

УДК 631.417.1:631.445.12(470.311)

ПОТЕРИ УГЛЕРОДА ПРИ ДОБЫЧЕ ТОРФА И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОСУШЕННОГО ТОРФЯНИКА В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ*

© 2015 г. Г.Г. Суворов¹, М.В. Чистотин^{1,2}, А.А. Сирин¹¹Институт лесоведения

143030 Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, 21, Россия

E-mail: suvorov@ilan.ras.ru, sirin@ilan.ras.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова

127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

E-mail: chistotinmv@yahoo.com

Поступила в редакцию 14.05.2015 г.

Дана оценка потерь углерода (С) для характерных направлений использования осушенных лесоболотных биогеоценозов: для добычи торфа и сельского хозяйства. На стадии подготовки осушенных площадей к добыче торфа потеря С в виде изъятой фитомассы могла одновременно составлять 20 т С/га, при добыче торфа – достигать 25–32 т С/га/год. Эмиссия CO₂ на заброшенном без рекультивации участке торфодобычи приводит к потере углерода в зависимости от условий года от 1.6 до 4.7 т С/га/год. За 10 лет может бесполезно минерализоваться слой торфа, соизмеримый с ежегодно изымаемым при фрезерной добыче. Для неиспользуемого сенокоса верхний предел оценки потерь С при эмиссии CO₂ составил за конкретный год 0.8 т С/га/год, или в 4 раза меньше, чем с участка торфодобычи. Текущая потеря С брошенными осушенными торфяниками только за счет эмиссии CO₂ на порядок превосходит долговременную скорость накопления углерода (LORCA) изученным торфяным болотом, оцененную, по данным ¹⁴С-датирования, в 0.14–0.17 т С/га/год.

Ключевые слова: потери углерода, добыча торфа, сельскохозяйственное использование, осушенный торфяник, Московская область.

ВВЕДЕНИЕ

Торфяные болота – один из ключевых резервуаров углерода суши, а их осушение и последующее хозяйственное использование – наиболее значительные антропогенные факторы, влияющие на углеродный баланс этих экосистем [1, 2]. Торфяные болота занимают >8% территории страны [3–5]. Большая их часть расположена в лесной зоне, многие в разной степени покрыты древес-

ной растительностью [6] и являются лесоболотными экосистемами. Наиболее активное осушение и хозяйственное освоение болот происходило в европейской части России. Всего к концу XX века в России добычей торфа было затронуто до 1.5 млн га, а площадь используемых для сельского хозяйства осушенных земель достигла 5 млн га. Во многих случаях именно частично выработанные месторождения становились объектами последующего сельскохозяйственного использования. Нормативно были установлены различные варианты рекультивации выработанных торфяных месторождений. Однако существовала установка на расширение сельскохозяйственных земель, и поэтому доминировало именно это направление. Частично выработанные торфяники переводили в категорию сельскохозяйственных земель с последующим использованием под пашню, для частного садоводства или их использовали после залужения как сенокосы и пастбища. С начала

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта “Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата”, финансируемого в рамках “Международной климатической инициативы” Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы, строительства и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K “Восстановление торфяных болот”), и программы Президиума РАН “Живая природа: современное состояние и проблемы развития”.

1990-х гг. стала сокращаться разработка торфяников и было заброшено без рекультивации много полей фрезерной добычи торфа; перестали использовать значительную часть сельскохозяйственных земель с торфяными почвами [5, 7]. При этом неиспользуемые осушенные торфяники являются наиболее уязвимыми к изменению климата [8, 1]. Они являются чрезвычайно пожароопасными территориями, которые требуют либо возвращения в хозяйственный оборот, либо, в отсутствие к ним экономического интереса, обводнения и искусственного заболачивания [9].

Эмиссия диоксида углерода в результате осушения болот и их последующего использования – один из ведущих антропогенных источников парниковых газов, связанных с землепользованием. Особенности его учета нашли отражение в соответствующих документах Межправительственной группы экспертов по изменению климата [10]. Однако на фоне растущего числа измерений потоков углеродсодержащих парниковых газов на естественных болотах [11] в нашей стране проведено недостаточно работ, посвященных антропогенно нарушенным торфяникам [12, 13].

Охрана, восстановление и разумное использование болот – необходимые компоненты ослабления потепления климата, а обводнение и искусственное заболачивание неиспользуемых торфяников – приоритетная мера по сокращению эмиссии CO_2 , происходящей в результате деструкции торфа и при торфяных пожарах. Это эффективный путь сохранения запасов углерода торфяных залежей и возобновления его накопления. Экономический эффект от снижения выбросов парниковых газов при восстановлении болот может оказать дополнительную поддержку этим мероприятиям [14], которые имеют широкий спектр экологических выгод. В Московской обл. торфяные болота занимали >6% ее территории [15] и площадь осушенных и освоенных торфяников велика даже по сравнению с другими регионами европейского центра России. Их неиспользование – одна из основных причин торфяных пожаров 2002 и 2010 гг., что определило необходимость проведения работ по обводнению пожароопасных торфяников [9].

Оценка потерь углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании важна как для рассмотрения антропогенного влияния на запасы углерода торфяных болот, так и для анализа эффективности мероприятий по обводнению неиспользуемых осушенных торфяников. Основные потери углерода (С) при указанных направлениях использования связаны: 1) с удалением растительности и верхнего слоя торфа с очесом при подго-

товке площадей для добычи торфа, 2) с добычей торфа, 3) с минерализацией оставшейся торфяной залежи после прекращения торфодобычи: а) при оставлении площадей без рекультивации или б) при рекультивации и последующем сельскохозяйственном использовании. Цель работы – оценка этих потерь при исследовании исходного запаса С в биомассе древесного, травяно-кустарничкового и мохового яруса, количества добытого торфа, эмиссии CO_2 на изученных объектах. Эмиссия метана, вынос растворенного и взвешенного углерода с водой, а также вследствие ветровой эрозии в данной работе не рассматриваются.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на Дубненском болотном массиве в Талдомском р-не Московской обл. ($56^{\circ}42'$ с. ш., $37^{\circ}50'$ в. д.). В 1979 г. часть массива была осушена для добычи торфа с расстоянием между картовыми каналами 40 м. После частичной выработки залежи отдельные участки были рекультивированы для сельскохозяйственного использования под сенокосы или для выращивания овощных культур. Исследование проводили на исходно однотипной, как предполагаем, части болотного массива, на 3-х участках с различной историей использования (рисунок): 1) участок естественного болота (контроль), 2) участок, который после прекращения торфодобычи был рекультивирован под посев многолетних трав и использовался как сенокос в течение примерно 20 лет, 3) участок заброшенной недавно торфодобычи (растительность в месте наблюдений практически отсутствовала). На каждом участке было размещено по одной стационарной точке наблюдений, расстояние между ними составило 150–300 м. Более подробное описание объекта исследования дано в работе [12].

