

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 551.581<<19/20>>

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КРИОЛИТОЗОНЫ И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА¹

© 2011 г. А. В. Дзюба, И. С. Зекцер

Институт водных проблем Российской академии наук

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 10.02.2009 г.

Приведены результаты статистического анализа и оценки многолетних изменений температуры приземного воздуха, газового состава атмосферы, глубины сезонного протаивания, температуры и площади распространения многолетнемерзлых пород в приполярной зоне северного полушария. Получены предварительные оценки возможного влияния наблюдаемых изменений теплофизических параметров многолетнемерзлых пород на альбедо подстилающей поверхности, влагосодержание атмосферы, концентрацию углекислого газа и метана в атмосфере. Сделана оценка плотности антропогенного и природного потоков метана от подстилающей поверхности в атмосферу. Описаны возможные механизмы формирования планетарных максимумов концентраций углекислого газа и метана в атмосфере приполярных широт в связи с взаимодействием метанового цикла и процессов оттаивания многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: подземные воды, многолетнемерзлые породы, парниковые газы, метан, изменения климата, криолитозона.

Фундаментальная естественнонаучная проблема современных и возможных в ближайшие десятилетия изменений климата, а также реакции на эти изменения геологической среды становится все более актуальной в связи с обостряющейся необходимостью выработки экологических, экономических и политических стратегий. К настоящему времени нет единого мнения о причинах и механизме современных климатических изменений и, как следствие, об ожидаемых климатических эффектах. Современный уровень научного понимания интерактивных закономерностей физико-химических процессов внутри климатической системы с участием подземных вод криолитозоны существенно ниже по сравнению с другими компонентами гидросферы. Предварительные представления имеются лишь о возможном влиянии изменений климата на режим подземных вод в зоне активного водообмена в отдельных регионах [9]. Также, нет четкого понимания масштабов и интенсивности газообменных процессов почвенных и подземных вод с атмосферой при их фазовом переходе, что характерно для криолитозоны. Возможные механизмы и масштабы обратных связей между криолитозоной и современной динамикой климата изучены недостаточно. В четвертом Докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [32] в

числе других приводится следующая ключевая неопределенность — порядок величины современных и будущих обратных связей по углеродному циклу все еще плохо определен. Согласно словарю терминов МГЭИК [32], если результат какого-либо первоначального процесса, происходящего в климатической системе, вызывает изменения во втором процессе, который, в свою очередь, воздействует на первоначальный процесс, то такой механизм взаимодействия между процессами называется климатической обратной связью. Положительная обратная связь усиливает первоначальный процесс, а отрицательная ослабляет его.

Положительная обратная связь между потеплением климата и углеродным циклом воспроизводится современными численными моделями климата. Однако до последнего времени в блоке углеродного цикла учитывался только обмен углекислым газом CO_2 . Большинство климатических моделей не имеют блока метанового цикла как подцикла углеродного цикла. Лишь последние модификации климатической модели Института физики атмосферы (ИФА) РАН наряду с блоком термогидрофизики почвы учитывают отклик на изменения климата вечной мерзлоты и эмиссии метана CH_4 болотными экосистемами [8, 13].

Цель данной работы — описание механизмов формирования и оценка положительных обратных связей между климатом субполярной зоны Северного полушария и эмиссией метана из криолитозоны. На основе имеющихся к настоящему времени

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (государственный контракт 02.740.11.0336) и РФФИ (проект 10-05-00245-а).

эмпирических данных и обобщения ранее полученных результатов, проведена ревизия динамики современного климата приполярной зоны, основных параметров криолитозоны, а также содержания CH_4 и CO_2 в атмосфере. Сделаны оценки плотности антропогенного и природного потоков CH_4 от подстилающей поверхности в атмосферу в различных широтных зонах и средних глобальных значений плотности потока.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА СЕВЕРНОЙ ПРИПОЛЯРНОЙ ЗОНЫ И СОСТОЯНИЯ КРИОЛИТОСФЕРЫ

Несмотря на противоречивость авторитетных мнений по поводу оценки динамики современного климата, обобщение всех имеющихся к настоящему времени данных наблюдений и результатов различных методик описания климатической изменчивости, проведенное Рабочей группой 1 МГЭИК в 2007 г. [32], позволяет считать надежными выводами в числе других следующие положения. Во-первых, потепление на протяжении последних 50 лет — неоспоримый факт, что видно из наблюдений за приземной температурой воздуха и у поверхности суши, и у поверхности океана. Во-вторых, палеоклиматическая информация свидетельствует о том, что интенсивность потепления за последнее столетие максимальна не менее чем за прошедшие 1300 лет. Лишь ~125 тыс. лет назад в полярных районах было значительно теплее, чем сейчас, в течение длительного периода. В-третьих, среднегодовые температуры в северном полушарии во второй половине XX в. были выше, чем в любой другой 50-летний период за последние 500 лет [27]. Авторами статьи рассмотрены среднегодовые и среднемесячные изменения приземной температуры воздуха за 1970–2005 гг. в приполярной зоне северного полушария (65–75° с.ш.) и в зоне умеренных широт (55–65° с.ш.). В качестве исходной информации использовались сеточные значения среднемесячных аномалий (относительно базового периода 1960–1990 гг.) температуры по массиву [33], имеющиеся на сайтах [46, 47]. Статистический анализ среднегодовых изменений приземной температуры воздуха (рис. 1) показывает, что с 1970 по 2005 г. статистически значимый на 95%-ном уровне линейный тренд температуры составил в приполярной зоне северного полушария (65–75° с.ш.) и в зоне умеренных широт (55–65° с.ш.). В качестве исходной информации использовались сеточные значения среднемесячных аномалий (относительно базового периода 1960–1990 гг.) температуры по массиву [33], имеющиеся на сайтах [46, 47]. Статистический анализ среднегодовых изменений приземной температуры воздуха (рис. 1) показывает, что с 1970 по 2005 г. статистически значимый на 95%-ном уровне линейный тренд температуры составил в приполярной зоне северного полушария (65–75° с.ш.) и в зоне умеренных широт (55–65° с.ш.).

