

Углеродный баланс в криолитозоне России и глобальный климат: современное состояние и прогноз, основанный на моделировании.

О.А. Анисимов, С.А. Ренева.

Краткая аннотация. В статье рассматривается современная динамика криолитозоны России в контексте возможного влияния эмиссии парниковых газов на глобальный климат. Дается оценка запасов почвенного углерода криолитозоны на основе уточненных опубликованных данных. При помощи математической модели рассчитываются последовательные изменения глубины сезонного таяния и температуры многолетнемерзлых пород с использованием данных метеонаблюдений за период 1960-2008 г., а также для климатических сценариев на середину 21 века по 5 моделям общей циркуляции. Результаты расчетов сравниваются с трендами, полученными по данным наблюдений. Прогнозы температуры и глубины сезонного таяния многолетнемерзлых грунтов используются в модели углеродного газообмена почвы для оценки эмиссии парниковых газов при таянии вечной мерзлоты и возможного воздействия таких изменений на глобальный климат. Обсуждается неопределенность полученных оценок и факторы, от которых она зависит.

Введение

Значительные изменения климата в северной полярной области, имевшие место в 20 веке и продолжившиеся в первом десятилетии 21 века, вызвали широкий спектр последствий для природных систем. Их изучению посвящена многочисленная научная литература. Одним из вопросов, который в последние годы вышел за рамки чисто научного анализа и оказался в центре внимания широкой общественности и лиц, принимающих политические решения, является возможность усиления потепления за счет изменения углеродного цикла в Арктике. Этот вопрос приобретает особую актуальность в связи с продолжающимися международными переговорами об ограничении эмиссии парниковых газов на уровне, при котором глобальное потепление не выйдет за рамки обозначенного ЕС предела в 2 °С (http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/index_en.htm). Большую озабоченность вызывает потенциальное увеличение эмиссии метана при таянии многолетнемерзлых грунтов, а также в результате действия иных механизмов, например, разложения газовых гидратов в шельфовой зоне или же формирования этого газа в озерных отложениях (Christensen *и др.* 2004; Friberg *и др.* 2003). В данной работе дается оценка современных знаний о запасах углерода в арктических экосистемах, оценивается соотношение между стоком и источниками углерода в Арктике в контексте изменения климата и приводятся результаты модельных расчетов дополнительного радиационного воздействия на глобальный

климата, обусловленного эмиссией парниковых газов при таянии многолетнемерзлых болот криолитозоны России. В ряде публикаций как научной печати, так и в средствах массовой информации, последний механизм часто упоминается как наиболее опасный с точки зрения возможного усиления глобального парникового эффекта при том, что с количественных позиций он еще недостаточно хорошо изучен. Именно по этой причине его анализу было уделено большое внимание в исследованиях, проводившихся в рамках Международного Полярного года. Важной задачей было сопоставить концептуальную модель с фактическими данными о распространении многолетнемерзлых грунтов, содержании в них углерода, динамике температуры почвы и мощности сезонно-талого слоя (СТС). Это позволило дать оценку гипотетическим суждениям относительно сильного влияния будущего увеличения эмиссии метана на глобальный климат, сравнив их с данными измерений и расчетов, имеющих четкую географическую привязку.



Рисунок 1. Распространение вечной мерзлоты на территории России.

Динамика многолетнемерзлых грунтов и углеродный баланс

Многолетнемерзлые грунты, часто называемые вечной мерзлотой, распространены на 25% площади суши Северного полушария (около 23 млн. км²), занимая в России более 10 млн. км² или же около 63% площади страны (Анисимов *и др.* 2005). Вечная мерзлота встречается не только в Арктике, но и за ее пределами в высокогорных районах с холодным климатом (см. рис. 1). Территории с многолетнемерзлыми породами объединены в понятие криолитозона. Основными параметрами вечной мерзлоты являются ее среднегодовая температура, глубина залегания нижней границы (вертикальная мощность), а также

мощность сезонно-талого слоя (СТС) над ней. Важной характеристикой является также льдистость мерзлых пород, от которой в наибольшей степени зависит величина их просадки при оттаивании.

Наибольшей вертикальной мощности, до 1500 м, вечная мерзлота достигает в центральных районах Сибири и в Якутии. Более характерные величины составляют 100 – 800 м в зоне сплошного распространения, 25-100 м в зоне прерывистого и 10-50 м – островного распространения. Диапазон среднегодовой температуры грунта у поверхности в этих зонах составляет, соответственно, $-8^{\circ}\text{C} \sim -13^{\circ}\text{C}$, $-3^{\circ}\text{C} \sim -7^{\circ}\text{C}$, и $0^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$. Годовые колебания температуры быстро затухают с глубиной и ощущаются лишь до глубины 10-12 м (Гаврилова, 1981; Zhang *и др.* 2000).

В контексте глобального изменения климата интерес к вечной мерзлоте связан с двумя причинами. Во-первых, повышение температуры многолетнемерзлых грунтов, в особенности сопровождающееся таянием включающих их подземных льдов, приводит к целому ряду геоморфологических процессов, формированию термокарстовых просадок поверхности почвы, усилению береговой эрозии и иным деструктивным изменениям. Все это оказывает влияние на естественные ландшафты, разрушая леса и вызывая заболачивание территории, приводит к повреждениям инфраструктуры районов крайнего севера, а также порождает геополитические проблемы в связи с размыванием берегов арктических морей и островов, в результате которого ежегодные потери территории в Российской Федерации достигают 30 км^2 . Анализу этих проблем и прогнозу возможности развития таких процессов посвящено достаточно большое число научных публикаций (АСИА, 2005; Анисимов *и др.*, 2004; Ильичев *и др.* 2003). Второй причиной является возможное увеличение эмиссии парниковых газов. Отметим, что перечисленные выше процессы, в особенности заболачивание, формирование озер в карстовых просадках и вынос органического вещества на прибрежный шельф при береговой эрозии, также оказывают влияние на углеродный цикл в Арктике, однако в данной работе количественно не оцениваются. Изменения вечной мерзлоты рассматриваются нами лишь в связи с непосредственным влиянием роста температуры грунта и мощности СТС на эмиссию парниковых газов за счет декомпозиции талого органического вещества, дополнительно вовлекаемого в круговорот углерода. Именно с этим механизмом, при всех имеющихся неопределенностях существующих оценок, авторы многих недавних научных публикаций и оценочного отчета о последствиях потепления в Арктике связывают возможное усиление парникового эффекта в ближайшие десятилетия (Symon, 2005). Концептуально, выдвигаемая ими модель выглядит следующим образом.

На протяжении многих тысяч лет арктическая тундра накапливала в почвенном слое органическое вещество, являясь стоком углерода для атмосферы. Растительный покров, даже столь небогатый, как в тундре, поглощая в процессе фотосинтеза из атмосферы углекислый газ, формирует биомассу и гумус. Гумус, представляющий собой отмершие растения, накапливается в верхнем слое почвы, создавая органический горизонт. Ниже находится минеральный грунт, чаще всего супесчаный или же суглинистый, который содержит мало органики. Из-за низкой продуктивности тундровой растительности процесс накопления очень медленный, в результате на большей части криолитозоны толщина верхнего органического слоя невелика, порядка 10-15 см. Иная ситуация складывается в болотах, которые продуцируют (или продуцировали ранее в более теплые эпохи) большое количество органики.