Относительная высота точек наблюдений была определена нивелированием. Для характеристики стратиграфии и запасов углерода в торфе на каждом из участков были отобраны образцы по профилю залежи торфяным буром ТБГ-1. Ботанический состав и степень разложения торфа по визуальным выделенным слоям залежи определяли микроскопическим методом и центрифугированием [16], объемную массу – после высушивания образцов при 105°C , зольность – прокаливанием при температуре озоления 525°C [17]; содержание С в торфе – на СНН-анализаторе “Carlo Erba 1106” (Италия) методом окисления пробы при температуре 1010°C с газохроматографическим определением CO_2 в трехкратной повторности.

Датировка торфа была проведена в Институте геологии РАН, приведены калиброванные ^{14}C -даты (**cal BP**), рассчитанные с использованием программы Calib Rev 5.1 [18].

Запасы углерода в надземной фитомассе определяли в октябре 2011 г. отдельно для древесного, травяно-кустарничкового и мохового ярусов на 3-х пробных площадках, характеризующих открытую часть (площадки 1 и 2) и т. н. “облесенное кольцо” (площадка 3) болотного массива.

Надземную фитомассу древесного яруса, представленного исключительно сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), определяли на пробных площадках размером 25 м². Проводили пересчет всех деревьев с измерением высоты (h), диаметра ствола на уровне корневой шейки (d_0) (по причине малого размера деревьев). Далее было взято 9 модельных деревьев по ступеням толщины в 1 см (от 1 до 6 см), для каждого из которых была определена масса ствола (без отделения коры) и ветвей. Определение массового соотношения древесной части ветвей и хвои было сделано в отдельности для 4-х отобранных ветвей (представлены средние результаты). Для определения влажности 2 пробы древесины стволов (по 5–10 г), 4 пробы древесной части ветвей (по 20–60 г) и 4 пробы хвои (по 30–40 г) высушивали при температуре 105°C до постоянной массы. Для каждого модельного дерева была рассчитана масса сухого вещества ствола и ветвей. Пересчет фитомассы модельных деревьев на фитомассу древостоя проводили регрессионным методом [19]. По выборке, включающей модельные деревья со всех пробных площадок, были рассчитаны параметры степенных уравнений зависимости массы ствола и массы ветвей дерева от $d_0^2 \times h$. Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 составил 0.96 для стволов и 0.82 для ветвей. Далее, для каждой пробной площадки рассчитали массу сухого вещества стволов и ветвей, затем – общую надземную фитомассу. При пересчете на количество С учитывали различное его содержание в хвое и древесине.

Фитомассу травяно-кустарничкового яруса определяли методом “укосных квадратов” на 1 м² (по 1 м на каждой пробной площадке). Растения срезали на уровне дневной поверхности сфагнового покрова. Учет массы мохового покрова с очесом на каждой пробной площадке был выполнен на 2-х учетных площадках размером 0.03 м² (в понижении и на повышении микрорельефа). После взвешивания образцов из них отбирали по одной навеске (≈30 г) для определения влажности. Навески высушивали, как описано выше.

Подземная фитомасса древесного и травяно-кустарничкового ярусов была рассчитана на основе литературных данных о соотношении надземной и подземной фитомассы [20–22].

Содержание С в биомассе древесного, травяно-кустарничкового и мохового ярусов было определено в свежем материале в 2013 г. на элементном анализаторе “vario MICRO cube” (Elementar, Германия) при сгорании образца при $t = 1140^\circ\text{C}$, разделении газов с помощью метода программируемой ступенчатой десорбции (TPD – Temperature Programmed Desorption) в трехкратной повторности.

Определение общей фитомассы луговой растительности на участке сенокоса проводили однократно в сентябре 2008 г. Надземную фитомассу определяли на 4-х укосных квадратах размером 1 м², подземную фитомассу – модифицированным методом монолитов [23, 24] на одной учетной площадке 30 × 30 см, отдельно для слоев 0–10, 10–20 и 20–30 см.

Для оценки потерь С в виде CO_2 при минерализации торфа был использован статический камерный метод [25]. В каждой точке наблюдений измерения проводили в 1–3-х сайтах с расстоянием между ними 0.5–3.0 м. На сенокосном участке растения срезали на уровне почвы, на естественном болоте – только сосудистые растения на уровне поверхности мохового покрова. Измерения проводили в период с 11 до 18 ч дня. Металлическое основание камеры устанавливали на поверхность почвы или снега с заглублением нижней части на 10 см. На основание помещали камеру из прозрачного пластика со снимаемым чехлом из светоотражающей металлической фольги, снабженную пробоотборником. Герметичность сочленения камеры с основанием обеспечивалась гидрозатвором из отстоянной водопроводной воды. Использовали камеры: в 2005–2011 гг. – темные, круглого сечения (0.09 м²), объемом 15 дм³; в 2012–2014 гг. – прозрачные и темные, квадратного сечения (0.49 м²), объемом 206 дм³. Перемешивание воздуха в камере обеспечивал вентилятор с расходом воздуха 0.88 м³/мин. Продолжительность экспозиции – от 20 до 130 мин в зависимости от ожидаемого уровня эмиссии. Количество проб воздуха, отобранных из камеры в течение экспозиции, составляло от 4 до 6, объем пробы – 60 см³. Объемную долю CO_2 в пробах определяли на газовом хроматографе “Кристалл 2000М” с пламенно-ионизационным детектором, газ-носитель – гелий, длина колонки – 2 м, внутренний диаметр – 2 мм, сорбент – Hayesep Q 80/100 mesh, температура колонки – 70°C, метанатора – 350°C, детектора – 160°C; анали-

зируемый объем пробы – 1 см³. Для оценки скорости (dc/dt , млн⁻¹/ч) изменения концентрации CO₂ в камере использовали метод наименьших квадратов, исходя из допущения о стационарности этого показателя в течение экспозиции. Эмиссию CO₂ (E , мг С/м²/ч) рассчитывали по формуле $E = (dc/dt \times V \times 12/22.4)/s$, где V – объем воздуха в камере (м³), s – площадь сечения камеры (м²).