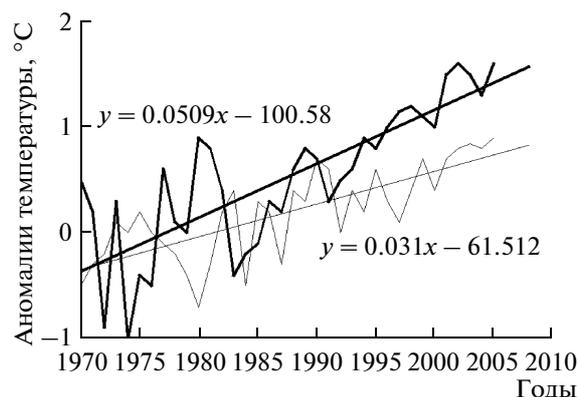


Рис. 1. Изменение среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха в приполярной зоне (жирная кривая) и в зоне умеренных широт (тонкая). Прямые линии — линейные тренды. Здесь и на рис. 4 численные значения — уравнения линейных трендов.

духа в полярных и умеренных широтах по различным наборам сеточных данных, полученных в [11]. Согласно [6, 32] в целом для северного полушария линейный тренд среднегодовых температур за этот период составил $0.6^\circ\text{C}/35$ лет. Таким образом, в последние 35 лет потепление в северных широтах во все сезоны года происходит значительно интенсивнее, чем в других широтных зонах.

Согласно выводам экспертов МГЭИК [32] увеличение годового количества атмосферных осадков в арктической зоне с 1979 по 2005 г. составило до 20%, а по данным Института глобального климата и экологии в полярной зоне России положительный линейный тренд осадков с 1976 по 2005 г. составил весной 0.6 , а осенью 1.48 см/10 лет [48].

Вопрос о соотношении роли естественных процессов и антропогенных воздействий в динамике газового состава атмосферы и, как следствие, в современных изменениях климата к настоящему времени окончательно не решен. Однако рост концентрации термодинамически активных газов в атмосфере — реальность, а интенсификация парникового эффекта и соответствующего роста температуры приземного воздуха вследствие этого — физическая закономерность. Изменения концентрации основных парниковых газов в атмосфере приполярной зоны северного полушария, полученные авторами по данным Всемирной метеорологической организации [40, 41], представлены на рис. 2. Межгодовые изменения концентрации CO_2 и CH_4 в северной приполярной зоне в 1986–2005 гг. аппроксимируются линейными трендами ($y = 1.65x - 2921.6$) и ($y = 5.30x - 8763.2$) с достоверностями 99 и 92% соответственно. Рост концентрации CO_2 в атмосфере Арктики за этот период составил ~ 33 млн $^{-1}$, или 9%, а CH_4 120 млрд $^{-1}$, или 7%. Считается, что атмосфера Земли достаточно хорошо перемешивается за время порядка 1–2 мес. В связи с этим представляет инте-

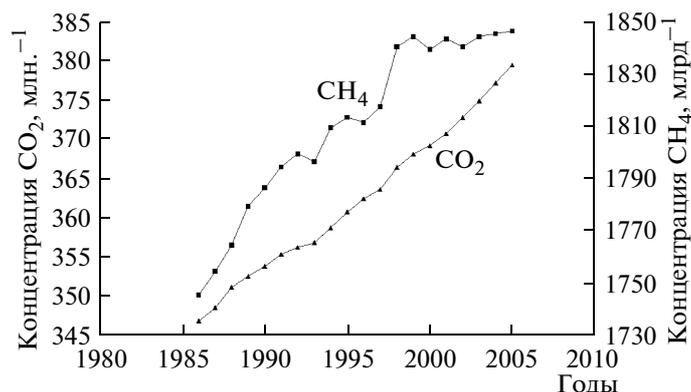


Рис. 2. Изменения концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере приполярных широт.

рес полученное по данным [40, 41] широтное распределение среднегодового содержания CO₂ и CH₄ в пограничном слое атмосферы. Из рис. 3 очевидно, что максимум концентрации CO₂ и CH₄ наблюдается не в умеренных широтах, где антропогенное воздействие на углеродный цикл максимально, а в зоне 65–75° с.ш., где сжигается <5% ископаемого топлива, не возделываются рисовые поля и в целом антропогенная нагрузка минимальна [10]. Так, в 2002 г. в широтной зоне 65–75° с.ш. содержание CO₂ составляло ~376 млн.⁻¹, а CH₄ 1856 млрд.⁻¹, что превышает концентрации этих парниковых газов в умеренных широтах на ~2 млн.⁻¹ и 50 млрд.⁻¹ соответственно. Заметим, что превышение фонового содержания CO₂ в атмосфере северных регионов по сравнению с умеренными широтами сравнимо по величине с его годовым приростом, а CH₄ — с ростом его концентрации примерно за 10 лет.

Одна из главных особенностей приполярной широтной зоны северного полушария — широкое распространение мощного слоя многолетнемерзлых пород на континентах и на шельфе Арктических морей. В настоящее время общепринята международная классификация криолитозоны по признаку сплошности распространения. Различают сплошную мерзлоту, когда она подстилает >80% площади; прерывистую, когда она занимает от 50 до 70% площади и островную, когда ее доля составляет <50%. Общая площадь распространения материковой многолетней мерзлоты в северном полушарии в настоящее время составляет ~26 млн. км². Доля сплошной мерзлоты составляет ~53 общей площади, прерывистой 27, островной ~20% [1–4]. В классической геокриологии процессы трансформации криолитозоны рассматриваются в геологических масштабах времени. Мнения относительно динамики криолитозоны в связи с современными климатическими изменениями противоречивы.

Как известно, основные характеристики криолитозоны — площадь ее распространения, глубина залегания, температура и глубина сезонного протаивания.

Необходимо отметить, что массив эмпирических данных о многолетних изменениях основных характеристик криолитозоны в настоящее время находится на стадии формирования. Только в последние годы созданы международные программы мониторинга динамики криолитозоны [17, 19, 24, 25, 35], в которых уточняется единая методика измерения.

