



УДК 631.4.43

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.9

ПОГЛОЩЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА БОЛОТНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ГОЛОЦЕНЕ. ПРОБЛЕМЫ ЗАБОЛАЧИВАНИЯ

© *Б.В. Бабиков¹, д-р с.-х. наук, проф.*

К.И. Кобак², д-р географ. наук

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: lidun80@mail.ru

²Государственный гидрологический институт, 2-я Линия, 23, Васильевский остров, Санкт-Петербург, Россия, 199053; e-mail: lidun80@mail.ru

Болотные экосистемы являются для атмосферы нетто-стоком углерода (атмосферного углекислого газа). Дан анализ скорости заболачивания и интенсивности аккумуляции углерода в торфе на территории России за время голоцена. Именно в этот период образовалась большая часть болот России, накопивших торф. По современным оценкам, площадь торфяных болот составляет 1,68 млн км², с заболоченными землями – 3,69 млн км². Все эти земли содержат более 100 млрд т углерода (100,93 Гт). Россия занимает первое место в мире по запасам аккумулярованного торфа. Ежегодно в мире заболачивается 66 тыс. га. На территории России средняя скорость заболачивания в голоцене составляла 15...18 тыс. га/год. Она варьировала под влиянием изменяющихся климатических, гидрологических, геологических, морфологических и других факторов, а также значительно отличалась в различных природных зонах и регионах России. Например, в Карелии (северо-западная часть России) средняя скорость заболачивания в голоцене составляла 400 га/год, при этом она варьировала от 150 до 755 га/год. Наиболее интенсивное заболачивание и накопление торфа установлено в атлантическое время голоцена, когда менялись не только типы болотных экосистем, но и их соотношение. Сходные черты заболачивания имеют и другие районы Северо-Запада Российской Федерации и Западной Сибири. К настоящему времени в России накоплены многочисленные данные о скорости аккумуляции торфа и углерода в болотных экосистемах разных типов в среднем за голоцен. Эти результаты далеко не полные и, к сожалению, не дают возможности определить современную скорость накопления органики в болотах и точнее определить характер функционирования экосистемы (является болото нетто-стоком или нетто-источником углекислого газа для атмосферы). Осушение болот может увеличить эмиссию углекислого газа в атмосферу. Для определения современной (за сезоны, десятилетия) скорости нетто-аккумуляции углерода используют следующие методы: балансовый и математического моделирования болотной экосистемы. Расчеты современной скорости нетто-аккумуляции углерода болотами по модели Р. Клаймэ (в модификации И.Е. Турчинович) показали, что она составляет 37,6 млн т углерода/год. В настоящее время процессы заболачивания

в России активизировались вследствие глобального изменения климата и значительных разрушений дренажных систем.

Ключевые слова: болотные экосистемы, голоцен, углерод, аккумуляция, торф, моделирование.

Введение

Наличие углекислого газа (CO_2) в атмосфере – это результат функционирования естественного углеродного цикла, обмена углеродом (С) между атмосферой, океанами, литосферой и биотой. Характерные временные масштабы взаимодействия между резервуарами С различны, как и изменения значений потоков между ними. Эти взаимодействия характерны для всей истории Земли, в ходе которой содержание CO_2 в атмосфере значительно колебалось под влиянием различных естественных факторов (изменений солнечной постоянной, движения материков, скорости спрединга океанического дна, горообразования и др.). Так, в позднем мелу мезозойской эры количество углерода в атмосфере составляло 3700 млрд т (Гт), его концентрация – 1800 ppmv (миллионных долей по объему). Наряду с общим трендом уменьшения CO_2 , которое происходило не плавно, а скорее скачкообразно, углеродный пул атмосферы содержал в олигоцене только 700 Гт С (с концентрацией 320 ppmv), в плиоцене – 950 Гт С (450 ppmv), в начале четвертичного периода – 400...600 Гт С (200...300 ppmv) [6].

Начиная с верхнего плейстоцена, для которого концентрация CO_2 в атмосфере известна на основании результатов анализов пузырьков воздуха из антарктических и гренландских ледяных кернов (200 ppmv), содержание CO_2 увеличивалось. За последние 17...18 тыс. лет атмосфера аккумулировала не менее 170 млрд т С, средняя скорость аккумуляции составляла 20...30 млн т С/год.

Роль континентальной биоты во флуктуациях концентрации атмосферного CO_2 (C_{CO_2}) до сих пор окончательно не ясна, но большинство специалистов считает, что биомасса и почвы служили нетто-стоком атмосферного углекислого газа. Пул органического углерода почв увеличился с 625 млрд т С (18 тыс. лет назад (В.Р.)) до 2100 Гт С в настоящее время [20, 21, 30, 40]. В увеличении размеров почвенного пула С несомненно велика роль развития болот и накопления в них торфа.

По современным оценкам, мировые запасы аккумулированного в болотах С (на площади 6,41 млн км²) составляют 329,0...528,0 Гт С [19]. В России общая площадь оторфованных и заболоченных земель – 3,691 млн км², или 21% территории страны [18]. Согласно другим оценкам, только болота (в границах нулевой залежи) занимают площадь 1,68 млн км² [30]. Содержание углерода в них – 100,9 Гт [10]. По запасам торфа Россия занимает первое место в мире.

Органическое вещество, созданное в процессе фотосинтеза болотными растениями, минерализуясь и частично метаморфизуясь, в анаэробных переувлажненных условиях трансформируется в торф, который накапливается в разных природных зонах в течение многих лет.

Ежегодно в мире заболачивается около 66 тыс. га земли [18]. Как ни парадоксально, но о скорости накопления торфа и углерода и темпах заболачивания в раннем голоцене (разные временные интервалы) имеется более полное представление, чем об уровне болотообразовательного процесса за последние 100 лет. Результаты анализа имеющихся данных свидетельствуют о том, что существуют диаметрально противоположные точки зрения на проблему современной трансгрессии болот и интенсивности аккумуляции в них торфа и углерода [24].

Торфяные болотные экосистемы, как известно, представляют собой нетто-сток атмосферного CO₂, в них углерод аккумулируется на десятки, сотни и тысячи лет. Эти экосистемы можно рассматривать как своеобразные «биологические тупики».

В целях предотвращения негативных последствий современного и предстоящего изменения климата на конференции в Рио-де-Жанейро в 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН, направленная в основном на разработку стратегий сохранения биоразнообразия и уменьшения эмиссии в атмосферу парниковых газов [1]. Суть ее – количественные обязательства по ограничению (либо сокращению) их выбросов. В 1997 г. в Киото был выработан протокол (Киотский протокол) к этой конвенции, согласно которому к 2012 г. все страны, имея определенные квоты, должны сократить размеры эмиссий парниковых газов (в первую очередь CO₂).

Президиум РАН принял решение об организации Совета-семинара «Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий» под председательством акад. Ю.А. Израэля (2004 г.). Совет-семинар и до настоящего времени продолжает свою работу [17].

В данной статье не обсуждается возможная эффективность и научная обоснованность Киотского протокола. В свете его подписания и ратификации многими странами (Россия присоединилась к нему 26 февраля 2005 г.) вопрос учета современной скорости аккумуляции углерода и его нетто-поступления в атмосферу приобрел не только общебиологический, но и политический характер. Это подтверждается огромным вниманием к проблеме современного изменения климата (в частности, проведением Всемирного саммита ООН в декабре 2009 г., (Копенгаген, Дания), собравшего более 15 тыс. участников). Совершенно очевидно, что уже в настоящее время необходимы надежные оценки как антропогенных, так и естественных нетто-стоков и нетто-источников углерода для атмосферы. К 19 февраля 2012 г. 192 страны ратифицировали Киотский протокол (США и Австралия до сих пор его не подписали), но суммарная доля выбросов этих 192 стран составляет 63,7 % общей эмиссии. Действие Киотского протокола в современном его виде в декабре 2012 г. закончилось. На 18-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Доха, Катар) завершилось (несмотря на существенные разногласия) подписанием договора о втором периоде – 2013–2017 (до 2020) гг. Эксперты сходятся во мнении, что реализация проекта без участия в нем промышленных гигантов

(США, Китай, Россия, страны ЕС, Индия) теряет смысл. Новый протокол «Киото-2» должен содержать четкую цель на 2050 г. для глобальных (например, на 50 %) снижений выбросов парниковых газов. Детально страны-участники планируют вернуться к обсуждению будущего «Киото-2» в 2015 г. Вероятно, возникнут новые обязательства, новая ратификация.

Совершенно очевидно, что прежде всего необходимо уточнение всех составляющих глобального углеродного цикла, надежные оценки как антропогенных, так и естественных источников и стоков углерода для атмосферы. Также явно нужны уточненные и новые сведения об интенсивности взаимодействия атмосферы и океана, поскольку именно океан определяет инерционность многих процессов в атмосфере [6, 16, 36, 43, 47, 53].

Трансгрессия болот и накопление в них торфа в голоцене

Послеледниковый период характеризовался значительными климатическими изменениями и, как следствие, изменениями в растительности и почвенном покрове не только в отдельных регионах, но и во всем северном полушарии. Необратимое активное заболачивание является неотъемлемой чертой голоцена. Климатические, гидрологические и геолого-морфологические факторы оказывают наибольшее влияние на линейный прирост торфа. Климатом обусловлена интенсивность аккумуляции углерода и, следовательно, величина прироста торфа, а гидрологический режим определяет условия деградации органики.

По современным оценкам [41, 51] средняя скорость заболачивания за весь голоцен на территории России составляла 150...180 тыс. га/год. Совершенно очевидно, что скорость трансгрессии болот, как и их вертикальный рост, не были одинаковыми в разных районах и в разные временные отрезки голоцена. Так, в Карелии на основе большого фактического материала удалось реконструировать основные этапы развития болот в голоцене, изменения типов этих болот и их растительности [14, 15] (табл. 1).

