

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 581.526 (571.1)

Л. И. ИНИШЕВА*, К. И. КОБАК**, И. Е. ТУРЧИНОВИЧ**

*Томский государственный педагогический университет

**Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА ЗАБОЛАЧИВАНИЯ И СКОРОСТЬ АККУМУЛЯЦИИ УГЛЕРОДА В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ РОССИИ

Проанализирована скорость аккумуляции углерода в болотных экосистемах России в голоцене. Определены современные скорости аккумуляции углерода и линейного прироста торфа некоторых типов болот России.

Ключевые слова: болотные экосистемы, скорость депонирования углерода, парниковые газы, эмиссия, заболачивание, торфонакопление.

An analysis is made of the carbon accumulation rate in bog ecosystems of Russia during the Holocene. The analysis ascertained the contemporary carbon accumulation rate and the linear peat growth rate for some types of bogs of Russia.

Keywords: bog ecosystems, carbon deposition rate, greenhouse gases, emission, paludification, peat accumulation.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с позднего плейстоцена содержание в атмосфере CO_2 увеличивалось. За последние 17–18 тыс. лет атмосфера аккумулировала не менее 170 млрд т углерода, при этом средняя скорость аккумуляции составляла 20–30 млн т С/год [1].

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 CO_2 . 18 тыс. л. н. пул органического углерода составлял 625 млрд т (Гт), в настоящее время — 2100 Гт [2]. Увеличение почвенного пула углерода, несомненно, связано с развитием болот и накоплением в них торфа. По современным оценкам мировые запасы углерода, аккумулированного в болотах (на площади 6,41 млн km^2), составляют от 329 до 528 Гт [3]. Ежегодно в мире заболачивается около 66 тыс. га земель [4]. В России общая площадь оторфованных и заболоченных земель — 3,691 млн km^2 , или 21 % территории страны, а содержание в них углерода — 100,93 Гт [5]. По другим оценкам болота (в границах нулевой залежи) занимают площадь 1,68 млн km^2 [6]. По запасам торфа Россия находится на первом месте в мире.

Следует заметить, что о скорости накопления торфа и углерода и скорости заболачивания в раннем голоцене (разные временные интервалы) мы имеем более полное представление, чем о скорости болотообразовательного процесса за последние 100 лет. С января 2013 г. намечается новый этап в работе над «Киотским протоколом». Совершенно очевидно, что уже сейчас необходимы надежные оценки как антропогенных, так и естественных стоков и источников углерода. Поэтому была поставлена задача проанализировать скорости процесса заболачивания и аккумуляции углерода в болотных экосистемах в разные временные интервалы.

ТРАНСГРЕССИЯ БОЛОТ И НАКОПЛЕНИЕ ТОРФА В ГОЛОЦЕНЕ

По оценке М. И. Нейштадта [7], на территории России средняя скорость заболачивания за весь голоцен составляла 15 тыс. га/год, по нашим оценкам [2] — 18 тыс. га/год. Совершенно очевидно,

что скорость трансгрессии болот 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, изменения их типов и состава растительности [8]. Начавшийся в бореале болотообразовательный процесс 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 [8] как 400 га/год, колебания составляют от 150 до 755 га/год. Наиболее интенсивное болотообразование отмечено 7000–5000 лет В. Р., когда сформировалось более 40 % болотных массивов современной территории Карелии (3,63 млн га) и скорость заболачивания составляла 670–755 га/год. В суббореальное время (4900–4000 лет В. Р.) площади вновь образующихся болот были минимальными — 150 га/год, что близко к интенсивности болотообразования в последнем тысячелетии — 130 га/год.

После суббореального минимума (4000–3000 лет В. Р.) произошел некоторый подъем и затем последовал новый спад. После 2000 лет В. Р. процесс болотообразования вновь активизировался.