Расчет интегральных потоков CO₂ был проведен отдельно для бесснежного и зимнего периодов. Использованы данные с сайта www.rp5.ru (ООО “Расписание Погоды”, Санкт-Петербург, Россия) для ближайшей точки метеонаблюдений – г. Дмитров. За сход снежного покрова принимали дату, когда на полях снег покрывал только половину поверхности почвы, за установление – дату формирования устойчивого снежного покрова. Для оценки дыхания почвы за бесснежный период применяли метод бутстрапа [26], количество повторностей – 50000. В каждой повторности для каждой даты измерения была получена реализация случайной величины, которая задана средним и стандартным отклонением наблюдаемой величины с допущением о нормальном распределении этой случайной величины. При аппроксимации динамики дыхания почвы в бесснежный период использовали линейную интерполяцию. Затем были рассчитаны среднее арифметическое и стандартное отклонение реализаций сезонной оценки, полученных в отдельных повторностях. Для выполнения расчетов использован программный пакет MATLAB R2010b. Потоки CO₂ за зимний период рассчитывали как произведение величин числа зимних дней в году и медианы среднего потока, полученной по данным зимних измерений за все годы наблюдений. Интегральную эмиссию CO₂ за периоды со снежным покровом рассчитывали как произведение величин продолжительности периода в данном году и медианы зимних величин потока за все годы наблюдений.

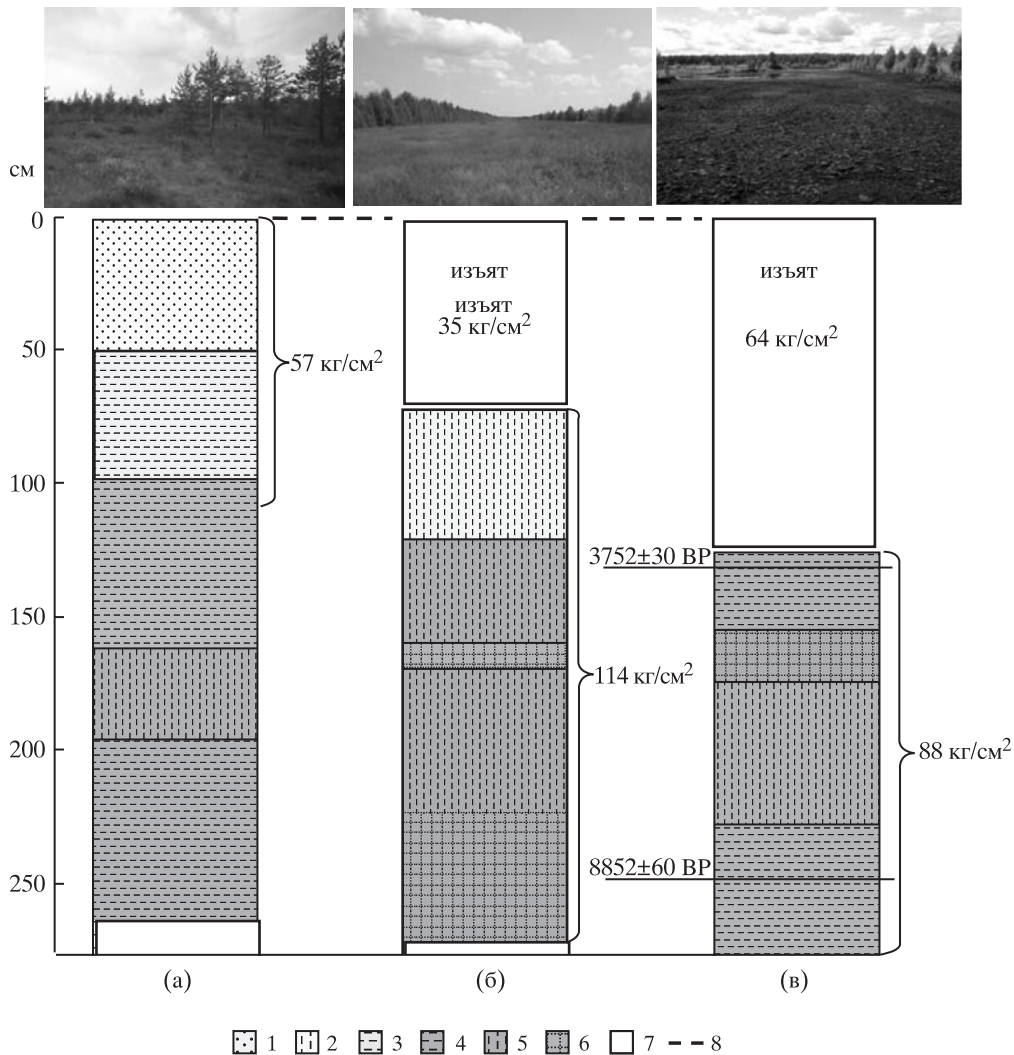
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Запасы и накопление С в торфе. На неосушенном участке мощность современной торфяной залежи составляла 263 см. 65% залежи сформировано низинными торфами, выше – последовательно перекрытыми переходными и верховыми (рисунок). На обоих осушенных участках верхняя часть залежи мощностью >0.5 м (сенокос) и >1 м (торфодобыча) была удалена при разработке. По строению сохранившейся части залежи осушенные участки мало отличались от неосушенного. Имелись небольшие стратиграфические различия, но в целом на одном гипсометрическом