По своему определению болота являются биомами, в которых накопление углерода за счет фотосинтетического связывания из атмосферы превышает его расход за счет декомпозиции. Там, где в силу тех или иных причин это соотношение меняется, правильнее было бы говорить о наличии торфяников, однако мы не будем проводить различий между ними, понимая под болотами территории с накоплениями органического вещества, заметно превышающими вертикальную мощность органического слоя почвы на окружающей их территории. В криолитозоне России находится большое количество многолетнемерзлых болот, особенно распространены они в Западной Сибири. Торф, накопленный в болотах, при положительных температурах разлагается, выделяя углерод в виде углекислого газа или метана, в зависимости от условий аэрации. Метан выделяется бактериями в том случае, когда отсутствует доступ кислорода, т.е. имеют место анаэробные условия, как, например, ниже уровня болотных вод. Потепление климата повлечет за собой увеличение глубины сезонного таяния мерзлых болот криолитозоны, при этом возрастет объем талого торфа, находящегося в анаэробных условиях, в результате чего может увеличиться эмиссия метана. Сам по себе рост температуры почвы также ускоряет скорость микробиологических процессов, в ходе которых выделяется метан. Изменение температуры на один градус меняет интенсивность выделения метана из болот примерно на 10%. Показательны результаты исследования, проводившегося на болотном комплексе, расположенном в северной части Швеции в области островного распространения многолетнемерзлых пород. Произошедшие за 30 лет наблюдений с 1970 по 2000 г. увеличения температуры воздуха и мощности СТС, а также изменение растительного покрова вызвали рост эмиссии метана на 22-66%, отмечавшийся не только в отдельных точках, но и на ландшафтном уровне (Christensen *и др.* 2004). Последующий анализ показал, что два основных фактора, температура и количество талого органического субстрата доступного для микробиологической декомпозиции почти

полностью обуславливают вариации среднегодовой эмиссии метана (Christensen *и др.* 2003; Christensen *и др.* 2003).

Экстраполируя полученные результаты на континентальный уровень, можно ожидать, что при развитии потепления в Арктике и таянии вечной мерзлоты баланс углерода изменит знак, и результирующий поток будет направлен из почвы в атмосферу, а не наоборот, как это имело место на протяжении многих тысячелетий. При этом весьма важно разделять углеродные потоки, осуществляемые в форме углекислого газа и метана. Согласно имеющимся оценкам, в последние десятилетия наземные арктические экосистемы в целом были слабым стоком атмосферного CO_2 с интенсивностью от 0.3 до 0.6 Пг С/год (1 петаграмм, Пг, = 10^{15} г), при том, что они были и продолжают оставаться сильным источником поступления метана в атмосферу, интенсивность которого оценивается с большой неопределенностью от 32 до 112 Тг CH_4 /год (1 тераграмм, Тг, = 10^{12} г) (McGuire *и др.* 2009; Zhuang *и др.* 2004; Zhuang *и др.* 2006). Было оценено, что вклад естественных глобальных источников метана в общий баланс составляет 270 Тг CH_4 в год (Prather, Ehhalt, 2001), из которых болота стоят на первом месте. На долю северных заболоченных земель приходится 65 Тг CH_4 в год (Walter *и др.* 2001).

Если бы весь углерод из болотных почв, поступающий в атмосферу, высвобождался в форме CO_2 , этот процесс лишь компенсировал бы уменьшение парникового эффекта за счет стока в предшествующий период, когда происходило накопление торфяной залежи и через фотосинтез углекислый газ забирался из атмосферы. В длительной перспективе такой процесс не оказывал бы существенного влияния на тепловой баланс Земли. Если же хотя бы часть накопленного углерода выделится в виде метана, произойдет усиление парникового эффекта. Способность метана поглощать инфракрасное излучение в 21 раз сильнее, чем у равного количества углекислого газа. Метан является долгоживущим газом, среднее время нахождения одной его молекулы в атмосфере составляет около 12 лет, что также способствует усилению его воздействия на глобальный климат. Немаловажно, что если увеличение потока CO_2 в атмосферу за счет усиления декомпозиции почвенного органического вещества может быть скомпенсировано большим его поглощением растительностью, что и наблюдается в настоящее время, то у метана дополнительного стока из атмосферы не появится. Сток метана, в отличие от углекислого газа, из атмосферы ограничен, в основном это фотохимическое разрушение и незначительное поглощение за счет бактериального переокисления до CO_2 в верхнем аэрируемом слое почвы.

Корректные расчеты потоков парниковых газов невозможны без данных о содержании органического вещества в почвах. Начиная с середины 1990х годов, когда впервые были получены такие оценки (Oechel *и др.* 1993), и вплоть до недавнего времени

считалось, что запасы углерода в арктических почвах составляют приблизительно 455 Пг, при том, что содержание углерода в верхнем метровом слое почвы всех существующих наземных экосистем оценивалось в 1400-1600 Пг. Если же принять во внимание более глубокие горизонты, то при увеличении почвенного слоя до 2 метров глобальная оценка возрастает до 2400 Пг. Недавние исследования показали, что в 3-х метровом слое арктических почв всего северного полушария может содержаться 750 Пг углерода (Schuur, al., 2008). Эта оценка не включает запасы углерода в арктических болотах, которые по данным (Gorham, 1991) могут содержать дополнительно от 200 до 450 Пг С, в зависимости от того, принимается ли средняя мощность торфяной залежи равной 1.0 или 2.3 м. Несколько меньшая оценка запасов углерода в арктических болотах, 270-370 Пг, дается в работе (McGuire *и др.*, 2009). В более поздней работе (Tarnocai *и др.* 2009) приводятся данные о том, что канадские арктические болота содержат около 150 Пг С. Это подтверждает первую из приведенных оценок, поскольку приблизительно треть всех арктических болот находятся в Канаде. В последние несколько лет оценки вновь были пересмотрены в связи с предположением о том, что значительное количество почвенного углерода в Арктике может располагаться в глубоких слоях на глубинах от 3 до 25 метров. Так, в работах (Zimov *и др.* 2006а; Zimov *и др.* 2006б) рассматриваются лессовые отложения Сибири (т.н. едома). Эта территория в Плейстоцене была занята лесотундровой и степной растительностью, затем отложения подверглись промерзанию, в результате чего образовался мощный слой (до 25 метров), в котором может содержаться около 400 Пг С. Эта оценка, впрочем, может быть и вдвое меньшей, поскольку сведения о едоме ограничены, непонятно, сколь распространены такие отложения. Еще 250 Пг С может содержаться в отложениях ниже 3 метров в дельтах семи главных арктических рек (Schuur, al., 2008). Обобщая результаты отмеченных исследований, можно сказать, что около 1000 Пг С содержится в арктических почвах в слое до 25 метров вне болот, от 200 до 450 Пг С в болотах и от 200 до 400 Пг С в едоме на территории Сибири. Суммарное содержание углерода во всех арктических почвах до глубины 25 метров, таким образом, оценивается в 1400-1850 Пг. В этот диапазон попадают также и более дифференцированные оценки, полученные в последние два года. По ним мерзлые арктические почвы содержат около 1672 Пг углерода, что составляет приблизительно половину глобального почвенного запаса, из которых 277 Пг содержится в болотах (Schuur, *и др.*, 2008). Содержание почвенного углерода по всей толще торфяников криолитозоны может достигать 32–70 кг С/м² (Peter *и др.* 2009). В вертикальном разрезе большая часть углерода содержится в слое почвы, ограниченном первыми 3 метрами, и оценивается по слоям в 191 Пг (0 - 30 см), 496 Пг (0 - 100 см) и 1024 Пг (0 - 300 см) (Tarnocai

и др. 2009). В слоях глубже 3 м запасы углерода были оценены в 407 Пг в едome и 241 Пг в дельтовых отложениях (Peter *и др.* 2009).