Нетто-аккумуляция углерода в болотах Карелии, по нашим расчетам, уменьшалась в течение голоцена от 34,5 г С/м² в год (бореальное время) до 9–10 г С/м² в год (в субатлантике). В атлантическое время она составляла 27 г С/м² в год, а в суббореале — 17 г С/м² в год [2]. Такой же характер процесса заболачивания и торфонакопления наблюдался на северо-западе европейской части России. Изучение трансгрессии верховых болот свидетельствует о том, что с XVIII столетия скорость наступления болот на суходолы возрастала и к началу 1990-х гг. достигла 44,6 см/год, а на некоторых болотных массивах — 166,3 см/год [9]. Нетто-аккумуляция углерода олиготрофными болотами северо-запада, по нашей оценке, составляла 45 г С/м² в год в бореале и атлантике, 43 г С/м² в год — в суббореале и 18 г С/м² в год — в субатлантическое время [10].

Исследования на территории Западной Сибири показывают, что начало активного болотообразовательного процесса относится к предбореальному времени. Оно было обусловлено окончанием Сарганского 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) наступление болот на суходолы шло со скоростью 40–60 см/год [11]. За 4–5,5 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 1,4–1,6 мм/год, что в два раза превышало интенсивность накопления торфа в северных экосистемах европейской части России [12].

В суббореальное время в связи с похолоданием и увеличением сухости климата темпы трансгрессии болот на суходолы снизились до 5–10 см/год, а скорость торфонакопления уменьшилась до 0,4 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 см/год), а интенсивность торфонакопления в северной тайге не превышает 0,2 мм/год [11, 12].

Похожие результаты получены и при исследованиях болотных массивов таежной зоны Западно-Сибирской равнины (междуречье Оби и Васюгана, 59°23' с. ш., 76°54' в. д.). По мере образования торфяной залежи, начиная с предбореального времени (около 9500 лет В. Р.), скорость ее нарастания постоянно уменьшалась. Наиболее интенсивное накопление торфа происходило на границе предбореала и бореала, когда средний прирост составлял 2,04 мм/год (предбореал) — 0,86 мм/год (бореал). Аккумуляция углерода в торфе была максимальной (137 г С/м² в год) в предбореале и достаточно высокой (45,5 г С/м² в год) в бореальное время [13]. Современный (субатлантика) прирост торфа этих болот составляет 0,3 мм/год, а аккумуляция углерода — 11,2 г С/м² в год.

Анализ скорости торфонакопления Северной Евразии за голоцен в зональном аспекте свидетельствует о том, что, несмотря на различия в историях болотообразовательного процесса Европы и Западной Сибири, для них прослеживается ряд общих черт. Так, для северных торфяников и Европы, и Западной Сибири начало голоцена характеризуется высокими темпами торфонакопления: до 1,6 мм/год в Западной Сибири и 0,8 мм/год на Европейском Севере. В Западной Сибири заболачиванием была охвачена в основном северная часть региона, а на юге существовали лишь немногочисленные торфяники [14]. Новосанчуговское похолодание и последовавший после короткого потепления ряд новых похолоданий привели к тому, что в период 7000–6000 лет В. Р. на севере наблюдался локальный минимум торфонакопления. В это же время в южных районах (южнотаежная подзона и лесостепь) установлены локальные максимумы торфообразования как в Европе, так и в Западной Сибири.

Климатический оптимум голоцена на севере характеризовался максимальным потеплением и повышением влажности, определившими увеличение активности торфонакопления в болотах лесотундры и северной тайги. В этот период, возможно, произошла полная деградация мерзлоты. Есть основания полагать, что именно тогда сформировалась основная площадь современных болотных массивов Севера [12]. Похолодание, начавшееся 4,5 тыс. л. н., обусловило уменьшение скорости торфонакопления в северных районах европейской части и Западной Сибири. В Западной Сибири 3,5 тыс. л. н. этот показатель снизился до 0,1–0,2 мм/год и далее слабо варьировал, вплоть 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 способствовали протаиванию мочажин и формированию 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 тыс. лет остаются частично промерзшими. В целом в северных районах в голоцене наблюдалась сходная тенденция уменьшения скорости торфонакопления от бореала до субатлантики. Интенсивность торфонакопления в Западной Сибири была значительно выше, чем на Европейском Севере, особенно в ранние временные отрезки голоцена (9000–7000 лет В. Р.). В лесотундре и тундре Европы также отмечался всплеск торфонакопления (3000–1500 лет В. Р.), когда скорость этого процесса достигала 0,4 мм/год.