уровне залегают торфа одного вида (табл. 1). На всех 3-х участках залежь подстилается озерными отложениями, а различие в гипсометрическом положении ее основания составляет не более 15 см. Многие болота отличает высокая пространственная неоднородность экологических условий и растительного покрова, что отражается в ботаническом составе и других характеристиках торфов, и они могут заметно меняться даже на небольшом протяжении. В данном случае можно свидетельствовать о генетической близости всех 3-х изученных участков и, соответственно, их сравнимости по скорости накопления и запасу углерода до осушения. Проведенный расчет исходного запаса С на осушенных участках и экспорта С при добыче торфа основан на допущении, что до осушения высота дневной поверхности была равна современной высоте на неосушенном участке. Исходный запас С в нижней части залежи (121–271 см) на обоих участках был принят равным современному запасу в том же слое на участке добычи торфа, а в верхней части – современному запасу в соответствующем слое на неосушенном участке. Принимая эти допущения, оценили исходный запас С в торфе для обоих осушенных участков (табл. 1) на уровне 150 кг С/м².

Пробы для ¹⁴С-датирования торфа были взяты на участке торфодобычи, где технически отбор был проще. Возраст торфа на глубине 126 и 246 см от исходной (восстановленной) дневной поверхности залежи составил 3752 ± 30 (ГИН 13887) и 8852 ± 60 (ГИН 13886) cal BP (календарных калиброванных ¹⁴С-лет до 1950 г. н.э.) соответственно. Это позволило оценить долговременную кажущуюся скорость накопления С (long-term apparent rate of carbon accumulation – LORCA [27]) как в среднем для всей залежи (0–246 см), так и для слоев 0–126 и 126–246 см в отдельности. Исходя из принятого допущения об идентичности исходной залежи для всех участков, восстановленный запас С для указанных выше слоев торфа составил для участка торфодобычи 139, 72, 64 кг С/м². С учетом имеющихся датировок величины LORCA были равны 15.7, 14.1, 17.0 г С/м²/год соответственно, что близко к имеющимся оценкам долговременной скорости накопления С болотами лесной зоны [1, 2, 27], включая европейскую часть России [28]. Речь идет, конечно, о средней скорости накопления С, которая могла существенно варьировать в зависимости от меняющейся интенсивности торфонакопления в прошлом [29, 30].

Потери С фитомассы при освоении торфяника. Исходя из допущения об исходной близости изученных участков, для оценки этих потерь были использованы данные о запасах С фитомассы на неосу-



Вид объектов и стратиграфия торфяной залежи: (а) – естественное болото, (б) – сенокос, (в) – торфодобыча. Торф верховой: 1 – сосново-сфагновый; торф переходный: 2 – древесный, 3 – травяной; торф низинный: 4 – травяной, 5 – древесный, 6 – древесно-травяной; 7 – изъятый слой торфа, 8 – исходная дневная поверхность.

шенном (контрольном) участке болотного массива (табл. 2). Численность деревьев на пробных площадках 1–3 была равна 8,0, 3,2, 8,4 тыс. шт./га, средний диаметр – 19, 16, 54 мм, средняя приведенная по диаметру высота – 118, 100, 300 см соответственно. Возраст деревьев варьировал от 10 до 40 лет.

Доля подземной части от общей фитомассы сосны в болотных биогеоценозах оценивается от 10 до 38% [20–22, 31–33], достигая, по данным некоторых авторов, 44,9% [34]. В наших расчетах была принята величина 25%, как указываемая для болотных биогеоценозов, максимально близких изученным. Доля подземной фитомассы травяно-кустарничкового яруса сосново-кустарничково-сфагновых биогеоценозов составляет, по разным оценкам, от 44 до 85% [20, 32, 35] от общей фитомассы. В наших расчетах было принято 70%.

Пробная площадка 3 характеризовалась на порядок большим запасом С в древесном ярусе, чем площадки 1 и 2, но меньшими запасами С в моховом и травяно-кустарничковом (табл. 2). В итоге запасы С фитомассы типичных участков верхового болотного массива – “облесенного кольца” (площадка 3) и более открытой его части (площадки 1 и 2), различались незначительно, составляя ≈ 20 т С/га. Основная часть изученного болотного массива облесена мало, запас С наземной фитомассы древесного яруса не превышал 1 т С/га. Для добычи торфа часто осваивают более облесенные болота, поэтому общие потери С фитомассы при освоении торфяников могут достигать больших величин. При этом независимо от характера утилизации фитомассы увеличивается объем CO_2 , который попадает в атмосферу.

Таблица 1. Характеристики торфяной залежи изученных участков

Слой*, см	Ботанический состав торфа	R**, %	Объемная масса, г/см ³	Зольность	С	Запас С в 1-см слое, кг/м ²	Запас С, кг/м ²
				%			
Неосушенное болото							
От -7 до 0	Очес	–	0.04	3.5	46.2		
0–43	Верховой сосново-сфагновый	35–40	0.09	4.8	47.1	0.42	
43–93	Переходный травяной	30–40	0.11	4.8	54.8	0.63	56.8
93–101	Низинный травяной	40–50	0.10	6.2	52.4	0.50	
101–158	Низинный травяной	40–50	0.10	6.2	52.4	0.50	
158–263	Низинный древесный, травяной	35–40	–	–	–	–	88.2***
Сумма							145
Сенокос							
0–66							34.7***
66–71							
71–76	Переходный древесный	50–60	0.22	11.2	43.2	0.95	26.3***
76–96	Переходный древесный	50–60	0.10	12.2	45.5	0.45	
96–116	Переходный древесный	45–55	0.15	11.1	48.0	0.74	88.2***
116–121	Низинный древесный	45–50					
121–156	Низинный древесный	45–50					
156–166	Древесно-травяной	35–40	Нет данных				88.2***
166–221	Древесный	45–50					
221–271	Древесно-травяной	35–40					
Общий исходный запас							149
Торфоразработки							
0–71							37.4***
71–121							26.3***
121–141	Низинный травяной	35–40	0.09	5.0	52.6	0.50	
141–151	Низинный травяной	35–40	0.13	7.7	49.4	0.65	
151–171	Низинный древесно-травяной	40–45	0.15	9.1	52.4	0.79	
171–191	Низинный древесный	40–50	0.16	8.1	49.3	0.78	88.2
191–226	Низинный древесный	45–55	0.10	6.8	51.0	0.51	
226–276	Низинный травяной	40–45	0.09	10.2	50.5	0.45	
Общий исходный запас							152

* Слой от исходной дневной поверхности.