В криолитозоне лишь часть углеродного пула, содержащаяся в сезонно-талом слое, участвует в обмене с атмосферой. Вместе с тем, всесезонные исследования потоков CO₂ из наземных экосистем севера, начатые в 1989/90 гг. группой ученых Дальневосточного отделения Академии Наук (Северовосточная Научная Станция (СВНС) и Тихо-океанский океанологический институт), показали, что почвы сезонно-талого слоя дышат, т.е. выделяют углерод, не только летом, когда температура положительная и идет рост растений, но и зимой, когда этот слой промерзает. Многолетние непрерывные измерения, выполненные на СВНС, расположенной в низовьях реки Колымы, показали, что с одного квадратного метра тундры, лесотундры, и северной тайги только за зиму в атмосферу поступает как минимум 100 г углерода в форме CO₂, что сопоставимо с годовым выбросом антропогенного CO₂ с территории бывшего СССР или США (или 15-17 % от общей антропогенной эмиссии). Также было выявлено, что мерзлота, оттаивающая под озерами (талики), которые занимают до 50-70 % территории прибрежной тундры, является важнейшим региональным источником CH₄ в атмосферу (Семилетов, 2001).

Моделирование эмиссии метана при таянии болот криолитозоны России

Оценить вклад эмиссии метана из многолетнемерзлых болот в парниковый эффект можно на основе моделирования сезонного оттаивания и углеродного газообмена в условиях изменения климата. В данной работе рассматривается применение таких моделей для прогноза глубины оттаивания многолетнемерзлых болот криолитозоны России и расчета изменения эмиссии парниковых газов.

Модель эмиссии метана с поверхности болот строилась с учетом трех основных механизмов его транспорта в почвах: диффузии газа через воду или воздух, заполняющие поры в почве, пузырьковый перенос и транспорт газа через корневую систему растений. Подробное описание физически полной модели углеродного газообмена почвы и атмосферы дано в двух предшествующих публикациях (Анисимов *и др.* 2005). Было проведено обобщение большого числа проведенных при помощи физически полной модели расчетов с целью выявления зависимостей потоков метана от глубины протаивания и температуры. Предварительно была осуществлена калибровка модели углеродного газообмена при помощи немногочисленных данных наблюдений за потоками метана, глубиной оттаивания и температурой почвы, главным образом полученными в дельте р. Лены.

В результате обобщения множественных расчетов по модели удалось сформулировать зависимость относительного изменения потока метана от глубины оттаивания и температуры поверхности почвы в следующем виде:

$$J_2/J_1 = \exp 0.1(T_2 - T_1) \sqrt{H_{d2}/H_{d1}}, \quad (1)$$

где J_1 и J_2 – потоки метана за два различных периода времени,
 H_{d1} и H_{d2} – соответствующие глубины оттаивания,
 T_1 и T_2 – температуры поверхности почвы.

Важным фактором, влияющим на эмиссию метана, является уровень грунтовых вод. Для того чтобы оценить влияние этой характеристики на поток метана, проводились соответствующие модельные расчёты при стоянии грунтовых вод от 0 до 40 см ниже поверхности почвы. В результате обобщения было получено следующее выражение для расчёта относительного изменения потока метана при изменении уровня грунтовых вод (Анисимов и др. 2005):

$$J/J_0 = (1 - 0.033h) \quad (2)$$

где J , J_0 – соответственно потоки метана при нахождении уровня грунтовых вод на глубине h и у поверхности.

Однозначных сведений о том, приведет ли повышение среднеглобальной температуры к увеличению или же уменьшению уровня грунтовых вод нет. Один из возможных сценариев предполагает, что в ближайшие десятилетия уровни грунтовых вод в криолитозоне могут понизиться за счет улучшения дренирования, более глубокого сезонного оттаивания мерзлоты, увеличения испарения и транспирации. При этом можно ожидать, что равновесие сместится в сторону продукции углекислого газа, и при общем росте потока углерода в атмосферу доля метана будет уменьшаться. Иная картина может иметь место при увеличении осадков, развитии термокарста, просадочных форм рельефа и усилении заболачивания. При плохом дренировании и отсутствии стока можно ожидать повышения уровня грунтовых вод, увеличения анаэробной зоны в сезонно талом слое, вследствие чего возможно усиление эмиссии метана.

Уравнение (1) позволяет прогнозировать относительные изменения потока метана в атмосферу, обусловленные увеличением температуры органического субстрата и мощности сезонно-талого слоя. Важно при этом понимать, что несмотря на наличие углерода в

различных слоях криогенных почв, наибольший вклад будут давать болота, поскольку сезонно-талый слой в них находится полностью в пределах органического горизонта. При общем понимании этого механизма, до настоящего времени оценки потенциального вклада многолетнемерзлых болот при изменении климата в глобальный парниковый эффект оставались большей частью качественными. В данной работе была предпринята попытка получения их в количественном виде для криолитозоны России. Для этого при помощи модели вечной мерзлоты были рассчитаны изменения мощности сезонно-талого слоя мерзлого органического вещества по всей криолитозоне России для нескольких климатических сценариев. Полученные результаты были помножены на долю площади, которую занимают мерзлые болота в каждой из ячеек пространственной расчетной сетки. Определение этой величины составило самостоятельную задачу.

Для расчета глубины сезонного оттаивания и температуры талого слоя многолетнемерзлых болот была применена стационарная модель вечной мерзлоты. Расчет температуры грунта осуществляется в несколько этапов, при этом последовательно учитывается влияние снежного покрова, растительности и температурной сдвижки, обусловленной различием коэффициентов теплопроводности талого и мерзлого грунта:

$$\begin{aligned} T_{\Pi} &= T_{\text{в}} + \Delta T_{\text{сн}} + \Delta T_{\text{р}}, \\ A_{\Pi} &= A_{\text{в}} - \Delta A_{\text{сн}} - \Delta A_{\text{р}}. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих выражениях T_{Π} , A_{Π} – средняя годовая температура и ее амплитуда на поверхности почвы, $\Delta T_{\text{сн}}$, $\Delta A_{\text{сн}}$ и $\Delta T_{\text{р}}$, $\Delta A_{\text{р}}$ – поправки, учитывающие влияние снежного покрова и растительности. Величина поправок на отепляющее влияние снежного покрова рассчитывается по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{сн}} &= A_{\text{в}} \left(1 - \exp \left(-Z_{\text{сн}} \left(\frac{\pi \cdot c_{\text{сн}} \cdot \rho_{\text{сн}}}{P \cdot \lambda_{\text{сн}}} \right)^{1/2} \right) \right), \\ \Delta T_{\text{сн}} &= A_{\text{в}} \left(1 - \exp \left(-Z_{\text{сн}} \left(\frac{\pi \cdot c_{\text{сн}} \cdot \rho_{\text{сн}}}{P \cdot \lambda_{\text{сн}}} \right)^{1/2} \right) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

В этих соотношениях $Z_{\text{сн}}$ – средняя за зиму высота снега, $c_{\text{сн}}$, $\rho_{\text{сн}}$, и $\lambda_{\text{сн}}$ – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности снега, P – продолжительность года в секундах.

