

## Заболачивание на Васюганском болоте

Л. И. ИНИШЕВА<sup>1</sup>, К. И. КОБАК<sup>2</sup>, Н. Г. ИНИШЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный педагогический университет  
634061, Томск, ул. Киевская, 60  
E-mail: inisheva@mail.ru

<sup>2</sup> Государственный гидрологический институт  
199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23  
E-mail: kobakkira@yandex.ru

<sup>3</sup> Томский государственный университет  
634050, Томск, просп. Ленина, 36  
E-mail: inishev.n@yandex.ru

Статья поступила 18.07.2016

Принята к печати 23.09.2016

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты долгосрочной оценки накопления углерода и текущего связывания углерода на примере сосново-кустарничково-сфагновых биогеоценозов (БГЦ) на Васюганском болоте. В разные по климатическим условиям годы NPP изменяется в пределах от 206 до 337 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>. Выявлено увеличение интенсивности выделения углерода в более сухие вегетационные периоды. Большая часть потерь углерода обусловлена эмиссией диоксида углерода (в среднем 61,3 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>, или 23,5 % NPP). Можно констатировать прогрессирование процесса торфообразования. Вынос углерода болотными водами, определенный расчетом по модели выноса химических веществ, составляет 3,0 % NPP при среднем значении выноса 7,9 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>. На основании модели вертикального роста болот рассчитана современная скорость аккумуляции углерода от 10,3 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> в полигональных болотах до 51,7 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> в низинных травяных болотах.

**Ключевые слова:** Васюганское болото, биогеоценоз, долговременное депонирование, баланс углерода, скорость аккумуляции углерода, болотные воды, модель вертикального роста.

В условиях увеличения содержания углерода в атмосфере наиболее ценными являются биогеоценозы, которые способны поглотить больше CO<sub>2</sub> из атмосферы и как можно меньше возратить обратно. Таковыми и являются болота. Мировые оценки депонированного углерода в болотах отличаются (от 329 до 528 Гт) [Lappalainen, 1996;

и др.]. Как известно [Заварзин, 1994], по содержанию устойчивого С<sub>орг</sub> почвы на единицу площади экосистемы России располагаются в следующий ряд: болота, степи, леса. Растущие болота – уникальные экологические системы, связывающие на длительный период CO<sub>2</sub> атмосферы и этому вопросу посвящены многие работы [Lappalainen,

1996; Наумов и др., 2009; Cory et al., 2013; Инишева и др., 2015].

Прирост торфа разделяют на долговременный средний и кратковременный средний. Первый включает прирост торфа за весь период существования болота (периоды в тысячу лет и более), второй – за временной интервал в несколько десятилетий, столетий. Основная проблема, интересующая исследователей, – какой процесс преобладает в настоящее время: депонирование углерода или выделение его в виде парниковых газов. Для ее решения необходимо более подробно исследовать входящие и выходящие потоки углерода в торфяно-болотных экосистемах.

Цель данного сообщения – анализ скорости депонирования углерода в голоцене и определение современных скоростей аккумуляции углерода на Васюганском болоте (ВБ).

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Васюганское болото – самое огромное болото в мире, захватило Обь-Иртышский водораздел и раскинулось между  $55^{\circ}40' - 58^{\circ}60'$  с. ш. и  $75^{\circ}30' - 83^{\circ}30'$  в. д. с протяженностью с запада на восток 573 и с севера на юг около 320 км. Подробная информация о нем приведена в работе [Инишева и др., 2003]. Площадь ВБ составляет 5 269 437 га, из которых 36,9 % относится к разведанной территории и 63,1 % приходится на прогнозные ресурсы. На ВБ сосредоточено 18,7 млрд т торфа, что составляет 16 % от запасов всего Сибирского региона. Проведенные расчеты показали, что содержание депонированного углерода в ВБ составляет 5,1 млрд т или 12 % от всех запасов углерода в торфяных залежах Сибирского региона. Преобладающий тип залежи – низинный (56,4 %), верховая залежь – 25,9 %, а остальные запасы относятся к переходным и смешанным типам. Разнообразие биогеоценозов на ВБ достаточно велико. Остановимся на некоторых обобщенных типах: сосново-кустарничково-сфагновые (рямы разных вариантов), грядово-мочажинные и грядово-мочажинно-озерковые, осоково-гипновые топи и др.

