

Сибирский центр климато-экологических систем и образования

УДК 57.045

УТВЕРЖДАЮ

Директор, д.ф.м.н., профессор

_____ Гордов Е.П.

«_____» _____ 2007 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Моделирование углеродного баланса болотных экосистем южной тайги при
различных сценариях изменения климата

Государственный контракт № 02.517.11.9011
в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-
технологического комплекса России на 2007-2012 годы

Научный руководитель

подпись, дата

Е. А. Дюкарев

Томск 2007

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель, с.н.с., к.ф.-м.н.		Дюкарев Е.А. (разделы 1, 2, 3, 4, 5, 6)
Исполнители темы н.с., к.б.н.		Головацкая Е.А. (введение, разделы 1, 2, 3, 4, 5, 6 заключение)
м.н.с., к.б.н.		Веретенникова Е.Э (раздел 4)

РЕФЕРАТ

Отчет 26 с., 1 ч., 8 рис., 6 табл., 7 источников, 0 прил.

БОЛОТНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ, БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ, БАЛАНС УГЛЕРОДА, МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ, ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

Объектом исследования являются нативные олиготрофные болота Томской области.

Цель работы: Получение новых данных о закономерностях изменения круговорота углерода в торфоболотных экосистемах при прогнозируемых изменениях климата.

Основные результаты работ заключаются в следующем:

Исследованы особенности динамики основных метеопараметров в различных фитоценозах. Оценены потоки CO₂ и метана, биологическая продуктивность исследуемых экосистем. Выявлены зависимости между потоками углерода и метеорологическими условиями. Разработана локальная модель углеродного цикла болотной экосистемы, учитывающая накопление углерода в живой растительности и торфяной залежи, и выполнен прогноз развития торфоболотных экосистем южной тайги при различных сценариях изменения климата.

В модели учитывается изменение продуктивности растительности и эмиссии CO₂ при изменении климатических характеристик. Параметры модели определялись из результатов экспедиционных измерений 2004-2006 гг., а прогноз изменения климата в XXI столетии на территории Западной Сибири был взят из данных расчетов по модели общей циркуляции атмосферы HadCM3. Рост температуры воздуха будет способствовать увеличению продуктивности болотной растительности и интенсификации выделению углерода из торфяной залежи. Скорость накопления углерода в торфе также будет возрастать. При быстром росте атмосферного CO₂ и температуры (сценарий A1) накопление углерода в мортмассе происходит быстрее, чем в «мягких» сценариях (B1, B2). В каждой рассмотренной экосистеме имеются свои особенности развития запасов фитомассы и мортмассы. В результате потепления климата и увеличения концентрации CO₂ в атмосфере скорость депонирования углерода в торфяной залежи в южной тайге может увеличиться к 2100 году на 75±22% по сравнению с современными темпами накопления.

Содержание

Обозначения и сокращения	5
Введение	6
1. Наблюдаемые изменения климата и моделирование изменений	8
1.1. Сценарии выбросов парниковых газов.....	10
1.2. Изменение климата в XXI столетии	10
1.3. Прогноз изменений климата Западной Сибири	13
2. Модель круговорота углерода в торфоболотных экосистемах.....	13
3. Экспериментальные исследования круговорота углерода в болотных экосистемах	16
3.1. Методы исследования	16
3.2. Базовые площадки	17
3.3. Биологическая продуктивность	19
3.4. Эмиссия CO ₂	20
4. Прогноз развития торфоболотных экосистем при различных сценариях изменения климата	22
Заключение	25
Список использованных источников.....	26

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие обозначения и сокращения:

БВБ – Большое Васюганское болото

дер. - деревня

Сорг – органический углерод

НИР – Научно-исследовательская работа

т.м. – торфяное месторождение

УБВ – уровень болотных вод

ГТК – гидротермический коэффициент

СКО – среднеквадратичное отклонение

МГЭИК- Межправительственная группа экспертов по изменению климата

ВМО - Всемирная Метеорологическая Организация

ЮНЕП - Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде

МОЦАО - модель общей циркуляции системы атмосфера-океан

СДСВ - Специальный доклад о сценариях выбросов

Введение

Одним из фундаментальных процессов биосферы является круговорот углерода. Существует мнение о возможной связи через парниковый эффект заметного повышения концентрации углекислого газа в атмосфере с глобальными изменениями климата. Быстрое увеличение содержания углекислого газа в атмосфере связывают с антропогенной деятельностью: сжигание топлива, уничтожение лесов, разрушение лесных подстилок, дернины лугов, степей, осушение болот, окисление гумуса пахотных почв - все эти процессы дают значительное поступление CO_2 в атмосферу.

Функции наземных экосистем в качестве источников или стоков углекислоты определяются балансом между двумя мощными биосферными процессами - фотосинтетической продукцией органического углерода (Сорг) и выделением CO_2 при дыхании и разложении органического вещества. Согласно исследованиям Г.А. Заварзина [1994], по содержанию устойчивого Сорг почвы на единицу площади экосистемы России располагаются в ряд: болота, степи, леса. Таким образом, болота играют существенную роль в круговороте углерода. Кроме того, болота единственные в наземной биоте экосистемы, которые обеспечивают постоянный сток в них углерода.

Осушение болот приводит к снижению уровня болотных вод, развитию водной и ветровой эрозии, активизации процессов микробиологической трансформации органического вещества торфа, что способствует сработке торфяной залежи.

Вместе с тем, работ по изучению углеродного баланса болотных экосистем сравнительно немного. Представляет большой интерес выявление структурных особенностей и степени трансформации болотных экосистем, расположенных в наиболее заболоченном регионе – Западной Сибири.

В настоящее время известно о важной климатообразующей роли больших болот, связанной с их влиянием на баланс углекислого газа, метана, тепла и влаги в системе. Болота влияют на водную, биологическую и гидрохимическую составляющие биосферы. Согласно мнению известных российских ученых Г.А. Заварзина и Н.П. Лаверова на долю болот в изменении содержания в атмосфере парниковых газов (углекислого газа и метана) приходится до 25 %. Поэтому изучение законов природы на примере таких комплексов имеет мировое значение.

В прошедшем веке рядом российских и зарубежных ученых были проведены различные исследования Большого Васюганского болота (БВБ). Несмотря на это, влияние БВБ, как устойчивого природного образования, на формирование окружающей среды и климатические изменения остается пока еще слабоизученным фактором. Количественных оценок этого влияния явно недостаточно, либо они сильно расходятся. Данный факт значительно ограничивает

возможности существующих моделей, описывающих климатические изменения, атмосферные процессы, взаимодействия в системе «земля–биосфера–атмосфера», затрудняет прогнозирование, сдерживает разработку программ по рациональному природопользованию, освоению и устойчивому развитию заболоченных территорий.

Территория такого болота как БВБ представляет собой огромную по размерам поверхность, с ровным рельефом и со специфическими теплофизическими свойствами торфогрунтов (большой теплоемкостью и малой теплопроводностью), которая существенно отличается от окружающей территории. Поверхность БВБ, соизмеримая по площади с размерами синоптических образований, формирует своеобразный по температурно-влажностным характеристикам «остров» в нижней тропосфере. Воздушные массы, проходящие над данной территорией, претерпевают значительную трансформацию.

С учетом вышесказанного становится ясно, что исследование БВБ – это, с одной стороны, весьма актуальная задача, представляющая большой научно-практический интерес, но, с другой стороны, и весьма сложная задача, требующая комплексного подхода.

Решение поставленной задачи возможно при проведении экспедиционных работ для наблюдения за метеорологическими характеристиками, режимами функционирования болотных экосистем на базовой площадке и осушенном пункте торфоболотных экосистем.