Начавшийся в бореале болотообразовательный процесс заметно активизировался в атлантическое время. Позднее, в суббореале, сильное похолодание с одновременным снижением количества осадков привело к уменьшению горизонтального роста болот и прироста торфа. Средняя скорость заболачивания за голоцен оценивается авторами как 400 га/год (колебания – 150...755 га/год). Наиболее интенсивное болотообразование отмечено 7,0...5,0 тыс. лет В.Р., когда сформировалось более 40 % болотных массивов современной территории Карелии (3,63 млн га), скорость заболачивания составляла 670...755 га/год. В суббореальное время (4,9...4,0 тыс. лет В.Р.) число и площади вновь образующихся болот были минимальными (150 га/год) и близкими к интенсивности болотообразования в последнем тысячелетии (130 га/год). После суббореального минимума (4,0...3,0 тыс. лет В.Р.) произошел некоторый подъем и последовал новый спад. После 2,0 тыс. лет В.Р. процесс болотообразования вновь активизировался.

Таблица 1

Типы болот в Карелии в голоцене

Период	Типы болот	Соотношение типов, %
Бореальный, BO2	Травяные и травяно-моховые (евтрофные, мезотрофные)	82
	Лесные (мезотрофные)	18
Атлантический, AT2	Травяные (евтрофные)	64
	Травяно-моховые (мезотрофные)	26
	Лесные (мезотрофные)	10
Суббореальный, SB	Травяные (евтрофные)	27
	Травяно-моховые (мезотрофные)	25
	Лесные (мезотрофные)	34
	Сфагновые (олиготрофные)	14
Субатлантический: SA1	Травяно-моховые (евтрофные)	21
	Травяно-моховые (мезотрофные)	41
	Лесные (мезотрофные)	6
	Сфагновые (олиготрофные)	32
SA2	Травяно-моховые (мезотрофные)	22
	Аапа (евтрофно-мезотрофные)	32
	Лесные (мезотрофные)	2
	Сфагновые (олиготрофные)	14
	Грядово-мочажинные (олиготрофные)	30

В бореальное и атлантическое время господствовали травяные и травяно-моховые евтрофные и евтрофно-мезотрофные болота. Позднее, в суббореале, наряду с травяными, лесными и травяно-моховыми появлялись сфагновые олиготрофные типы болот, доля которых возрастала, и в середине субатлантического периода составляла более 30 % (от общего числа типов). С субатлантического времени существенное значение также приобрели грядово-мочажинные олиготрофные болота и евтрофно-мезотрофные болота типа аапа (табл. 1). Общая заболоченность территории Карелии увеличивалась от 4 % в бореальное время до 19 % в атлантическое, достигая в суббореале и субатлантике соответственно 27 и 30 %.

Скорость нетто-аккумуляция углерода в болотах Карелии, по нашим расчетам [41], в течение голоцена уменьшалась от 34,5 (бореальное время) до 9,0...10,0 г С/(м²·год) (субатлантическое). В атлантическое время она составляла 27,0 г С/м² год, в суббореальное – 17,0 г С/(м²·год) [41, 50].

В болотах, благодаря анаэробным условиям среды, особенностям термического режима, а также консервирующим свойствам торфа, пыльца, споры и другие частицы растений сохраняются лучше, чем в минеральных отложениях, поэтому болота (торфяная залежь) являются хранителями информации об истории растительности голоцена. Исследование залежи обычно проводится методом профилей, пересекающих болото от окраинных частей к центру.

В разных частях профиля путем бурения отбираются образцы для палинологического (спорово-пыльцевого) анализа, определяется мощность залежи и возраст по радиоуглеродным данным. Базальный возраст (время образования залежи) и глубина торфа являются основой для определения средней многолетней скорости накопления торфа в болотах разных природных зон (табл. 2).

Таблица 2

**Вертикальный прирост торфа и накопление углерода в голоцене
(средние значения) в некоторых болотных массивах России**

Район исследования	Вертикальный прирост торфа, мм/год	Накопление углерода, г С/(м ² ·год)	Автор
Западная Сибирь, среднее для лесной зоны	0,62	36,5	Лапшина, 2004 [25]
Южная тайга и подтайга	0,74...0,80	41,0 (24,9...56,7)	Лапшина, 2004 [25]
Лесные болота (согры)	0,36	–	Гидрология..., 2009 [12]
Выпуклые верховые болота	1,13 0,24	– –	Лапшина, 2004 [25] Новиков, Батуев, 2010 [28]
Средняя тайга	0,56	24,8 (15,4...43,9)	Лапшина, 2004 [25]
Центры крупных верховых болот	0,35...0,40	–	Гидрология..., 2009 [12]
Большое Васюганское болото (верховые болота)	0,60...2,62	30,0...40,0	Пологова, Лапшина, 2002 [32]
Северная тайга	0,39 (0,10...0,78)	11,4 (7,1...15,4)	Лапшина, 2004 [25]
Плоскобугристые	0,20	–	Лапшина, 2004 [25]
Микроландшафты	0,22	–	Гидрология..., 2009 [12]
Крупнобугристые	0,39	–	Гидрология..., 2009 [12]
Тундра	0,15...0,24	–	Новиков и др., 1999
Полигональные	0,05	–	[28, 29] Новиков, Батуев, 2010 [30]
Европейская территория России (Карелия)	0,85	–	Вомперский и др. 1999 [10]
Южная тайга Европейской территории России	0,55	–	Вомперский и др., 2000 [9]
Северо-Запад (среднее за 9500 лет)	0,59	–	Кузьмин, 1993 [24]
Никольско-Лютинская болотная система (среднее), генетические центры		11,8...35,8 (13,4...40,9) 10,0...24,6	Кузьмин, 1993 [24]
Полосы слияния Ширинская болотная система, генетические центры		9,0...29,0	Кузьмин, 1993 [24]

Изучение содержания и интенсивности накопления углерода в торфяных залежах разного типа, которое обычно производится в лабораторных условиях, показало, что залежи верхового (сфагнового) типа характеризуются наименьшими запасами углерода [42]. Содержание углерода в слоях гипново-травяной низинной залежи заметно выше, максимальных значений накопление (до 70...80 г С/(м²·год)) достигает в низинных торфах, залегающих в озерах и долинах малых рек богатого грунтового питания [25, 42].

Такой же, как в Карелии, характер процесса заболачивания и торфонакопления отмечен и в других районах Северо-Запада европейской части России. Изучение трансгрессии верховых болот свидетельствует о том, что с XIII в. скорость наступления болот на суходолы возрастала, достигая к началу 90-х гг. XX в. примерно 44,6 см/год, на некоторых болотных массивах – 166,3 см/год [24]. Нетто-аккумуляция углерода олиготрофными болотами северо-запада, по нашей оценке, в бореале и атлантике составляла 45,0 г С/(м²·год), в суббореале – 43,0 г С/(м²·год), в субатлантическое время – 18,0 г С/(м²·год) [20, 42]. Исследования на территории Западной Сибири показывают, что начало активного болотообразовательного процесса относится к предбореальному времени. Оно было обусловлено окончанием Сартанского оледенения и потеплением климата, но протекало на незначительных территориях и лишь в хорошо выраженных микропонижениях. В бореале процесс торфообразования активизировался, а в атлантике (особенно во второй половине атлантического периода) наступление болот на суходолы шло со скоростью 40,0...60,0 см/год [11]. За 4,0...5,5 тыс. лет (от бореала до суббореала) сформировалась большая часть болотных массивов Западной Сибири. В северной тайге, тундре и лесотундре скорость торфонакопления в бореале была максимальной за весь голоцен, достигая 1,40...1,60 мм/год, что в 2 раза выше интенсивности торфонакопления в северных экосистемах европейской части России [7].

В суббореальное время в связи с похолоданием и увеличением сухости климата темпы трансгрессии болот на суходолы снизились до 5,0...10,0 см/год, скорость торфонакопления уменьшилась до 0,40 мм/год. Происходила консервация погребенных под слоем торфа подзолов во вновь развивающейся мерзлоте. Последние 2,5 тыс. лет характеризуются самыми низкими темпами роста болот (4,0 см/год), интенсивность торфонакопления в северной тайге не превышает 0,20 мм/год [7, 11]. Сходные результаты были получены и при исследованиях болотных массивов таежной зоны Западно-Сибирской низменности (междуречье Оби и Васюгана, 59°23' с.ш. – 76°54' в.д.). По мере роста торфяной залежи, начиная с предбореального времени (около 9,5 тыс. лет В.Р.), скорость ее нарастания постоянно уменьшалась. Наиболее интенсивным накопление торфа было на границе предбореала и бореала, когда средний прирост составлял 2,04 (предбореал) ... 0,86 мм/год (бореал). Аккумуляция углерода в торфе была максимальной (137,0 г С/(м²·год) в предбореале) и достаточно высокой (45,5 г С/(м²·год)) в бореальное время [13]. Современный (субатлантика) прирост торфа этих болот – 0,30 мм/год, аккумуляция углерода – 11,2 г С/(м²·год). Исследователи

приходят к выводу о явном замедлении процесса торфонакопления и, основываясь на результатах моделирования, даже о его возможном прекращении через 1,0 тыс. лет (или ранее), когда уменьшающаяся скорость прироста составит 0,15 мм/год, что ниже минимального прироста, отмеченного в суббореальное время (0,21 мм/год).

Анализ скорости торфонакопления в Северной Евразии в зональном аспекте за голоцен свидетельствует о том, что, несмотря на различия, в историях болотообразовательного процесса Европы и Западной Сибири прослеживается и ряд общих черт. Прежде всего то, что для северных торфяников как Европы, так и Западной Сибири, начало голоцена (предбореальное и бореальное время) характеризуется высокими темпами торфонакопления: до 1,40...1,60 мм/год – в Западной Сибири, 0,80 мм/год – на Европейском Севере. В Западной Сибири заболачиванием в основном была охвачена северная часть, а на юге существовали лишь немногочисленные торфяники [26]. Новосанчуговское похолодание и после короткого потепления последовавший ряд новых похолоданий привели к тому, что в период 7,0...6,0 тыс. лет В.Р. на Севере наблюдался локальный минимум торфонакопления. В это же время в южных районах (в южнотаежной подзоне и лесостепи) установлены локальные максимумы торфообразования как в Европе, так и в Западной Сибири.