** Степень разложения.

*** Величины, оцененные с использованием дополнительных допущений.

Потери С при добыче торфа. Добыча торфа – наиболее сильный фактор сокращения запаса С, связанного в торфах, который при любом направлении использования торфяного сырья достаточно быстро попадает в виде CO₂ в атмосферу [1, 10, 27]. Оценивали потери С при добыче торфа на обоих осушенных участках, также исходя из приведенных выше допущений, “восстановив” изъятый слой залежи на основании данных о запасах С на неосушенном участке.

Исходный запас С был оценен в 152 и 149 кг/м² для торфодобычи и сенокоса соответственно (табл. 1). В первом случае был удален 121-см слой торфа, во втором – 66 см, что соответствовало изъятию 64 и 35 кг С/м², или 640 и 350 т С/га. Разработка этих участков началась примерно в 1980 г. В первом случае активную разработку вели до 2006 г., позже – эпизодически. На втором участке торф добывали, вероятно, до 1991 г., после чего он был залужен. Исходя из продолжительности

Таблица 2. Запас углерода в фитомассе на неосушенном участке

Фракция фитомассы	Запас углерода на пробных площадках, т С/га		
	1	2	3
Мох*, повышение/понижение	17.9/12.8	10.3/15.7	12.3/9.1
Среднее	15.4	13.0	10.7
Травяно-кустарничковый ярус, надземная/подземная	1.6/(3.6)**	2.0/(4.6)	0.7/(1.5)
Всего	(5.2)	(6.6)	(2.2)
Древесный ярус, надземная/подземная	0.7/(0.2)	0.2/(0.1)	7.1/(2.3)
Всего	(0.9)	(0.3)	(9.4)
Вся фитомасса, надземная/подземная	17.7/(3.8)	15.2/(4.7)	18.5/(3.8)
Всего	(21.5)	(19.9)	(22.3)

* Включая очес.

** В скобках приведены данные, полученные с привлечением литературных данных.

Таблица 3. Дыхание почвы в бесснежный период, г С-СО₂/м²/год

Участок	Время наблюдений, год						
	2005	2008	2009	2010	2013	2014	
Продолжительность бесснежного/зимнего периодов, сут	214/151	229/136	240/125	234/131	223/142	239/126	
Осадки за год/май–сентябрь, мм	574/330	810/490	751/351	548/257	731/452	468/256	
Средняя температура воздуха за год/май–сентябрь, °С	+6.4/+15.5	+6.6/+14.1	+5.5/+15.0	+5.8/+18.4	+6.0/+16.1	+6.1/+16.1	
Добыча торфа	повышение (2а)	138±14	377±16	288±15	447±17	322±21	217±19
	понижение (2б)	148±30	93±21	–	(30±1) ¹	448±21	153±19
Сенокос	межканавье (5)	1130±45	721±29	(59±4, 229±14, 84±3) ²	1130±18	1130±18	832±30
Естественное болото	повышение (7а)	310±130	592±65	632±47	647±68		
	понижение (7б)	250±13	67±19	82±20	108±42	434±18*	498±30*

Примечание. В скобках даны единичные величины дыхания почвы (мг С/м²/ч) для следующих дат: ¹ – 24.06, ² – 30.04, 21.07, 27.10.

* До 2010 г. измерения проводили в облесенной части болотного массива (в повышении и в понижении микрорельефа), после 2010 г. – на открытой части болотного массива между повышением и понижением микрорельефа.

добычи в 26 и 11 лет, средние ежегодные потери С составляли ~2.5 и 3.2 кг С/м²/год, или 25 и 32 т С/га/год для участка торфодобычи и сенокоса соответственно. Это сопоставимо ежегодному изъятию ~5 см торфа, что многократно меньше нормативной торфодобычи [36], и ее активное осуществление может приводить к существенно большим потерям С.

Потери С при минерализации торфа. Для их оценки измеряли дыхание почвы, которое вклю-

чает дыхание автотрофов (корней растений) и гетеротрофов. Последнее и определяет потери С при минерализации. На участке торфоразработки, где нет растений, дыхание почвы непосредственно характеризует потерю С от минерализации; на участке сенокоса возникла задача разделения автотрофного и гетеротрофного дыхания.

Измерения дыхания почвы вели с разной частотой с 2005 по 2014 гг. в основном в бесснежный период (табл. 3), для которого были приняты

Таблица 4. Эмиссия CO₂ со снежного покрова, мг С-CO₂/м²/ч

Дата	Торфодобыча		Сенокос	Естественное болото	
	форма рельефа				
	повышение	понижение	основная по- верхность	повышение	понижение
05.04.2006			7.1±2.3	18±13	21.1±1.1
21.03.2007		32±12			
26.02.2008		1.3±0.1		2.8±0.6	
05.12.2008	13.8±4.9		24.0±3.7	22.8±4.1	15.4±2.7
28.01.2009			44.2±9.4		4.9±1.0
23.03.2009	1.0±0.8			3.9±1.9	8.8±4.9
26.11.2010					44±26
02.01.2014				2.1±1.9	
06.02.2014	7.7±7.7		44±11		
Медиана эмиссии	6.4		33.8	12.0	

следующие границы: 2005 г. – 21.04–21.11, 2008 г. – 3.04–18.11, 2009 г. – 12.04–8.12, 2010 г. – 1.04–21.11, 2013 г. – 17.04–26.09, 2014 г. – 7.04–2.12. Термические условия этих периодов были похожими, пики средних декадных температур воздуха (~20°C) приходились на июль. Исключение – экстремально жаркий 2010 г. со среднедекадными температурами августа до 30°C. Осадки бесснежного периода 2008, 2013, 2014 гг. распределены равномерно в течение лета, достигая 50–60 мм в отдельные декады; 2014 г. был экстремально засушливым, 2005 г. имел сухую осень, 2009 г. – сухое лето и влажную осень, 2010 г. был экстремально засушливым с основными осадками ближе к осени.