Новизна проводимого исследования заключается в том, что применительно к таким объектам как БВБ впервые интегрируется в одном проекте усилия представителей различных специальностей: биологов, метеорологов, физиков, специалистов по геоинформационным технологиям.

Результаты исследования пополняют существующие представления о закономерностях протекающих в болотной системе физических, биологических и химических процессов и составляют основу для прогнозирования путей развития Васюганской болотной системы, оказывающей существенное влияние на динамику развития Западно-Сибирского региона.

Получены новые научные знания о ходе развития, динамике и эволюции заболоченных ландшафтов, их влияния на климатические функции, прогноз эмиссии и стоков углекислого газа при изменениях климатических характеристик, расширена базовая сеть мониторинга природных процессов на заболоченной территории Западной Сибири.

Научный уровень исследования представляется достаточно значимым. Так, реализация одной из целей – надежная оценка интегральной аккумулирующей способности торфяных болот Западной Сибири по отношению к углекислому газу является важной для разработки модели глобального баланса углерода, от достоверности которой зависит достоверность оценки прогнозируемых изменений климата.

1. Наблюдаемые изменения климата и моделирование изменений

Многочисленные исследования свидетельствуют, что климат Земли на протяжении всей истории существования земной атмосферы претерпевал изменения, связанные с различными причинами природного характера (изменения массы и состава атмосферы, дрейф континентов, изменения элементов земной орбиты, и т.д.). История климата в 20-м веке характеризуется качественно новым явлением: фактором изменения климата становится деятельность человека. В 20 веке на Земном шаре произошло беспрецедентное, по крайней мере, за последнее тысячелетие потепление. Особо быстрый рост наблюдается с 70-х годов столетия. Такие значительные и быстрые изменения глобальной температуры, в свою очередь, могут привести к изменениям во всех компонентах климатической системы и оказать серьезное влияние на различные стороны жизни и деятельности человека на планете. Большинство климатологов в настоящее время связывают его с увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов (в первую очередь, двуокиси углерода) за счет человеческой деятельности (антропогенный фактор).

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) была учреждена в 1988 г. совместно Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) и Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП). Цель при этом была и остается в обеспечении оценки знаний обо всех аспектах изменения климата, включая вопрос о том, каким образом деятельность человека может вызывать такие изменения и может испытывать на себе их влияние. В третьем докладе МГЭИК «Изменение климата, 2001 г.: Научные аспекты» описывается современное состояние знаний о климатической системе, и даются оценки ее прогнозируемой эволюции в будущем и связанных с этим неопределенностей.

Глобальная средняя приземная температура (среднее значение температуры воздуха около поверхности суши и температуры поверхности моря) в период после 1861 г. повышалась. В XX столетии это повышение составило $0,6 \pm 0,2$ °C. Это значение примерно на $0,15$ °C больше, чем значение, оценочно определенное, за период до 1994 г., что связано с сравнительно высокими температурами в дополнительно учитываемые годы (1995—2000 гг.) и улучшением методов обработки данных [IPCC, 2001].

Выбросы парниковых газов и аэрозолей в результате деятельности человека продолжают изменять атмосферу таким образом, что это может, по предположениям, неблагоприятно повлиять на климат. Концентрация двуокиси углерода (CO_2) в атмосфере в период с 1750 г. возросла на 31%. Ни в последние 420 000 лет, ни, вероятно, в течение последних 20 млн лет концентрация CO_2 не была столь высокой, как сегодня. Наблюдающиеся на сегодняшний день темпы ее увеличения беспрецедентны, по меньшей мере, в последние 20 000 лет.

Земля поглощает излучение, идущее от Солнца, главным образом своей поверхностью. Эта энергия затем перераспределяется за счет циркуляции в атмосфере и океане и отражается обратно в космос в виде более длинноволнового (инфракрасного) излучения. Если рассматривать среднегодовые значения и планету Земля в целом, то энергия входящего солнечного излучения примерно уравнивается исходящим земным излучением. Любой фактор, который изменяет излучение, поступающее от Солнца и потерянное в космосе, или который изменяет перераспределение энергии внутри атмосферы и между атмосферой, сушей и океанами, может повлиять на климат. Повышение концентраций парниковых газов ведет к снижению эффективности, с которой поверхность Земли излучает в космос. Большая часть исходящего от поверхности Земли излучения поглощается атмосферой и повторно излучается на более значительных высотах и при более низких температурах. В результате это ведет к положительному радиационному воздействию, которое нагревает нижние слои атмосферы и поверхность Земли. Поскольку в космос уходит меньше тепла, это вызывает возрастающий парниковый эффект — увеличение эффекта, который существовал в атмосфере Земли в течение миллиардов лет в результате присутствия естественно возникающих парниковых газов: водяного пара, двуокиси углерода, озона, метана и закиси азота.

Любые вызванные деятельностью человека изменения в климате будут накладываться на фоновые естественные климатические колебания, которые происходят в большом диапазоне временных и пространственных масштабов. Изменчивость климата может быть связана с естественными изменениями в воздействиях на климатическую систему, например, колебаниями в силе приходящего солнечного излучения и изменениями в концентрациях аэрозолей, возникающих в результате извержений вулканов. Естественные колебания климата могут происходить также и при отсутствии изменений во внешних воздействиях, всего лишь как результат сложных взаимодействий между компонентами климатической системы, например между атмосферой и океаном.

Для получения подробных оценок обратных связей и региональных характеристик необходимы сложные, физически обоснованные модели климата. Такие модели пока еще не могут охватить все аспекты климата, а также им присущи конкретные неопределенности. Тем не менее, доверие к способности этих моделей обеспечивать полезные прогнозы будущего климата возросло вследствие продемонстрированной эффективности этих моделей в определенном диапазоне пространственных и временных масштабов.

Всеобъемлющие климатические модели строятся по физическим законам, представленным математическими уравнениями, которые решаются с использованием трехмерной сетки над глобусом. Для имитации климата основные компоненты климатической системы должны быть представлены в подмоделях (атмосфера, океан, земная поверхность, криосфера и биосфера)

наряду с процессами, которые происходят внутри и между ними. Модели глобального климата, в которых компоненты атмосферы и океана соединены вместе, известны в качестве моделей общей циркуляции системы атмосфера-океан (МОЦАО).

С помощью моделей разработаны прогнозы концентраций парниковых газов и аэрозолей в атмосфере и, соответственно, прогнозы будущего климата на основе сценариев выбросов, представленных в Специальном докладе о сценариях выбросов (СДСВ) МГЭИК.

1.1. Сценарии выбросов парниковых газов

Сценарий A1 содержит описание будущего мира, характеризуемого очень быстрым экономическим ростом, глобальным населением, показатели которого достигают пиковых значений в середине века с последующим уменьшением, а также быстрым внедрением новых и более эффективных технологий.

Сценарий A2 описывает очень неоднородный мир. Основополагающей темой является самообеспечение и сохранение местной самобытности. Показатели рождаемости в разных регионах очень медленно сближаются, результатом чего является постоянный рост общей численности населения.

Сценарий B1 содержит описание движущегося в одном направлении мира с тем же самым глобальным населением, которое достигает максимальной численности в середине века, а затем уменьшается, как и в сценарии A1, однако при быстрых изменениях в экономических структурах в направлении сервисной и информационной экономики с уменьшением материальной интенсивности и внедрением чистых и ресурсосберегающих технологий. Главное внимание уделяется глобальным решениям в интересах экономической, социальной и экологической устойчивости.