В среднетаежной зоне Европы и Западной Сибири вариации скорости торфонакопления находились в противофазе [12]. Максимальные скорости (до 1,1 мм/год в Западной Сибири и 1,4 мм/год в Европе) зафиксированы в бореальное время, но на более поздних 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 Васюганского болота показало, что средняя многолетняя аккумуляция углерода составляла 30–40 г С/м² в год [15]. Вертикальный прирост колебался в залежах верхового типа от 0,60 до 2,62 мм/год (табл. 1), что выше средних значений для Западной Сибири и значительно выше обычно приводимых значений для европейской средней и южной тайги [5]. В бореальный период (9–8 тыс. л. н.) в условиях посте-

Таблица 1

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

Район исследования	Вертикальный прирост торфа, мм/год	Накопление углерода, г/(м ² ·год)	Лит. источник
Западная Сибирь (среднее для лесной зоны)	0,62	36,5	[16]
Южная тайга и подтайга	0,74–0,80	41,0 (24,9–56,7)	[16]
Лесные болота (согры)	0,36		[17]
Выпуклые верховые болота	1,13		[16]
	0,24		[18]
Средняя тайга	0,56	24,8 (15,4–43,9)	[16]
Центры крупных верховых болот	0,35–0,40		[17]
Васюганское болото (верховые)	0,60–2,62	30–40	[15]
Северная тайга	0,39 (0,10–0,78)	11,4 (7,1–15,4)	[16]
Плоскобугристые болота	0,20		[16]
Микроландшафты	0,22		[17]
Крупнобугристые болота	0,39		[17]
Тундра	0,15–0,24		[18]
Полигональные болота	0,05		[19]
Европейская территория России			
Карелия	0,85		[5]
Южная тайга ЕТР	0,55		[5]
Северо-запад (среднее за 9500 лет)	0,59		[9]
Никольско-Лютинская болотная система		11,8–35,8	[9]
Генетические центры		13,4–40,9	
Ширинская болотная система		10,0–24,6	
Генетические центры		9,0–29,0	

пенного потепления климата на исследованной территории Васюганского болота установлен пик аккумуляции углерода — 70 г С/м^2 в год при величине прироста $1,79 \text{ мм/год}$. Столь большие различия в уровне аккумуляции углерода в болотах средней тайги Европы и Азии могут быть объяснены особенностями сибирского климата.

В лесостепной зоне и подзоне южной тайги Западной Сибири климатический оптимум голоцена сопровождался аридизацией климата [20], что привело к снижению скорости торфонакопления. В торфяниках Европы это не зафиксировано. Однако за последние более 4 тыс. лет (4000 В. Р.) в лесостепной зоне скорость торфонакопления синхронно возрастала в торфяных болотах Европы и Азии. В этой зоне 3700–3500 лет В. Р. фиксируется развитие олиготрофных торфяников, чему могло способствовать только увеличение влажности климата. Избыток атмосферной влаги создавал анаэробные 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 (2000–1700, 1500–1400 и 700–600 лет В. Р.), увеличиваясь в отдельных торфяниках до $1,5\text{--}2 \text{ мм/год}$ [12]. Накопленные данные позволяют сделать вывод, что в течение голоцена скорость торфообразования в южных районах Сибири и Европы возрастала. Изменения скорости торфонакопления на севере и на юге находились в противофазе.

Результаты изучения вертикального прироста торфа в болотах России в голоцене по данным радиоуглеродных датировок [21] свидетельствуют о том, что в субатлантический период прирост явно активизировался на болотах южной тайги и хвойно-широколиственных лесов европейской территории России (по сравнению со средним значением за голоцен). На аналогичных же болотах Западной Сибири (вне области распространения многолетней мерзлоты) в это время установлено некоторое снижение прироста по сравнению со средним за голоцен. Полученные результаты прекрасно согласуются с данными о снижении уровня торфонакопления в субатлантическое время в Западной Сибири.

Анализ скорости торфонакопления в болотах, расположенных на многолетнемерзлых грунтах и снабженных радиоуглеродными датировками (базальный возраст 7680–10 610 лет), показал, что во вторую половину голоцена (в суббореале и субатлантике) скорость часто на порядок ниже ($0,08 \text{ мм/год}$), чем в первую ($0,55 \text{ мм/год}$), когда она соответствовала приросту немерзлых торфяников [21].