Авторами выполнены расчеты многолетних изменений средней глубины оттаивания многолетнемерзлых пород в конце периода таяния по данным организованной в 1990 г. Международной программы по циркумполярному мониторингу активного слоя многолетней мерзлоты за 1956–2008 гг. На рис. 4 представлен многолетний ход аномалий глубины оттаивания, полученных после вычитания из годового значения среднего за весь период значения соответствующей станции и осредненных по всем станциям. Значения интегральной кривой до 1990 г. получены по станциям Российской зоны Арктики (31 станция), а после 1990 г. анализировались данные более 140 стандартных наблюдательных площадок и пунктов наблюдений, расположенных в России (север европейской части, Западная, Центральная, Северо-Восточная Сибирь, Чукотка, Камчатка), США (Аляска), Канаде, Дании (Гренландия), Швеции, Норвегии, Швейцарии, Китае, Монголии. Результаты анализа показали, что в последние 35 лет наблюдается статистически значимое увеличение толщины активного слоя (глубины сезонного протаивания) многолетнемерзлых пород в различных районах криолитозоны северного полушария, составившее в среднем ~1 см в год. Глубина протаивания возростала в зонах распространения многолетней мерзлоты различной степени сплошности при разных растительных покровах, различных почвах и разной влажности грунтов. При этом в отдельных районах приполярной зоны, например на европейском севере России (г. Воркута) и восточном побережье Гренландии (г. Закенберг), в 1990–2000 гг. наблюдался гораздо более быстрый рост толщины слоя протаивания,

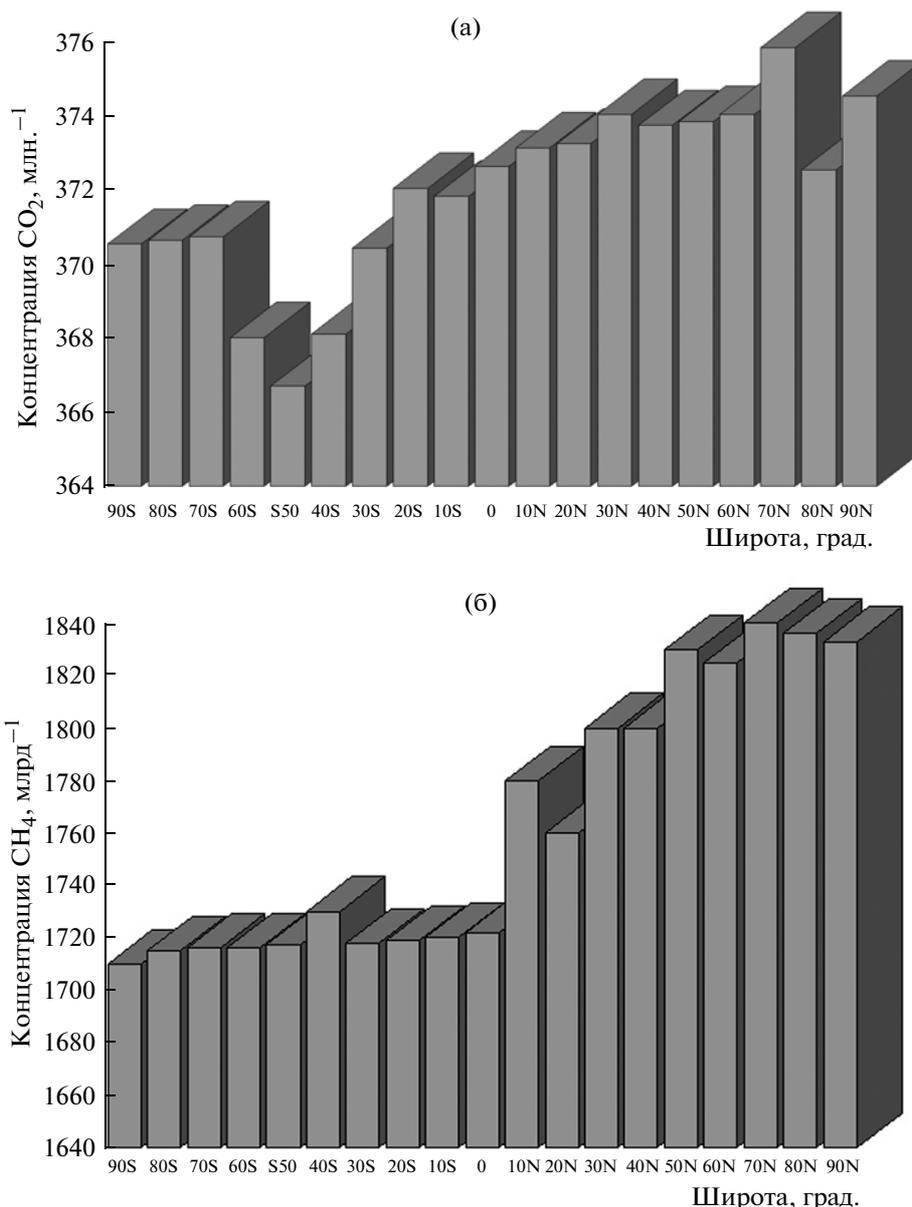


Рис. 3. Изменение по широте среднегодовой (2002 г.) концентрации CO₂ (а) и CH₄ (б) в атмосфере.

равный соответственно 2.1 и 1.7 см/год. Сделанные оценки не противоречат ранее полученным результатам [18, 29, 38, 42].

Информация о многолетних изменениях температуры мерзлотных грунтов на разных глубинах в различных частях криолитозоны по данным GTN-P [49] представлены на рис. 5. Данные наблюдений показывают, что с начала 1970-х гг. до 2000 г. температура многолетнемерзлых грунтов повышалась в Западной Сибири (п-ов Ямал, стационар Марре-Сале) со скоростью $\sim 0.06^\circ\text{C}/\text{год}$ на глубине 10 м, в канадской Арктике в районе долины Маккензи – $0.05^\circ\text{C}/\text{год}$ на глубине 28 м, на Аляске (м. Барроу) – $0.03^\circ\text{C}/\text{год}$ на глубине 15 м. По данным [34, 45, 43] в

северной Канаде рост температуры поверхности почвы за последние 100 лет составляет 2°C . Многолетний ход температуры поверхности почвы и мерзлых грунтов в северных районах хорошо согласуется с ходом приземной температуры воздуха [34, 36].