Сценарий B2 содержит описание мира, в котором главное внимание уделяется локальным решениям проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости. Это мир с постоянно увеличивающимся глобальным населением при темпах ниже, чем в A2, промежуточными уровнями экономического развития и менее быстрыми и более разнообразными технологическими изменениями по сравнению с сюжетными линиями B1 и A1.

1.2. Изменение климата в XXI столетии

Результаты вычислительных экспериментов демонстрируют пространственную неоднородность потепления, преимущественно с более высокими скоростями роста над континентами; над океанами потепление слабее, в некоторых областях океана ряд моделей указывает даже на возможное похолодание. Наиболее сильный рост среднегодовой температуры ожидается в высоких широтах Северного полушария. Оценки потепления для разных сезонов

показывают, что в целом оно сильнее в северном полушарии. Для большинства регионов суши ожидается потепление; зимой в северных регионах рост температуры быстрее, чем в среднем по Земному шару; летом более быстрый рост ожидается в Средиземноморском регионе, в Центральной Азии и на севере континента.

Согласно моделям круговорота углерода к 2010 г. концентрации CO_2 в атмосфере составят от 540 до 970 ppm для иллюстративных сценариев (что от 90 до 250 % выше концентрации в 280 ppm в 1750 г.) (рисунок 1).

В этих прогнозах учтены обратные связи между климатом и сушей и океанами. Глобальная средняя приземная температура, согласно прогнозам, повысится в период с 1990 г. по 2100 г. на 1.4— 5.8 °C (рисунок 1). Эти результаты, полученные на основе ряда моделей климата, соответствуют всему диапазону сценариев, представленных в СДСВ.

В таблицах 1,2 приведены прогнозы изменения содержания CO_2 в атмосфере и глобальной температуры при различных сценариях изменения климата.

Таблица 1 - Изменение содержания CO_2 в атмосфере (ppm)

Год	A1	A2	B1	B2
1970	325	325	325	325
1980	337	337	337	337
1990	353	353	353	353
2000	369	369	369	369
2010	389	390	388	388
2020	417	417	412	408
2030	455	451	437	429
2040	504	490	463	453
2050	567	532	488	478
2060	638	580	509	504
2070	716	635	525	531
2080	799	698	537	559
2090	885	771	545	589
2100	970	856	549	621

Таблица 2 - Аномалии (отклонение от нормы за 1961-1990 гг.) глобальной температуры (°C) при различных сценариях эмиссии

Год	A1	A2	B1	B2
с 1750 по 1990	0.33	0.33	0.33	0.33
1990	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	0.16	0.16	0.16	0.16
2010	0.32	0.35	0.34	0.39

2020	0.55	0.50	0.55	0.66
2030	0.85	0.73	0.77	0.93
2040	1.27	1.06	0.98	1.18
2050	1.86	1.42	1.21	1.44
2060	2.50	1.85	1.44	1.69
2070	3.10	2.33	1.63	1.94
2080	3.64	2.81	1.79	2.20
2090	4.09	3.29	1.91	2.44
2100	4.49	3.79	1.98	2.69

Глобальный климат в XXI столетии

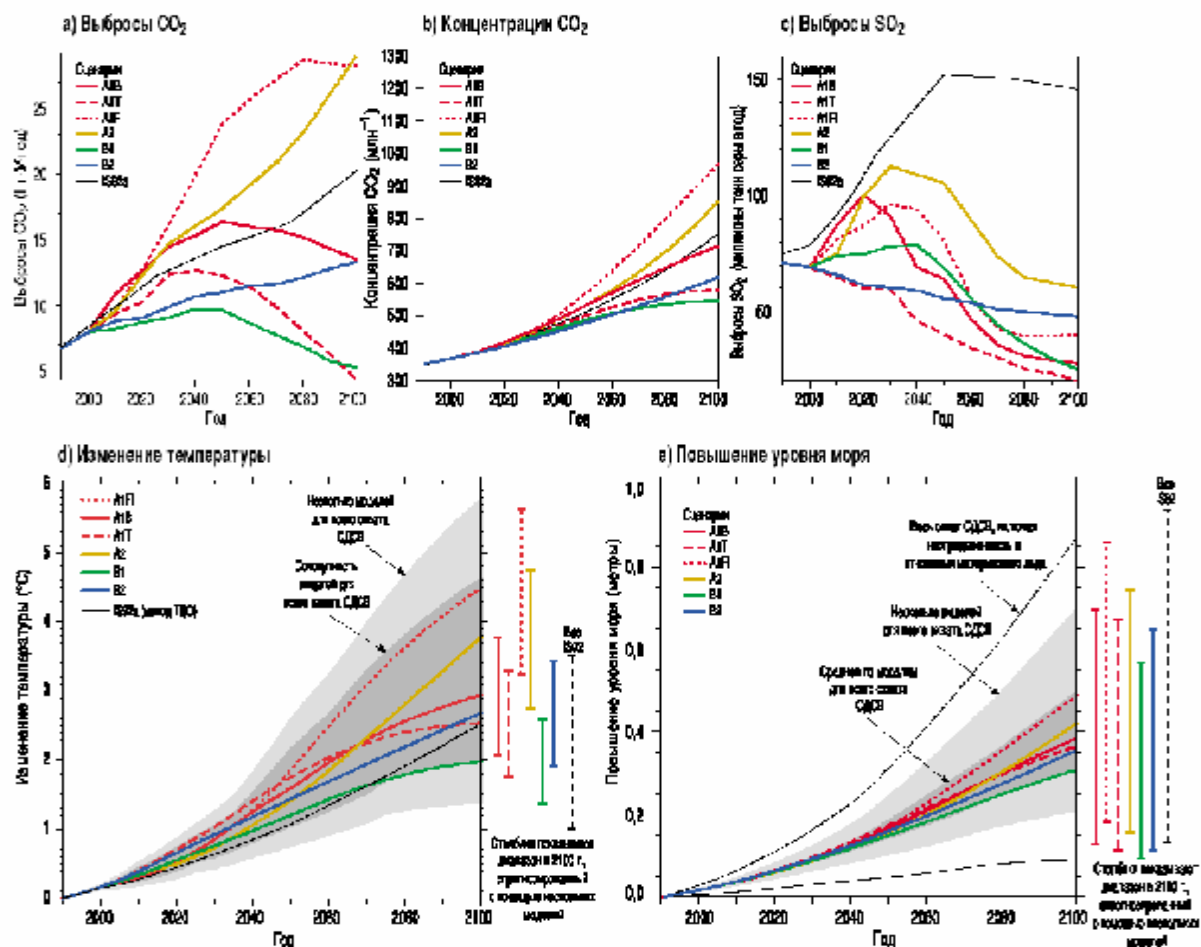


Рисунок 1 - Глобальный климат в XXI столетии будет зависеть от естественных изменений и от реакции климатической системы на деятельность человека [IPCC, 2001]

1.3. Прогноз изменений климата Западной Сибири

Наблюдающееся в 20 веке глобальное потепление проявляется во всех регионах России. От конца 19 к концу 20 века потепление для территории России в целом составило около $+1^{\circ}\text{C}/100$ лет. После 1970 г. тренд потепления составил около $+4^{\circ}\text{C}/100$ лет. Из сезонов потепление более заметно зимой и весной и почти не наблюдается осенью. Потепление более выражено к востоку от Урала [Груза, 2003].