Влажное потепление в последние сто лет привело к увеличению прироста торфа и накоплению углерода в болотах средней тайги Западной Сибири. 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 составляла, по оценке М. И. Нейштадта [22], 8 тыс. га/год. За последние 2,5 тыс. лет средняя скорость наступления болот на суходолы составляла 15 см/год . На основании результатов радиоуглеродного датирования установлено, что она не была одинаковой: с 2500 до 1250 л. н. — $16,8 \text{ см/год}$, с 1250 до 820 л. н. — $20,9 \text{ см/год}$, а с 820 г. до настоящего времени — $9,1 \text{ см/год}$. Современное Васюганское болото 500 л. н. состояло из 19 отдельных болот площадью $4,5 \text{ млн га}$, при этом 900 тыс. га было представлено мелкозалежными участками с мощностью торфа менее $0,7 \text{ м}$ [7, 22].

По мнению специалистов [9, 23, 24], возникновение новых очагов устойчивого заболачивания в настоящее время в естественных условиях маловероятно. Процесс заболачивания лесов носит прерывистый характер и большого значения не имеет [23]. Однако 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 интенсивном наступлении болот на леса. Незаболоченная лесная площадь составляет там не более 20–30 % [23]. Подобная тенденция отмечена и в других типах леса.

Статистические данные свидетельствуют о том, что за последние 30 лет увеличение заболоченности отмечается во всех административных районах России (кроме некоторых южных). Совершенно очевидно, что современное заболачивание в большой степени обусловлено разрушением созданных ранее лесосушительных систем. В России с 1775 по 1991 г. осушено $4,96 \text{ млн га}$ земель, причем с 1925 по 1991 г. (без Прибалтики, Белоруссии и Украины) лесосушительные системы были построены на площади более 4 млн га . В 1991 г. гидроресомелиоративные работы резко сократились. Есть основания полагать, что к настоящему времени вторичному заболачиванию подверглось не менее 1 млн га [25]. Наглядным примером вторичного заболачивания служат отроги Васюганского болота в районе с. Бакчар в Томской области [26].

В последние годы отмечается четкая тенденция наступления болот на леса на северо-западе России. Линейный рост болот, их наступление на окружающие суходолы составляет в настоящее время

30–50 см/год, а вертикальный прирост торфа равен в среднем 3 мм/год [9]. Вариации значений вертикального прироста находятся в интервале от 0,4–0,6 мм/год (торфа древесной и древесно-травяной групп) до 10–12 мм/год (олиготрофные сфагновые торфа). Максимальные величины вертикального прироста отмечаются как в генетических центрах — 12,82 мм/год, так и на окраинах — 10,26 мм/год (Никольско-Лютинская болотная система). Среднее значение вертикального прироста торфа для некоторых сфагновых болот северо-запада (Никольско-Лютинская система, Ламмин-Суо, Ширинский Мох) за последние 100 лет составляет 7,14 мм/год. Активизация процесса торфонакопления может быть объяснена климатическими причинами, прежде всего увеличением количества осадков [9]. Действительно, анализ метеорологических данных по Северо-Западному региону свидетельствует об увеличении среднегодовой (и зимне-весенней) температуры и росте осадков за последние десятилетия [27, 28].

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ АККУМУЛЯЦИИ УГЛЕРОДА

По мнению специалистов, для определения современной скорости аккумуляции углерода в болотных экосистемах могут быть использованы два основных метода [26, 29–31]. Первый из них — это сведение баланса углерода в экосистеме, основанное на определении первичной продуктивности болотных растений (NPP), измерениях потоков газов — CO_2 и CH_4 (эмиссия с поверхности почв) и выноса углерода болотными водами. Второй — использование моделей процессов аккумуляции торфа и углерода, базирующихся на исторических сведениях о функционировании болотной экосистемы (вместе с данными о плотности торфяного профиля, его возрасте и т. д.) [31].