Климатический оптимум голоцена на Севере характеризовался максимальным потеплением и увеличением влажности климата, обусловившими возрастание интенсивности торфонакопления в болотах лесотундры и северной тайги. В этот период отмечена вероятность полной деградации мерзлоты на Севере. Есть основания полагать, что именно тогда сформировалась основная площадь современных болотных массивов Севера [7]. Похолодание, начавшееся 4,5 тыс. лет назад, обусловило уменьшение скорости торфонакопления в северных регионах европейской части и Западной Сибири. В Западной Сибири 3,5 тыс. лет назад эта скорость снизилась до 0,10...0,20 мм/год и далее слабо варьировала до наших дней. В это время происходило промерзание торфяников и, несмотря на последовавшие потепления климата, мерзлота, находившаяся в термоизолирующем слое торфа, не протаивала. Лишайниковые сообщества тундрового типа, сформировавшиеся на поверхности торфяников, распространились до 61° с.ш. Небольшие потепления обуславливали протаивание мочажин и формирование бугристых комплексов в центральных частях болотных массивов, а также трансгрессии торфяников на прилегающие суходолы. По периферии болотных массивов возникали грядово-мочажинные болота, которые в течение последних 3,0 тыс. лет остаются частично промерзшими. В целом в северных регионах наблюдалась в голоцене сходная тенденция снижения скорости торфонакопления от бореала до субатлантика. Интенсивность торфонакопления в Западной Сибири была значительно выше, чем на Европейском Севере, особенно в ранние временные отрезки голоцена (9,0...7,0 тыс. лет В.Р.). В лесотундре и тундре Европы был также всплеск торфонакопления (3,0...1,5 тыс. лет В.Р.), когда его скорость достигала 0,40 мм/год.

В среднетаежной зоне Европы и Западной Сибири вариации скорости торфонакопления находились в противофазе [7]. Максимальные скорости (до 1,10 мм/год – в Западной Сибири, 1,40 мм/год – в Европе) зафиксированы в бореальное время, но на более поздних временных этапах максимумы и минимумы скорости чаще всего не совпадают. Абсолютные значения скорости, как правило, заметно выше в болотах европейской части. Однако изучение процессов накопления углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота (торфяная колонка «Водораздел», расположенная в средней тайге центральной части Обь-Иртышского междуречья) показало, что средняя многолетняя аккумуляция углерода составляла 30,0...40,0 г С/(м²·год) [32]. Вертикальный прирост в залежах верхового типа колебался от 0,60 до 2,62 мм/год (табл. 2), что выше средних значений для Западной Сибири и значительно выше обычно приводимых для европейской средней и южной тайги значений (9,10 мм/год). В бореальный период (9,0...8,0 тыс. лет В.Р.) в условиях постепенного потепления климата на исследованной территории Большого Васюганского болота установлен пик аккумуляции углерода (70,0 г С/(м²·год)) при величине прироста 1,79 мм/год. Большие различия в уровне аккумуляции углерода в болотах средней тайги Европы и Азии могут быть объяснены особенностями сибирского климата (высокие летние температуры, обеспечивающие довольно высокую продуктивность болотных растений и вертикальный прирост торфа и, вместе с тем, замедлением процессов разложения торфа в зимнее время из-за глубокого промерзания почв на фоне короткого вегетационного периода [25, 32].

В лесостепной зоне и подзоне южной тайги Западной Сибири климатический оптимум голоцена сопровождался аридизацией климата [39], что привело к снижению скорости торфонакопления. В торфяниках Европы это не зафиксировано, но, начиная с 4,0 тыс. лет В.Р. в лесостепной зоне скорость торфонакопления синхронно возрастала в торфяных болотах Европы и Азии. 3,7...3,5 тыс. лет В.Р. в этой зоне фиксируется развитие олиготрофных торфяников, чему могло способствовать только увеличение влажности климата. Избыток атмосферной влаги создавал олиготрофные условия прежде всего в центральной части, оттесняя к краю болотного массива грунтовые воды.

Торфонакопление в южной тайге и лесостепи очень четко реагировало на серию похолоданий субатлантического периода (2,0...1,7; 1,5...1,4; 0,7...0,6 тыс. лет В.Р.), увеличиваясь в отдельных торфяниках до 1,50...2,00 мм/год [7]. Накопленные данные позволяют сделать вывод, что в течение голоцена скорость торфообразования в южных районах Сибири и Европы возрастала. Изменения скорости торфонакопления на Севере и Юге находились в противофазе.

В суббореальное и субатлантическое время во всех районах заболачивание продолжалось в основном за счет разрастания ранее образовавшихся болот. Сухое похолодание суббореала (2,8 тыс. лет В.Р.) и начала атлантики привело к снижению темпов торфонакопления в средней тайге Западной Сибири [25],

в ее северных районах за последние 2,5 тыс. лет интенсивность торфонакопления не превышала 0,20...0,30 мм/год. Скорость радиального роста, как уже отмечалось, составляла 4,0 см/год [11], аккумуляция углерода – 11,2 г С/(м²·год) [7, 13].

Результаты изучения вертикального прироста торфа в болотах России в голоцене, по данным радиоуглеродных датировок [9], свидетельствуют о том, что в субатлантический период голоцена этот прирост явно увеличился на болотах южной тайги и хвойно-широколиственных лесов европейской территории России (по сравнению со средним приростом за голоцен). На аналогичных болотах Западной Сибири (вне области распространения многолетней мерзлоты) установлено некоторое снижение прироста в это время (по сравнению со средним за голоцен). Полученные результаты прекрасно согласуются с данными о снижении уровня торфонакопления в субатлантическое время в Западной Сибири.

Анализ данных о скорости торфонакопления в болотах, которые расположены на многолетне-мерзлых грунтах, снабженных радиоуглеродными датировками (базальный возраст 7,68...10,61 тыс. лет), также показал, что эта скорость во второй половине голоцена (в суббореале и субатлантике) часто на порядок ниже (0,08 мм/год), чем в первой (0,55 мм/год), когда она соответствовала приросту немерзлых торфяников [9].

Влажное потепление за последние 100 лет привело к увеличению прироста торфа и накоплению углерода в болотах средней тайги Западной Сибири [32]. Сведения о современной скорости заболачивания и интенсивности накопления торфа и углерода в болотных экосистемах России далеко не полны и носят фрагментарный характер.

Заболачиваемость Западной Сибири в субатлантике, по оценке М.И. Нейштадта [31], составляла 8000 га/год. За последние 2,5 тыс. лет средняя скорость наступления болот на суходолы равнялась 15,0 см/год. На основании результатов радиоуглеродного датирования было установлено, что она не была одинаковой: 2,5...125 тыс. лет В.Р. – 16,8 см/год; 1,25...0,82 тыс. лет В.Р. – 20,9 см/год; с 820 г. и по настоящее время – 9,1 см/год. Современное Большое Васюганское болото 500 лет назад состояло из 19 отдельных болот площадью около 4,5 млн га, при этом 900 тыс. га было представлено мелкозалежными участками с мощностью торфа менее 0,7 м. В настоящее время вследствие разрастания этих участков образовался единый массив, где 25 % занимаемой территории имеет возраст не более 500 лет [31, 41].

По мнению специалистов, возникновение новых очагов устойчивого заболачивания в настоящее время в естественных условиях маловероятно [24, 34, 35]. Процесс заболачивания лесов носит прерывистый характер и большого значения не имеет [34]. Но в лесах могут возникать новые очаги заболачивания при строительстве дорог (при отсутствии водосливных сооружений), запруживании и захламлении небольших речек и ручьев, в зонах создания новых водохранилищ и т.д. Аэровизуальные наблюдения в Карелии, проведенные в 1978 г. в Калевальском и Кемском районах, свидетельствуют об инте-

сивном наступлении болот на леса. Незаболоченная лесная площадь составляет там не более 20...30 % [34]. Подобная тенденция отмечена и в других районах, например в Вепском лесу (по сообщению Федорчука, 1999 г.).

Статистические данные Земельного кадастра России свидетельствуют о том, что за последние 30 лет увеличение заболоченности отмечается во всех административных районах европейской территории России (кроме некоторых южных) [22].

Очевидно, что современное заболачивание в большой степени обусловлено разрушением ранее созданных лесосушительных (и других мелиоративных) систем. В России с 1775 г. по 1991 г. было осушено 4,96 млн га, причем за период с 1925 г. по 1991 г. лесосушительные системы были построены на территории России (без Прибалтики, Белоруссии и Украины) на площади более 4 млн га. С 1991 г. гидролесомелиоративные работы, как известно, существенно сокращались, что явилось причиной вторичного заболачивания ранее осушенных земель. Есть основания полагать, что к настоящему времени вторично заболотилось не менее 1 млн га [23]. Такие же тенденции наблюдаются и в восточных областях России. Наглядным примером вторичного заболачивания является болото Бакчар в Западной Сибири [19].

В последние годы на Северо-Западе России отмечается четкая тенденция усиления трансгрессии болот на леса. Линейный рост болот, их наступление на окружающие суходолы в настоящее время составляет 30,0...50,0 см/год, вертикальный прирост торфа в среднем – 3,00 мм/год (табл. 2 [24]). Вариации значений вертикального прироста находятся в интервале от 0,40...0,60 (для древесной и древесно-травяной групп) до 10,00...12,00 мм/год (олиготрофные сфагновые торфа). В болотах Ленинградской области установлены максимальные значения вертикального прироста как в генетических центрах (12,82 мм/год), так и на окраинах (10,26 мм/год) (Никольско-Лютинская болотная система Ленинградской области и др.). Средние значения вертикального прироста торфа для некоторых сфагновых болот Северо-Запада (Никольско-Лютинская система, болото Ламмин-Суо, Ширинский Мох и др.) за последние 100 лет составляли 7,14 мм/год.

Повышение активности процесса торфонакопления в последние годы может быть объяснено климатическими причинами и, прежде всего, увеличением количества осадков [24]. Анализ метеорологических данных, полученных на станциях Северо-Западного региона, свидетельствует о росте среднегодовой (а также зимне-весенней) температуры и количества осадков за последние десятилетия [6, 21].