Средняя высота снега рассчитывается через зимние осадки в каждом месяце по следующей формуле:

$$Z_{\text{сн}} = \sin^2 \phi \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=1}^k h_i (k - (i - 1)) \right\}. \quad (5)$$

Здесь k – число зимних месяцев, h_i – сумма снежных осадков в месяце с номером i , ϕ – географическая широта. Тригонометрический множитель учитывает уменьшение высоты снега за счет зимних оттепелей, влияние которых возрастает при уменьшении широты.

Для учета влияния растительного покрова на температуру почвы были использованы следующие соотношения:

$$\Delta A_p = \frac{\Delta A_1 \tau_1 + \Delta A_2 \tau_2}{P}, \quad (6)$$

$$\Delta T_p = \frac{\Delta A_1 \tau_1 + \Delta A_2 \tau_2}{P} \cdot \frac{2}{\pi}.$$

Поправки ΔA_1 и ΔA_2 определяются следующими выражениями:

$$\Delta A_1 = (A_p - T_p) \left(1 - \exp \left(-Z_p \left(\frac{\pi}{K_p^- \cdot 2\tau_1} \right)^{1/2} \right) \right), \quad (7)$$

$$\Delta A_2 = (A_p + T_p) \left(1 - \exp \left(-Z_p \left(\frac{\pi}{K_p^+ \cdot 2\tau_2} \right)^{1/2} \right) \right).$$

В этих формулах τ_1 и τ_2 – продолжительность холодного и теплого периодов, Z_p – высота растительности, K_p^- и K_p^+ – коэффициент теплопроводности растительности в холодный и теплый периоды года, T_p и A_p – средняя годовая температура и ее амплитуда на верхней границе растительного покрова, определяемые соотношениями:

$$T_p = T_B + \Delta T_{\text{сн}}, \quad (8)$$

$$A_p = A_B - \Delta A_{\text{сн}}.$$

Температура вечной мерзлоты под слоем сезонного оттаивания отличается от температуры поверхности почвы на величину температурной сдвижки, для расчета ее величины было использовано полу-эмпирическое уравнение:

$$T_m = \frac{0.5 \cdot T_n \cdot (\lambda_m + \lambda_t) + A_n \frac{\lambda_t - \lambda_m}{\pi} \left(\frac{T_n}{A_n} \arcsin \frac{T_n}{A_n} + \left(1 - \frac{T_n^2}{A_n^2} \right)^{1/2} \right)}{\lambda^*}. \quad (9)$$

В этом уравнении λ_t и λ_m – коэффициенты теплопроводности талой и мерзлой почвы, $\lambda^* = \lambda_m$, если числитель меньше нуля и $\lambda^* = \lambda_t$, если числитель больше нуля. И, наконец, глубина сезонного оттаивания рассчитывалась с использованием следующего уравнения:

$$Z = \frac{2(A_n - T_m) \cdot \left(\frac{\lambda \cdot P \cdot C}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{(2A_m \cdot C \cdot Z_m + Q_\phi \cdot Z) \cdot Q_\phi \cdot \left(\frac{\lambda \cdot P \cdot C}{\pi \cdot C} \right)^{1/2}}{2A_m \cdot C \cdot Z_m + Q_\phi \cdot Z + (2A_m \cdot C + Q_\phi) \cdot \left(\frac{\lambda \cdot P \cdot C}{\pi \cdot C} \right)^{1/2}}{2A_m \cdot C + Q_\phi}, \quad (10)$$

В этом уравнении Q_ϕ – теплота фазовых переходов воды в единице объема почвы, A_m и Z_m определяются следующими уравнениями:

$$A_m = \frac{A_n - T_m}{\ln \left(\frac{A_n + \frac{Q_\phi}{2C}}{T_m + \frac{Q_\phi}{2C}} \right)} - \frac{Q_\phi}{2C}, \quad (11)$$

$$Z_m = \frac{2(A_n - T_m) \cdot \left(\frac{\lambda \cdot P \cdot C}{\pi} \right)^{1/2}}{2A_m \cdot C + Q_\phi}. \quad (12)$$

Соотношения (3) – (12) позволяют рассчитать температуру и глубину сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов. В качестве входных климатических данных используются среднемесячные поля температуры воздуха и осадков, заданные в узлах регулярной сетки $0,5^\circ$ по широте и долготе. В случае если расчет проводится для условий будущего климата, к современным средним месячным нормам прибавляются их ожидаемые приращения, определяемые сценарием изменения климата.

Расчет проводился последовательно в узлах регулярной сетки с пространственным шагом 0.5 градуса по широте и долготе. Влажность (в зимний период льдистость в водном эквиваленте) болотной торфяной залежи задавалась в пределах от 600 до 800 мм/м. Для расчета коэффициента теплопроводности торфа, λ (Вт/м °С) использовались эмпирические формулы, полученные в Государственном гидрологическом институте на основе обобщения экспедиционных данных по болотным почвам Западной Сибири:

$$\lambda_M = 0,08 \exp(0,00388 \times w_M), \times$$

$$\lambda_T = (0,615 \times w_T + 22,2) \times 10^{-3} \quad (13)$$

Объемный коэффициент теплоемкости торфа, C_v (дж/м² × °С) рассчитывался через удельную теплоемкость скелета, $C_{ск}$ (дж/кг × °С), плотность скелета, $\rho_{ск}$ (кг/м³) и влажность w , (мм/м) по следующим формулам:

$$C_{v,M} = C_{ск} \times \rho_{ск} \times 2,090 \times w_M,$$

$$C_{v,T} = C_{ск} \times \rho_{ск} + 4,180 \times w_T, \quad (14)$$

В этих формулах w_M и w_T – льдистость и влажность почвы (мм/м), 4180 и 2090 – удельная теплоемкость воды и льда (дж/кг × °С). Высота снежного покрова рассчитывалась по зимним осадкам и изменялась в зависимости от климатического сценария. Плотность снега считалась неизменной и равной 300 кг/м³, коэффициент теплопроводности и теплоемкость снега задавались равными $\lambda_{сн} = 0,23$ Вт/(м × °С) и $c_{сн} = 2090$ дж/(кг × °С). Характерные значения теплофизических параметров торфяной залежи, использованные в расчетах, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характерные значения теплофизических параметров для торфов.

	$\rho_{ск}$, кг/м ³	$C_{ск}$, Дж/(кг × ° С)	W (min/max), мм/м	λ_M , Вт/(м × ° С)	λ_T , Вт/(м × ° С)	w_H , мм/м
Торф	200	2000	450/900	0,80/2,60	0,30/0,55	0

Изложенная выше модель была применена для расчета изменения температуры грунта и мощности сезонно-талого слоя многолетнемерзлых болот криолитозоны России. Расчеты были проведены для пяти различных климатических сценариев CGCM2, CSM-1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL-R30c и HadCM3, все они использовали сценарий эмиссии парниковых газов B2. Описание этих сценариев можно найти на веб-страницах Международной группы экспертов по изменению климата <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/> и <http://igloo.atmos.uiuc.edu/IPCC/>. Были рассчитаны относительные изменения мощности СТС, выраженные в процентах от современной нормы. При этом за норму принимались результаты расчета с использованием осредненных за период 1990–2004 г. климатических данных в узлах регулярной сетки с пространственным разрешением 0.5° по широте и долготе. Для получения прогноза в каждом узле сетки климатическим параметрам, т.е. среднемесячным температурам воздуха и суммам осадков, осредненным за период 1990–2004 г., давались приращения в соответствии с прогнозами нескольких физически полных моделей климата. Приращения в каждом узле детальной сетки рассчитывались интерполяцией данных из окружающих его четырех узлов более грубой модельной сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ с весами, обратно пропорциональными расстояниям между узлами. Относительная разность результатов расчетов мощности СТС для прогнозируемых на будущее и базовых условий и представляла собой прогноз изменения глубины сезонного таяния вечной мерзлоты. Такой прием, т.е. расчет относительных разностей и наложение данных детальной и грубой сетки, позволил свести к минимуму погрешность, связанную с неточным описанием современного состояния вечной мерзлоты и со смещением оценок параметров, имеющем место в большинстве климатических сценариев.