Наблюдения в июле 2006 г. не выявили явной суточной динамики дыхания почвы, и было принято допущение об оценке сезонных потоков CO₂ без ее учета, хотя этот вопрос требует более детального рассмотрения.

Зимний поток CO₂ измеряли эпизодически, медиана его величины для участка торфодобычи, сенокоса и естественного болота составила 6.4, 33.8 и 12.0 мг С-CO₂/м²/ч соответственно (табл. 4). Последняя величина сопоставима, например, с зимним среднесуточным потоком CO₂, полученным методом вихревых пульсаций на мезо-олиготрофном болоте в Республике Коми: 1.1 г CO₂/м², или 14 мг С-CO₂/м²/ч [37]. Исходя из средних величин эмиссии CO₂ в зимний период и продолжительности последнего (табл. 3, 4), оценили зимний поток каждого года наблюдений. Его средние величины составили для торфодобычи, сенокоса и естественного болота ~20, 110 и 40 мг С-CO₂/м²/ч соответственно. По полученным оценкам, интегральный поток CO₂ за зимний период на

участке брошенной торфодобычи составлял 5–10, сенокоса – 10–15, естественного болота – порядка 10% от интегрального потока CO₂ за бесснежный период. Эти данные, основанные на малой выборке, могут быть занижены. По данным [38, 39], на осушенных торфяниках в Финляндии суммарное дыхание почвы за период со снежным покровом составляло 16–61% от величины дыхания почвы за теплый период.

Потери С на неиспользуемых торфоразработках. Фрезерная добыча торфа (наиболее применяемый промышленный метод) предполагает ровную поверхность залежи. На исследованном участке из-за эпизодической вывозки торфа из заготовленных ранее буртов и использования бульдозерной техники возникли незначительные неровности поверхности с амплитудой высоты до 10–30 см. Поэтому измерения потоков CO₂ проводили на повышениях (как типичных для торфодобычи) и понижениях. Интегральный поток С-CO₂ в бесснежный период варьировал на повышениях от 140 до 450 г С/м², или 1.4–4.5 т С/га в зависимости от условий года (табл. 3). Среди характерных величин 300–450 г С/м² выделялись низкие потоки 2005 и 2014 гг. Эти годы были обеспечены достаточным числом измерений, и их теплый период характеризуется небольшим количеством осадков и невысокими средними величинами температур воздуха. Эмиссия на повышениях, где условия для минерализации торфа лучше, была больше по сравнению с понижениями в 2008 и 2014 гг., однако в 2013 г. это соотношение было обратным. В 2005 г. потоки CO₂ на повышениях и понижениях существенно не различались. На естественном болоте в 2008, 2009 и 2010 гг. поток на повышениях был почти на порядок больше, чем на понижениях.

По гидротермическим условиям наиболее сильно выделялся 2010 г. с минимальными осадками и максимальной температурой воздуха за период май–сентябрь (табл. 3), а также максимальным потоком CO_2 – 450 г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$. В близком по количеству осадков, но с меньшей температурой за период май–сентябрь 2014 г. поток CO_2 был в 2 раза меньше – 220 г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$. 2008 и 2013 гг. были схожими по количеству летних осадков (450–490 мм) и эмиссии CO_2 на повышениях – 350 г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$, хотя среднегодовая температура 2008 г. была самой высокой за годы наблюдений. 2005 и 2009 гг. были сопоставимы по количеству летних осадков (330–350 мм). 2009 г. был более влажным по количеству годовых осадков и холоднее по величинам среднегодовой и летней температур; эмиссия на повышениях в этом году была в 2 раза больше, чем в 2005 г.

Для участка торфодобычи эмиссия CO_2 с учетом зимнего периода составляла от 160 до 470 г $\text{C}/\text{м}^2$, или 1.6–4.7 т $\text{C}/\text{га}$. Без учета выноса C с водной и ветровой эрозией это были основные текущие потери C при данном землепользовании. Эта величина в 10–30 раз превышала среднюю скорость накопления C в торфе, приведенную выше: 14–17 г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$, или 0.14–0.17 т $\text{C}/\text{га}$. При этом на участке заброшенной торфодобычи за 10 лет минерализовался слой, равный изымаемому за 1 год при не очень активной разработке торфа.

Потери C при сельскохозяйственном использовании. Интенсивная минерализация на сенокосном участке верхнего 25-см слоя торфяной залежи (исходная глубина 71–96 см) подтверждена ее сравнением с соответствующим слоем (66–100 см) на неосушенном болоте (табл. 2). В данном случае зольность возросла в 2.5 раза. Более чем в 2 раза увеличилась объемная масса верхнего слоя (0–5 см) почвы. Это результат как подготовки торфяника (известкование, залужение и др.), так и длительного последующего использования. Добавление свежих растительных остатков в виде отмиравших корней увеличивало способность к разложению торфяной массы [40]. В то же время запас C на единицу объема в верхнем слое почвы на сенокосе сократился незначительно, а в поверхностном слое 0–5 см даже возрос за счет увеличения объемной массы. Сказывалось насыщение корнями влажно-лугового фитоценоза [24].

По данным на 5.09.2008 г., надземная фитомасса на участке сенокоса составила 490, подземная (в слое 0–30 см) – 1099 г сухого вещества/ м^2 с распределением между слоями 0–10, 10–20, 20–30 см: 914 (83%), 144 (13%) и 41(4%) г/ м^2 соот-

ветственно. Эти величины могут быть занижены по сравнению с максимальной величиной подземной фитомассы по причине снижения фитомассы к моменту определения, неполного учета корней для слоя 0–30 см и неучтенных подземных органов в слое глубже 30 см.