На основании обширных материалов были установлены связи интенсивности накопления торфа с некоторыми климатическими параметрами. Для северных торфяников отмечена положительная реакция на потепление и увлажнение климата с запаздыванием на 600 (на повышение температуры) и 1120 лет (для количества осадков). Коэффициенты корреляции равны 0,77 и 0,64 соответственно.

Для южных торфяников (при отрицательной реакции на увеличение температуры и количества осадков) коэффициенты корреляции составляют $-0,45$ и $-0,26$ при запаздывании реакций на 320 и 720 лет. Выявленное запаздывание означает, что интенсивность торфонакопления на изменение климата, ускоряясь или замедляясь в соответствующие периоды потеплений или похолоданий, достигает максимума или минимума интенсивности только спустя указанное время после климатических экстремумов [4, 7].

Методы определения современной скорости аккумуляции углерода

Для определения современной скорости аккумуляции углерода в болотах сегодня используют два метода: балансный, когда в полевых условиях определяются все потоки в экосистему (поступление углерода и его потери), и моделирование.

Модель вертикального роста болот была разработана Р. Клаймэ [43] для исследования верховых болот еще в 1984 г. В последние годы она широко применяется (в модификации И. Турчинович) [33, 38] для расчетов и других типов болотных экосистем. Согласно этой модели, болото можно представить в виде двух слоев: акротелма – верхнего деятельного слоя, и катотелма – нижнего, в котором все процессы протекают значительно медленнее («деятельный» и «инерционный» слой). Обоснование разделения торфяной залежи на два разнородных слоя впервые было сделано в работах К.Е. Иванова (1948 г.) и В.Д. Лопатина (1949 г.) [4, 27]. За верхнюю границу акротелма принимают условную поверхность, проходящую на высоте средних отметок выпуклых и вогнутых форм микрорельефа. Граница между акротелмом и катотелмом в болотах совпадает со средним многолетним минимальным (как правило, летним) положением уровня болотных вод.

В акротелме происходит отмирание массы живого органического вещества, и в аэробных условиях активно протекают биохимические процессы разложения. Интенсивность гидрологических процессов в деятельном слое зависит от глубины залегания болотных вод и ограничена наличием особой (меняющейся) по глубине структуры (скелет корневой части тела растения).

Процесс накопления органического вещества в акротелме может быть представлен следующим образом:

$$dM_a/dt = P_a - A_a M_a - P_c, \quad (1)$$

где $M_a = P_a H_a$ – масса органического вещества на единице площади в акротелме;

P_a – ежегодное поступление живого органического вещества на поверхность болота;

H_a – глубина акротелма;

A_a – коэффициент пропорциональности;

P_c – поток органического вещества, ежегодно поступающего из деятельного слоя в нижний инертный слой – катотелм.

Доля поступающего в катотелм вещества, определяемая соотношением M_a/P_a , зависит от многих факторов: продуктивности болотных растений, кли-

матических условий и т.д. Это соотношение имеет разные значения для болот разных типов.

Скорость деструкции органического вещества в акротелме также зависит от многих факторов. По мнению многих специалистов, она пропорциональна массе органического вещества, остающегося после разложения в изучаемом слое, поэтому коэффициент пропорциональности A_a обычно принимают постоянной величиной для данного типа болота и растительности.

В нижнем инертном слое болота происходят аналогичные процессы, но интенсивность разложения органического вещества в анаэробных условиях катотелма на один-два порядка меньше, чем в акротелме. Накопление органического вещества в катотелме можно представить как

$$dM_c/dt = P_c - A_c M_c, \quad (2)$$

где M_c – масса органического вещества торфа на единице площади, накопившегося к моменту времени t ;

P_c – аналог ежегодной продукции для акротелма;

A_c – параметр, который обычно принимают постоянной величиной для длительного интервала времени, в течение которого можно считать условия окружающей среды неизменными.

Накопление органического вещества в верхнем слое болотной экосистемы происходит до тех пор, пока не установится постоянная толщина акротелма, которая сохраняется в течение длительного времени при отсутствии существенных изменений в окружающей среде. В этот период развития болотной экосистемы потоком органического вещества в катотелм можно пренебречь. Формирование акротелма занимает от нескольких десятилетий до сотен лет для разных типов болот. По нашим оценкам, наиболее быстро стационарный деятельный слой устанавливается в аапа и грядово-мочажинных комплексах, где время его формирования составляет 50...60 лет. Наиболее длительно этот процесс протекает в низинных болотах (400...600 лет). Зная толщину акротелма и плотность органического вещества в нем, а также нетто-продуктивность растительного сообщества для данного типа болота, можно оценить значение постоянной распада A_a .

В стационарном состоянии с момента времени становления акротелма (T_a) поступление органического вещества в этот слой компенсируется его потерями в акротелме и стоком в нижний – катотелм.

Это позволяет представить уравнение (1) как $dM_a/dt = 0$ и оценить поток органического вещества из акротелма в катотелм (P_c).

Значение P_c характеризует среднюю многолетнюю скорость торфонакопления в начальной стадии развития болота, когда формирование торфяной залежи только началось и скорость потерь органического вещества в катотелме пренебрежимо мала. В начальный период болотообразования скорость торфонакопления определяется интенсивностью нетто-продуктивности болотных экосистем именно в тот период времени, а также процессами, происходящими в акротелме, параметры которого, как и скорости различных процессов в нем, отличаются от современных.

Обсуждение результатов

Оценка современного потока органического вещества из деятельного слоя в катотелм является основой для определения современной скорости аккумуляции и линейного прироста торфа некоторых типов болот России (табл. 3). В расчетах использованы значения нетто-продуктивности, толщины акротелма, плотности абс. сухого вещества в акротелме по литературным данным [4, 5, 14, 15, 24, 37]. Приведенные в табл. 3 значения параметра A_a для исследуемых типов болот оценены нами с помощью модели вертикального роста болот [38, 41].

Таблица 3

Поток органического вещества из акротелма в катотелм и максимально возможный линейный прирост торфа в некоторых типах болот России в современную эпоху

Тип болот	Продуктивность фитомассы*, г/(м ² ·год)	Плотность торфа в акротелме*, кг/м ³	Толщина акротелма, м	Константа разложения A_a , в год	Поток органического вещества в катотелм P_c *, кг/(м ² ·год)	Линейный прирост торфа, мм/год
Аапа	0,14...0,54	65...90	0,10...0,30	0,02...0,06	0,058	0,46...0,53
Грядово-мочажинные верховые	0,43...0,52	30...50	0,38...0,44** 0,42...0,49***	0,01...0,05	0,070	0,88...0,93
Верховые облесенные: европейская часть РФ	0,30...0,63	30...50	0,49...0,54**	0,01...0,04	0,063	0,79...0,84
Западная Сибирь	0,21...0,63		0,47...0,58***		0,079	1,00...1,10
Низинные Лесные и травяно лесные	0,78	140	0,85	0,06	0,02	0,10...0,20
	0,72	100 110	0,49	0,01	0,10	0,70...0,90

* Абс. сухое органическое вещество. **Данные полевых наблюдений. ***Расчетные данные.

Современная скорость аккумуляции углерода (при среднем его содержании в абс. сухом веществе 51,7 %) колеблется от 10,3 в полигональных болотах до 51,7 г С/(м²·год) в низинных травяных болотах. Оценки выполнены без учета потерь органического вещества в толще торфяной залежи, образованной за время существования болота, но мы полагаем, что они несколько завышены. В дальнейшем планируется уточнить параметры модели, характеризующие процессы в катотелме.

Для расчетов использованы результаты определения площадей, полученные в Государственном гидрологическом институте (на площади 168 млн га) [30], и данные по распределению площадей, занимаемых разными типами болот [4, 42].

Суммарная аккумуляция углерода болотами России в настоящее время составляет 37,6 млн т/год. По нашим оценкам, максимальный вклад (46,8 %) в эту аккумуляцию вносят грядово-мочажинные болота, занимающие более 40 % площади современных болот [42].

Результаты определения современной скорости аккумуляции углерода в болотах балансовым методом весьма ограничены. Это объясняется тем, что используются сложные приборы для учета отдельных составляющих углеродного баланса болотной экосистемы, требуются высококвалифицированный персонал для их обслуживания, тщательный выбор места и времени наблюдений и т. д.

Удачным примером могут служить исследования в Западной Сибири на отрогах Большого Васюганского болота (болото Бакчар) в 1991–2001 гг. [19]. Изучение в течение ряда лет первичной продуктивности (NPP), эмиссии газов (CO_2 и CH_4) с поверхности почв и выноса углерода болотными водами показало, что общий расход углерода в изученных болотных экосистемах (77,4 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) значительно уступает уровню фотосинтетической нетто-аккумуляции (125 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) – среднему значению за весь длительный период наблюдений. Большая часть потерь углерода обусловлена эмиссией углекислого газа (в среднем 69,0 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, или 55,2 % от NPP) и метана, доля которого значительно меньше (0,3...6,5 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, или 2,7 % NPP). Вынос углерода болотными водами, содержащими растворенные органические вещества, составляет 6,9 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, или 5,5 % NPP.

Авторы пришли к выводу о преобладании процесса аккумуляции углерода в торфяной залежи и прогрессировании торфообразования в настоящее время. По нашим оценкам, сделанным на основании результатов проведенных полевых исследований, средняя аккумуляция составляет 48,0 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [20].

Подобные исследования, проведенные в Ленинградской области на верховом болоте Ламмин-Суо (без учета эмиссии метана) показали, что современная нетто-аккумуляция углерода составляет 12,0 % NPP (31,4 г $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$), вынос углерода болотными водами – 5,0 % NPP. Следствием минерализации органического вещества на поверхности почв и в акротелме является эмиссия газов, равная 83,0 % NPP. Эти исследования продолжаются в настоящее время с учетом интенсивности выделения метана с поверхности почв. Полученные результаты свидетельствуют о положительном балансе (нетто-накоплении углерода) в разные по погодным условиям годы, но полученных результатов явно недостаточно для окончательных выводов [20].

Высокие значения вертикального прироста торфа (2,28 мм/год – в центре, до 3,29 мм/год – на некоторых окраинах [24]), установленные на этом болоте, безусловно подтверждают тот факт, что процесс торфообразования в настоящее время интенсивно продолжается.