Описанный алгоритм соответствует гипотетическому случаю, когда вся криолитозона представляет собой одно сплошное мерзлое болото, поскольку в расчетах по всем ячейкам сетки использовались теплофизические параметры для торфа. Очевидно, что необходимо учесть реальное распространение многолетнемерзлых болот на рассматриваемой территории. Для этого, исходя из данных, показанных на рисунке 2, была составлена «маска» с оценками доли площади, занимаемой многолетнемерзлыми болотами в каждой из ячеек пространственной сетки в криолитозоне России. Исходная карта была построена путем обработки топографических карт масштаба 1 : 1 000 000 с использованием ГИС технологий.

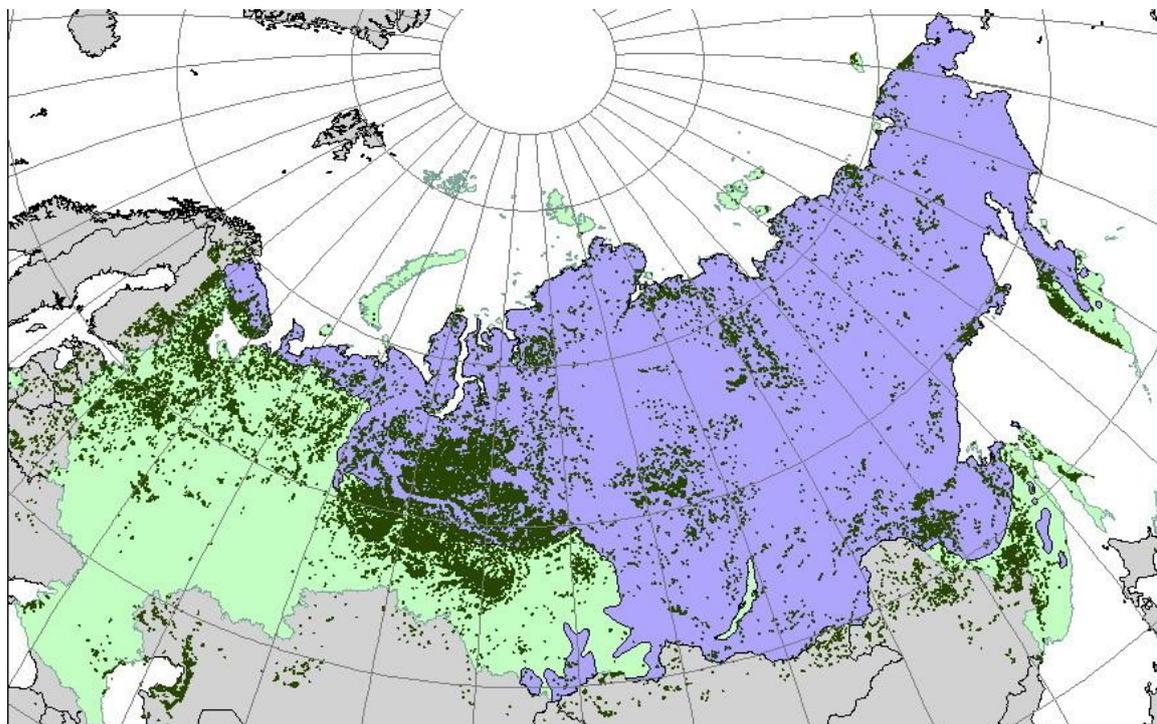


Рисунок 2. Карта болот России и зоны вечной мерзлоты.

Согласно этим данным, площадь болот всей территории России составляет 0,76 млн. км², из них 0,35 млн. км² приходится на криолитозону. Между тем, по данным (Gorham, 1991) площадь болот бореальной и субарктической зон составляет 3,46 млн. км². Эти болота сосредоточены в России (1,5 млн. км²), Канаде (1,19 млн. км²), США (0,55 млн. км²), Скандинавии и Финляндии (0,22 млн. км²). В работах (Вомперский, 1994а,б) площадь болот России оценивается в 1,39 млн. км², в то время как данные, полученные в Государственном гидрологическом институте, указывают на то, что она составляет 1,68 млн. км² (Новиков *и др.* 2002). Отличие этой оценки от результатов, полученных другими авторами, объясняется, по всей видимости, разномасштабностью исходных материалов. Так, в работах Новикова были использованы в основном топокарты масштабов 1 : 300 000 и 1 : 500 000, а также аэрофотоснимки. Уменьшение масштаба исходных картографических данных, очевидно, приводит к занижению действительной площади за счет потери мелких болотных экосистем, причем в рассматриваемых случаях оценки различаются почти в два раза. Вводя поправку, учитывающую болота подсеточного масштаба, полученную нами оценку площади многолетнемерзлых болот криолитозоны России можно увеличить до 0,7 млн. км².

Результаты и выводы

Результаты расчетов показали, что все пять сценариев изменения климата дают достаточно сложную региональную картину изменения мощности СТС многолетнемерзлых болот криолитозоны России. Среди рассмотренных пяти климатических моделей сценарий GFDL можно назвать "средним", а сценарии NCAR и ECHAM-4, соответственно, наиболее консервативным и экстремальным в плане воздействия на многолетнемерзлые грунты. На рисунке 3 представлены результаты расчетов относительного изменения мощности СТС мерзлых болот криолитозоны России, полученные с использованием климатического сценария GFDL для середины 21 века согласно описанной выше методологии.

