

## ДИНАМИКА КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА

А.А.ВАСИЛЬЕВ, Д.С.ДРОЗДОВ, Г.В.МАЛКОВА, В.П.МЕЛЬНИКОВ, Н.Г.МОСКАЛЕНКО, П.Т.ОРЕХОВ, А.В.ПАВЛОВ,  
О.Е.ПОНОМАРЕВА, Н.Г.УКРАИНЦЕВА (ИКС СО РАН)

Проблема оценки состояния и прогноза эволюции мерзлых пород в условиях меняющегося климата стала одной из актуальных в науках о Земле и, в частности, в криологии. Вместе с тем в исследованиях различных ученых на сегодняшний день существует достаточная неопределенность в интерпретации данных моделирования и результатов прогноза ожидаемых климатических изменений, от которых тесно зависит познание эволюции криолитозоны в будущем.

Изучение изменений современного климата обычно проводят путем систематизации и анализа метеорологических данных. Первые метеостанции в России появились около 200-250 лет назад, сейчас это государственная система наблюдений. Потепление климата на севере России и в Северном полушарии в целом началось преимущественно во второй половине 1960-х - середине 1970-х годов. Изменения климата оценивают, сравнивая осредненную за десятилетие среднегодовую температуру воздуха с неким базовым периодом, принятым в климатологии. До недавнего времени период нормы считался с 1951 по 1980 г. В 2001 г. Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) был рекомендован новый базовый период (1961-1990 гг.) для характеристики климата.

Для периода новой нормы среднегодовой температуры воздуха (см. рис. 1) характерно некоторое увеличение температуры воздуха и закономерное перемещение соответствующих изолиний на север на расстояние от 10 до 50 км в Европейской части России и в Западной Сибири. Среднегодовая температура воздуха в период новой нормы изменяется на территории России от 0 °С у южных границ криолитозоны до -14 °С на побережье моря Лаптевых и до -16 °С в Верхоянском районе.

Скорость потепления обычно количественно характеризуется трендами изменения среднегодовой температуры воздуха (°С/год) за многолетний период. Наибольшая скорость потепления приходится на 80-е годы. В это время тенденции к потеплению климата и эволюции криолитозоны отмечались почти повсеместно, но проявлялись с разной интенсивностью. В частности, в арктических районах, где потепление климата наиболее опасно для жизнедеятельности человека, оно, к счастью, было выражено достаточно слабо. Повышение температуры воздуха в 1965-1995 гг на территории Севера России в целом составило 1,1-1,2 °С (в отдельных пунктах более 2 °С),

тогда как глобально-осредненной для всего земного шара температуры 0,5-0,6 °С. Во вторую половину 1990-х годов темпы потепления климата снизились, на Европейском Севере отмечена даже небольшая тенденция к понижению температуры воздуха, тогда как в районах криолитозоны с континентальным климатом (Центральная Якутия, Забайкалье, и др.) потепление продолжалось. Общая тенденция возрастания с 1960-х гг среднегодовых температур воздуха сохранилась и в начале XXI века локально в ряде мест (Усть-Цильма, Сыктывкар, Надым, Енисейск, Норильск, Тура, Вилуйск, Сеймчан, Бомнак), в других местах (Салехард, Воркута, Туруханск, Олекминск, Алдан) потепление замедлилось или явно приостановилось. Это наглядно иллюстрируют линии регрессии (тренды изменения климата), полученные в автоматизированном режиме статистического анализа данных об изменении среднегодовой температуры воздуха на некоторых опорных метеостанциях за 1965-1995, 1990-2005 и 1965-2007 гг. (рис. 1).

Информационной основой для оценки изменений состояния вечной мерзлоты являются данные мониторинга криолитозоны и метеорологических станций. Понятие «мониторинг криолитозоны» введено в начале 1990-х годов. Это - унифицированная система режимных наблюдений за состоянием геологической среды на территории многолетнего и сезонного промерзания земной коры, оценки, контроля и прогноза ее изменений под воздействием природно-климатических и техногенных факторов.

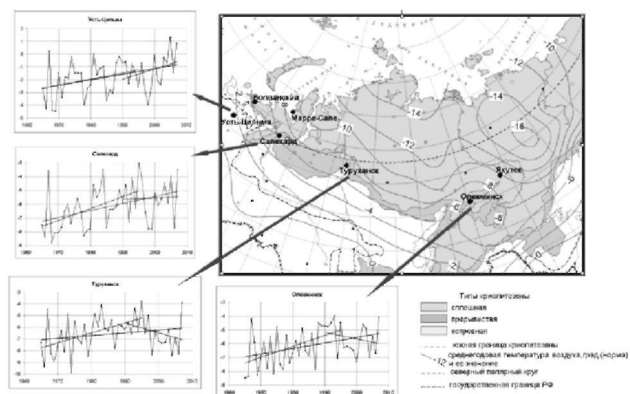


Рис. 1 Карта нормы среднегодовой температуры воздуха (среднее значение за 1961-1990 гг.) и изменчивость климата по отдельным метеопунктам.