Одна из составляющих углеродного баланса – эмиссия CO_2 с поверхности экосистемы – широко используется как показатель «биологическая продуктивность почв» (биологическая активность почв), а также как свидетельство изменений, происходящих в почвенном профиле под влиянием естественных причин или антропогенного вмешательства. Результаты изучения трансформации торфяных земель, где было проведено осушение, свидетельствуют об изменениях в наземной растительности и почвенном покрове. Так, при длительных наблюдениях (1958 – 2009 гг.) на осушенном в разной степени мезотрофном болоте Ленинградской области (Тосненский район) было установлено, что после осушения сформировалось новое высокобонитетное сосновое насаждение, уменьшилась толщина торфяной залежи, увеличилась зольность торфа. Показано, что биологическая активность торфяных почв тесно связана с гидротермическими условиями. Исследования установили [3], что продуцирование CO_2 зависит прежде всего от положения уровня грунтовых вод, влажности почв и температуры.

Осушение болот способствует активизации в них биологической активности и ведет к увеличению в торфе концентрации CO_2 . Эмиссия CO_2 почвами России в период вегетации (по Г.А. Заварзину) варьирует в пределах 0,33...6,13 т/га. Осушение болот изменяет продуцирование CO_2 . В процессе осушения снижение уровней грунтовых вод способствует прогреванию почвы, увеличивает в них биологическую активность, содержание и продуцирование CO_2 [2, 3]. Однако при интенсивном осушении и значительном снижении уровня грунтовых вод продуцирование CO_2 снижается, уменьшается и его эмиссия. Скорость эмиссии CO_2 определяли по росту концентрации CO_2 внутри камеры в полевых условиях. Полевые исследования на мезотрофных торфяниках показали, что при понижении уровня грунтовых вод до 15...20 см эмиссия органического углерода за период вегетации составляет 1,4 т/га, при положении уровня грунтовых вод 40...45 см – 3,2 т/га, при понижении до 60...70 см – 0,6 т/га.

При несомненных достоинствах и широком использовании показателя биологической активности почв следует отметить, что при изучении современной скорости аккумуляции атмосферного углекислого газа болотными экосистемами этот показатель необходим, но его явно недостаточно для решения проблемы.

Заключение

Анализ палеоклиматических данных свидетельствует о том, что потепление климата на границе послеледниковья – голоцена, с геологической точки зрения было быстрым. Скорость изменения температуры воздуха летом в северных и средних широтах Северного полушария составляла не менее 2,6 °C за 100 лет, при этом ранний голоцен, как известно, характеризовался активным болотообразованием и торфонакоплением.

Эмпирические данные о климате последней четверти XX в. показывают, что этот период был самым теплым не только за время инструментальных наблюдений, но и за последнюю тысячу лет. Средняя глобальная температура в рекордно теплые годы (1995, 1998, 2001 гг.) была на 0,4...0,6 °С выше, чем в конце XIX в. В высоких широтах Северного полушария (на Аляске, в Канаде и Северной Евразии) температура воздуха превышала средние многолетние значения более чем на 1,5...2,0 °С. В высоких широтах одновременно отмечены увеличение количества осадков и изменения в циркуляционном режим, характерные для теплых эпох прошлого. Изменения температуры в начале XXI в. под влиянием усиления парникового эффекта сопоставимы с ее изменениями на границе позднеледникового (голоцена), и быстрое потепление климата на этой границе может быть представлено как возможный аналог флуктуаций климата и окружающей среды [2]. Учитывая это, можно предположить, что процесс образования болот интенсифицируется в предстоящие десятилетия в северных регионах России, интенсивность торфонакопления может достичь бореально-позднеатлантического уровня.

По прогнозу современная северная граница между полигональными и бугристыми болотами в Западной Сибири при глобальном потеплении на 1,4 °С сместится к северу примерно на 100 км, на 2,2 °С – более, чем на 400 км, между бугристыми и олиготрофными болотами – соответственно на 400 км и более, чем на 500 км. Очевидно, что для изменения растительного покрова и типа болот потребуется значительное время, возможно сотни лет, в связи с малой скоростью торфообразования и аккумуляции в них углерода [12].

Торфонакопление в болотных экосистемах России, по нашим оценкам, составляет 37,6 млн т С/год. Вероятно, что эти оценки занижены (по меньшей мере в 1,5 – 2 раза) из-за неполноты или полного отсутствия сведений о некоторых болотных системах России [5, 42].

Прогнозируемое увеличение площадей болот, вероятно, повысит нетто-аккумуляцию CO₂ из атмосферы, поскольку углерод захоранивается в торфах на тысячи лет. Большинство отечественных и зарубежных специалистов рассматривают в настоящее время арктические и бореальные экосистемы как нетто-сток углерода из атмосферы [7, 8, 10, 12, 13, 34, 35, 45, 46, 50 и др.], но существует и противоположное утверждение, где болота представляются как постоянные нетто-источники парниковых газов в атмосферу [52]. В настоящее время во многих странах разрабатываются программы, направленные на охрану болотных экосистем в целях сохранения биологического разнообразия планеты. Даже наблюдается восстановление ранее осушенных торфяных болот (например, в Шотландии) или превращение в болота территорий, занятых ранее сельскохозяйственными культурами (например, рисовые поля в Японии). В результате подобных мероприятий и возможного увеличения площадей болот в некоторых странах должна возрасти нетто-аккумуляция углекислого газа из атмосферы.

По данным анализа ледяных кернов, полученных на антарктической станции Восток, расположенной на высоте 3,5 км над уровнем моря, диапазон колебаний концентрации CO_2 в атмосфере за последние 165 тыс. лет составлял 200...280 ppmv. Концентрация CO_2 и температура изменялись почти синхронно за этот период под влиянием колебаний инсоляции в высоких широтах северного полушария [33, 43].

Анализ керна, взятого в Антарктиде на станции Сипл [33, 47, 48], позволил восстановить историю изменения CO_2 в атмосфере за период от середины XVIII до середины XX вв. На основании этих данных, которые хорошо согласуются с современными, можно установить, что в XVIII в. концентрация CO_2 составляла около 278 ppmv.

Как уже упоминалось, во время последнего гляциального максимума (около 18 тыс. лет В.П.), концентрация CO_2 в атмосфере составляла 190...200 ppmv, в голоцене (последние 10 тыс. лет) она увеличилась до 270...280 ppmv [33, 46]. Подобная особенность имела место и в изменении концентрации метана, которая увеличилась от 0,35 ppmv в конце гляциальной эпохи до 0,65 ppmv в голоцене.

Измерения концентрации CO_2 в атмосфере начались в конце XVIII в., однако, как показал Дж. Каллендер [44], первые надежные результаты были получены только во второй половине XIX в. Обобщая имеющиеся результаты, он пришел к заключению, что в конце XIX – начале XX вв., до того, как начались значительные выбросы CO_2 от сжигания ископаемого топлива, концентрация CO_2 в атмосфере составляла в среднем 290 ppmv (в 1880 г.). Это значение, с тех пор неоднократно уточненное, широко использовалось в качестве оценки «доиндустриальной» атмосферы, т. е. до того момента, когда антропогенное воздействие стало играть существенную роль. Отклик климатической системы Земля – гидросфера – атмосфера на возмущение, вносимое в атмосферу дополнительным поступлением «антропогенного» (от использования ископаемого топлива) CO_2 , осуществляется, как известно, на фоне долгопериодных изменений, происходящих за счет естественных факторов. Этим проблемам посвящено множество исследований [6, 20, 33, 43, 47, 49, 53], но с непрерывным увеличением концентрации CO_2 в атмосфере, обусловленным деятельностью человека, по мнению специалистов, начался новый «грандиозный геофизический эксперимент» [53].

В 50-х гг. XX в. проблема повышения содержания парниковых газов в атмосфере вновь вышла на первый план. Установленный эффект изотопной дискриминации (эффект Зюсса) и использование радиоактивного углерода (^{14}C) в годичных кольцах древесины (и в других биологических объектах) дали возможность оценить изменение вклада CO_2 антропогенного происхождения в общее содержание CO_2 в течение последних 100 лет.

В 1954 г. на Конференции по атмосферной химии (Швеция) было принято решение об организации CO_2 -мониторинга и создана сеть из 15 станций в Скандинавии, где производился отбор проб в газовые пипетки и последующий анализ

содержания CO₂. Полученные в 1955–1959 гг. данные подтвердили рост концентрации CO₂ в атмосфере (примерно на 10 % с начала века). В это же время был создан инфракрасный газовый анализатор, что дало толчок к расширению дальнейших исследований по мониторингу и значительно повысило точность измерений (1 ppmv) по сравнению с методами, применявшимися ранее.

В течение Международного геофизического года (1956-1958 гг.) под руководством Ч. Киллинга [48] были организованы наблюдения в обсерватории Мауна Лоа на Гавайях, которые продолжаются до сих пор. Постепенно была создана целая сеть мониторинговых станций в разных районах Земли (на Южном полюсе, мысе Барроу на Аляске, мысе Мататула в Западном Самоа и др.) для того, чтобы получить представление о пространственном распределении содержания CO₂ в атмосфере.

Было установлено, что станция Мауна Лоа оказалась чрезвычайно удачным местом наблюдений, так как полученные на ней данные соответствуют средним глобальным значениям концентрации CO₂ и их изменениям.

С 1959 по 1988 гг. средняя годовая концентрация на Мауна Лоа увеличилась с 316 до 351 ppmv. Такой рост концентрации (на 11 %) соответствовал увеличению содержания CO₂ в атмосфере на 75 Гт С. Это повышение обусловлено антропогенными факторами, главным из которых является эмиссия CO₂ при сжигании ископаемого топлива, и (в значительно меньшей степени) изменением характера землепользования (например, вырубка лесов и интенсификация сельского хозяйства). Анализ истории энергетики свидетельствует о том, что с 1700 по 1985 гг. в результате использования ископаемого топлива в атмосферу поступило около 170 Гт С, эмиссия в конце 80-х гг. XX в. составляла (5,6±0,5) Гт С/год. Экспоненциальный рост концентрации CO₂, наблюдаемый на станции Мауна Лоа, полностью соответствует ходу нарастания эмиссии от использования ископаемого топлива (Ff – так называемый промышленный, или топливный поток). На CO₂-кривой можно установить даже периоды двух мировых войн и нефтяного кризиса 1970–1980-х гг., когда рост концентрации в атмосфере явно замедлялся.