Модель вертикального роста болот, разработанная для исследования верховых болот [30], в последние годы широко применяется для расчетов. Согласно этой модели болото можно представить в виде двух слоев: верхнего, деятельного слоя (акротелм) и нижнего (катотелм), в котором все процессы протекают значительно медленнее. Разделение торфяной залежи на два разнородных слоя впервые было обосновано в работах К. Е. Иванова [32] и В. Д. Лопатина [33].

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

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

где $M_a = P_a \cdot N_a$ — масса органического вещества на единице площади в акротелме; P_a — ежегодное поступление живого органического вещества на поверхность болота; N_a — глубина акротелма; P_c — поток органического вещества, ежегодно поступающего из деятельного слоя в нижний инертный слой — катотелм; A_a — коэффициент пропорциональности. Доля поступающего в катотелм вещества, определяемая отношением M_a/P_a , зависит от продуктивности болотных растений, климатических условий и т. д.

Скорость деструкции органического вещества в акротелме зависит от многих факторов. По мнению специалистов, она пропорциональна массе органического вещества, остающегося после разложения в изучаемом слое, а 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

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

где M_c — масса органического вещества торфа на единице площади, накопившегося к моменту времени t ; A_c — параметр, обычно представляющий собой постоянную величину для длительного интервала времени, в течение которого можно считать условия окружающей среды неизменными; P_c — аналог ежегодной продукции для акротелма.

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 в разных типах болот. По нашим оценкам, наиболее быстро стационарный деятельный слой устанавливается в болотах типа 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 значения 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 выразить уравнение (1) как $dMa/dt = 0$ и оценить величину потока органического вещества из акротелма в катотелм (P_c).

Значение P_c характеризует среднюю многолетнюю скорость торфонакопления в ранней стадии развития болота, когда формирование торфяной залежи только началось и скоростью потери органического вещества в катотелме можно пренебречь. В начальный период болотообразования скорость торфонакопления определяется интенсивностью нетто-продуктивности болотных экосистем, а также процессами, происходящими в акротелме, параметры которого, как и скорости различных процессов в нем, отличны от современных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

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. В наших расчетах использованы значения нетто-продуктивности, толщины акротелма, плотности абсолютно сухого вещества в акротелме по литературным данным [8, 9, 34–37]. Приведенные в табл. 2 значения параметра A_a для исследуемых типов болот оценены нами с помощью модели вертикального роста.

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

Суммарная аккумуляция углерода болотами России в настоящее время составляет 37,6 млн т/год [2, 5, 35]. По нашим оценкам, максимальный вклад (46,8 %) в эту аккумуляцию вносят грядово-мочажинные болота, занимающие более 40 % площади современных болот [38].

Результаты определения современной скорости аккумуляции углерода в болотах балансовым методом весьма ограничены. Положительным примером могут служить наши исследования в Западной Сибири на отрогах Васюганского болота в 1991–2001 гг. [26]. Изучение в течение ряда лет первичной продуктивности (NPP), эмиссии газов с поверхности почв (CO₂ и CH₄) и выноса углерода болотными водами показало, что общий расход углерода в изученных болотных экосистемах значи-

Таблица 2

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, кг/м ² в год (АСВ)	Плотность торфа в акротелме, кг/м ³ (АСВ)	Толщина акротелма, м	Константа разложения (A_a) в год	Поток органического вещества в катотелм, кг/м ² в год (АСВ) × (P_c)	Линейный прирост торфа, мм/год
Аапа	0,14–0,54	65–90	0,1–0,3	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 р	0,01–0,05	0,070	0,88–0,93
Верховые облесенные европейская часть Западная Сибирь	0,30–0,63 0,21–0,63	30–50	0,49–0,54* 0,47–0,58 р	0,01–0,04	0,063–0,079	0,79–0,84 1,00–1,10
Низинные (лесные)	0,78	140	0,85	0,06	0,02	0,10–0,20
Низинные травяно-лесные	0,72	100	0,49	0,01	0,10	0,70–0,90

Примечание. АСВ — абсолютно сухое органическое вещество; р — расчетные данные; * — данные полевых наблюдений.

тельно уступает уровню фотосинтетической нетто-аккумуляции — 77,4 и 125 г С/м² в год соответственно (средние значения за весь период наблюдений).