Прирост торфа за весь период голоцена на ВБ определяли по результатам абсолютных датировок нижних и верхних границ слоев

торфяных отложений соответствующей мощности.

Для определения современной скорости аккумуляции углерода в болотных экосистемах использовали два основных метода: сведение баланса углерода в экосистеме и использование модели процесса аккумуляции торфа и углерода Климко в модификации Турчинович, базирующихся на исторических сведениях о функционировании болотной экосистемы [Слупто, 1996; Kobak et al., 1998].

Балансовые исследования углерода на ВБ включали изучение поступления и выделения его на трех БГЦ сосново-кустарничково-сфагновой формации в южно-таежной подзоне Западной Сибири и на ландшафтном профиле водосборного бассейна. Надземную продукцию определяли укосным методом, подземную – методом монолитов. Чистую первичную продукцию рассчитывали как сумму надземной и подземной продукции [Титлянова и др., 1988]. Газовый режим изучали “реперс”-методом [Айлрих, 2000]. В качестве пробоотборников использовали камеры размером  $30 \times 40$  мм, объемом 30 мл. Заполненные дистиллированной водой камеры соединяли между собой и опускали по всей глубине торфяной залежи. Через месяц их извлекали из торфяной почвы, пробы воды отбирали в вакутейнеры с последующим анализом диоксида углерода и метана. Для измерения  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  использовали камерный метод. Газовый состав анализировали на хроматографе “Кристалл-5000.1”.

В качестве объекта изучения стока углерода поверхностным стоком выбран водосбор в пределах территории исследований. Для определения выноса с частных площадей водосбора необходимо иметь пункты наблюдений за стоком воды и концентрацией химических элементов, что практически невозможно на болотах. Поэтому для нахождения выноса углерода с болотными водами разработана математическая модель этого процесса для поверхности водосборного бассейна и движения вод по русловой сети. В болотных водах определяли углерод водорастворимый, гуминовые и фульвовые кислоты по [Технический анализ торфа, 1992].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Массовое развитие болот на Западно-Сибирской равнине относится к началу атлантического периода, характеризующегося оптимальными климатическими условиями для процесса торфообразования. В данный период отмечается и формирование ВБ, которое 500 лет назад состояло из 19 отдельных болот. В настоящее время вследствие разрастания этих участков, образовался единый массив, где 25 % занимаемой территории имеет возраст не более 500 лет при нижнем пределе возраста 9000 лет [Инишева и др., 2003].

Рассмотрим прирост торфа на ВБ за весь период голоцена. На основании исследований авторов и литературных источников следует, что скорость накопления торфа на ВБ в раннем голоцене равна 0,5 мм/год; в среднем голоцене – 0,4–0,7 мм/год, а в позднем – 0,88 мм/год [Васильев, 2000; Лисс и др., 2001]. Установлен пик аккумуляции углерода – 70 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> при величине прироста 1,79 мм/год в бореальный период (9000–8000 лет назад). В условиях постепенного потепления климата на территории ВБ величина прироста очень четко реагировала на серию похолоданий субатлантического периода (2000–1700 лет, 1500–1400, 700–600 лет назад), увеличиваясь в отдельных торфяниках до 1,5–2 мм/год.

Как обстоят дела с процессом заболачивания на ВБ в настоящее время? Рассмотрим результаты определения современной скорости аккумуляции углерода на ВБ балансовым

методом на примере сосново-кустарничково-сфагновых БГЦ в разные по метеорологическим условиям годы, репрезентативные в многолетнем ряду. Годы исследований выбирались по гидротермическому коэффициенту Селянинова (ГТК), представляющему собой отношение суммы осадков за период с температурой выше 10 °С к испаряемости, выраженной суммой температур за этот же период, уменьшенной в 10 раз.