Прогноз изменения климата в XXI столетии на территории Западной Сибири был взят из данных расчетов по МОЦАО HadCM3 выполненных в Центре Хедли, (Великобритания). Модель имеет пространственно разрешение 2.5° по долготе и 3.75° по широте. Преимущество модели HadCM3 [Pope, 2000] заключается в том, что модель не нуждается в подгоночных выравниваниях потоков тепла и пресной воды у поверхности океана. Согласно данным моделирования, к 2020 году среднелетняя температура воздуха на юге Западной Сибири, в узле пространственной сетки, находящемся над исследуемой территорией, возрастет на $1.7\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$, по сравнению с средними значениями за 1961-1990 гг. К концу XXI столетия температура увеличится на $4.7 - 8.7^{\circ}\text{C}$ в зависимости от выбранного сценария эмиссии парниковых газов (таблица 3).

Таблица 3 - Аномалии (отклонение от нормы за 1961-1990 гг.) температуры воздуха (T , $^{\circ}\text{C}$) и концентрации CO_2 в воздухе (ppm) для июня-августа Западной Сибири по данным модели HadCM3

		A1	A2	B1	B2
Концентрация CO_2 , ppm	2020	79	79	74	70
	2050	229	194	150	140
	2080	461	360	199	221
Температура, $^{\circ}\text{C}$	2020	1.74	1.74	2.49	1.74
	2050	4.74	3.99	3.99	3.24
	2080	8.67	7.17	5.3	4.74

2. Модель круговорота углерода болотных экосистем

Всеобъемлющие МОЦАО являются весьма сложными и для их прогона требуются значительные компьютерные мощности. Для исследования различных сценариев выбросов парниковых газов и последствий допущений или аппроксимаций в параметрах в модели более тщательным образом также широко используются более простые модели. В своей совокупности простые, промежуточные и всеобъемлющие модели образуют «иерархию климатических моделей», все из которых являются необходимыми для изучения выборов, сделанных в параметризациях, и оценки четкости климатических изменений.

Основная планетарная функция наземных экосистем заключается в формировании и регулировании потоков углерода в биосфере, обеспечении непрерывной работы углеродного цикла. Круговорот углерода в болотной экосистеме можно представить схематически в виде классической системы блоков и потоков (Рис.2.). Блоками являются: содержание углерода в атмосфере (A), запасы углерода в живой фитомассе (L) и мортмассе (M). В качестве потоков рассматриваются: нетто поступление углерода из атмосферы в живую фитомассу (разница между усвоением углерода из атмосферы в процессе фотосинтеза (Ph) и дыханием растений (R_L)); переход углерода живой фитомассы в мортмассу (отмирание) (D), возврат углерода в атмосферу в виде CO_2 и CH_4 в результате эмиссии газов с поверхности торфяной залежи (R_D). Имеются сведения о значительной роли процессов реассимиляции (reA) в углеродном балансе болотной экосистемы [Naumov, 2004]. Однако, в связи с трудностью количественных оценок этой составляющей, в предложенной модели она не учитывается. Некоторый вклад в формирование баланса вносит выход углерода за пределы экосистемы с болотными водами (X).

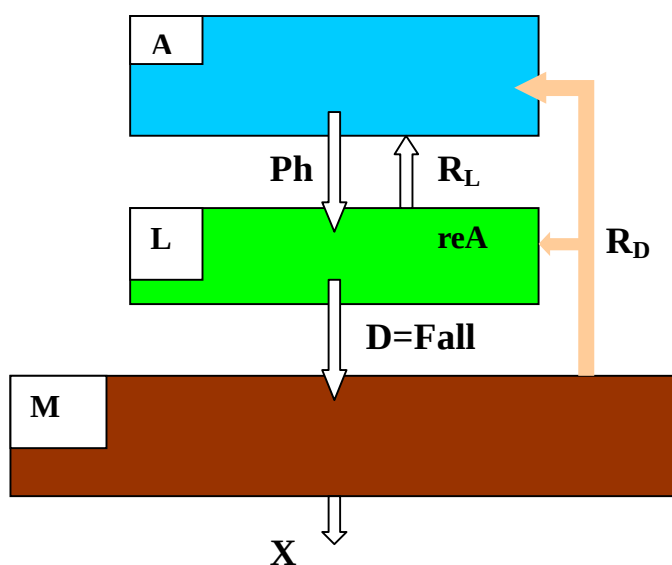


Рисунок 2 - Блок-схема углеродного цикла наземной экосистемы

В рамках локальной модели считаем, что атмосферная концентрация углерода меняется независимо от потоков углерода между пулами живого и мертвого органического вещества. Для изучения долговременных изменений в системе при прогнозируемых изменениях климата будем рассматривать годовые величины потоков без учета сезонной динамики. Будем считать, что продуктивность системы не зависит от количества питательных элементов в почве, а определяется только климатическими факторами. Суммарное увеличение живой фитомассы (чистая первичная продукция - NPP) будет складываться из прироста надземной части кустарничков, надземной

части трав, зеленой части мхов и живых подземных частей кустарничков и трав, причем в качестве источника углерода, усваиваемого растениями в процессе фотосинтеза, выступает как атмосфера, так и торфяная залежь.

$$NPP = Ph - R_L + reA, \quad reA = a R_D,$$

a - доля потока углерода выделяющегося в результате минерализации мортмассы реассимилируемая растительностью.

Общий поток углерода из живой растительности в мертвую будет складываться из отмирания живых частей кустарничков, трав, мхов, корней трав и кустарничков. В течение года отмирает часть растительности выросшая за вегетационный период, а оставшаяся часть формирует долговременное увеличение запасов живой фитомассы.

$$D = g \cdot NPP$$

g - коэффициент, характеризующий отмирание фитомассы. Величина коэффициента g должна быть близка к 1, поскольку в противном случае масса живой растительности будет стремительно увеличиваться до неограниченных величин.

Изменение содержания углерода в живой массе растений и мортмассе будет описываться системой дифференциальных уравнений, которые выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} dLive/dt &= NPP - D = (1-g) \cdot NPP, \\ dMort/dt &= l \cdot D - R_D - X = l \cdot g \cdot D - R_D - X \end{aligned} \quad (1)$$

NPP – годовая первичная продукция надземного и подземного ярусов, которая связана с общими запасами фитомассы линейной зависимостью $NPP = NPP_0 \cdot L$. D – поток углерода связанный с ежегодным отмиранием фитомассы, R_D – минерализация мортмассы, X - сток с болотными водами.

Запасы углерода в фитомассе, верхнем 30 см слое мортмассы и величина годовой чистой первичной продукции определялись в ходе выполнения полевых работ в 1999-2006 гг.. Эмиссия углерода из торфяной залежи измерялась камерным методом. Некоторая неопределенность в вычислении потока R_D вызвана отсутствием измерений эмиссионных потоков CO_2 и CH_4 в зимнее время. Согласно литературным данным [Pannikov, 2000] эмиссия в холодное время года может составлять до 11% от суммарного годового потока.

Будем рассматривать отношение содержания углерода в фитомассе и мортмассе к запасам фитомассы в начальный момент: $M = Mort / L_0$, $L = Live / L_0$, де L_0 – содержание углерода в живой фитомассе, включая надземную и подземную части в начальный (современный) момент. Перепишем уравнение (1) в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} dL/dt &= (1-g) \cdot p \cdot L, & p &= NPP_0 / L_0, \\ dM/dt &= g \cdot p \cdot L - b \cdot f - x, & f &= R_D / L_0, \quad x = X / L_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Зависимость годичной продукции болотной растительности от температуры и количества CO_2 в воздухе выражается следующим соотношением [Тарко, 2005]:

$$p = p_0(1 + p_1\Delta T)(1 + p_2\Delta C),, \quad (3)$$

где C – концентрация углекислого газа в атмосфере, T – температура воздуха, p_0 – коэффициент связанный с продуктивностью растительности при современных значениях температуры и концентрации CO_2 , p_1 , p_2 – коэффициенты определяющие увеличение продуктивности растительности при росте температуры и концентрации CO_2 . Согласно литературным данным [Тарко, 2005], годичная продукция при увеличении температуры на 1°C может увеличиться на 5 - 18%. Коэффициент p_1 может принимать значения от 0,05 до 0,18, а коэффициент $p_2 > 3 \cdot 10^{-4}$.