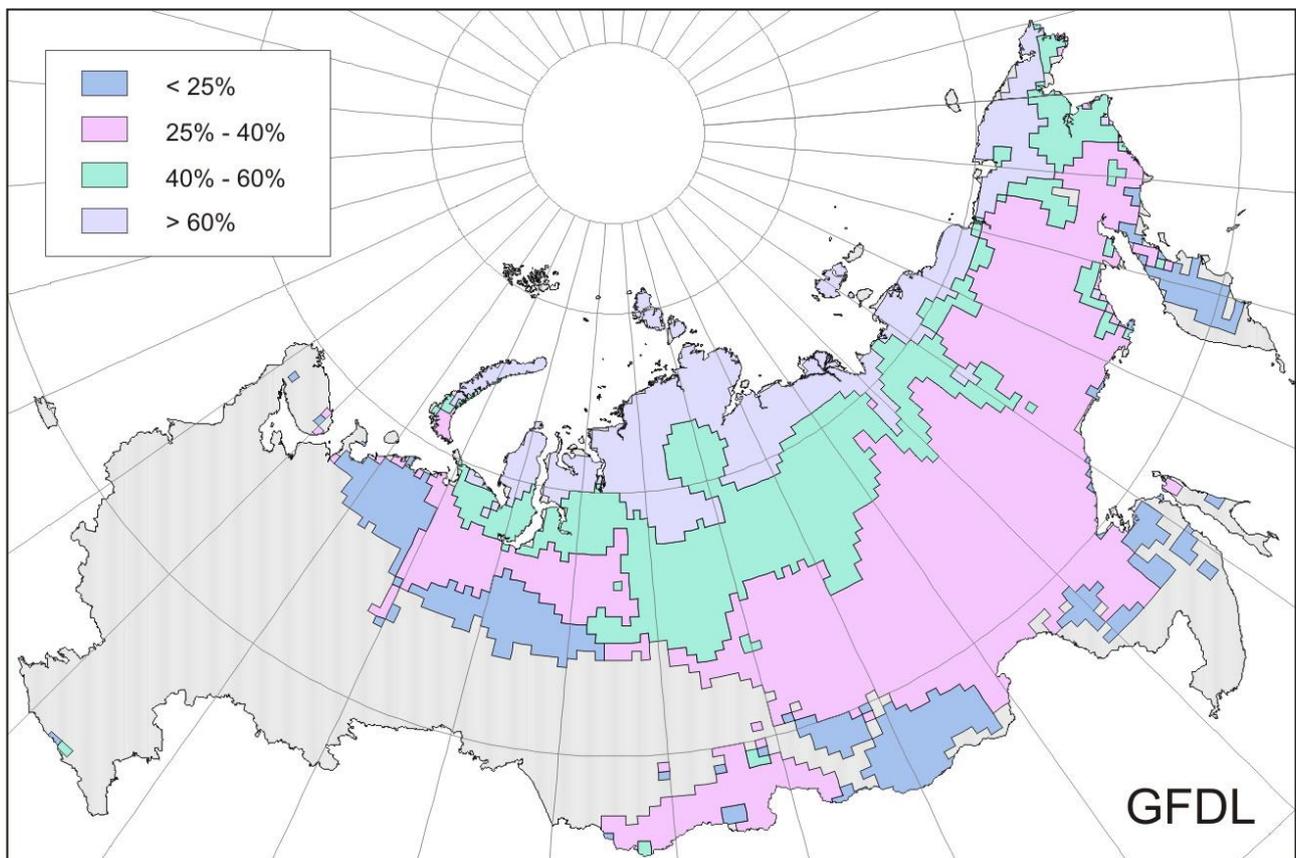


Рисунок 3. Расчетное изменение мощности СТС мерзлых болот криолитозоны России, климатический сценарий GFDL для середины 21 века.

Этот результат был получен для влагосодержания торфяной залежи 800 мм/м. Приращение мощности СТС при потеплении климата, выраженное в абсолютных единицах, зависит от влажности торфа, возрастая с ее увеличением, в то время как в относительных величинах приращения не столь ярко выражены. Были проведены расчеты и для других временных срезов, т.е. для первой четверти и конца 21 века по всем сценариям (здесь не

приводятся), что позволило оценить динамику ожидаемых изменений. Отвлекаясь от региональных различий, обусловленных климатическими сценариями, можно сделать вывод о том, что к середине столетия увеличение мощности СТС мерзлых болот в южной периферийной области будет достигать 15%-20%. В зоне прерывистого распространения мерзлых пород, где в настоящее время СТС на мерзлых болотах составляет от 0.5 до 1 м, он может вырасти до 50%. К концу столетия такие же сильные изменения возможны на большей части криолитозоны от арктического побережья приблизительно до 70 градуса северной широты, в то время как на оставшейся части глубина протаивания может увеличиться, согласно прогнозу, на 25%-50%.

Комбинируя данные о прогнозируемом изменении мощности СТС и о доли площади, занимаемой многолетнемерзлыми болотами в каждой ячейке модельной сетки, можно оценить приращение талого органического субстрата, доступного для микробиологической декомпозиции и производства метана. Вместе с расчетными данными об изменении температуры грунтов это позволяет, воспользовавшись уравнением (1), оценить относительное увеличение эмиссии метана, обусловленное таянием вечной мерзлоты. Сравнив эту величину с современным потоком метана из той же области, можно рассчитать приращение в абсолютных единицах. Так, по данным различных авторов, современный поток метана из болот криолитозоны России составляет приблизительно 24-33 Тг/год, наибольшую часть которого (около 22.2 Тг/год) дает Западная Сибирь (Anisimov, 2007). В результате расчётов было установлено, что в среднем по всем климатическим сценариям к середине 21 в. эта величина может вырасти приблизительно на 25%, что составляет 6–8 Тг/год.

В контексте воздействия на глобальную климатическую систему важна не сама полученная величина увеличения ежегодного поступления метана в атмосферу, а результирующее изменение концентрации этого газа и связанное с этим изменение радиационного воздействия. Рассчитать его можно, приняв во внимание, что среднее время жизни молекулы метана в атмосфере составляет около 12 лет (Prather *и др.*, 2001). Таким образом, ежегодное дополнительное поступление 6-8 Тг увеличит равновесную концентрацию в атмосфере максимум на 100 Тг, или же на 0.04 ppm (объемных миллионных единиц). При том, что чувствительность глобально осредненной среднегодовой температуры воздуха к увеличению атмосферного содержания метана на 1 ppm составляет около 0.3 °C (Ramaswamy, 2001), воздействие рассмотренного выше механизма эмиссии метана за счет таяния болот криолитозоны России к середине 21 века может привести к росту глобальной температуры на 0.012 °C, что, конечно же, не создает серьезных угроз.

Целесообразно кратко проанализировать возможные последствия модельных ограничений и допущений, принятых в изложенных выше расчетах. Прежде всего, при постановке задачи предполагалось, что во всех типах болот криолитозоны мощность торфяной залежи превышает мощность СТС. В наиболее холодной области сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощность СТС невелика и это условие выполняется для большинства болот. Вместе с тем, относительно молодые и вновь формирующиеся болота в этой области могут иметь неглубокий слой торфа, который и при современном климате полностью оттаивает в течение теплого периода года. То же самое можно сказать и о некоторых болотах южной части криолитозоны. Очевидно, что в таких условиях увеличение мощности СТС не добавит столь много талого органического субстрата, как предполагалось в расчете, поскольку содержание органики в нижележащих слоях относительно невелико. Хотя и в этом случае изменение эмиссии будет иметь место, главным образом за счет увеличения температуры, оно будет ниже оценки, полученной нами.