Линиями на графиках показаны тренды изменения среднегодовой температуры воздуха за периоды 1965-1995, 1990-2005 и 1965-2007 гг.

В настоящее время из развитой в 1980-е годы системы мониторинга криолитозоны на Севере России, когда функционировало более 60 геокриологических стационаров, сохранилось примерно 1/5 часть наблюдательных объектов. Каждый из действующих стационаров по-своему уникален. На одних имеются относительно длинные ряды непрерывных геокриологических наблюдений (до 30 лет) (стационары Болванский, Воркутинский, Марре-Сале, Надым, Чабыда), на других (Якутск, Сырдах и др.) ряды наблюдений короче, но выполнено детальное изучение определяющих состояние вечной мерзлоты внешних параметров (снежный покров, водная толща, потоки солнечной радиации в атмосфере и др.).

В течение полевых сезонов 2008 г., в котором принимали участие многие сотрудники ИКЗ СО РАН, получены новые данные о динамике геокриологических условий для опорных стационаров на Севере России.

На стационаре Марре-Сале (Западный Ямал) прослеживается заметное повышение среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м за 1978-1995 гг., которое в различных ландшафтных условиях оценивается за рассматриваемый период в 0,1-1 °С. В 1996-2001 гг. в условиях значительной изменчивости климата произошло понижение среднегодовой температуры грунтов на 0,4-0,6 °С в различных ландшафтных условиях. С 2001 г. снова стала проявляться слабая тенденция к повышению температуры грунтов. Сезон 2007-2008 гг. характеризовался аномальным повышением температуры многолетнемерзлых пород (рис. 2).

По данным наблюдений на геокриологическом стационаре Болванский, расположенном в устье р. Печоры (Европейский Север), за период с 1983 по 2008 г. отмечается слабый тренд повышения среднегодовых температур ММП на глубине 10 м. В различных ландшафтных условиях он колеблется от 0,003 до 0,025 °С/год, в среднем для региона составляя 0,012 °С/год, при соответствующем тренде повышения температуры воздуха 0,078 °С/год. Наибольшие тренды изменения температуры ММП заметны в низкотемпературных условиях, характерных для вершин холмов и увалов на участках с тундровой растительностью. Для скважины 59 получены данные о динамике температур как ММП, так и пород деятельного слоя (СТС) (рис. 3).

Наметилась тенденция к повышению среднегодовых температур грунтов как деятельного слоя (температура СТС,  $t_s$ , так и ММП на глубине 10-12 м (температура ММП,  $T_c$ ). Амплитуда межгодовых колебаний  $t_s$  значительно больше  $T_c$ , но, тем не менее, обращает на себя внимание практически одинаковый тренд изменения температуры пород СТС и ММП. За весь период наблюдений он составляет 0,027 и 0,025 °С/год соответственно, что практически в три раза меньше тренда повышения температуры воздуха (с учетом аномально теплого 2007 г. он равен 0,078 °С/год). Это свидетельствует о замедленной реакции мерзлоты на изменения климата. Характерна относительная синхронность в многолетних изменениях

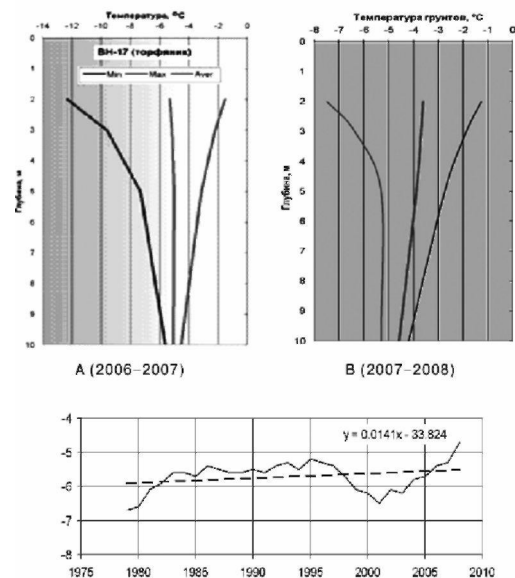


Рис. 2. Среднегодовая температура грунтов в скважине 17 (стационар Марре-Сале, п-ов Ямал, тундровая зона, торфяник). А - 2006-2007 гг., В - 2007-2008 гг., С - среднегодовая температура грунтов на глубине ЯТГО за последние 30 лет, линия тренда, уравнение регрессии. Примечание: при осреднении температур используется не календарный, а гидрологический год - с сентября по сентябрь