В работе [41] приведена скорость оборота подземной фитомассы (отношение подземной чистой первичной продуктивности к максимальной подземной биомассе) для ряда экосистем. Для 13 луговых сообществ, характеризующихся среднегодовой температурой воздуха от -5 до 10°C , нижняя и верхняя квартили скорости оборота составили 0.31 и 0.67/год соответственно. Принимая для оценки оборота подземной фитомассы эти величины, для надземной фитомассы – 1/год, содержание C в сухой массе – 50% и используя приведенные данные о фитомассе, можно получить для изученного участка консервативную и повышенную оценки суммарной чистой первичной продуктивности: 415 и 613 г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$ соответственно.

Дыхание почвы на сенокосе за 2008 г. с учетом зимнего периода составило 831 г $\text{C}/\text{м}^2$. Данные о вкладе дыхания гетеротрофов в дыхание почвы, оцененном различными методами, приведены в [42]. Для массива, включающего 12 травянистых сообществ бореального и умеренно теплого поясов, нижняя и верхняя квартили этого показателя составили 60 и 68% соответственно. При использовании этих оценок дыхание гетеротрофов на исследованном участке составило 499 и 565 г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$. В результате чистая продуктивность экосистемы сенокосного участка будет находиться в интервале от -83 до $+48$ г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$, или от -0.83 до $+0.48$ т $\text{C}/\text{га}$, и отрицательная часть полученного интервала чистой продуктивности экосистемы характеризует потерю C от минерализации торфа, близкую к 1 т $\text{C}/\text{га}/\text{год}$. Измерения прозрачной камерой 23.08.2013 г. в двукратной повторности дали оценки чистой продуктивности экосистемы: -82 ± 10 , -50 ± 25 на сенокосном и 47 ± 23 , 57 ± 14 мг $\text{C}/\text{м}^2/\text{ч}$ на неосушенном участке. Измеренное темной камерой дыхание почвы составило 379 ± 28 , 383 ± 23 на сенокосном и 259 ± 31 , 275 ± 29 на неосушенном участке. Эти данные дополнительно свидетельствовали об отрицательном балансе C на сенокосном участке и положительном – на естественном болоте.

Сенокосный участок на начало исследования находился в средней степени интенсивности эксплуатации (сенокосение 1 раз в год и реже); рекомендуемое среднее количество укосов в год для влажных лугов лесной зоны составляет 1.5. При сенокосном использовании изымается более

половины надземной фитомассы [43], а поступление опада и депонирование С в почве снижается в сравнении с неиспользуемым луговым сообществом. При допущении об изъятии 50% наземной фитомассы отрицательный баланс С на сенокосном участке для условий 2008 г. составил 206 и 74 г С/м²/год. При интенсивном луговодстве потери С могут возрасти, а при использовании торфяников для выращивания зерновых или пропашных культур они могут быть больше на порядок: по данным для Финляндии, Швеции и Голландии, они оцениваются от 20 до 115 т СО₂/га/год, или 5.5–31.3 т С-СО₂/га/год [44].

Даже с учетом изъятия части фитомассы при сенокосении потери С на сенокосном участке были близки или меньше по сравнению с плохо заросшими растительностью заброшенными торфоразработками. При этом фитомасса на сенокосе, особенно ее подземная часть, оценена с занижением. Наличие луговой растительности может стимулировать минерализацию торфа, однако она снижает потери С при водной и ветровой эрозии. Поэтому рекультивация под сенокосные угодья – оптимальный вариант использования осушенных торфяников для снижения потерь углерода торфяных залежей и уменьшения его поступления в виде СО₂ в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мощность залежи, сложенной преимущественно низинными, которые перекрыты переходными и верховыми торфами, на контрольном участке естественного болота составила 263 см, а запас углерода – 1450 т С/га. По данным ¹⁴С-датирования и послонных характеристик торфа, долговременная кажущаяся скорость накопления С (long-term apparent rate of carbon accumulation – LORCA) была оценена для всей залежи и ее горизонтов в 14–17 г С/м²/год, что соответствовало существующим данным для болот лесной зоны.

При удалении растительного покрова после осушения было потеряно 20 т С/га. Открытая часть верхового болота и его облесенный склон имели различную фитомассу древесного, травяно-кустарничкового и мохового ярусов, однако суммарные запасы С различались незначительно. Для болотных экосистем с более развитым древесным ярусом, которые часто осваивали при добыче торфа, потери С с изымаемой фитомассой могли быть больше.

На этапе добычи торфа с изученных участков было изъято в зависимости от длительности использования ~350 и 640 т С/га, или 23 и 42% от

исходного запаса. Учитывая продолжительность добычи торфа на этих участках, потери С на этом этапе составляли 32 и 25 т С/га/год, соответственно.

Потери С при разложении торфа на участке брошенной торфодобычи составили от 1.6 до 4.7 т С/га/год, что на порядок больше средней скорости торфонакопления за период существования изученного болотного массива. В результате минерализации за 10 лет терялось количество углерода, изымаемое за 1 средний год добычи торфа. Оценки этих потерь занижены, т. к. не учитывали потери углерода при ветровой и водной эрозии.

Чистая продуктивность экосистемы на участке сенокоса, по оценкам авторов, могла составить в 2008 г. от –0.8 до +0.5 т С/га. С учетом изъятия 50% наземной фитомассы при сенокосении потери С для условий 2008 г. могли быть от –2.06 до –0.74 т С/м²/год, а при интенсивном луговодстве могли быть больше. Для заброшенного участка торфодобычи за тот же год потери С только с эмиссией СО₂ составили ~4.0 т С/га, т. е. в 4 раза больше, чем на залуженном участке. Сенокосы на осушенных и частично выработанных торфяниках могут рассматриваться как шадящая форма использования этих земель с точки зрения деградации торфяной залежи и потерь углерода.