Изменения площади, занимаемой криолитозонной в целом и различными по степени сплошности ее частями, изучаются на основе двух подходов. Первый – географический – основывается на палеоклиматических аналогиях и соответствующем распространении многолетнемерзлых пород [5, 16]. Второй – на численном моделировании термического режима почвы, основанного на совместном решении уравнений теплопроводности и теплового

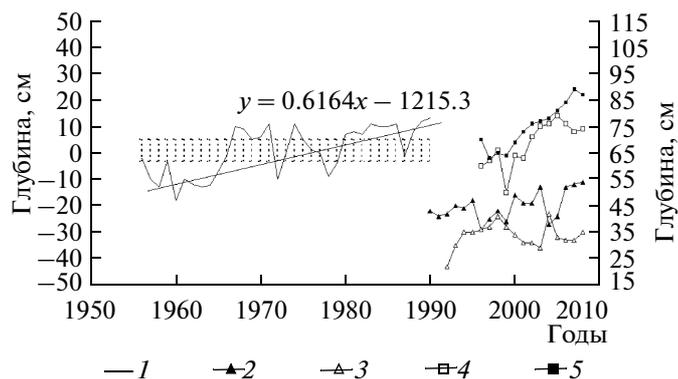


Рис. 4. Изменения глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых пород. Интегральная кривая 1; Аляска (Бети Пинго) 2, (м. Барроу) 3; Гренландия (г. Закенберг) 4; Россия (г. Воркута) 5. Здесь и на рис. 5 прямые линии — линейные тренды. Заштрихованная область — среднеквадратичные отклонения.

баланса [1–3]. Во многих моделях общей циркуляции атмосферы и океана параметры криолитозоны представлены упрощенно. Такие модели не дают возможность получить динамику физических характеристик криолитозоны. Вместе с тем, результаты ряда исследований, в частности — использование климатической модели промежуточной сложности ИФА РАН, свидетельствуют о реальности изменения площади криолитозоны в масштабах времени порядка десятилетий в условиях современного потепления [7, 8, 12–14]. Модельные оценки изменения площади многолетней мерзлоты в XX в. в целом соответствуют эмпирическим данным. По результатам [8, 14] площадь распространения континентальной сплошной и прерывистой мерзлоты в северном полушарии имеет тесную линейную зависимость от соответствующих индексов суровости. По мультимодельным оценкам площадь сплошной мерзлоты с 1970 по 2000 г. сократилась примерно с 13.8 до 11.7 млн. км².

Таким образом, можно обоснованно полагать, что в последние десятилетия в приполярной зоне северного полушария наблюдаются направленные изменения концентрации парниковых газов в атмосфере и температуры приземного воздуха, превышающие таковые в других широтных зонах. В то же время, накопленные к настоящему времени эмпирические данные о динамике основных характеристик криолитозоны свидетельствуют об их значимых направленных изменениях, по крайней мере, в течение трех последних десятилетий.

КРИОЛИТОЭФФЕКТ

Оценка отклика эмиссии CH₄ болотными экосистемами на изменения климата проведена в работах [8, 14, 27, 44]. Согласно [8, 14] в 1961–1990 гг. глобальный поток CH₄ болотными системами со-

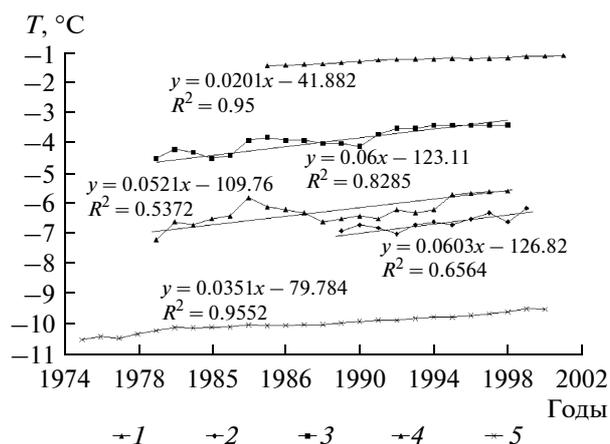


Рис. 5. Изменения температуры мерзлых пород в различных районах криолитозоны: центральная (глубина 15 м) 1 и северная (28 м) 2 части долины Макензи; западный Ямал, днище болота (10 м) 3, тундра, мох (10 м) 4; Аляска, м. Барроу (15 м) 5. В скобках — глубина, на которой измерялась температура. Численные значения — уравнения линейных трендов и их достоверность.

ставил 133–139 млн. т/год. Тропические болота дают, ~100 млн. т/год, а болота субполярных (севернее 50° с.ш.) регионов — 23–28 млн. т/год. В модели ИФА РАН учет изменений в многолетней мерзлоте и процессов в болотных экосистемах дает лишь незначительное увеличение прироста концентрации CH₄ в атмосфере, что приводит к небольшому дополнительному парниковому эффекту и дополнительному потеплению (глобально ~0.05°K). Результаты расчетов эмиссии CH₄ болотами приарктической зоны по модели ИФА РАН согласуются с оценками [27], но дают величину <51 млн. т/год [44].