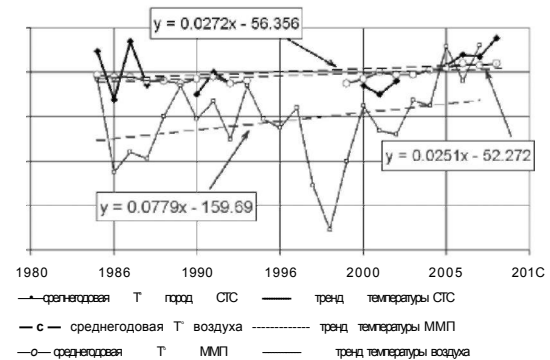


Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры воздуха, пород деятельного слоя и многолетнемерзлых пород в скважине 59 на стационаре Болванский, линии тренда и уравнения регрессии

температуры пород и воздуха: отчетливо прослеживаются периоды похолодания (с 1985 по 1990 гг.) и потепления (с 1990 по 1993 и с 2002 по 2008 гг.). В холодные годы среднегодовая температура на подошве СТС ( $t_s$ ) как правило, ниже среднегодовой температуры ММП ( $T_c$ ), а в периоды потепления - выше и опасно приближается к 0 °С. Если такие теплые годы будут повторяться, то возникает опасность отрыва кровли ММП и формирования несливающейся мерзлоты в данных ландшафтных условиях.

Изменение среднегодовой температуры грунтов в многолетнем цикле не всегда соответствует современному потеплению климата. В Центральной Якутии, несмотря на значительное потепление климата (тренд потепления 0,07-0,08 °С/год), повышение температуры мерзлых грунтов в 1980-2005 гг. выражено слабо, а на отдельных ландшафтах не выражено совсем. Так, по опубликованным данным Ю.Б.Скачкова, на режимной площадке,

расположенной в мелкодолинном типе местности, тренд изменений температуры грунтов за 1987–2005 г. практически отсутствует ( $0,0005\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ). На другой площадке стационара (склоновый тип местности) тренд изменений температуры грунтов за этот же период оказался также очень слабым ( $0,0093\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ). Это было обусловлено снижением высоты снежного покрова, которое началось с 1980-х гг. Аномально многоснежные зимы 2005–2007 гг. в Центральной Якутии привели к значительному изменению температуры грунтов в верхнем 10-метровом слое. На стационаре в Якутске за три последних года среднегодовая температура грунтов изменилась: на лугу на глубине 2 м - от  $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; на 5 м - от  $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 10 м - от  $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в лесу на глубине 2 м - от  $-4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на 5 м - от  $-3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 10 м - от  $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Настораживает, что столь значительное потепление ММП за такое короткое время встретилось впервые за 26-летнюю историю мониторинговых исследований. Дальнейшие наблюдения покажут, было ли это временное повышение или наметилась тенденция изменения устойчивого термического состояния верхних горизонтов криолитозоны, отмечавшегося прежде.

По данным метеостанции Надым, среднемноголетняя температура воздуха в данном регионе составляет  $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в период с 1966 по 1997 г. - имело место потепление климата, которое после 1997 г. прекратилось и сменилось некоторым похолоданием. С 2005 г. опять фиксируется повышение среднегодовых температур воздуха. Установлено (по данным режимных геокриологических наблюдений в скважинах на стационаре Надым), что за наблюдаемый период происходило повышение температуры ММП до середины 1990-х, а затем - понижение температур, с 2005–2008 гг. - вновь рост температур грунтов. Таким образом, изменения температур ММП не имеют выраженного тренда, носят колебательный характер, соответствующий климатическим изменениям.