Скорость эмиссии углерода из залежи зададим соотношением:

$$f(T) = f_0(1 + f_1\Delta T + f_2\Delta C), \quad (4)$$

где f_1 – коэффициент, связанный с изменением скорости эмиссии при увеличении температуры, который может меняться в пределах 0,11-0,3, f_2 – коэффициент, описывающий изменение величины эмиссии при увеличении концентрации CO_2 .

3. Экспериментальные исследования круговорота углерода в болотных экосистемах

3.1. Методы исследования

Измерение эмиссии углекислого газа проводилось камерным методом, с использованием газоанализатора ОПТОГАЗ 500.4. Методика определения эмиссии углекислого газа заключается в следующем: на поверхности торфяной залежи устанавливается пластиковая камера, основание которой врезается в почву, торф вокруг камеры уплотняется для изоляции от атмосферного воздуха. Измеряется содержание газа в камере сразу после ее установки. Выдерживается экспозиция 30 мин, затем через шланг отбирается проба воздуха и анализируется на газоанализаторе. Полученные данные по объемной концентрации CO_2 переводятся в концентрацию CO_2 выраженную в кг/м^3 по формуле:

$$C = 0.01 \cdot P \cdot X \cdot M / R \cdot T,$$

где C – концентрация CO_2 , кг/м^3 ; P – атмосферное давление, Па; X – концентрация CO_2 , %; M – молярная масса газа, кг/моль ; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль/К ; T – абсолютная температура, К. Параллельно проводится контрольное измерение концентрации CO_2 в атмосфере. В дальнейшем рассчитывается величина потока (скорость эмиссии) CO_2 по соотношению:

$$F=(C-C_0)*V/(t*S),$$

где F – скорость эмиссии, мг/м²*час; C (мг/м³) – концентрация CO₂ в камере после времени экспозиции - t (час), C₀ – исходная концентрация газа в камере, S (м²) и V(м³) – соответственно площадь и объем камеры.

Запас биомассы определялся в период максимального ее развития, конец июля - начало августа. Надземную продукцию определяли укосным методом (без учета древесного яруса), подземную - методом монолитов Шалыта (1960). На каждом исследуемом БГЦ выбирались учетные площадки размером 50х50 см, с которых срезалась растительность на уровне поверхности мха. Срезанные растения разбирались по фракциям: живая фитомасса (однолетняя и многолетняя фотосинтезирующая фитомасса, однолетние побеги, многолетняя нефотосинтезирующая фитомасса) и мертвая фитомасса - мортмасса (ветошь, подстилка), затем высушивались до воздушно-сухого состояния и взвешивались. Определение подземной биомассы проводилось на тех же площадках, что и определение надземной биомассы. Для этого из стенки почвенного разреза отбирались монолиты размером 10х10х10 см до глубины 20 см. Из отобранных монолитов отбирались живые корни. Моховой очес и корни также высушивались до воздушно-сухого веса и взвешивались. На основе данных по ежемесячным запасам фитомассы рассчитывалась чистая первичная продукция наземного покрова как сумма приростов всех видов растений на единице площади за год.

3.2. Базовые площадки

Объектами исследования являются болотные экосистемы Большого Васюганского болота, расположенные на геофизическом стационаре «Васюганье» ИМКЭС СО РАН. Стационар находится в северо-восточной части БВБ в окрестности дер. Полынянка Бакcharского района Томской области. В пределах водосборной площади р. Ключ параллельно линиям стока заложен ландшафтный профиль, который пересекает следующие основные виды болотных фитоценозов: высокий рям, низкий рям, грядово-мочажинный комплекс и осоково-сфагновую топь. Протяженность ландшафтного профиля от высокого рьяма до осоково-сфагновой топи составляет 800 м.

Высокий рям представляет собой окраину верхового водораздельного массива, шириной 20-30 м. Микрорельеф представлен моховыми подушками и приствольными буграми высотой до 50 см, занимающими около 50% поверхности. Растительность высокого рьяма принадлежит сосново-кустарничково-осоково-сфагновой ассоциации. Древесный ярус состоит из сосны (*Pinus silvestris* L.) с единичными растениями *Pinus sybirica* Mayr. и *Betula pubescens* Ehrh. Средняя высота древостоя 18 м, средний диаметр стволов около 20 см. Проективное покрытие древесного

яруса - 90%. Подрост представлен в основном сосной и единичными экземплярами кедра и березы, высотой 5-10 м, с диаметром стволов 5-10 см. Кустарничковый ярус развит пышно, кустарники достигают высоты 50 см, проективное покрытие (п.п.) - 90%. Доминантами являются *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., довольно обильны брусника (*Vaccinium vitis-idea* L.) и клюква (*Oxycoccus microcarpus*). В травяном покрове встречается *Carex globularis* L., *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L. Общее п.п. травяного яруса - 15 %. Доминантами мохового покрова (96%) являются сфагновые мхи (*Sphagnum angustifolium*). На приствольных повышениях встречается небольшое количество зеленых мхов, на стволах деревьев и кустарников присутствуют лишайники.

Строение торфяной залежи ландшафтного профиля представлено на рисунке ///. Торфяная залежь высокого рья имеет мощность 1 м. В основании залежи лежит слой низинного осокового торфа высокой степени разложения, затем идут переходные виды торфов: древесно-сфагновый и древесно-травяной. Верхний слой представлен сосново-пушицевым торфом.

Высокий рям по направлению к центру болота переходит в низкий. Микрорельеф низкого рья волнистый из-за большого количества больших моховых подушек высотой около 30 см, диаметром до 3 м.

Растительность низкого рья также относится к сосново-кустарничково-сфагновой ассоциации с низкой сосной. Угнетенный древесный ярус представлен *Pinus silvestris* f. *Litwinowii*. Средняя высота древостоя – 2-3 м, средний диаметр стволов 3 см. П.п. древесного яруса 30%. Кустарничковый ярус развит обильно на микроповышениях, общее проективное покрытие - 60-70%. Ярус сложен *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L. и *Vaccinium uliginosum* L. На вершинах кочек растет клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus* Turcz.). Травяной ярус имеет п.п. менее 5% и представлен куртинами *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L. и *Drosera rotundifolia* L. В моховом покрове на повышениях доминирует *Sphagnum fuscum* Klinggr. (95%), кроме того, на межкочковых понижениях встречаются *Sph. angustifolium* C. Jens. и *Sph. magellanicum* Brid.

Торфяная залежь низкого рья достигает мощности 2 м и имеет смешанный топяной вид строения. В основании залежи лежит слой низинного торфа, который перекрывает мощный (1,5 м) слой верхового торфа двух видов - магелланикум со средней степенью разложения и фускум с низкой степенью разложения. На контакте низинного и верхового пластов располагается тонкая прослойка переходного древесно-сфагнового торфа.

При продвижении к центру болота за сосново-кустарничково-сфагновыми ассоциациями следует осоково-сфагновая.