Большая часть потерь углерода обусловлена эмиссией диоксида углерода (в среднем 69 г С/м² в год, или 55,2 % от NPP) и метана, доля которого значительно меньше (0,3–6,5 г С/м² в год, или 2,7 % NPP). Экспериментально определенный вынос углерода болотными водами, включающий растворенные органические вещества, составляет 5,5 % NPP (6,9 г С/м² в год). В результате получен вывод о преобладании процесса аккумуляции углерода в торфяной залежи и прогрессирующем торфообразовательном процессе в настоящее время. По нашим оценкам, средняя аккумуляция углерода составляет 48 г С/м² в год.

Подобные исследования, проведенные в Ленинградской области на верховом болоте Ламмин-Суо (без учета эмиссии метана), показали, что современная нетто-аккумуляция углерода составляет 12 % NPP (31,4 г С/м² в год), вынос углерода болотными водами — 5 % NPP, а следствием минерализации органического вещества на поверхности почв и в акротелме является эмиссия газов, равная 83 % NPP [10]. Эти исследования продолжаются в настоящее время уже с учетом интенсивности выделения метана с поверхности почв. Полученные результаты свидетельствуют о положительном балансе (нетто-накоплении углерода) в разные по погодным условиям годы, но их явно недостаточно для окончательных выводов. Вместе с тем высокие значения вертикального прироста торфа, установленные на этом болоте, — 2,28 мм/год в центре и до 3,29 мм/год на некоторых окраинах [9], безусловно, подтверждают тот факт, что процесс торфообразования в настоящее время активно продолжается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения температуры в начале XXI столетия под влиянием усиления парникового эффекта сопоставимы с ее изменениями на границе позднеледниковья—голоцена, и быстрое потепление климата на этой границе может быть представлено как возможный аналог флуктуации климата и окружающей среды в первой четверти XXI в. [39]. Учитывая это, можно предположить, что процесс болотообразования активизируется в предстоящие десятилетия в северных районах России, а интенсивность торфонакопления достигнет бореально-позднеатлантического уровня.

По прогнозу современная северная граница между полигональными и бугристыми болотами в Западной Сибири сместится к северу примерно на 100 км при глобальном потеплении на 1,4 °С и более чем на 400 км при увеличении температуры на 2,2 °С. Граница между бугристыми и олиготрофными болотами также переместится к северу на 400 км при потеплении на 1,4 °С и более чем на 500 км, или примерно на 5 градусов широты, при повышении средней глобальной температуры на 2,2 °С.

Торфонакопление в болотных экосистемах России составляет, по нашим оценкам, 37,6 млн т С в год. Вполне вероятно, что эти оценки занижены (по меньшей мере в 1,5–2 раза) из-за отсутствия сведений о некоторых болотных системах России [35]. Прогнозируемое увеличение площадей болот, возможно, приведет к возрастанию нетто-аккумуляции диоксида углерода из атмосферы, и углерод в дальнейшем будет депонироваться в торфах на многие годы. Большинство отечественных и зарубежных специалистов рассматривают арктические и бореальные экосистемы как нетто-сток углерода из атмосферы [5, 7, 9, 12, 13, 23, 24, 31, 40–44]. Существует и другое (противоположное) утверждение, в котором болота представлены как постоянные нетто-источники парниковых газов в атмосферу [45].

В настоящее время во многих странах разрабатываются программы, направленные на охрану болотных экосистем с целью сохранения видового биоразнообразия планеты. Осуществляется даже восстановление ранее осушенных торфяных болот (например, в Шотландии) или вновь превращение в болота территорий, занятых сельскохозяйственными культурами (например, рисовые поля в Японии). В результате таких мероприятий должна увеличиться нетто-аккумуляция диоксида углерода из атмосферы.