В большинстве районов Севера, где отсутствует заметное техногенное воздействие на мерзлые грунты, прослеживается слабая тенденция к современному возрастанию глубины сезонного протаивания. Климатические изменения способствуют возрастанию глубины сезонного протаивания. В первую очередь, глубина сезонного протаивания определяется количеством тепла, поступившим в грунт за летний период (т.н. индекс протаивания). По данным стационара Марре-Сале, увеличение мощности сезонного талого слоя для территории стационара в целом за 26 лет оценивается примерно в 15 % для отдельных ландшафтов: осоково-гипнового болота и полого южного склона мелкобугристой тундры. На участках полигональной тундры с мощным мохово-лишайниковым покровом и участках со злаками и хвощом глубина протаивания увеличивается слабо. Эти отмеченные для Марре-Сале закономерности не всегда сохраняются в других регионах. На стационаре Болванский за 1984–2008 г. глубина сезонного протаивания

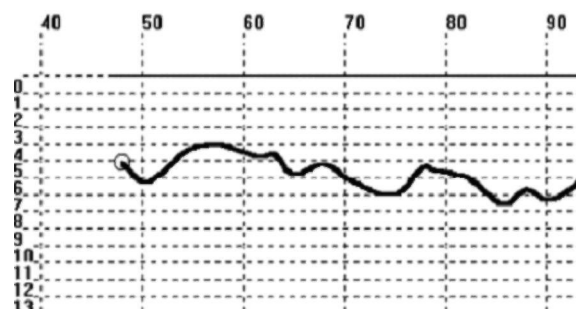


Рис. 4. Положение опущенной кровли мерзлоты в окрестностях скважин 5-1 на режимной площадке с лиственничным кустарничково-лишайниковым редколесьем (Уренгойское месторождение, Западная Сибирь)

вания на тундровых урочищах увеличилась на 10 %. На стационаре Чабыда глубина протаивания за 1980–2006 г. незначительно сократилась (на 3–5 %), несмотря на сильное потепление климата.

В различных геосистемах криолитозоны Западной Сибири выявлены области деградации многолетнемерзлых пород (ММП) с поверхности и факторы формирования зон с опущенной кровлей мерзлоты и выявлен диапазон изменения температур грунтов за последние 30 лет.

В лесотундре, обращаясь к ландшафтному фактору геокриологической обстановки, мы увидим следующие закономерности. В 1975–1980 гг. предтундровые лиственничные редколесья и редины встречались на междуречье левых притоков Пура - рек Аркатаб-яха и Таб-яха. К северу от р. Таб-яха междуречные поверхности были полностью безлесны. Фрагменты низкорослых лиственничных редин (open forest) встречались только на низких (1–2) речных террасах. Это подтверждалось и наземными исследованиями (крупномасштабная инженерно-геокриологическая съемка методом ключевых участков), и дешифрированием аэрофотоснимков 1960–1970 гг. Полевые наблюдения 2007–2008 гг. показали массовое продвижение на север по междуречью р. Таб-яха и Хадуттэ одиноко стоящих лиственниц высотой 1,5–3 м - вплоть до широтного отрезка долины р. Паровы-Хадуттэ. Внешний вид лиственниц свидетельствует о достаточно комфортных условиях их произрастания.

К северу от р. Хадуттэ, уже в подзоне южных тундр, на междуречьях в 1999 г. также был отмечен 2–3-летний подрост лиственниц высотой 10–20 см, однако в последующие холодные малоснежные зимы лиственницы вымерзли и в настоящее время больше не возобновляются. Лиственничные редины и даже лес, а также полустланиковые заросли высокоствольной ольхи встречаются на заносимых снегом крутых склонах (преимущественно южных румбов) в долинах рек и наиболее крупных ручьев. Тем не менее есть основания говорить, что северная граница предтундровых редколесий сместилась за 30-летний период на 10–30 км к северу.

Ландшафтные изменения, безусловно, коррелированы с наблюдаемым потеплением климата, однако лучше прослеживается связь ландшафтных

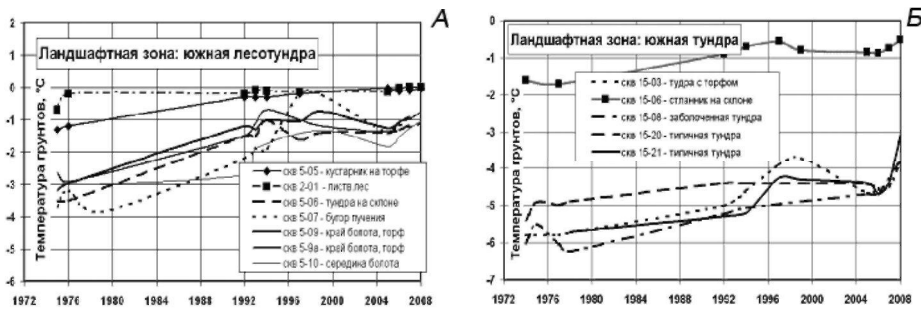


Рис. 5. Изменение температур грунтов в южной лесотундре (А) и южной тундре (Б) на глубине ~10 м (Западная Сибирь, Уренгойское НГКМ)