В исследуемых верховых болотах NPP изменяется в пределах от 206 до 337 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> (табл. 1). Экстремальные значения NPP принадлежат году с ГТК 0,51 (сухой год). По средним значениям наибольшим NPP характеризуется средний по тепло- и влагообеспеченности год (ГТК 1,02). Особый интерес представляет оценка суммарного потока углерода за вегетационный период. Средние значения интенсивности выделения CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> за три года исследования составили – 69, 72, 47,7 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>. Экстремально большое выделение отмечается в год с ГТК 1,02–111 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>. По средним значениям эмиссии прослеживается такая же закономерность. Большая часть потерь углерода обусловлена эмиссией диоксида углерода (в среднем 61,3 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>, или 23,5 % NPP). Доля метана значительно меньше (1,6 г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>, или 0,6 % NPP). В сумме доля выноса равна 24,1 % NPP. Рассмотрим вынос углерода со стоком. По отдельным болотам он существенно варьирует вследствие особенностей самих болот, зависимости от колебаний объема стока и количественно может изменяться в широких пределах. Авторами разработана ма-

Т а б л и ц а 1  
Элементы углеродного баланса в сосново-кустарничково-сфагновых БГЦ, г С м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>

Годы по гидротермическому коэффициенту	Поступление	Выделение CO <sub>2</sub> и CH <sub>4</sub>	Депонирование
0,51	206–337 264,6 ± 38,43	61–80 69,0 ± 6,96	140–276 195,6 ± 50,40
1,02	277–301 290,3 ± 7,06	45–111 72,0 ± 24,46	166–248 218,3 ± 32,14
1,34	214–245 227,0 ± 11,37	31–79 47,7 ± 19,20	166–189 179,3 ± 8,44
Среднее	260,6 ± 15,69	62,9 ± 8,94	197,7 ± 16,24

П р и м е ч а н и е. В числителе – экстремальные, в знаменателе – средние значения, ± 6,96 – доверительный интервал.

тематическая модель выноса веществ с поверхности водосборного бассейна. При этом принималось во внимание следующее: вынос химических элементов (в нашем случае соединений углерода) в период весеннего половодья и дождевых паводков происходит преимущественно с поверхностным стоком воды, который изменяется не только во времени, но и по площади водосбора; пространственная неоднородность условий формирования стока учитывается разделением площади водосбора по ландшафтному признаку. При расчетах движения растворенных веществ введены следующие допущения: 1) задача решается в одномерной постановке; концентрация рассматриваемых ингредиентов принимается осредненной по живому сечению потока или эффективной площади сечения склона для склонового стока, т. е. меняется только по длине и во времени; 2) считается, что растворенные вещества распространяются благодаря движению воды и совместно с ее частицами, не обладая при этом собственными возможностями перемещения (молекулярная диффузия и т. п.); 3) процессы самоочищения воды в первом приближении не учитываются, что возможно, если интенсивность разложения веществ невелика (например, при низкой температуре воды) или вода проходит расчетный участок за сравнительно небольшой промежуток времени.

Особенностью модели является то, что она реализуется относительно расхода рассматриваемого ингредиента, т. е. массы вещества, переносимой через заданное поперечное сечение потока в единицу времени. По необходимости осуществляется переход к концентрациям примеси. Подробно описание модели приведено в работе [Инишева и др., 2003]. В качестве примера ее применения выполнены расчеты выноса углерода в виде гуминовых кислот с поверхности водосбора р. Ключ. Полученные результаты (рис. 1) свидетельствуют об удовлетворительной сходимости рассчитанных и фактически наблюдаемых гидрографов расхода гуминовых кислот в замыкающем створе р. Ключ и, следовательно, о возможности применения рассматриваемого подхода к моделированию выноса растворенных веществ с заболоченных территорий.