Содержание парниковых газов в атмосфере продолжает увеличиваться. Из данных мониторинговой станции Мауна Лоа на Гавайях [46], где с 1958 г. проводятся непрерывные наблюдения за концентрацией парниковых газов в атмосфере, известно, что современная концентрация диоксида углерода за 2011 г. составила 391,57 ppmv, в то время как в 1959 г. она равнялась 315,8 ppmv (среднегодовые значения). Скорость роста концентрации диоксида углерода также увеличилась в последние годы. Если в 1992–2001 гг. она составляла 1,55 ppmv/год, то в прошедшее десятилетие (2003–2012 гг.) возросла до 2,0 ppmv/год (напомним, что в начале периода наблюдений на Мауна Лоа, т. е. во второй половине XX столетия, эта скорость не превышала 0,7–1,0 ppmv/год).

Совершенно очевидно, что основной причиной увеличения содержания парниковых газов в современной атмосфере является их эмиссия от промышленной деятельности человека (так называемый «fossil fuel flux», или «поток от сжигания ископаемого топлива»). Величина этой эмиссии возрастает. По результатам исследований в НАСА, эмиссия концентрации диоксида углерода в 2010 г. на 5,9 % превышала таковую 2009 г. и составляла 9,1 Гт в год. Интересно отметить, что в 2009 г. вклад развивающихся стран был больше, чем вклад развитых (например, чем вклад США).

Безусловно, основным «потребителем» атмосферного диоксида углерода является Мировой океан. Интенсивность нетто-стока в болотные экосистемы очень мала, и это должно учитываться при разработке стратегий, направленных на ослабление неблагоприятных последствий глобального потепления климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sundquist E. T. The global carbon dioxide budget // *Science*. — 1993. — 259. — P. 934–941.
2. Kobak K. I., Kondrasheva N. Yu., Turchinovich I. Ye. Changes in carbon pools of peatland and forests in northwestern Russia during the Holocene // *Global and Planetary Change*. — 1998. — N 16–17. — P. 75–84.
3. 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.
4. Инишева Л. И. Болота и биосфера: Введение к сборнику материалов VII Всерос. науч. школы (13–15 сентября 2010 г., Томск). — Томск: Изд-во Том. пед. ун-та, 2010. — С. 3–4.
5. Вомперский С. Э., Цыганова О. П., Ковалев А. Г. и др. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода // *Глобальные изменения природной среды и климата*. — М., 1999. — С. 124–145.
6. 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: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2000. — С. 49–52.
7. Neustadt M. I. Holocene peatland development // *Late Quaternary Environments of the Soviet Union*. — Minneapolis: Univ. of Minnesota Press, 1984. — P. 201–206.
8. Елина Г. А., Кузнецов О. Л., Максимов А. И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. — Л.: Наука, 1984. — 128 с.
9. Кузьмин Г. Ф. Болота и их использование // *Сб. науч. трудов НИИ торфяной промышленности*. — СПб., 1993. — 140 с.
10. Кобак К. И. Биотические компоненты глобального углеродного цикла. — СПб.: Гидрометеоздат, 1988. — 246 с.
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: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2000. — С. 63–65.
12. Васильев С. В. Скорость торфонакопления в Западной Сибири // *Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене*. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2000. — С. 56–59.
13. Глебов Ф. З., Толейко Л. С., Климанов В. А. и др. Динамика палеорастительности, палеоклимата, накопления торфа и углерода в междуречье Оби и Васюгана (Западно-Сибирская низменность) // *Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене*. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2000. — С. 16–19.
14. Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н. А. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. — М., 2001. — 584 с.
15. Пологова Н. Н., Лапшина 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.
16. Лапшина Е. Д. Болота Западной Сибири: Автореф. дис ... д-ра биол. наук. — Томск, 2004. — 37 с.
17. *Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири* / Под ред. С. М. Новикова. — СПб.: Изд-во ВВМ, 2009. — 536 с.
18. 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.: ГЕОС, 1999. — С. 72–76.
19. Новиков С. М., Батуев В. И. О реликтовых болотах севера Западной Сибири // *Изв. РГО*. — 2010. — Т. 142, вып. 3. — С. 37–43.
20. Хотинский Н. А. Голоцен северной Евразии. — М.: Наука, 1977. — 200 с.
21. 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: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2000. — С. 53–55.