В настоящее время содержание парниковых газов в атмосфере продолжает увеличиваться. По данным наблюдений в обсерватории Мауна Лоа, среднегодовая концентрация CO₂ в 2011 г. составляла около 392 ppmv, в 2013 г. – 397 ppmv. Это означает, что за истекшее столетие (1912–2012 гг.) концентрация CO₂ в атмосфере возросла более, чем на 90 ppmv, с начала XXI в. (2000–2013 гг.) – на 37 ppmv (с 360 ppmv). Скорость увеличения CO₂ также нарастала. Если в начале наблюдений на станциях мониторинга (1958 г.) она составляла 0,7...1,0 ppmv/год, то в 1992–2001 гг. уже увеличилась до 1,55 ppmv/год, а в последние годы – до 2,0...2,07 ppmv/год. Современная атмосфера содержит более 832 Гт С в форме CO₂.

Есть все основания утверждать, что основной причиной увеличения концентрации CO₂ в современной атмосфере является эмиссия CO₂ от сжигания ископаемого топлива (антропогенный поток, Ff). Поток от антропогенного

воздействия суши на биоту (F_{bio}), обусловленный вырубкой лесов в тропической и внетропической зонах, изменениями в характере землепользования и др., оценивается менее достоверно, чем F_f . На основании глобальных оценок интенсивности вырубки лесов и лесовосстановления, оценки изменения относительного содержания изотопов углерода $^{13}C/^{12}C$ в атмосферном CO_2 , а также исследования широтного перепада значений концентраций CO_2 в атмосфере было сделано заключение, что существующий F_{bio} имеет порядок 1 Гт С/год [20, 48, 49].

Промышленная эмиссия (F_f) возрастает. По результатам исследований НАСА эмиссия CO_2 в 2010 г. составляла 9,1 Гт С в год, что на 5,9 % выше, чем в 2009 г. Причем следует отметить, что вклад развивающихся стран в суммарный поток больше, чем развитых стран [36] (больше вклада США). Современная ситуация (сумма антропогенной эмиссии ($F_f + F_{bio}$) и концентрация CO_2 в атмосфере) соответствует прогнозируемой для 2010 г. (суммарная эмиссия составляла около 10 Гт С/год, концентрация CO_2 – 395..398 ppmv). На базе нескольких сценариев развития энергетики (сценарий Межправительственного совета экспертов по изменению климата, IPCC, 1990, Prospects for Future Climate 1991) [33], включенных в существующие модели глобального углеродного цикла, были сделаны прогнозы изменений концентрации CO_2 в атмосфере до 2050–2060 гг. [33]. Интервал неопределенностей прогнозируемых значений обусловлен прежде всего различными представлениями о будущем антропогенных источников F_f и F_{bio} . Существующие оценки свидетельствуют о том, что значительная доля антропогенного CO_2 будет оставаться в атмосфере в течение длительного времени, поскольку инерционность в системе океан–атмосфера приводит к запаздыванию возмущений в атмосфере на многие годы (15..20 лет и более). В середине или в конце текущего столетия можно ожидать увеличения содержания CO_2 в атмосфере в 2 раза по сравнению с его доиндустриальным значением, т.е. около 560 ppmv.

Углекислый газ, поступивший при сжигании ископаемого топлива, будет перераспределяться постепенно между другими резервуарами углерода. Однако, если будет сожжена значительная часть углеродного топлива, то и через 10 тыс. лет концентрация CO_2 в атмосфере будет в 2 раза выше современной. Для очищения атмосферы от антропогенного CO_2 за счет связывания его в карбонатных породах (главным образом океанов) потребуется значительно больше времени – от 1 до 10 млн лет.

За короткий интервал времени количество остающегося в атмосфере антропогенного CO_2 зависит от скорости его поступления и поглощения другими резервуарами. Океаны (в основном, их глубинные слои) содержат приблизительно в 50 раз больше углерода, чем атмосфера, и служат самым важным стоком для антропогенного CO_2 (по современным оценкам, около 50..59 %). В настоящее время океан недонасыщен CO_2 [33]. Скорость поглощения его океаном определяется интенсивностью трех процессов: скоростью обмена CO_2 между воздухом и водой и переноса его через границу раздела; интенсив-

ностью перераспределения углерода в воде между его соединениями (гидрокарбонатным и карбонатным ионами и растворенным CO₂); диффузией и циркуляцией в океане, за счет которых происходит обмен вод углеродом и перенос его в глубокие слои океана, лишенные контакта с атмосферой. Учитывая инерционность этих процессов и всей системы океан–атмосфера, о чем уже было сказано ранее, нельзя ожидать снижения концентрации углекислого газа в современной атмосфере (даже при успешном осуществлении программы Киотского протокола).

Интенсивность нетто-стока в болотные экосистемы Российской Федерации (37,6 млн т С/год) безусловно мала. Если предположить, что все современные болота планеты (641 млн га) аккумулируют углерод с такой же интенсивностью, как болота России (на площади 168 млн га), нетто-поглощение атмосферного CO₂ (143,5 млн т С/год) не может компенсировать его антропогенного поступления.

Полученные результаты будут полезны при уточнении составляющих глобального углеродного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.А., Зимницкий П.В. Статистические данные о биоразнообразии древесных ресурсов России на начало XXI в. СПб.: Хромис, 2006. 160 с.
2. Бабиков Б.В. Состав воздуха торфяных почв и его влияние на рост культур сосны // Лесн. журн. 1963. № 6. С. 14–19. (Изв. высших учебных заведений).
3. Бабиков Б.В. Экология сосновых лесов на осушенных болотах. СПб.: Наука, 2004. 166 с.
4. Болота Западной Сибири/Под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова Л.: Гидрометеоздат, 1976. 448 с.
5. Боч М.С., Кобак К.И., Кольчугина Т.П., Винсон Т.С. Содержание и скорость аккумуляции углерода в болотах бывшего СССР // Бюллетень МОИП, отд. Биол. 1994. Т. 99, вып. 4. С. 59–70.
6. Будыко М.И., Ронов А.Б., Янишин А.Л. История атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 207 с.
7. Васильев С.В. Скорость торфонакопления в Западной Сибири//Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 56–59.
8. Вомперский С.Э. Роль болот в круговороте углерода // XI Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева «Биогеоценотические особенности болот и их использование». М.: РАН, 1994. С. 5–37.
9. Вомперский С.Э., Цыганова О.П., Глухова Т.В., Валяева Н.А. Вертикальный прирост торфа на болотах России в голоцене по данным радиоуглеродных датировок // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 53–55.
10. Вомперский С.Э., Цыганова О.П., Ковалев А.Г., Глухова Т.В., Валяева Н.А. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода // Глобальные изменения природной среды и климата. М.: РАН, 1999. С. 124–145.
11. Гаджиев И.М., Смоленцев Б.А. Роль торфообразования в формировании почвенного покрова Сибирских Увалов в голоцене // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 63–65.

12. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / Под ред. С.М. Новикова. СПб.: Изд-во ВВМ, 2009. 520 с.
13. Глебов Ф.З., Толейко Л.С., Климанов В.А., Карпенко Л.В., Дашковская И.С. Динамика палеорастительности, палеоклимата, накопления торфа и углерода в междуречье Оби и Васюгана (Западно-Сибирская низменность) // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 16–19.
14. Елина Г.А. Динамика болотообразования на северо-западе России в голоцене // XI чтения памяти акад. В.Н. Сукачева «Биоценологические особенности болот и их рациональное использование». М.: РАН, 1994. С. 61–84.
15. Елина Г.А., Кузнецов О.Л., Максимов А.И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л.: Наука, 1984. 128 с.
16. Ефимова Н.А., Жильцова Е.Л., Лемешко Н.А., Строкينا Л.А. О сопоставлении изменений климата в 1981–2000 гг. с палеоаналогами глобального потепления // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 18–23.
17. Зайцева Н.А. О работе Совета-семинара РАН «Возможности предотвращения изменений климата и его негативных последствий», проблема Киотского Протокола // Материалы Всерос. конф. «Нерешенные проблемы глобальной климатологии». СПб., 10-11 июня 2010 г. СПб.: РАН. С. 25–28.
18. Инишева Л.И. Болота и биосфера. Введение // Материалы VII Всерос. науч. шк., 13–15 сентября 2010 г. Томск, Изд-во Томск. гос. ун-та, 2010. С. 3–4.
19. Инишева Л.И., Головацкая Е.А. Сток и эмиссия углерода в Васюганском болоте // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 123–133.
20. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 267 с.
21. Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Лугина К.М., Торопова А.А., Турчинович И.Е. Анализ многолетних метеорологических наблюдений в Северо-Западном регионе России // Метеорология и гидрология. 1999. № 1. С. 30–38.
22. Кобак К.И., Сперанская Н.А. Заболачивание и аккумуляция углерода в болотных экосистемах России // Структурно-функциональные исследования растений в приложении к актуальным проблемам экологии и эволюции биосферы: Тез. докл. СПб.: БИН, 2009. С. 26.
23. Константинов В.К. Гидролесомелиоративная энциклопедия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 367 с.
24. Кузьмин Г.Ф. Болота и их использование // Тр. НИИ торфяной промышленности. СПб.: Изд-во «Петербург», 1993. 140 с.
25. Лапицина Е.Д. Болота Западной Сибири: автореф. ... д-ра биол. наук. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2004. 37 с.
26. Лисс О.Л., Березина Н.А. Болота Западно-Сибирской равнины. М.: Наука, 1981. 208 с.
27. Лопатин В.Г. О гидравлическом значении верховых болот // Вестн. ЛГУ. 1949. № 2. С. 37–49.
28. Новиков С.М., Батуев И.В. О реликтовых болотах севера Западной Сибири // Изв. РГО, 2010. Т. 142, вып. 3. С. 37–43.
29. Новиков С.М., Усова Л.И., Малясова Е.С. Возраст и динамика болот Западной Сибири // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. М.: ГЭОС, 1999. С. 72–76.