изменений с динамикой геокриологических характеристик. Изменения среднегодовой температуры грунтов весьма сглажены по сравнению с изменениями во внешних средах (например, с изменениями температуры воздуха). Это дает возможность проследить общие геокриологические тенденции не затухающие флуктуациями и экстремумами. На Уренгойском НГКМ температура мерзлоты увеличилась приблизительно на 1 °С в период 1975-1993 гг. В южной лесотундре подъем температуры ММП меняется от 0,6 до 2,1 °С. В северной лесотундре и южной тундре подъем несколько меньше - 0,1...1,6 °С. Режимные наблюдения 1994-1997 гг. показали замедление роста температуры. Следующие 5 лет подтвердили это, что позволило предположить смену цикла потепления циклом понижения температур. Однако последние годы (2005-2008) указывают на новый подъем температур, который, тем не менее, не достиг в среднем максимума конца 1990-х. Соответствующие закономерности представлены на рис. 5.

В лесных и болотных урочищах динамика температур и кровли ММП имеют разный характер. На заболоченных участках тундр и на торфяниках, на различных формах пучения наблюдается рост температуры грунтов при относительно устойчивом положении кровли мерзлоты на глубине сезонно-талого слоя (СТС) - до ~2 м, в отличие от лесных урочищ и кустарников, где отмечено ее опускание. Скважинная термометрия фиксирует это опускание со значительной погрешностью, т.к. не показывает физическое мерзлое состояние пород. С помощью микросейсмических работ установлена граница мерзлых (содержащих лед) пород на глубине 3-7 м (рис. 4).

На тундровых урочищах и в болотах в середине 1990-х годов потепление мерзлоты сменилось похолоданием. Наиболее значительное охлаждение грунтов фиксируется на различных торфяных и минеральных буграх.

Установлено, что в результате потепления климата в различных геосистемах происходит выравнивание среднегодовой температуры грунта: изменение температуры ММП ( $T$  °С) на участках деградации мерзлоты составляет около 0...0,1 °С, и  $\Delta T = 1...1,4$  °С для мест, где мерзлота сохранилась и имеет средне-

годовую температуру ММП от 2 до 3 °С. Аналогичные процессы идут и севернее - в южнотундровой ландшафтной подзоне, но происходят они при более низких температурах в ММП 4... 5 °С.

Период 2005-2008 гг характеризуется общей для севера Западной Сибири тенденцией - незначительным увеличением температуры грунтов, которые приближаются к максимуму температур конца 1990-х. Генераль-

ный тренд среднегодовых температур горных пород в регионе окончательно не установился.

Взаимодействие экосистем и многолетнемерзлых пород отличается в разных природных зонах. В северной тайге и лесотундре, где растительный покров разнообразен и мозаичен и велики запасы надземной фитомассы, растительность (даже в одних и тех же климатических условиях) может оказывать существенное влияние на температуру, льдистость и особенности распространения многолетнемерзлых пород (обуславливает чередование талых и мерзлых участков либо участков с пониженной кровлей ММП и поверхностным их залеганием). В тундре формирование мерзлых толщ происходит в основном под воздействием климатических факторов. Роль почвенно-растительного покрова существенно снижается, в зависимости от запасов фитомассы и мощности органического горизонта почв в кровле ММП может формироваться льдистый «переходный слой».

Детальные стационарные наблюдения за состоянием природных экосистем проводились в северной тайге (Надым), в лесотундре на территории Уренгойского газоконденсатного месторождения, на левобережье р. Пур, по субмеридиональному трансекту г. Новый Уренгой - р. Нгарка-Есета-Яха - р. Хадуттэ. Наиболее яркими индикаторами климатического потепления явились тесно связанные друг с другом геокриологический и ландшафтный факторы геоэкологической обстановки. Геокриологический фактор - это заметное повышение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород или опускание кровли мерзлоты при температуре грунтов близкой к 0 °С. Причем на фоне положительного тренда наблюдаются заметные отклонения, соответствующие похолоданиям.

Полевые работы ИКЗ СО РАН 2008 г. на геокриологических стационарах и площадках показали необходимость дальнейшего мониторинга различных параметров криолитозоны: наблюдения за криогенными процессами, температурным режимом ММП и СТС, деградацией или аградацией мерзлых толщ, динамикой экосистем. Продление рядов наблюдений позволит осуществлять более достоверные прогнозы развития криолитозоны в условиях меняющегося климата.