Арктические почвы и верхний слой многолетней мерзлоты содержат ~455 Гт углерода, что составляет ~14% всего почвенного углерода на планете и ~60% углерода, содержащегося в современной атмосфере [10, 30, 31]. В зависимости от условий аэрации почвы могут выделять углерод в виде CO₂ или CH₄. По некоторым оценкам только в верхнем слое многолетней мерзлоты присутствует не менее 30% углерода, который содержится в почве во всем мире. Круглогодичные исследования, проводимые в течение последних 20 лет на Северо-Восточной научной станции Дальневосточного отделения РАН в низовьях р. Колымы, на побережье моря Лаптевых (Полярная геокосмофизическая обсерватория в Тикси Центра коллективного пользования Российского фонда фундаментальных исследований), а также на Аляске (м. Барроу), показали, что наряду с почвенной респирацией и донными отложениями болот значимый источник CO₂ и CH₄ в атмосферу приполярных регионов — озера и подозерные талики. Озера занимают до 50–70% территории прибрежной тундры. Мерзлота, оттаивающая под озе-

рами (подозерные талики) – важнейший региональный источник CH_4 в атмосферу. Образованию новых и увеличению площади имеющихся озер, росту подозерных и подрусловых таликов сопутствуют процесс постепенного оттаивания многолетнемерзлых пород на дне и по берегам и их последующее проваливание. Органические вещества из растаявших пород опускаются на дно озера. Попав в бескислородную среду, органические вещества перерабатываются анаэробными бактериями-броуидильщиками и метаногенными архебактериями, выделяющими CH_4 . Большинство озер северной Сибири характеризуется тем, что их дно и берега образует так называемая едома – вечная мерзлота плейстоценового возраста, насыщенная органикой (до 2%). Едома обеспечивает мощный поток CH_4 в атмосферу в виде пузырей, неравномерно распределенных по поверхности озер. Осенью метановые пузыри вмержают в лед. Поэтому эмиссия CH_4 и CO_2 из арктических озер наиболее интенсивна при вскрытии льда весной. Однако в более мягких климатических условиях субарктической тундры наблюдаются незамерзающие отверстия во льду (грифоны), через которые из глубоких горизонтов сезоннотальных слоев мерзлоты поток CH_4 и CO_2 в атмосферу зимой не прекращается. Через каждое из таких отверстий по оценке [22, 23] в атмосферу выбрасывается до 30 л CH_4 в сутки. При определенных синоптических условиях (пониженное атмосферное давление) поток CH_4 из донных отложений озер в зимнее время составляет величину $\sim 10^3 \text{ см}^3$ за сутки с 1 м^2 [23]. Подозерные талики, глубина и площадь которых в последнее время возрастают [33], в течение всего года – существенный источник CH_4 в атмосферу. Оцененное по специально разработанной методике [21, 22] примерное количество CH_4 , поступающего в атмосферу из талых озер северной Сибири, в настоящее время составляет 3,8 Мт. Это более чем в два раза превышает объем CH_4 , выделяемого в этом регионе болотами (1,7 Мт CH_4 в год [10]) и составляет $>2\%$ глобального природного потока CH_4 . По данным [22] годовой поток CH_4 из озер северной Сибири в 1974 г. составлял 2,4 Мт. За 26 лет (с 1974 по 2000 г.) эмиссия CH_4 вследствие описанного процесса возросла на 58%. Результаты исследований динамики потоков CH_4 и CO_2 на Аляске и на севере Канады [30, 31] также свидетельствуют о росте эмиссии этих парниковых газов из почвы и донных отложений озер и болот. Экстраполяция приведенных оценок эмиссии CH_4 из талых озер и подозерных таликов северной Сибири на приполярную территорию Аляски и Канады дает величину $\sim 20 \text{ Мт } \text{CH}_4/\text{год}$ дополнительно к эмиссии болотными экосистемами.

Количество органики в криолитозоне чрезвычайно велико. По оценкам [22, 37] расконсервация $<0.1\%$ количества органического углерода, захороненного в верхнем 100-м слое мерзлоты, может дать $\sim 10000 \text{ Гт}$ углерода в форме CH_4 . Обрушение в мор-

ские воды значительных участков арктических побережий доставляет на арктический шельф количество органического вещества, соизмеримое с транспортом органического вещества сибирскими реками, и представляет собой дополнительный источник CH_4 в атмосферу приполярных регионов.

Образование CH_4 происходит в бескислородном слое донных отложений. Выше – в зоне, где имеется кислород – наблюдается его частичное окисление с выделением CO_2 . Оставшийся CH_4 поступает в атмосферу и, в отличие от CO_2 , практически не возвращается в водную среду, т.к. растворимость CH_4 в воде в ~ 40 раз меньше, чем растворимость CO_2 . Парниковый эффект метана \sim в 21 раз превышает парниковый эффект от CO_2 , хотя его концентрация в атмосфере в ~ 200 раз меньше концентрации CO_2 .

В таблице приведены оценки глобальных и региональных (по широтным зонам) потоков и плотностей потоков CH_4 от подстилающей поверхности в атмосферу. Большинство авторов сходятся в оценке глобальной эмиссии CH_4 в атмосферу в $610 \pm 50 \text{ Мт}/\text{год}$ [8, 10, 14, 32]. Примерно 74% Мт $\text{CH}_4/\text{год}$ имеют антропогенное происхождение [10, 20]. Основные антропогенные источники CH_4 – его выбросы при добыче и транспортировке нефти, природного газа и каменного угля (подземная вентиляция шахт), рисоводство, продукты жизнедеятельности животных, сжигание биомассы, свалки. Основные природные источники CH_4 – наземные и подземные водные экосистемы, почвы. Согласно [10, 20] время жизни CH_4 в атмосфере составляет ~ 12 лет. Более 80% CH_4 изымается из атмосферы в результате его окисления в тропосфере до CO_2 , еще по $\sim 5\%$ изымается вследствие микробиологических процессов в почве и его окисления в стратосфере. Оставшиеся 5–10% CH_4 (на современном этапе 30–40 Мт $\text{CH}_4/\text{год}$), очевидно, накапливаются в атмосфере. Заметим, что накопление в атмосфере $\sim 2.8 \text{ Мт } \text{CH}_4$ соответствует росту его концентрации на $\sim 1 \text{ млрд}^{-1}$ [28].