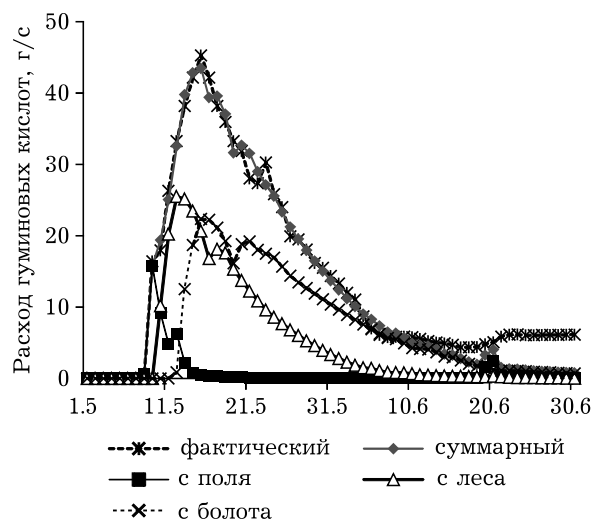


Рис. 1. Фактический и рассчитанные гидрографы выноса гуминовых кислот

В результате расчетов по модели за весенне-летний период вынос общего углерода в разных соединениях с водосборной площади достиг  $7,9 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . Таким образом, потери углерода с болотными водами составили 3,0 % NPP. Важно заметить, что вынос углерода с болотными водами происходит в виде гуминовых веществ, при этом наибольшая доля принадлежит углероду фульвовых кислот, содержание которых достигает в отдельные периоды 98 % от общего выноса углерода болотным стоком ( $6,9 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  или  $6790 \text{ кг С км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  (рис. 2)).

На основании полученных результатов за разные по погодным условиям вегетационные периоды можно сделать вывод о преобладании аккумуляции углерода в торфяной залежи ( $197,7 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ) и, соответственно, прогрессирующем торфообразовательном процессе на ВБ в современный период. Наибольшее депонирование, как и эмиссия  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , отмечалось в год с оптимальными условиями тепло- и влагообеспеченности (ГТК 1,02). Однако важно отметить, что балансовые исследования коснулись только сосново-кустарничково-сфагновых БГЦ, и в этом случае можно констатировать достаточно высокую скорость процесса торфообразования. При создании возможности проведения одновременных балансовых исследований во всех представительных БГЦ ВБ, можно будет получить более полное представление о развитии процесса торфообразования на всей

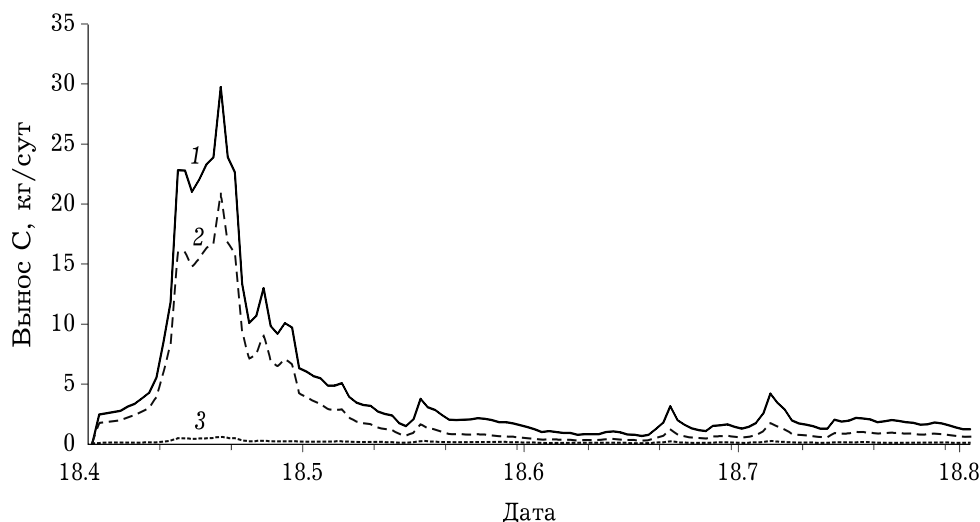


Рис. 2. Вынос углерода с болотными водами (расчет по модели)

1 – С в/р – углерод водорастворимый, 2 – ГК – гуминовые кислоты, 3 – фульвовые кислоты

территории уникальной болотной экосистемы, которой и является ВБ.