Еще одно обстоятельство, которое не принималось во внимание в проведенных нами расчетах, связано с учетом просадки грунта при оттаивании и сопутствующим изменением уровня болотных вод. Как показали наблюдения, в верховых болотах на многолетней прерывистой мерзлоте уровень болотных вод располагается на 40 и более сантиметров ниже растительного покрова. В развившихся же после таяния сфагново-осоковых болотах он расположен вблизи поверхности сфагновых мхов. Следствием этого является некоторое увеличение аккумуляции углерода в почвах на растаявшей мерзлоте и значительное повышение интенсивности эмиссии метана ($182,6 \text{ мг } \text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки) по сравнению с болотами на мерзлоте ($40,9 \text{ мг}/\text{м}^2$ в сутки) и $21,1 \text{ мг}/\text{м}^2$ в сутки на аналогичных болотах, занимающих не мерзлые почвы. Поскольку уровень грунтовых вод оказывает столь сильное воздействие на соотношение между углеродом, выделяемым в форме CO_2 и CH_4 , многие авторы полагают, что решающую роль в воздействии на глобальный климата будут играть гидрологические условия при таянии многолетнемерзлых болот. На ландшафтном уровне данные наблюдений за последнее десятилетие указывают на тенденцию к уменьшению влагосодержания в бореальных лесах зоны прерывистого распространения вечной мерзлоты (Bunn *и др.* 2007; Goetz *и др.* 2007; Riordan *и др.* 2006). Если эта тенденция распространится и на область сплошного распространения многолетнемерзлых пород, баланс еще сильнее сместится в стороны CO_2 , что в итоге может привести даже к сокращению эмиссии метана как за счет рассмотренного выше механизма, связанного с увеличением мощности СТС болот, так и в силу того, что может уменьшиться численность небольших карстовых озер (Smol *и др.*, 2007). В настоящее время они широко распространены в области сплошной

вечной мерзлоты, и имеющиеся в них органические осадки часто служат источником эмиссии метана. Однако этот механизм, связанный с формированием, динамикой и иссушением таких озер, выходит за рамки данной статьи. Его обсуждению посвящена обширная самостоятельная литература. Нам же здесь важно лишь то, что изложенный выше механизм, вероятнее всего, способен лишь уменьшить, а не увеличить полученную нами оценку величины воздействия таяния многолетнемерзлых болот на глобальный климат.

Еще один вопрос, который целесообразно обсудить, связан с концептуальными ограничениями использованного нами подхода, в частности с тем, что в нем болота зафиксированы и их площадь и пространственное распределение не меняются в процессе потепления. Достаточно хорошо известно, что в действительности имеют место динамические изменения болот. Часть из них, главным образом те, что расположены вблизи южной границы криолитозоны, со временем иссушаются, образуя торфяники. Такие процессы наблюдаются в случае, когда увеличение глубины сезонного таяния достигает уровня, при котором болотные воды получают доступ к подземным дренирующим горизонтам. В северной части криолитозоны, напротив, может происходить формирование новых болот, первоначально образуемых небольшими термокарстовыми просадками при отсутствии подземного или же поверхностного дренажа. Ряд моделей рассматривают такие динамические изменения болот, в некоторых из них рассчитывается также и эмиссия метана, и целесообразно сравнить выводы, получаемые с их помощью, с нашими результатами. В таблице 2 приведены результаты модельных оценок чувствительности эмиссии метана к изменениям температуры воздуха, осадков, уровня грунтовых вод и мощности СТС по данным различных авторов, которые можно сравнить с полученным нами результатом.

Прямое сравнение не всегда возможно, поскольку в работах используются различные предположения об изменениях климатических характеристик. Кроме того, они заметно различны по географическому охвату. Тем не менее, аналогии все же можно провести, в некоторых случаях прибегнув к масштабированию по той или иной характеристике.

Полученный нами результат можно кратко сформулировать следующим образом. Таяние многолетних болот криолитозоны России может привести к увеличению эмиссии метана в середине 21 века на 6-8 Тг/год, или же на 20%-30% от современной величины. Эта оценка была получена для климатических сценариев по ряду моделей, которые предполагают, что к середине 21 века глобально осредненная среднегодовая температура увеличится на 0.8 -1.2 °С при том, что в широтной зоне 60°-90°N потепление составит 2.2°-3.2°С.

Таблица 2. Модельные оценки чувствительности эмиссии метана к изменениям температуры воздуха, осадков, уровня грунтовых вод и мощности СТС по данным различных авторов.

Изменения эмиссии CH ₄	Условия расчета	Автор
Глобальный охват, ±20%	Однородное потепление ±1°C	[Walter <i>u др.</i> 2001]
Глобальный охват, ±8%	Увеличение осадков ±20%	
Пояс 60°–90° N, +19%	Однородное потепление +2°C	[Cao <i>u др.</i> 1998]
Пояс 60°–90° N, +21%	Однородное потепление +2°C и увеличение осадков +10%	
Пояс 60°–90° N, +38%	Увеличение мощности СТС +10 см	[Zhuang <i>u др.</i> 2004]
Пояс 60°–90° N, <+25%	Подъем грунтовых вод +10 см	[Walter <i>u др.</i> 2001]
Глобальный охват, +63%	Фиксированное распределение болот, 2 x CO ₂ GISS сценарий	[Shindell <i>u др.</i> 2004]
Глобальный охват, +78%	Динамическое распределение болот, 2 x CO ₂ GISS сценарий	
Пояс 32°–90° N, +117%	Фиксированное распределение болот, 2 x CO ₂ GISS сценарий	
Арктические болота, +56%	Однородное потепление +4°C и увеличение осадков +0.3мм/день	[Christensen, Cox, 1995]

Близкий к нашему результат был получен в работах (Walter *u др.* 2001, 2001), при том, что полученная в ней оценка имеет глобальный охват. Ее общий вывод совпадает с нашим, т.е. увеличение эмиссии метана будет в пределах 20% при потеплении 1°C, которое вполне вероятно ожидать к середине 21 века. Вдвое меньшая оценка (при масштабировании полученных для +2 °C результатов к величине потепления, использованной в наших расчетах) была получена (Cao *u др.* 1998). Две другие работы, (Zhuang *u др.* 2004) и (Walter *u др.* 2001) сложно сравнивать с нашей из-за значительных различий в постановке задачи. Тем не менее, результаты качественно согласуются с нашими, если учесть, что в среднем по криолитозоне нами было получено приращение мощности СТС в многолетнемерзлых болотах к 2050 году около 10 см, со значительными региональными различиями. Что же касается чувствительности к изменению уровня болотных вод, она нами не оценивалась, но полученная (Walter *u др.* 2001) величина подтверждает высказывавшийся ранее тезис о том, что изменения гидрологических условий почвы могут иметь столь же сильное значение сколь и потепление.

Наиболее близким к нашему по формулировке был подход, описанный в (Shindell *u др.* 2004). В этой работе была использована модель углеродного газообмена болотных

экосистем для всего мира и отдельно для внетропической области, причем проводились расчеты как с фиксированным положением болот, так и с динамическим их распределением, подстраиваемым под текущие климатические условия. В качестве климатического сценария использовались результаты расчетов по достаточно старой модели GISS для удвоенного содержания углекислого газа в атмосфере, которые предполагают увеличение глобальной температуры приблизительно на 3.4 °С, т.е. почти в 3 раза большее, чем в наших расчетах. Прогнозируемое увеличение эмиссии метана из болотных экосистем (глобальная оценка) составило 63% и 78%, соответственно для фиксированного и динамического распределения болот. Если масштабировать эти результаты по величине потепления, приведя их в соответствие с нашими (поделив на 3), получится очень близкое совпадение. Большой интерес, впрочем, представляет полученная в этой работе для внетропической области оценка увеличения эмиссии болотного метана на 117%. Обратившись к данным о выбранном климатическом сценарии (они в работе не приводятся, но могут быть получены из исторических архивов первой рабочей группы МГЭИК), можно установить, что увеличение температуры по криолитозоне России составило 3-5 °С при одновременном увеличении осадков примерно на 0.4 – 0.8 мм/день. Масштабируя с учетом этих величин оценку в +117%, можно прийти к выводу, что она близка полученному нами результату чуть превышая его. Напротив, результат, полученный (Christensen *и др.*, 1995), чуть меньше нашего (после аналогичного масштабирования), но также весьма близок.