Осоково-сфагновая топь занимает центральную часть болотного массива. Микрорельеф представлен незначительными микроповышениями высотой до 20 см. Растительность открытой

топи относится к кустарничково-травяно-сфагновой ассоциации. Кустарничковый ярус (*Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L., *Oxycoccus microcarpus* Turcz.) высотой - 10 см развит слабо, расположен по положительным элементам микрорельефа. Проективное покрытие кустарничкового яруса - 20%. В травяном ярусе (п.п. - 40%) наиболее обильны *Eriophorum vaginatum* L. и *Carex rostrata* Stokes. Моховой ярус представлен различными видами сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum* Klinggr., *Sph. angustifolium* C. Jens. и *Sph. magellanicum* Brid.) формирующих микрорельеф. Степень покрытия моховым ярусом составляет 100%.

Торфяная залежь осоково-сфагновой топи достигает мощности 2,5 м. В основании залежи находится мощный пласт низинного торфа осокового и древесно-осокового вида (2 м). Верхний слой залежи (1 м) сложен верховыми фускум и сфагново-мочажинным торфами слабой степени разложения.

3.3. Биологическая продуктивность

Одним из основных показателей биологической продуктивности является запас биомассы. Исследование запасов биомассы показало, что максимальные запасы биомассы характерны для высокого рьяма, затем следуют низкий рям и открытая топь. Запасы биомассы состоят из запасов живого растительного вещества - фитомассы и мертвого растительного вещества – мортмассы.

Количество фитомассы определяется характером растительного покрова. В среднем запасы живой фитомассы не значительно отличаются на разных БГЦ изменяясь от 592 до 437 гС/м² в ряду высокий рям – низкий рям - открытая топь. Следует отметить, что максимальный вклад в запасы биомассы на исследуемых БГЦ вносит мортмасса, которая составляет около 70 % от общего запаса биомассы.

Чистая первичная продукция (NPP) является показателем накопления углерода в виде растительного вещества. Результаты исследования показали, что, несмотря на существенные различия в составе растительного покрова, в среднем олиготрофные болотные экосистемы имеют одинаковые величины на высоком, низком рьяме и открытой топи - 320, 286, 260 гС/м² в год соответственно (без учета древесного яруса). Основной вклад в продукцию на исследуемых олиготрофных болотных БГЦ вносят корни растений (53-59%) и сфагновые мхи (22-30%). Доля надземной части кустарничков и трав в продукции составляет около 20%. Динамика продуктивности за исследуемые годы характеризуется спадом продукции на всех БГЦ к 2002 году и максимумом в 2003 году.

Анализ, проведенный для оценки влияния погодных условий на биологическую продуктивность исследуемых фитоценозов, показал, что наиболее подвержена влиянию погодных условий (ГТК) продукция низкого рьяма ($r = -0,74$). Анализ влияния температуры и осадков на NPP показал, что продукция на высоком рьяме и открытой топи зависит от температуры воздуха в

течение вегетационного периода, на низком рьяе температура играет незначительную роль, в то время как количество осадков имеет сильное влияние на продуктивность. Корреляционный анализ между NPP и уровнем болотных вод показал, что УБВ оказывает влияние на продуктивность олиготрофного болота.

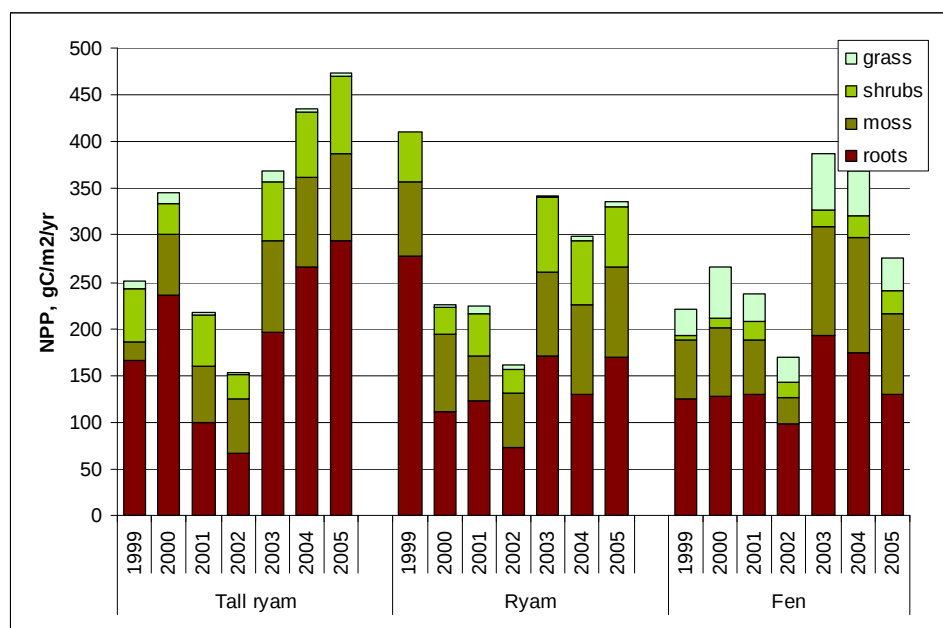


Рисунок 3 - Чистая первичная продукция на ключевых участках за 1999-2005 гг.

3.4. Эмиссия CO₂

Исследование эмиссии CO₂ на ландшафтном профиле показало ее зависимость от типов фитоценоза. Наблюдается заметное снижение эмиссии CO₂ от окраины болотного массива (высокого рья) к его центральной части (осоково-сфагновой топи), что связывается с различными ландшафтными условиями (Табл. 4). В отдельные годы потоки CO₂ в разных фитоценозах могут различаться более чем в 2 раза (Рис. 4). Исследуемые фитоценозы различаются по гидрологическим условиям, для каждого фитоценоза характерны свои уровни болотных вод, влажность торфа и соответственно по-разному прогревается деятельный слой, что вместе с характером растительности сказывается на величине эмиссии.

Таблица 4 - Эмиссия CO₂ на разных фитоценозах, среднее за 1999-2006 гг.

	Высокий рям	Рям	Топь
Эмиссия CO ₂ , г/м ² год	185±65	135 ±44	111 ±22

Анализ влияния гидрологических свойств торфяной залежи на интенсивность выделения CO₂ показал наличие корреляционной связи для потоков CO₂ с уровнем болотных вод

(коэффициент корреляции $r=-0.67$), а также с влажностью и температурой торфяной залежи ($r=-0.41$ и $r=0.65$ соответственно). Однако учитывая, что гидрологические условия определяются в основном погодными условиями, а температура поверхности торфяной залежи тесно связана с температурой воздуха ($r=0.83$), был проведен более подробный анализ влияния метеорологических параметров на эмиссию CO_2 . Анализ показал наличие зависимости эмиссии CO_2 от температуры воздуха ($r=0.59$), влажности воздуха ($r=-0.40$), атмосферного давления ($r=-0.53$) и содержания CO_2 в приземном слое воздуха.