22. **Нейштадт М. И., Малик М. И.** Прошлое, настоящее и будущее западносибирских болот // Природа. — 1980. — № 1. — С. 11–20.
23. **Пьявченко Н. И.** Болотообразовательный процесс в лесной зоне // Значение болот в биосфере. — М.: Наука, 1980. — С. 7–16.
24. **Пьявченко Н. И.** Торфяные болота, их природа и хозяйственное значение. — М.: Наука, 1985. — 152 с.
25. **Константинов В. К.** Гидролесомелиоративная энциклопедия. — СПб.: Гидрометеоздат, 2000. — 275 с.
26. **Инишева Л. И., Земцов А. А., Лисс О. Л. и др.** Васюганское болото: природные условия, структура и функционирование. — Томск: ЦНТИ, 2003. — 212 с.
27. **Кобак К. И., Кондрашева Н. Ю., Лугина К. М. и др.** Анализ многолетних метеорологических наблюдений в Северо-Западном регионе России // Метеорология и гидрология. — 1999. — № 1. — С. 30–38.
28. **Ефимова Н. А., Жильцова Е. Л., Лемешко Н. А., Строкина Л. А.** О сопоставлении изменений климата в 1981–2000 гг. с палеоаналогами глобального потепления // Метеорология и гидрология. — 2004. — № 8. — С. 18–23.
29. **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: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2000. — С. 60–62.
30. **Слүто R. S.** Limits to peat bog growth // Phil. Trans. Royal Soc. — 1984. — Vol. 303b. — P. 605–654.
31. **Слүто R. S.** Assessing the accumulation of carbon in peatlands // Northern peatlands in global climate change. FDITA. — Helsinki: Publ. of Academy of Finland, 1996. — P. 207–212.
32. **Иванов К. Е.** О фильтрации в поверхностном слое выпуклых болотных массивов // Метеорология и гидрология. — 1948. — № 2. — С. 46–59.
33. **Лопатин В. Д.** О гидравлическом значении верховых болот // Вестн. Ленингр. ун-та. — 1949. — № 2. — С. 37–49.
34. **Базилевич Н. И.** Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. — М.: Наука, 1993. — 140 с.
35. **Боч М. С., Кобак К. И., Кольчугина Т. П., Винсон Т. С.** Содержание и скорость аккумуляции углерода в болотах бывшего СССР // Бюл. МОИП. Отд. Биол. — 1994. — Т. 99, вып. 4. — С. 59–70.
36. **Болога Западной Сибири** / Под ред. К. Е. Иванова, С. М. Новикова. — Л.: Гидрометеоздат, 1976. — 448 с.
37. **Титлянова А. А., Базилевич Н. И., Снытко В. А.** Биологическая продуктивность травянистых экосистем. — Новосибирск: Наука, 1988. — 134 с.
38. **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. — 9, N 1. — P. 37–46.
39. **Анисимов О. А., Борзенкова И. И., Ванденберг Дж. и др.** Быстрое потепление климата на границе позднеледниковья–голоцена как возможный аналог изменения климата и окружающей среды в первой четверти XXI века // Метеорология и гидрология. — 2004. — № 12. — С. 31–41.
40. **Tolonen K., Vasander H. H., Damman A. W., Clymo R. S.** Preliminary estimates of long-term carbon accumulation and loss in the 25 boreal peatlands // Suo. — 1993. — Vol. 43, N 4–5. — P. 277–280.
41. **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. — 37. — P. 283–287.
42. **Zoltai S. C., Taylor S., Jeglum J. K. et al.** Wetlands of boreal Canada // Wetlands of Canada. — Montreal; Quebec: Polyscience Publication, 1988. — P. 97–154.
43. **Вомперский С. Э.** Роль болот в круговороте углерода // Биогеоценоотические особенности болот и их использование: XI чтения памяти акад. В. Н. Сукачева. — М.: Наука, 1994. — С. 5–37.
44. **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: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2000. — С. 53–55.
45. **Oechel W. C., Billings W. D.** Effect of global change on the carbon balance of arctic plants and ecosystems // Arctic ecosystems in a changing climate. — San Diego: Academ. Press, 1992. — P. 139–162.
46. **Hansen J., Keeling Ch., Harmon M. et al.** Targent atmospheric carbon dioxide // NASA Publ. Report. — 2008. — 124 p.

Поступила в редакцию 14 ноября 2012 г.