Литература

- Анисимов, О.А., С.А. Лавров, 2004. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК.- *Технологии ТЭК*, № 3, с. 78-83.
- Анисимов, О.А., С.А. Лавров, С.А. Ренева, 2005. Оценка эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России при изменении климата, В кн.: *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, А. Израэль, (Ред.). Гидрометеоздат: СПб. с. 124-141.
- Вомперский, С.Э. 1994а. Роль болот в круговороте углерода.- *Чтения памяти ак В Н Сукачева биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование*, Т. XI, с. 5-37.
- Вомперский, С.Э. 1994б. Биосферное значение болот в углеродном цикле.- *Природа*, №7, с. 44-50.
- Гаврилова, М.К. 1981. Современный климат и вечная мерзлота на континентах. 1981, Новосибирск: Наука. 112 с.
- Ильичев, В.А., В.В. Владимиров, А.В. Садовский, А.В. Замараев, В.И. Гребенец, М. Кутвицкая, 2003. Перспективы развития современных северных поселений. 2003, Москва: Российская архитектурная академия. 152 с.
- Новиков, С.М., Л.И. Усова, 2002. К оценке площади болот, заболоченных земель и прогнозных запасов торфа на территории Российской Федерации.- *Сборник работ по гидрологии*, №2, с. 3-10.
- Семилетов, И.П. 2001. Парниковый эффект, цикл углерода в Арктике, Российская трансарктическая экспедиция - 2000.- *Вестник РФФИ*, № 24, с. 59-63.

- ACIA, 2005. Arctic Climate Impact Assessment. 2005, Cambridge University Press. p. 1042.
- Anisimov, O., 2007. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission.- *Environmental Research Letters*, № 2, p. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045016.
- Bunn, A.G., S.J. Goetz, J.S. Kimball, K. Zhang, 2007. Northern high latitude ecosystems respond to recent climate change.- *EOS Transactions, American Geophysical Union*, № p. 333-335.
- Cao, M.K., K. Gregson, S. Marshall, 1998. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change.- *Atmospheric Environment*, № 19, p. 3293-3299.
- Christensen, T.R., P. Cox, 1995. Response of Methane Emission from Arctic Tundra to Climatic-Change - Results from a Model Simulation.- *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, № 3, p. 301-309.
- Christensen, T.R., A. Ekberg, L. Strom, M. Mastepanov, N. Panikov, O. Mats, B.H. Svensson, H. Nykanen, P.J. Martikainen, H. Oskarsson, 2003. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands.- *Geophysical Research Letters*, № 7,
- Christensen, T.R., N. Panikov, M. Mastepanov, A. Joabsson, A. Stewart, M. Oquist, M. Sommerkorn, S. Reynaud, B. Svensson, 2003. Biotic controls on CO₂ and CH₄ exchange in wetlands - a closed environment study.- *Biogeochemistry*, № 3, p. 337-354.
- Christensen, T.R., T.R. Johansson, H.J. Akerman, M. Mastepanov, N. Malmer, T. Friborg, P. Crill, B.H. Svensson, 2004. Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions.- *Geophysical Research Letters*, № L04501, p. doi:10.1029/2003GL018680.
- Friborg, T., H. Soegaard, T.R. Christensen, C.R. Lloyd, N.S. Panikov, 2003. Siberian Wetlands: Where a sink is a source.- *Geophysical Research Letters*, № 21, p. 2129.
- Gorham, E., 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming.- *Ecological Applications*, № 2, p. 182-195.
- Goetz, S.J., M.C. Mack, K.R. Gurney, J.T. Randerson, R.A. Houghton, 2007. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America.- *Environmental Research Letters*, № p. 045031.
- McGuire, A.D., L.G. Anderson, T.R. Christensen, S. Dallimore, L. Guo, D.J. Hayes, M. Heimann, T.D. Lorenson, R.W. Macdonald, N. Roulet, 2009. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change.- *Ecological Monographs*, № 4, p. 523-555.
- Oechel, W.C., S.J. Hastings, G. Vourlitis, M. Jenkins, G. Richers, N. Gruike, 1993. Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source.- *Nature*, № 361, p. 520-523.
- Prather, M., D. Ehhalt, 2001. Atmospheric chemistry and greenhouse gases, in *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Y.D. J.T. Houghton, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson., Editor. Cambridge University Press: Cambridge. p. 239-387.
- Ramaswamy, V., 2001. Radiative Forcing of Climate Change, in *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Y.D. J.T. Houghton, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson., Editor. Cambridge University Press: Cambridge. p. 349-416.
- Riordan, B., D. Verbyla, A.D. McGuire, 2006. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images.- *Journal of Geophysical Research*, № p. G04002.
- Shindell, D.T., B.P. Walter, G. Faluvegi, 2004. Impacts of climate change on methane emissions from wetlands.- *Geophysical Research Letters*, № 21,
- Schuur, E.A.G., e. al., 2008. Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle.- *Bioscience*, № 8, p. 701-714.
- Smol, J.P., M.S.V. Douglas, 2007. Crossing the final ecological threshold in high Arctic ponds.- *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, № p. 12395–12397.

- Symon, C., ed. *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impacts Assessment*. 2005, Cambridge University Press: Cambridge. 1042 p.
- Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, S. Zimov, 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region.- *Global Biogeochemical Cycles*, № p. in press.
- Walter, B.P., M. Heimann, E. Matthews, 2001. Modeling modern methane emissions from natural wetlands 1. Model description and results.- *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, № D24, p. 34189-34206.
- Walter, B.P., M. Heimann, E. Matthews, 2001. Modeling modern methane emissions from natural wetlands 2. Interannual variations 1982-1993.- *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, № D24, p. 34207-34219.
- Zhang, T., J.A. Heginbottom, R.G. Barry, J. Brown, 2000. Further statistics of the distribution of permafrost and ground ice in the Northern Hemisphere.- *Polar geography*, № 2, p. 126-131.
- Zhuang, Q., J.M. Melillo, D.W. Kicklighter, R.G. Prinn, A.D. McGuire, P.A. Steudler, B.S. Felzer, S. Hu, 2004. 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.- *Global Biogeochemical Cycles*, № 3,
- Zhuang, Q.L., J.M. Melillo, M.C. Sarofim, D.W. Kicklighter, A.D. McGuire, B.S. Felzer, A. Sokolov, R.G. Prinn, P.A. Steudler, S.M. Hu, 2006. CO₂ and CH₄ exchanges between land ecosystems and the atmosphere in northern high latitudes over the 21st century.- *Geophysical Research Letters*, № 17, p. -.
- Zimov, S.A., S.P. Davydov, G.M. Zimova, A.I. Davydova, E.A.G. Schuur, K. Dutta, F.S. Chapin, 2006. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool.- *Geophysical Research Letters*, № 20, p. -.
- Zimov, S.A., E.A.G. Schuur, F.S. Chapin, 2006. Permafrost and the global carbon budget.- *Science*, № 5780, p. 1612-1613.
- Peter, K., P. Chien-Lu, A.G.S. Edward, T. Charles, Z. Sergey, 2009. Report from the International Permafrost Association: carbon pools in permafrost regions.- *Permafrost and Periglacial Processes*, № 2, p. 229-234.