Вместе с тем в последние годы отмечается четкая тенденция усиления трансгрессии болот на леса, например на северо-западе России. Линейный рост болот, их наступление на окружающие суходолы составляет на этой территории в настоящее время 30–50 см/год, а вертикальный прирост торфа равен в среднем 3 мм/год [Кузьмин, 1993]. Вариации значений вертикального прироста находятся в интервале от 0,4–0,6 мм/год (например, для торфов древесной и древесно-травяной групп) до 10–12 мм/год (олиготрофные сфагновые БГЦ).

Поэтому, возвращаясь к вопросу о скорости современного заболачивания заметим, что суммарная аккумуляция углерода болотами России в настоящее время составляет 37,6 млн т/год (на основании площадей болот по России [Новиков, Усова, 2000] и данных по типам болот [Botch et al., 1995; Kobak et al., 1998]). По нашим оценкам, максимальный вклад (46,8 %) в эту аккумуляцию вносят грядово-мочажинные болота, занимающие более 40 % площади современных болот.

Для определения современной скорости аккумуляции углерода в болотных экосистемах ВБ может использоваться модель процессов аккумуляции торфа и углерода, базирующаяся на исторических сведениях о функционировании болотной экосистемы (вместе с данными о плотности торфяного

профиля, его возрасте и т. д.) [Слупо, 1984, 1996]. Согласно ей болото можно представить в виде двух слоев: верхнего деятельного и нижнего инертного, в котором все процессы протекают значительно медленнее. Процесс накопления органического вещества в деятельном слое может представляться 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 деятельном слое;  $P_a$  – ежегодное поступление живого органического вещества на поверхность болота;  $H_a$  – глубина деятельного слоя;  $P_c$  – поток органического вещества, ежегодно поступающего из деятельного слоя в нижний инертный. Доля поступающего в деятельный слой вещества, определяемая отношением  $M_a/P_a$ , зависит от многих обстоятельств (продуктивности болотных растений, климатических условий и т. д.) и это отношение имеет разные значения для болот разных типов.

Скорость деструкции органического вещества в деятельном слое зависит от многих факторов. По мнению некоторых специалистов [Слупо, 1996; Турчинович и др., 2000; и др.], она пропорциональна массе органического вещества, остающегося после разложения в изучаемом слое, а коэффициент разложения  $A_a$  обычно принимают постоянной величиной для данного типа болота и растительности.

В инертном слое болота происходят аналогичные процессы, но интенсивность разложения органического вещества в анаэробных условиях на один-два порядка меньше. Накопление органического вещества можно представить в следующем виде:

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

где  $M_c$  – масса органического вещества торфа на единице площади, накопившегося к моменту времени  $t$ ;  $A_c$  – параметр, который обычно принимают постоянной величиной для длительного интервала времени, в течение которого можно считать условия окружающей среды неизменными;  $P_c$  – аналог ежегодной продукции для деятельного слоя.

Накопление органического вещества в верхнем слое болотной экосистемы происходит до тех пор, пока не установится постоянная толщина мощности деятельного слоя, которая сохраняется в течение длительного времени при отсутствии существенных изменений в окружающей среде. В этот период развития болотной экосистемы потоком органического вещества в инертный слой можно пренебречь. Формирование деятельного слоя занимает от нескольких десятилетий до сотен лет в разных типах болот. По оценкам авторов, наиболее быстро стационарный деятельный слой устанавливается в болотах 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 мощность деятельного слоя и плотность органического вещества в нем, а также нетто-продуктивность растительного сообщества для данного типа болота, можно оценить значения константы разложения  $A_a$ .

В стационарном состоянии с момента времени становления постоянного деятельного слоя ( $T_a$ ) поступление органического вещества в него компенсируется его потерями в деятельном слое и стоком в нижний – инертный. Это позволяет выразить уравнение (1) как  $dMa/dt = 0$  и оценить величину потока органического вещества из деятельного слоя в инертный ( $P_c$ ).