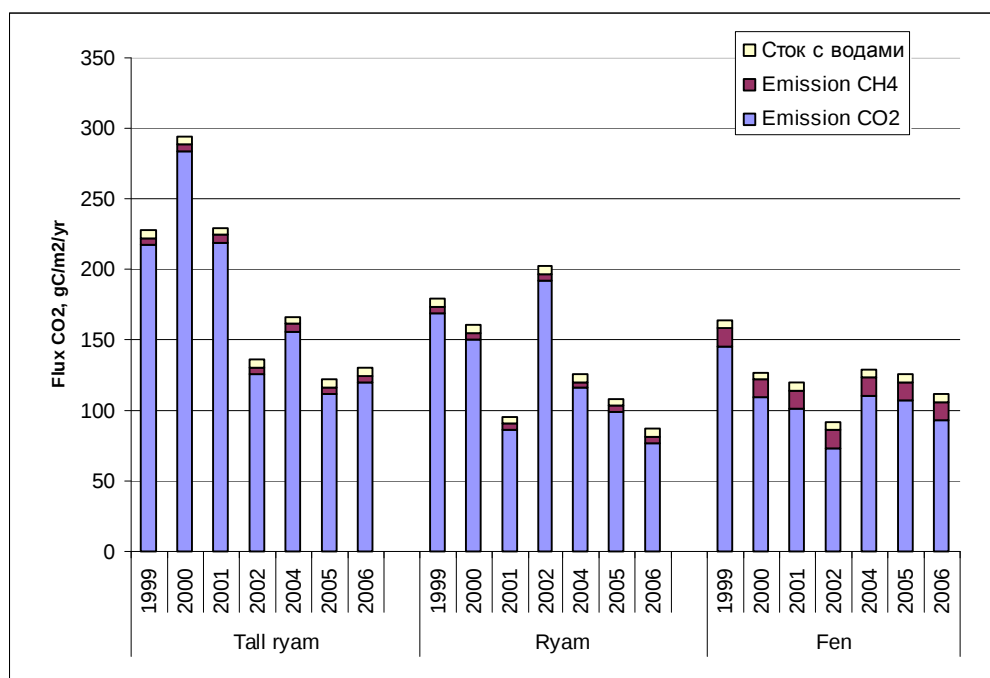


Рисунок 4 - Потоки эмиссии углерода на разных болотных фитоценозах.

Общий поток углерода из торфоболотных экосистем состоит из эмиссии углекислого газа, эмиссии метана с поверхности торфяной залежи и выноса углерода с болотными водами. Эмиссия метана составляет от 5% (в высоком рьяме) до 13% (на топи) от эмиссии CO_2 . Вынос углерода с болотными водами также не высок и составляет в среднем около 6 процентов от общей эмиссии (Рис. 4).

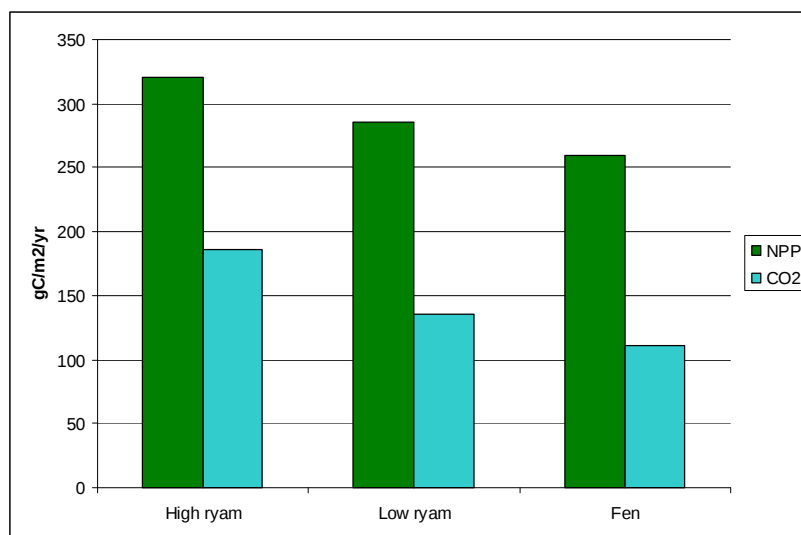


Рисунок 5 - Баланс углерода в разных болотных фитоценозах.

Сравнение биологической продуктивности и эмиссии углерода с поверхности торфяной залежи показало, что аккумуляция углерода в процессе фотосинтеза (NPP) в 2 раза превышает эмиссию углекислого газа с поверхности торфяной залежи всех исследуемых биогеоценозов (Рис. 5.).

Таким образом, в настоящее время на территории исследуемого болотного массива преобладает процесс депонирования углерода в виде органического вещества растений и торфа.

4. Прогноз развития торфоболотных экосистем при различных сценариях изменения климата

Для анализа влияния изменений климата на процесс аккумуляции углерода в торфе были выполнены расчеты по модели (2), с учетом соотношений (3) - (4), учитывающих зависимости основных потоков углерода от климатических характеристик. Концентрация углекислого газа в атмосфере задавалась исходя из известных сценариев изменения климата [IPCC, 2001]. Прогноз изменения климата в XXI столетии на территории Западной Сибири был взят из данных расчетов по МОЦАО HadCM3 выполненных в Центре Хедли, (Великобритания) [Pore, 2000]. Решение дифференциального уравнения (1) проводилось численно с использованием явного метода интегрирования. Шаг по времени в модели составлял один год.

Средние за 1999-2006 гг. запасы и потоки углерода в различных экосистемах на ключевых участках, являющиеся исходными данными для моделирования, приведены в таблице 5. Запасы фитомассы складываются из суммарной массы углерода содержащегося в живых частях кустарничков, трав, мхов, лишайников, корней трав и кустарничков. Мортмасса складывается из мохового оочеса и торфа в слое 30 см толщиной. NPP является суммарной величиной надземной и

подземной первичной продукции. Эмиссионный поток с поверхности торфяной залежи определялся камерным методом и включает поток углерода в форме CO_2 и CH_4 .

Таблица 5 - Параметры модели для различных экосистем

	Высокий рям	Рям	Топь
Фитомасса, гС/м ²	591.8	539.5	436.9
Мортмасса, гС/м ²	2036	1940	1290
NPP, гС/м ² /год	320.4	285.8	259.8
Эмиссия, гС/м ² /год	185.4	135.2	111.2
Сток, гС/м ² /год *	15.0	15.0	15.0
Безразмерные параметры			
M0/L0	3.44	3.60	2.95
P	0.54	0.53	0.59
F	0.31	0.25	0.25
X	0.03	0.03	0.03

* - оценка по литературным данным, нет измерений

Варьирование начальных значений величины эмиссии и продуктивности показывает, что в зависимости от соотношения между параметрами f и p может происходить как рост, так и деградация торфяной залежи (см. рис. 6). В рамках используемой модели масса живой растительности будет всегда увеличиваться.

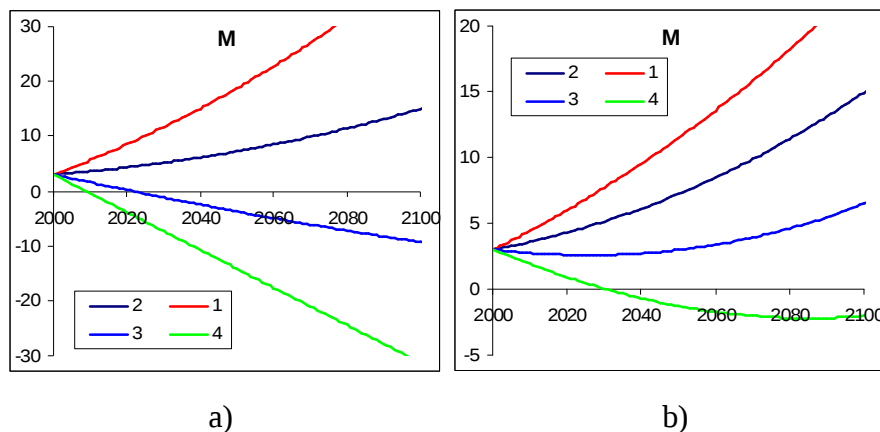


Рисунок 6 - Изменение содержания углерода в пуле мертвого вещества в XXI веке.

а) $f = 0.5$, $x = 0.02$, Варьирование величины продуктивности $p = 0.7$ (1), 0.5 (2), 0.3 (3), 0.1 (4).

б) $p = 0.5$, $x = 0.02$, Варьирование эмиссии $f = 0.4$ (1), 0.5 (2), 0.6 (3), 0.7 (4).