Как указывалось выше, в северных приполярных широтах антропогенные потоки CH_4 незначительны ($<5\%$) [10]. Эмиссия CH_4 северными болотами по данным [8, 14, 44] составляет от 23 до 51 Мт $\text{CH}_4/\text{год}$. Экстраполяция оценок эмиссии CH_4 вследствие прогрессирующего оттаивания многолетнемерзлых пород по берегам и на дне озер и подозерных таликов северной Сибири на Аляску и Канаду дает величину от 20 до 30 Мт $\text{CH}_4/\text{год}$. Таким образом, суммарная природная эмиссия CH_4 в условиях современного потепления в начале XXI в. в приполярной зоне составляет величину 60–80 Мт/год. Это значительно меньше глобальных антропогенных выбросов CH_4 и его природных выбросов в тропических и субтропических районах (таблица). Вместе с тем в формировании глобального поля содержания CH_4 в атмосфере определяющую роль играют региональные различия интен-

Характеристики интегральной и региональной эмиссии и плотности потока CH_4 в атмосферу (не приведены данные для широтной зоны южнее 30° ю.ш. ввиду незначительности потока и плотности потока CH_4 : суммарная эмиссия составляет ~ 55 Мт/год, плотность суммарного потока ~ 0.4 г/м² год)

Параметр	Земля в целом	Северная приполярная зона $60-75^\circ$ с.ш.	Зона умеренных и субтропических широт $30-60^\circ$ с.ш.	Внутритропическая зона 30° с.ш.— 30° ю.ш.
Площадь, 10^6 км ²	510.2	25.5	93.4	255.1
Антропогенная эмиссия, 10^6 т/год*	450	5	125	280
Плотность антропогенного потока, г/м ² год	0.74	0.20	1.34	1.10
Природная эмиссия, 10^6 т/год	160*	60	5**	90**
Плотность природного потока, г/м ² год	0.31	2.35	0.05	0.35
Суммарная эмиссия, 10^6 т/год	610	65	170	330
Плотность суммарного потока, г/м ² год	1.20	2.55	1.82	1.30

* — по данным [17, 27];

** — по данным [25] с учетом результатов [8, 13, 17, 40].

сивности эмиссии. Для оценки интенсивности эмиссии CH_4 в атмосферу были рассчитаны значения суммарной плотности потока $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год, а также плотности потока антропогенного и природного происхождения для различных широтных зон (таблица). Результаты расчетов показывают, что осредненная глобально суммарная плотность потока CH_4 в атмосферу составляет величину ~ 1.2 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год. Глобальная антропогенная составляющая эмиссии CH_4 более чем в 2 раза превышает природную. Вклад природных экосистем в глобальную эмиссию CH_4 составляет $\sim 30\%$. Плотность глобального потока CH_4 из природных источников равна 0.31 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год, из антропогенных — 0.74 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год. В зоне умеренных и субтропических широт северного полушария и во внутритропической зоне различия в интенсивности эмиссии CH_4 между антропогенными и природными источниками еще более существенна. Плотность потока CH_4 антропогенного происхождения максимальна в зоне умеренных и субтропических широт (1.34 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год). Плотность суммарного потока CH_4 в зоне умеренных и субтропических широт по оценкам авторов составляет величину ~ 1.8 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год, а в тропической зоне 1.3 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год. Плотность антропогенно обусловленной эмиссии CH_4 в северной широтной зоне незначителен (~ 0.20 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год) (таблица). Природная составляющая в северных приполярных широтах в зоне максимального распространения многолетней мерзлоты генерирует эмиссию CH_4 , оцениваемую в ~ 2.35 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год. Таким образом, в северной приполярной зоне в современных условиях потепления климата наблюдается планетарный максимум плотности суммарного потока CH_4 в атмосферу — 2.55 г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ год. Согласно этим оценкам наблюдаемое прогрессирующее оттаивание

многолетнемерзлых пород — основная причина повышенного фона основных парниковых газов (CH_4 и CO_2) в атмосфере приарктических районов, а парниковый криолитоэффект — один из главных механизмов, обуславливающих наибольшие по сравнению с другими регионами изменения климата в Субарктике.

Озера в приполярной широтной зоне северного полушария занимают $>30\%$ поверхности суши. В районах Арктического побережья поверхность озер занимает в среднем $\sim 50\%$ территории (в Северной Америке $50-80\%$). Анализ массива космических снимков, проведенный исследователями из Калифорнийского университета, Государственного университета Нью-Йорка, Колледжа экологии и лесного хозяйства в Сиракузах и Университета Аляски в Фэрбэнксе [39], показал, что только на севере Западной Сибири с 1983 по 1998 г. количество талых озер возросло с 1148 до 1197, или на $\sim 6\%$, а площадь поверхности озер возросла на $\sim 14\%$. Последние исследования динамики морских берегов и шельфовой мерзлоты в Арктике [37] показывают, что на арктических островах и мысах в теплый период года мерзлые породы высокой льдистости разрушаются и поглощаются морем со скоростью до $20-30$ м за сезон. В среднем по побережью Северный Ледовитый океан поглощает от 3 до 6 м материковой суши за лето [22]. Также по данным Института криосферы Земли СО РАН [50] в последние годы наблюдается некоторое увеличение площади болот в приполярной зоне России (особенно в Западной Сибири). Таким образом, в последние десятилетия в районах распространения многолетнемерзлых пород наблюдается увеличение количества воды в жидкой фазе, вовлеченной в климатические процессы взаимодействия, и можно констатировать увеличение

площади подстилающей поверхности, представляющей собой водное зеркало. Это влияет на такие параметры климатической системы как альbedo и излучательная способность подстилающей поверхности. Альbedo подстилающей поверхности характеризует количество коротковолновой радиации, поглощенной земной поверхностью. Альbedo водной поверхности в среднем составляет 0.06, альbedo снега и льда 0.7–0.9. Альbedo суши в зависимости от климатических условий, типа и влажности почвы, растительности меняется от 0.08 до 0.3. Например, альbedo сухой супесчаной почвы равно 0.18–0.16, влажной 0.16–0.18, мокрой 0.11–0.16, а сильно пропитанной водой 0.08–0.11 [15]. Вода среди всех природных жидких и твердых веществ характеризуется наибольшей теплоемкостью и наибольшей способностью поглощать солнечную радиацию. Увеличение количества воды в жидкой фазе в поверхностном слое суши полярных регионов приводит к дополнительному росту теплосодержания ее верхнего слоя и температуры приземного воздуха. По оценкам [15] уменьшение средней по площади величины альbedo подстилающей поверхности на 0.01–0.02 увеличивает температуру пограничного слоя приземного воздуха на 2.3–4.6°C.