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

При расчетах в табл. 2 использованы собственные экспериментальные значения нетто-продуктивности, мощности деятельного слоя, плотности абсолютно сухого вещества в этом слое, а также литературных источников [Болота..., 1976; Базилевич, 1993; Боч,

Т а б л и ц а 2

Прирост торфа в некоторых типах болот в современную эпоху

Тип болот	Продуктивность фитомассы, кг/(м <sup>2</sup> · год) (АСВ)	Плотность торфа в деятельном слое, кг/м <sup>3</sup> (АСВ)	Мощность деятельного слоя, м	Константа разложения, $A_a$ , г/(м <sup>2</sup> · год)	Поток органического вещества в деятельный слой, кг/(м <sup>2</sup> · год), ( $P_c$ ), (АСВ)	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	0,21–0,63	30–50	0,47–0,58 р	0,01–0,04	0,063–0,079	0,79–0,84
Низинные (лесные)	0,78	140	0,85	0,06	0,02	0,10–0,20
Низинные травянолесные	0,72	100–110	0,49	0,01	0,10	0,70–0,90

П р и м е ч а н и е. \* – данные полевых наблюдений, р – расчетные данные, АСВ – абсолютно сухое органическое вещество.

1994; Базилевич, Титлянова, 2008]. Приведенные в таблице значения параметра  $A_d$  для исследуемых типов болот оценены с помощью модели вертикального роста болот.

Современная скорость аккумуляции углерода (при среднем содержании углерода в абсолютно сухом веществе 51,7 %) колеблется от  $10,3 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  в полигональных болотах до  $51,7 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  в низинных травяных болотах. Так как расчет выполнен без учета потерь органического вещества в торфяной залежи, предполагается, что они несколько завышены.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бореальный период (9000–8000 лет назад) в условиях постепенного потепления климата на территории ВБ установлен пик аккумуляции углерода –  $70 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  при максимальной величине прироста 1,79 мм/год.

Проведенные исследования по балансу сосново-кустарничково-сфагновых БГЦ показали, что в разные по климатическим условиям годы NPP изменяется в пределах от 206 до  $337 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . Отмечается увеличение депонирования и интенсивности выделения углерода в оптимальные по влаго- и теплообеспеченности вегетационные периоды. Большая часть потерь углерода обусловлена эмиссией диоксида углерода (в среднем  $61,3 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ , или 23,5 % NPP).

Вынос углерода болотными водами, определенный расчетом по модели выноса химических веществ, составляет 3 % NPP при среднем значении выноса  $7,9 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  и происходит в виде гуминовых веществ, при этом наибольшая доля принадлежит углероду фульвовых кислот ( $6,9 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ , или  $6790 \text{ кг С км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ).

В целом, можно констатировать, что на ВБ преобладает аккумуляция углерода в торфяной залежи и, соответственно, торфообразование в современный период прогрессирует, и активность его протекания достаточно высокая.

На основании модели вертикального роста болот также рассчитывалась современная скорость аккумуляции углерода, которая изменяется от  $10,3 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  в полигональных болотах до  $51,7 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  в низин-

ных травяных болотах, что в 1,4–6,8 раза меньше по сравнению с результатами в бореальный период голоцена.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- Айрих Б. Происхождение и циркуляция  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в торфянике // Сокращение эмиссии метана. Новосибирск, 2000. С. 233–239.
- Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 140 с.
- Базилевич Н. И., Титлянова А. А. Биотический круговорот на пяти континентах. Азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
- Болота Западной Сибири / под ред. К. Е. Иванова, С. М. Новикова. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 448 с.
- 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.
- Васильев С. В. Скорость торфонакопления в Западной Сибири. Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. С. 56–59.
- Заварзин Г. А. Цикл углерода в природных экосистемах России // Природа. 1994. № 7. С. 15–18.
- Инишева Л. И., Земцов А. А., Лисс О. Л., Новиков С. М., Инишев Н. Г. Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование), 2-е изд. Томск: ЦНТИ, 2003. 124 с.
- Инишева Л. И., Сергеева М. А., Головченко А. В. Биохимические процессы и газовый режим болот // Сиб. экол. журн. 2015. Т. 22, № 4. С. 570–582 [Inisheva L. I., Sergeeva M. A., Golovchenko A. V. Biochemical processes and conditions in bogs of different geneses // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8, N 4. P. 470–479].
- Кузьмин Г. Ф. Болота и их использование // Сб. науч. тр. НИИ торфяной промышленности. СПб., 1993. 140 с.
- Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н. А., Березина Н. В., Инишева Л. И., Курнишкова Т. В., Слука З. А., Толпышева Т. Ю., Шведчикова Н. К. Болотные системы и их природоохранное значение. М.: Тула Гриф и К°, 2001. 584 с.