На основании анализа литературных данных и собственных исследований нами были определены следующие параметры, характеризующие чувствительность моделируемых процессов к изменениям климата: $f_1 = 0.035$, $f_2 = -0.002$, $p_1 = 0.01$, $p_2 = 0.002$, $\gamma_0 = 0.99$. Модельный расчет, в котором климат (а именно температура и содержание CO_2 в атмосфере) считался неизменным в течение всего XXI столетия показал, происходит рост запасов мортмассы для всех исследованных

экосистем (Рис.7). Наиболее быстрыми темпами увеличиваются запасы углерода в живой растительности и мортмассе в экосистеме топи.

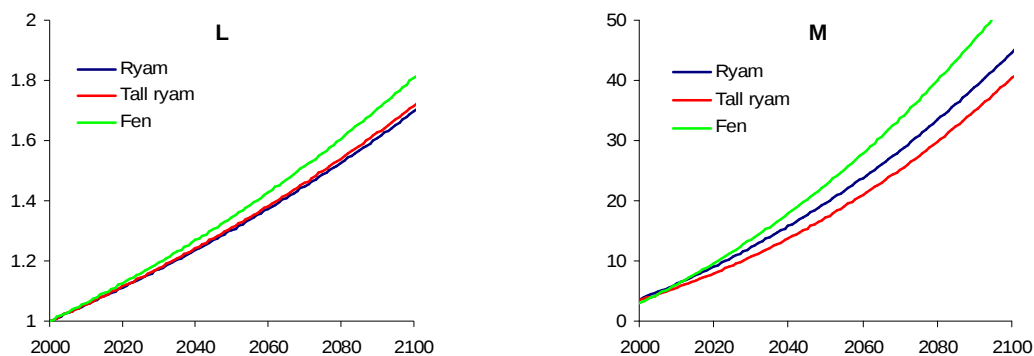


Рисунок 7 - Динамика фитомассы и мортмассы для экосистем южной тайги при неизменном климате.

Исследование модели показало, что при учете изменений климата, в соответствии с различными сценариями, происходит нелинейное изменение запасов фитомассы и мортмассы. (Рис.8.) Увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере и сопутствующее ему потепление климата вызывают рост скорости накопления углерода в торфяной залежи. Наиболее сильно этот эффект проявляется к концу века. При более сильном росте атмосферного CO_2 и температуры (сценарий A1) рост углерода в мортмассе происходит быстрее, чем при «мягких» сценариях эмиссии (B1, B2). В каждой экосистеме имеются свои особенности развития пула мортмассы

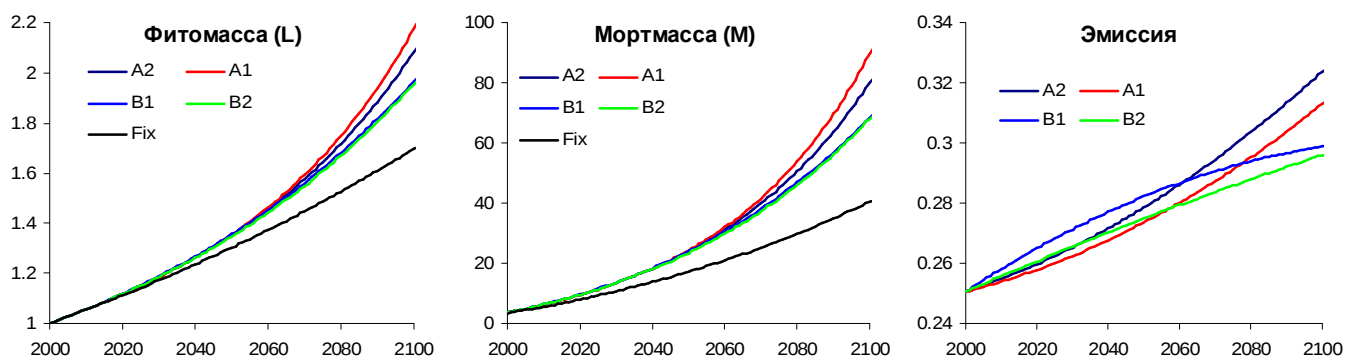


Рисунок 8 - Изменение запасов фитомассы, мортмассы и скорости эмиссии при различных сценариях изменения климата для экосистемы ряма.

В таблице 6 приведено изменение темпов накопления углерода в различных экосистемах относительно современных темпов аккумуляции, которое произойдет к концу столетия. К 2100 году в южной тайге скорость роста пула мортмассы возрастет на 52-114 % по сравнению с

современными темпами. Наибольшие изменения в темпах аккумуляции углерода наблюдаются в экосистеме высокого рьяма.

Таблица 6 - Влияние изменений климата на темпы накопления углерода торфяной залежью. Приведено (в процентах) изменение темпов аккумуляции относительно современных.

	Высокий рям	Рям	Топь
Фитомасса			
A1	29.0	28.3	32.3
A2	23.4	22.9	26.0
B1	16.2	15.8	17.9
B2	15.7	15.3	17.4
..Мортмасса			
A1	114.0	100.7	100.9
A2	91.6	79.1	81.0
B1	60.8	52.9	54.0
B2	60.5	52.4	53.4

Согласно модельным расчетам, в зависимости от типа экосистемы и выбранного сценария изменения скорость депонирования углерода растительностью к 2100 году возрастет на $22\pm 6\%$, а скорость накопления в торфяной залежи увеличиться на $75\pm 22\%$ по сравнению с современными темпами накопления.

Заключение

Разработана локальная модель углеродного цикла болотной экосистемы, учитывающая накопление углерода в живой растительности и торфяной залежи, и выполнен прогноз развития торфоболотных экосистем южной тайги при различных сценариях изменения климата.

В модели учитывается изменение продуктивности растительности и эмиссии CO_2 при изменении климатических характеристик. Параметры модели определялись из результатов экспедиционных измерений 1999-2006 гг., а прогноз изменения климата в XXI столетии на территории Западной Сибири был взят из данных расчетов по модели общей циркуляции атмосферы HadCM3. Рост температуры воздуха будет способствовать увеличению продуктивности болотной растительности и интенсификации выделения углерода из торфяной залежи. Скорость накопления углерода в торфе также будет возрастать. При быстром росте атмосферного CO_2 и температуры (сценарий A1) накопление углерода в мортмассе происходит быстрее, чем в «мягких» сценариях (B1, B2). В каждой рассмотренной экосистеме имеются свои особенности развития запасов фитомассы и мортмассы.

В результате потепления климата и увеличения концентрации CO_2 в атмосфере скорость депонирования углерода в торфяной залежи в южной тайге может увеличиться к 2100 году на $75\pm 22\%$ по сравнению с современными темпами накопления.

Список использованных источников

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Физика атмосферы и океана. 2003, т.39, № 2, С.166-185.
2. Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России // Природа, - 1994. - № 7. - С.15-18.
3. Тарко А.М. Антропогенные измерения глобальных биосферных процессов. – М. Физматлит. 2005. – 232 с.
4. IPCC, 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) // Eds.: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J., Xiaosy I. Cambridge University Press. – 944 p.
5. Naumov, A.V. 2004. Carbon budget and emission of greenhouse gases in bog ecosystems of Western Siberia. Eurasian Soil Sci. 37, 58–64.
6. Panikov N.S. Dedysh S.N. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bog (West Siberia): winter fluxes and thaw activation dynamics // Global Geochemical Cycles. 2000.Vol. 4. №4. P. 1071-1080.
7. Pope, V. D., M. L. Gallani, P. R. Rowntree and R. A. Stratton, 2000: The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model -- HadAM3. Climate Dynamics, 16: 123-146. (<http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/models/HadCM3.html>)