Рост заозеренности и увлаженности приполярных территорий приводит к росту испарения и влагосодержания атмосферы в полярных широтах. Влагосодержание атмосферного воздуха в рассматриваемой широтной зоне возросло с 1989 по 2005 г. от 3 до 5% [32]. В отличие от других газов, содержащихся в атмосфере, водяной пар способен конденсироваться в воздухе, выделяя большое количество тепла. Насыщающая концентрация водяного пара растет с повышением температуры, а наблюдаемые изменения его количества в атмосфере вносят ощутимый вклад в изменения плотности воздуха и облачности. Водяной пар – сильный парниковый газ, основная субстанция в атмосфере, поглощающая земное излучение и посылающая встречное излучение к земной поверхности. Водяной пар поглощает почти все излучение земной поверхности в диапазоне от 4 до 8 и от 12 до 40 мкм.

ВЫВОДЫ

На протяжении последних трех десятилетий в северной приполярной зоне во все сезоны года наблюдается более заметный рост температуры приземного воздуха по сравнению с другими широтными зонами. В то же время в атмосфере северных широт наблюдается планетарный максимум концентрации CO_2 и CH_4 , тогда как антропогенные выбросы этих газов максимальны в умеренных и субтропических широтах северного полушария.

Основные характеристики криолитозоны северного полушария чувствительны к современным изменениям климата и прежде всего – к их термической составляющей. Анализ накоплен-

ных к настоящему времени эмпирических данных свидетельствует о значимом увеличении толщины слоя сезонного протаивания многолетнемерзлых пород (в среднем для разных районов >10 см/10лет), повышении температуры мерзлотных грунтов до глубины 30 м (от 0.1 до 0.5°C/10лет), увеличении продолжительности периода положительных температур приземного воздуха, переходе на значительных площадях мерзлоты сплошного распространения в прерывистую, а последних в островную, сокращении общей площади поверхности, покрываемой многолетнемерзлыми грунтами.

Наблюдаемой динамике криолитозоны в северных районах сопутствует увеличение снеготалопа, переход значительных объемов влаги из твердого состояния в жидкое на поверхности суши и в верхнем слое почвы. Также отмечается увеличение площади водного зеркала на подстилающей поверхности северных территорий. Это вызывает рост испарения и влагосодержания атмосферы, усиление парникового эффекта и дополнительный рост температуры приземного воздуха. Кроме того, уменьшается альbedo подстилающей поверхности, вследствие чего наблюдается рост теплосодержания верхнего слоя почвы, наземных и подземных (таликов) водных объектов, повышение их собственного излучения и, следовательно, дополнительный рост температуры приземного воздуха.

Прогрессирующее оттаивание многолетнемерзлых пород сопровождается расконсервацией значительных объемов органических веществ. Это генерирует из водных наземных и подземных экосистем дополнительную эмиссию CH_4 . Эмиссия CH_4 в атмосферу в приарктической зоне в целом существенно меньше, чем в других широтных зонах северного полушария. Однако, по оценкам авторов статьи, плотность потока CH_4 в атмосферу вследствие оттаивания многолетнемерзлых пород в приполярной широтной зоне превышает плотности антропогенных и природных потоков в других широтных зонах. Возможно, именно вследствие этого происходит формирование планетарного максимума в широтном распределении концентрации CH_4 в атмосфере в северной приполярной зоне. Глобальное распределение фонового содержания CH_4 в атмосфере в целом соответствует рассчитанным значениям плотности потоков CH_4 в различных широтных зонах.

Таким образом, на современном этапе эволюции геологической среды криолитоэффект проявляется в усилении положительных обратных связей между изменениями климата и метановым циклом в северных широтах. Парниковый криолитоэффект, а также уменьшение альbedo подстилающей поверхности и дополнительные потоки водяного пара в атмосферу вследствие увеличения заозеренности северных территорий – важные факторы, обуславли-

вающие планетарный максимум наблюдаемых изменений климата в Арктике и Субарктике.

Приведенные оценки обратных связей требуют дальнейшего более детального анализа, дополнительных натурных и теоретических исследований. В частности, в рамках данной работы не рассмотрена химическая кинетика процесса окисления CH_4 , его зависимость от температуры и концентрации OH радикалов в тропосфере. Представленные в статье оценки изменений содержания CH_4 в атмосфере сделаны в приближении постоянства времени жизни этого парникового газа в атмосфере. Не учтена очевидная демпфирующая роль криолитосферы, проявляющаяся при ее деградации (учет скрытой теплоты плавления льда, консервация углерода в торфах). Практически не изучено влияние современной динамики криолитозоны на режим и качество подземных вод в северных регионах. Поступление большого количества органики плейстоценового и раннего голоценового возраста в речные и подземные воды, используемые для водоснабжения, требует оценок с точки зрения эпидемиологической безопасности.