30. Новиков С.М., Усова Л.И. Новые данные о площади болот и запасах торфа на территории России // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 49–52.
31. Нейштадт М.И., Малик М.И. Прошлое, настоящее и будущее западно-сибирских болот // Природа. 1980. № 11. С. 11–20.
32. Пологова Н.Н., Латишина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 174–179.
33. Предстоящие изменения климата. Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях / Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля, М.С. Маккракена, А.Д. Хекта. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 269 с.
34. Пьявченко Н.И. Болотообразовательный процесс в лесной зоне // Значение болот в биосфере. М.: Наука, 1980. С. 7–16.
35. Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природа и хозяйственное значение. М.: Наука, 1985. 152 с.
36. Режим доступа: <http://www.climatechange.ru/node/1023>
37. Туплянова А.А., Базилевич Н.И., Снытков В.А. Биологическая продуктивность травянистых экосистем. Новосибирск: Наука, 1988. 134 с.
38. Турчинович И.Е., Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Торопова А.А. Моделирование многолетних скоростей торфонакопления разными типами болот северо-запада России // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 60–62.
39. Хотинский Н.А. Голоцен северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.
40. Adams J. Carbon pools and its changes // Proc. of the 14.th INQA-Congress, August, 1985, Berlin. P. 17–23.
41. Atmospheric CO₂ and the global carbon cycle. USA Department of Energy, Report (DOE/ER 0239. Washington, D.C.).
42. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon. pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // Global Biogeochem Cycles. 1995. Vol. 9, N 1. P. 37–46.
43. Broecker W.S., Peng T.H. Carbon cycle-1985. Glacial to interglacial changes in the operation of the global carbon cycle // Radiocarbon. 1986. Vol. 28. P. 309–327.
44. Callendar G.S. On the amount of carbon dioxide in the atmosphere // Tellus. 1958. N 10. P. 243–251.
45. Clymo R.S. Limits to peat bog growth // Phil. Trans. Royal Soc. 1984. Vol. 303b. P. 605–654.
46. Clymo R.S. Assessing the accumulation of carbon in peatlands // Northern peatlands in global climate change. Helsinki, FDITA, Publ. of Academy of Finland, 1996. N 1. P. 207–212.
47. Hansen J. Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three dimensional model // J. Geoph. Res. 1988. Vol. 93. P. 9341–9364.
48. Hansen J., Keeling Ch., Harmon M. Target atmosphere carbon dioxide // NASA Publ. Report, 2008. 124 pp.
49. Hoffert M.I. Global distribution of atmospheric carbon dioxide. A projection // Atm. Env. Vol. 8. P. 1225–1240.
50. Jenny H., Gessel S.P., Bingham F.T. Comparative study of decomposition rate of organic matter in temperate and tropical regions // Soil Sci. Vol. 68. P. 419–432.
51. Vitt D.H., Beilman D.V., Halsey L.A. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene // Canadian Journ. of Earth Science. 2000. N 37. P. 283–287.

52. Volk T., Hoffert M.I. Ocean carbon pump. Analysis of relative strength and efficiencies of in ocean-driven atmospheric CO₂-changes//The carbon cycle and atmospheric CO₂ natural variations Archean to Present: Geoph. Monogr. 1985. Vol. 32. P. 91–110. (American Geophysical Union. Washington, D.C.).

53. Zoltai S.C., Taylor S., Jeglum J.K., Mills G.F., Johnson J.D. Wetlands of boreal Canada//Wetlands of Canada. Polyscience Publication, Montreal, Quebec: 1988. P. 97–154.

Поступила 18.03.15

UDC 631.4.43

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.9

Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by the Wetland Ecosystems of Russia in Holocene. The Problems of Paludification

B.V. Babikov¹, Doctor of Agricultural Sciences

K.I. Kobak², Doctor of Geographic Sciences

¹Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: lidun80@mail.ru

²State Hydrological Institute, 2nd Line, 23, Vasilyevsky Island, Saint Petersburg, 199053, Russian Federation; e-mail: lidun80@mail.ru

Wetland ecosystems are the net carbon (atmospheric carbon dioxide) sink for the atmosphere. The analysis of paludification speed and intensity of carbon accumulation in the peat in Russia during the Holocene is presented. During that period most of the peat bogs were formed in Russia. According to the current estimates, the area of peat bogs is 1.68 million km², with wetlands – 3.69 million km². All these lands contain more than 100 billion tons of carbon (Gt 100.93). Russia ranks first in the world in terms of accumulated peat. Annually 66 thousand Ha are swamped in the world. The average speed of paludification in Russia in Holocene was 15 ... 18 thousand Ha per year. It varied under the influence of changing climatic, hydrological, geological, morphological and other factors, and it was significantly different in some natural zones and regions of Russia. For example, the average rate of paludification in Karelia (north-western part of Russia) in Holocene was 400 ha per year, while it ranged from 150 to 755 ha per year. The most intensive logging and peat accumulation was found during the Atlantic period of Holocene, when the types of wetland ecosystems and their balance were changed. The other areas of North-Western and Western Siberia of the Russian Federation have similarities of waterlogging. To date, the numerous data on the rate of carbon and peat accumulation in bog ecosystems of different types an average during the Holocene are gathered in Russia. These results are not complete and, unfortunately, make it impossible to determine the current rate of accumulation of organic matter in the marshes and the nature of the ecosystem functioning (whether a marsh is a net sink or a net source of carbon dioxide for the atmosphere). Marsh drainage may increase the emissions of carbon dioxide into the atmosphere. To determine the current (over the seasons, decades) rate of net carbon accumulation the balance method and the method of mathematical modeling of the marsh ecosystem are used. The calculations of the present rate of net carbon accumulation by the swamps according to the R. Clymo model (as modified by I.E. Turchinovich) showed that it was 37.6 million tons of carbon per year. Currently, the process of paludification in Russia have

been intensified as a result of the global climate changes and extensive damage of the drainage systems.

Keywords: wetland ecosystems, Holocene, carbon, accumulation, peat, modeling.

REFERENCES

1. Alekseev V.A., Zimnitskiy P.V. *Statisticheskie dannye o bioraznoobrazii drevesnykh resursov Rossii na nachalo XXI veka* [Statistical Data on the Biodiversity of Wood Resources in Russia at the Beginning of the XXI Century]. Saint Petersburg, 2006. 160 p.
2. Babikov B.V. Sostav vozdukhа torfyanykh pochv i ego vliyanie na rost kul'tur sosny [The Air-Composition of Peat Soils and Its Impact on Growth of Pine]. *Lesnoy zhurnal*, 1963, no. 6, pp. 14–19.
3. Babikov B.V. *Ekologiya sosnovykh lesov na osushennykh bolotakh* [Ecology of Pine Forests on Drained Swamps]. Saint Petersburg, 2004. 166 p.
4. *Bolota Zapadnoy Sibiri* [Marshes of Western Siberia]. Ed. by K.E. Ivanov, S.M. Novikov. Leningrad, 1976. 448 p.
5. Boch M.S., Kobak K.I., Kol'chugina T.P., Vinson T.S. Soderzhanie i skorost' akumulyatsii ugleroda v bolotakh byvshego SSSR [Carbon Pools and Accumulation in Peatlands of the Former Soviet Union]. *Byulleten' MOIP* [Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series], 1994, vol. 99, iss. 4, pp. 59–70.
6. Budyko M.I., Ronov A.B., Yanshin A.L. *Istoriya atmosfery* [The History of the Atmosphere]. Leningrad, 1985. 207 p.
7. Vasil'ev S.V. Skorost' torfonakopleniya v Zapadnoy Sibiri [The Rate of Peat Accumulation in Western Siberia]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 56–59.
8. Vomperskiy S.E. Rol' bolot v krugovorote ugleroda [The Role of Peatlands in Carbon Cycle]. *XI Chteniya pamyati akad. V.N. Sukacheva "Biogeotsenoticheskie osobennosti bolot i ikh ispol'zovanie"* [The XI Readings to the Memory of a Member of the Academy of Sciences V.N. Sukachev "Biogeocenotic Features of Wetlands and their Use"]. Moscow, 1994, pp. 5–37.
9. Vomperskiy S.E., Tsyganova O.P., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. Vertikal'nyy prirost torfa na bolotakh Rossii v golotsene po dannym radiouglerodnykh datirovok [Vertical Growth of Peat in the Bogs of Russia in Holocene According to the Radiocarbon Dating]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 53–55.
10. Vomperskiy S.E., Tsyganova O.P., Kovalev A.G., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. Zabolochnost' territorii Rossii kak faktor svyazyvaniya atmosfernogo ugleroda [Paludification of the territory of Russia as an Atmospheric Carbon Sequestration Factor]. *Global'nye izmeneniya prirodnoy sredy i klimata* [Global Changes of Environment and Climate]. Moscow, 1999, pp. 124–145.
11. Gadzhiev I.M., Smolentsev B.A. Rol' torfoobrazovaniya v formirovaniy pochvennogo pokrova Sibirskikh Uvalov v golotsene [The Role of Peat Formation in the Soil Forming in the Siberian Ridges in Holocene]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 63–65.