- Наумов А. В., Косых Н. П., Паршина Е. К., Артымук С. Ю. Верховые болота лесостепной зоны, их состояние и мониторинг // Сиб. экол. журн. 2009. № 2. С. 251–259 [Naumov A. V., Kosykh N. P., Parshina E. K., Artymuk S. Yu. Raised bogs of the forest-steep zone, their state and monitoring // Contemporary Problems of Ecology. 2009. Vol. 2, N 6. P. 671–677. DOI: 10.1134/S1995425509060290].
- 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: Карел. науч. центр РАН, 2000. С. 49–52.
- Технический анализ торфа. М.: Недра, 1992. 760 с.
- Титлянова А. А., Базилевич Н. И., Снытков В. А. Биологическая продуктивность травянистых экосистем. Новосибирск: Наука, 1988. 134 с.
- 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: Карел. науч. центр РАН, 2000. С. 60–62.
- Botch M. S., Kobak K. I., Vinson T. S., Kolchugina T. P. Carbon pools and accumulation in peat-lands of the former Soviet Union // Global Biogeochem. Cycles. 1995. Vol. 9, N 1. P. 37–46.
- Cory R. M., Clumps B. C., Dobkowski J. A., Kling G. W. Surface exposure to sunlight stimulates CO<sub>2</sub> release from permafrost soil carbon in the Arctic // PNAS. 2013. N 110. P. 3429–3434.
- Clymo 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.
- Clymo R. S. Limits to peat bog growth // Philos. Trans. Royal Soc. London B. 1984. Vol. 303. P. 605–654.
- 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.
- Lappalainen E. General review on world peatland and peat resources // Global Peat Res. Finland. Saarijärvi. 1996. P. 53–57.

## Paludification on Vasyugan Mire

L. I. INISHEVA<sup>1</sup>, K. I. KOBAK<sup>2</sup>, N. G. INISHEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State Pedagogical University  
634061, Tomsk, Kiyevskaya str., 60  
E-mail: inisheva@mail.ru

<sup>2</sup> State Hydrological Institute  
199053, St. Petersburg, 2 Line B.O., 23  
E-mail: kobakkira@yandex.ru

<sup>3</sup> Tomsk State University  
634050, Tomsk, Lenina ave., 36  
E-mail: inishev.n@yandex.ru

The results of long-term evaluation of carbon stock and current carbon sequestration based on the example of pine-dwarf shrub-sphagnum biogeocoenoses on Vasyugan mire are given. In different climatic conditions (different years) NPP varies from 206 to 337 g C m<sup>-2</sup> · year<sup>-1</sup>. An increase in intensity of carbon emissions was revealed in drier vegetation periods. Most of the carbon losses are determined by emission of carbon dioxide (the average is 61.3 g C m<sup>-2</sup> · year<sup>-1</sup>, or 23.5 % of NPP). Progression of peat formation may be stated. The removal of the carbon by mire waters calculated by the mathematical model is 3.0 % of NPP with an average value of the removal of 7.9 g C m<sup>-2</sup> · years<sup>-1</sup>. On the basis of the model of vertical growth of mires was calculated present-day rate of carbon accumulation from 10.3 g C m<sup>-2</sup> · years<sup>-1</sup> in polygonal mires to 51.7 g C m<sup>-2</sup> · years<sup>-1</sup> in grassy mires.

**Key words:** Vasyugan mire, ecosystems, long-term deposit, balance of carbon, rate of carbon accumulation, mire waters, model of vertical growth.