Изложенные выше результаты анализа взаимосвязи процессов изменения климата в арктической зоне и оттаивания многолетнемерзлых пород, а также сделанные оценки плотности эмиссии CH_4 антропогенного и природного происхождения в атмосферу в разных широтных зонах позволяют обосновать следующую гипотезу: планетарный максимум потепления климата в арктических широтах в значительной степени вызван растущей эмиссией CH_4 из оттаивающих пород криолитозоны, создающих дополнительный парниковый эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А. Оценка макроклимата криолитозоны Евразии и распространение вечной мерзлоты в условиях глобального потепления // Метеорология и гидрология. 1994. № 9. С. 12–19.
2. Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е. О применении математических моделей для исследования взаимосвязи климата – вечная мерзлота // Метеорология и гидрология. 1990. № 10. С. 13–20.
3. Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е. Влияние изменений климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 1997. № 5. С. 71–80.
4. Анисимов О.А., Скворцов М.Ю. О применении математических моделей для исследования влияния изменения климата на вечную мерзлоту // Метеорология и гидрология. 1989. № 9. С. 98–103.
5. Величко А.А., Нечаев В.П. К оценке динамики зоны многолетней мерзлоты в Северной Евразии при глобальном потеплении климата // Докл. РАН. 1992. Т. 324. № 3. С. 667–671.
6. Дзюба А.В. Формализация дальней корреляционной связи североатлантического колебания и температурного режима атлантико-евразийской приполярной зоны // Метеорология и гидрология. 2009. № 5. С. 16–33.
7. Демченко П.Ф., Величко А.А., Голицын Г.С. и др. Судьба вечной мерзлоты: взгляд из прошлого в будущее // Природа. 2001. № 11. С. 43–49.
8. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. Взаимодействие метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 147–162.
9. Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Науч. мир, 2001. 328 с.
10. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004. 336 с.
11. Кузьмина С.И., Йоханнессен О.М., Анискина О.Г., Бобылев Л.П. Данные о приповерхностной температуре воздуха в высоких северных широтах: создание нового сеточного набора данных о приповерхностной температуре воздуха в высоких северных широтах // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1. С. 95–102.
12. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI в: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 38–49.
13. Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др. Оценки глобальных и региональных изменений климата в – веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 5. С. 629–642.
14. Мохов И.И., Елисеев А.В., Денисов С.Н. Модельная диагностика эмиссий метана болотными экосистемами во второй половине века с использованием данных реанализа // Докл. РАН. 2007. Т. 417. № 2. С. 258–262.
15. Найденов В.И., Швейкина В.И. Гидрологическая теория глобального потепления климата Земли // Метеорология и гидрология. 2005. № 12. С. 63–76.
16. Нечаев В.П. О некоторых соотношениях между мерзлотными и климатическими параметрами и их палеогеографическое значение // Вопросы палеогеографии плейстоцена ледниковых и перигляционных областей / Под ред. Величко А.А., Гричука В.П. М., 1981. С. 211–220.
17. Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: Методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли. 1997. Т. I. № 1. С. 47–58.
18. Павлов А.В. Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 1997. № 4. С. 61–73.
19. Павлов А.В. Оценка погрешностей измерений температуры грунтов в неглубоких скважинах в условиях сплошной криолитозоны // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 4. С. 9–13.
20. Семенов С.М., Израэль Ю.А., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Глобальные и региональные климатические последствия некоторых программ стабилизации концентраций диоксида углерода и метана // Проблемы экологии

- гического мониторинга и моделирования экосистем. 2007. СПб.: Гидрометеиздат, Т. 21. С. 75–91.
21. Семилетов И.П. О роли водных и наземных экосистем Арктики в формировании планетарных максимумов CH_4 и CO_2 в атмосфере // Докл. РАН. 1996. Т. 348. № 6. С. 817–820.
 22. Семилетов И.П. Парниковый эффект, цикл углерода в Арктике, Российская трансарктическая экспедиция 2000 // Вестн. РФФИ. 2001. № 2. С. 59–63.
 23. Семилетов И.П., Зимов С.А., Воропаев Ю.В. и др. Атмосферный метан в прошлом и будущем // Докл. РАН. 1994. Т. 339. № 2. С. 253–256.
 24. Чудинова С.М., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др. Особенности изменения температуры почв России в период последнего потепления климата // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 3. С. 23–30.
 25. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F. E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results // Polar Geography. 2000. № 3. P. 165–258.
 26. Canadel I. J., Dickenson R., Hibbard K. et al. Global Carbon Project: Report № 1. Canberra: Earth System Science Partnership, 2003. 69 p.
 27. Christensen T.R., Prentice I.C., Kaplan J. et al. Methane flux from northern wetlands and tundra // Tellus. 1996. V. 48. № 5. P. 409–416.
 28. Dlugokencky E.G., Masarie K.A., Lang P.M. et al. Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden // Nature. 1998. V. 393. № 6684. P. 447–450.
 29. Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G. et al. 2004: Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № D5101. doi:10.1029/2003JD004245
 30. Global Atmospheric-Biospheric Chemistry / Ed. Prinn R.G. N.Y.; London: Plenum Press, 1994. 261 p.
 31. IGAC. Project N 32. Stockholm, 1994. 134 p.
 32. IPCC. Technical Summary // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Solomon S., Qin D.M., Manning Z. et al. Cambridge; N.Y.: Cambridge Univer. Press, 2007. 336 p.
 33. Jones P.D., Moberg A. Hemisphere and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001 // J. Climate. 2003. № 16. P. 206–223.
 34. Majorovicz J., Safanda J., Skinner W. East to west retardation in the onset of the recent warming across Canada inferred from inversions of temperature logs // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № 1310. P. ETG 6/11 – ETG 6/12.
 35. Nelson F.E. Eurasian contributions to the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Workshop // Polar Geogr. 2004. № 28. P. 253–340.
 36. Osterkamp T.E. The recent warming of permafrost in Alaska // Global Planet. Change. 2005. № 49. P. 187–202. doi: 10.1016/j.gloplacha.2005.09.001
 37. Semiletov I.P. Aquatic sources and sinks of CO_2 and CH_4 in the polar regions // J. of the Atmospheric Sciences. 1999. № 56. P. 286–306.
 38. Smith S.L., Burgess M.M., Riseborough D., Nixon F.M. Recent trends from Canadian permafrost thermal monitoring network sites // Permafrost and Periglacial Processes. 2005. № 16 P. 19–30.
 39. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic lakes // Science. 2005. V. 308. № 5727. P. 14–29.
 40. WMO.WDCGG data summary 2005. GAV Data. 2005. V. 4. № 11. CD-ROM.
 41. WMO. WDCGG data summary 2005. GAV Data. 2005. V. 4. № 29. 755 p.
 42. Zhang X., Vincent L.A., Hogg W.D., Niitsoo A. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century // Atmos–Ocean. 2000. № 38. P. 395–429.
 43. Zhang X., Harvey K.D., Hogg W.D., Yuzyk T.R. Trends in Canadian streamflow // Water Resour. Res. 2001. V. 37 № 4. P. 987–998.
 44. Zhang T. Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № D16101. doi:10.1029/2004JD005642
 45. Zhuang Q., Melillo J.M., Kicklighter D.W. et al. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model // Glob. Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18. № 3. P. 34–51.
 46. www.cru.uea.ac.uk/cru/data
 47. www.ipcc-data.org
 48. <http://climatechange.igce.ru>
 49. www.gtnp.org
 50. <http://www.ikz.ru>