12. *Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of Peat Lands of the Permafrost Zone of Western Siberia]. Ed. by S.M. Novikov. Saint Petersburg, 2009. 520 p.
13. Glebov F.Z., Toleyko L.S., Klimanov V.A., Karpenko L.V., Dashkovskaya I.S. Dinamika paleorastitel'nosti, paleoklimata, nakopleniya torfa i ugleroda v mezhdurech'e Obi i Vasyugana (Zapadno-Sibirskaya nizmennost') [Dynamics of Palaeovegetation, Paleoclimate, Peat and Carbon Accumulation in the Interfluvial Area of the Ob and Vasyugan Rivers (West Siberian Lowland)]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 16–19.
14. Elina G.A. Dinamika bolotoobrazovaniya na severo-zapade Rossii v golotsene [Dynamics of Paludification in North-West of Russia in Holocene]. *XI Chteniya pamyati akad. V.N. Sukacheva "Biogeotsenoticheskie osobennosti bolot i ikh ispol'zovanie"* [The XI Readings to the Memory of a Member of the Academy of Sciences V.N. Sukachev "Biogeocenotic Features of Wetlands and their Use"]. Moscow, 1994, pp. 61–84.
15. Elina G.A., Kuznetsov O.L., Maksimov A.I. *Strukturno-funktional'naya organizatsiya i dinamika bolotnykh ekosistem Karelii* [Structural and Functional Organization and Dynamics of Wetland Ecosystems of Karelia]. Leningrad, 1984. 128 p.
16. Efimova N.A., Zhil'tsova E.L., Lemeshko N.A., Strokina L.A. O sopostavlenii izmeneniy klimata v 1981–2000 gg. s paleoanalogami global'nogo potepeniya [On the Comparison of Climate Change in 1981–2000 with the Paleoanalogs of Global Warming]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology], 2004, no. 8, pp. 18–23.
17. Zaytseva N.A. O rabote Soveta-seminara RAN "Vozmozhnosti predotvrashcheniya izmeneniy klimata i ego negativnykh posledstviy", problema Kiotskogo Protokola [On the Work of the Council-Seminar of the Russian Academy of Sciences "Opportunities of Climate Change Preventing and Its Adverse Effects", the Problem of the Kyoto Protocol]. *Materialy Vseros. konf. "Nereshennyye problemy global'noy klimatologii"*. Sankt-Peterburg, 10–11 iyunya, 2010 g. [Proc. All-Russian Conf. "Unresolved Problems of Global Climate". St. Petersburg, June 10–11, 2010]. Saint Petersburg, 2010, pp. 25–28.
18. Inisheva L.I. Bolota i biosfera. Vvedenie [Bogs and Biosphere. Introduction]. *Materialy VII Vseros. nauch. shk., 13–15 sentyabrya 2010 g.* [Proc. VII All-Russian Sci. School, 13–15 September, 2010]. Tomsk, 2010, pp. 3–4.
19. Inisheva L.I., Golovatskaya E.A. Stok i emissiya ugleroda v Vasyuganskom bolote [Carbon Stock and Emission in the Vasyugan Bog]. *Bol'shoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan Bog. Current Status and Development Processes]. Tomsk, 2002, pp. 123–133.
20. Kobak K.I. *Bioticheskie komponenty uglerodnogo tsikla* [Biotic Components of the Carbon Cycle]. Leningrad, 1988. 267 p.
21. Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Lugina K.M., Toropova A.A., Turchinovich I.E. Analiz mnogoletnykh meteorologicheskikh nablyudeniy v Severo-Zapadnom regione Rossii [Analysis of Long-Term Meteorological Observations in the North-West Region of Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology], 1999, no. 1, pp. 30–38.
22. Kobak K.I., Speranskaya N.A. Zabolachivanie i akkumulyatsiya ugleroda v bolotnykh ekosistemakh Rossii [Paludification and Carbon Accumulation in the Bog Ecosystems of Russia]. *Strukturno-funktional'nye issledovaniya rasteniy v prilozhenii k aktual'nym problemam ekologii i evolyutsii biosfery: Tez. dokl.* [Structural and Functional Studies of Plants in the Annex to the Topical Issues of Ecology and Evolution of the Biosphere: Abs.]. Saint Petersburg, 2009, p. 26.

23. Konstantinov V.K. *Gidrolesomeliativnaya entsiklopediya* [The Forest Reclamation Encyclopedia]. Saint Petersburg, 2000. 367 p.
24. Kuz'min G.F. *Bolota i ikh ispol'zovanie* [Bogs and Their Use]. *Tr. NII torfyanoj promyshlennosti* [Proc. Research Institute of Peat Industry]. Saint Petersburg, 1993. 140 p.
25. Lapshina E.D. *Bolota Zapadnoy Sibiri: dis... dok. biol. nauk* [Bogs of Western Siberia: Dr. Biol. Sci. Abs.]. Tomsk, 2004. 37 p.
26. Liss O.L., Berezina N.A. *Bolota Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Marshes of the West Siberian Plain]. Moscow, 1981. 208 p.
27. Lopatin V.G. O gidravlicheskom znachenii verkhovykh bolot [On the Hydraulic Value of Raised Bogs]. *Vestnik LGU* [Vestnik of Pushkin Leningrad State University], 1949, no. 2, pp. 37–49.
28. Novikov S.M., Batuev I.V. O reliktovykh bolotakh severa Zapadnoy Sibiri [About the Relict Marshes of the North of Western Siberia]. *Izvestia RGO*, 2010, vol. 142, iss. 3, pp. 72–76.
29. Novikov S.M., Usova L.I., Malyasova E.S. Vozrast i dinamika bolot Zapadnoy Sibiri [Age Dynamics of Wetlands of West Siberia]. *Bolota i zabolochennye lesa v svete zadach ustoychivogo prirodopol'zovaniya* [Marshes and Swamp Forests in the Challenges of Sustainable Environmental Management]. Moscow, 1999, pp. 72–76.
30. Novikov S.M., Usova L.I. Novye dannye o ploshchadi bolot i zapasakh torfa na territorii Rossii [New Data on the Area of Swamps and Peat Reserves in Russia]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 49–52.
31. Neyshtadt M.I., Malik M.I. Proshloe, nastoyashchee i budushchee zapadno-sibirskikh bolot [The Past, Present and the Future of the West-Siberian Swamps]. *Priroda*, 1980, no. 11, pp. 11–20.
32. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bol'shogo Vasyuganskogo bolota [Carbon Accumulation in the Peat Deposits of the Great Vasyugan Swamp]. *Bol'shoye Vasyuganskoye boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [The Great Vasyugan Swamp. Current Status and Processes of Development]. Tomsk, 2002, pp. 174–179.
33. *Predstoyashchie izmeneniya klimata. Sovmestnyy sovetsko-amerikanskiy otchet o klimate i ego izmeneniyakh* [The Upcoming Climate Change. The Joint Soviet-American Report on Climate and Climate Change]. Ed. by M.I. Budyko, Yu.A. Izrael, M.S. McCracken, A.D. Khekt. Leningrad, 1991. 269 p.
34. P'yavchenko N.I. Bolotoobrazovatel'nyy protsess v lesnoy zone [The Mire Creation Process in the Forest Zone]. *Znachenie bolot v biosfere* [The Significance of Swamps in Biosphere]. Moscow, 1980, pp. 7–16.
35. P'yavchenko N.I. *Torfyanye bolota, ikh priroda i khozyaystvennoe znachenie* [Peat Bogs, Their Nature and Economic Importance]. Moscow, 1985, 152 p.
36. *Kiotskiy protokol: pervye itogi* [The Kyoto Protocol: the First Results]. Available at: <http://www.climatechange.ru/node/1023>.
37. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Snytkov V.A. *Biologicheskaya produktivnost' travyanistykh ekosistem* [Biological Productivity of Herbaceous Ecosystems]. Novosibirsk, 1988, 134 p.
38. Turchinovich I.E., Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Toropova A.A. Modelirovanie mnogoletnikh skorostey torfonakopleniya raznymi tipami bolot severo-zapada Rossii [Modelling of Long-Term Rates of Peat Accumulation in Different Types of Marshes of the North-

west of Russia]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 60–62.

39. Khotinskiy N.A. *Golotsen severnoy Evrazii* [The Holocene of Northern Eurasia]. Moscow, 1977, 200 p.

40. Adams J. Carbon Pools and Its Changes. *Proc. 14th INQA-Congress, August, 1985*. Berlin, 1995, pp. 17–23.

41. Atmospheric CO₂ and the Global Carbon Cycle. *USA Department of Energy, Report*. DOE/ER 0239. Washington, D.C.

42. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon Pools and Accumulation in Peatlands of the Former Soviet Union. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, vol. 9, no. 1, pp. 37–46.

43. Broecker W.S., Peng T.H. Carbon Cycle – 1985. Glacial to Interglacial Changes in the Operation of the Global Carbon Cycle. *Radiocarbon*, 1986, vol. 28, pp. 309–327.

44. Callendar G.S. On the Amount of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*, 1958, no. 10, pp. 243–251.

45. Clymo R.S. Limits to Peat Bog Growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1984, vol. 303b, pp. 605–654.

46. Clymo R.S. Assessing the Accumulation of Carbon in Peatlands. *Northern Peatlands in Global Climate Change*. Ed. by R. Laiho, J. Laine, H. Vasander. Helsinki, 1996, no. 1/96, pp. 207–212.

47. Hansen J. Global Climate Changes as Forecast by Goddard Institute for Space Studies Three Dimensional Model. *J. Geoph. Res.*, 1988, vol. 93, pp. 9341–9364.

48. Hansen J., Ch. Keeling, M. Harmon et al. Target Atmosphere Carbon Dioxide. *NASA Publ. Report*, 2008. 124 p.

49. Hoffert M.I. Global Distribution of Atmospheric Carbon Dioxide. A Projection. *Atm. Env.*, 1974, vol. 8, pp. 1225–1240.

50. Jenny H., Gessel S.P., Bingham F.T. Comparative Study of Decomposition Rate of Organic Matter in Temperate and Tropical Regions. *Soil Sci.*, 1949, vol. 68, pp. 419–432.

51. Vitt D.H., Beilman D.V., Halsey L.A. Spatial and Temporal Trends in Carbon Storage of Peatlands of Continental Western Canada through the Holocene. *Canadian Journ. of Earth Science*, 2000, no. 37, pp. 283–287.

52. Volk T., Hoffert M.I. Ocean Carbon Pump. Analysis of Relative Strength and Efficiencies in Ocean-Driven Atmospheric CO₂ Changes. *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present. Proceedings of the Chapman Conference on Natural Variations in Carbon Dioxide and the Carbon Cycle, Tarpon Springs, FL, January 9-13, 1984*. Washington, DC, American Geophysical Union, 1985, pp. 91–110.

53. Zoltai S.C., Taylor S., Jeglum J.K., Mills G.F., Johnson J.D. Wetlands of Boreal Canada. *Wetlands of Canada. Polyscience Publication*. Montreal; Quebec, 1988, pp. 97–154.

Received on March 18, 2015