Осушенные торфяники, выведенные из хозяйственного оборота, вне зависимости от их состояния продолжают терять запасы углерода, накопленные ранее в торфе, который в виде СО₂ поступает в атмосферу. По возможности неиспользуемые и особенно нерекультивированные осушенные торфяники должны быть вовлечены в использование или обводнены для снижения потерь углерода, эмиссии парниковых газов и пожарной опасности этих объектов.

Авторы выражают признательность О.Н. Успенской за определение ботанического состава и степени разложения торфа, Т.Ю. Минаевой – за определение флористического состава растительности, М.В. Глаголеву – за консультации по обработке и анализу данных измерений потоков газов, А.В. Маркиной, Н.П. Шабановой и А.П. Кулешову, Я.И. Гульбе (Институт лесоведения), О.С. Гринченко (Институт водных проблем) – за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / Eds. Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. The Netherlands Global Environment Centre, Wageningen, Kuala Lumpur: Wetlands Inter-

- national, 2008. 179 p. <http://www.gec.org.my/index.cfm?&menuid=48&parentid=63>.
2. Peatlands and Climate Change / Ed. Strack M. Saarijärvi, Finland: International Peat Society, Saarijärven Offset Oy, 2008. 223 p.
 3. *Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г.* Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.
 4. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. географ. 2005. № 5. С. 21–33.
 5. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. Сирина А.А., Минаевой Т.Ю. М.: Геос, 2001. 190 с.
 6. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А.* Облесенность болот и заболоченных земель России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
 7. *Minayeva T., Sirin A., Bragg O.* A Quick scan of peatlands in central and eastern Europe. The Netherlands Wageningen, Wetlands International, 2009. 132 p. <http://www.wetlands.org/LinkClick.aspx?fileticket=Az8K7KVj%2bkh%3d&tabid=56>.
 8. Экосистемы болот // Состояние биоразнообразия природных экосистем России / Под ред. Орлова В.А., Тишкова А.А. М.: НИА-Природа, 2004. С. 103. <http://www.biodat.ru/doc/biodiv/>
 9. *Сирин А., Минаева Т., Возбранная А., Барталев С.* Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
 10. IPCC Supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: wetlands / Eds. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G. Switzerland: IPCC, 2014.
 11. *Глаголев М.В., Сирин А.А., Лапина Е.Д., Филиппов И.В.* Изучение потоков углеродсодержащих парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири // Вестн. ТГПУ. 2010. Вып. 3(93). С. 120–127.
 12. *Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е.* Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрохимия. 2006. № 6. С. 54–62.
 13. *Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А.* Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 56–68.
 14. Carbon credits from peatland rewetting – climate-biodiversity-land use / Eds. Tanneberger F., Wichtmann W. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2011. 223 p.
 15. *Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О.П., Глухова Т.В.* Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
 16. *Лиштван И.И., Король Н.Т.* Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 306 с.
 17. *Ариунушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
 18. *Stuiver M., Reimer P.J.* Extended ¹⁴C database and revised CALIB radio-carbon calibration program // Radiocarbon. 1993. V. 35. P. 215–230. <http://calib.qub.ac.uk/calib/calib.html>.
 19. *Усольцев В.А., Залесов С.В.* Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. 147 с.
 20. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии // Раст. ресурсы. 1967. Т. 3. Вып. 4. С. 567–588.
 21. *Вомперский С.Э., Иванов А.И.* Первичная биологическая продуктивность болотных сосняков // Биогеоэкологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией / Под ред. Молчанова А.А. М.: Наука, 1982. 208 с.
 22. *Валетов В.В., Кудин М.В., Смоляк Л.П.* Структура первичной продукции болотных лесов. Минск: Урожай, 1985. 164 с.
 23. *Станков Н.З.* Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 279 с.
 24. *Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А.* Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы // Агрохимия. 2010. № 12. С. 40–49.
 25. *Mosier A.R.* Chamber and isotope techniques // Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Chichester, N.Y.: Wiley, 1989. P. 175–187.
 26. *Davison A.C., Hinkley D.V.* Bootstrap methods and their application. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 582 p.
 27. *Joosten H., Clarke D.* Wise use of mires and peatlands – background and principles including a framework for decision-making. Saarijärvi, Finland: Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi, 2002. 303 p.
 28. *Минаева Т.Ю., Трофимов С.Я., Чичагова О.А., Дорофеева Е.И., Сирин А.А., Глушков И.В., Михайлов Н.Д., Кромер Б.* Накопление углерода в почвах лесных и болотных экосистем южного Валдая в голоцене // Изв. РАН. Сер. биол. 2008. № 5. С. 607–616.

29. *Климанов В.А., Сирин А.А.* Динамика торфонакопления болотами Северной Евразии за последние 3 000 лет // Докл. РАН. 1997. Т. 354. № 5. С. 683.
30. Болотные экосистемы. Гл. 6. Природные экосистемы суши. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. Семенова С.М. М.: Росгидромет, 2012. С. 217–225. http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/06.pdf.
31. *Finér L.* Biomass and nutrient cycle in fertilized and unfertilized pine, mixed birch and pine and spruce stands on a drained mire // *Acta Forest Fennica*. 1989. V. 208. 63 p.
32. *Махатков И.Д., Косых Н.П., Романцев С.А.* Запасы фитомассы и годичная продукция верховых болот средней тайги // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода. Прошлое и настоящее. Мат-лы 2-го Международ. полевого симп. (Ханты-Мансийск, 24 августа – 2 сентября 2007 г.) / Под ред. Вомперского С.Э. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 112–114.
33. *Коронатова Н.Г., Косых Н.П.* Соотношение продуктивности древесного и мохово-травяно-кустарничкового яруса на среднетаежных выпуклых олиготрофных болотах // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода. Прошлое и настоящее. Мат-лы 4-го Международ. полевого симп. (Новосибирск, 4–17 августа 2014 г.) / Под ред. Титляновой А.А., Дергачевой М.И. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2014. С. 182–185.
34. *Vasander H.* Plant biomass and production in virgin, drained and fertilized sites in a raised bog in southern Finland // *Annal. Bot. Fennici*. 1982. V. 19. P. 103–125.
35. *Головацкая Е.А.* Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири // *J. Siber. Feder. University. Biology*. 2009. V. 2. № 1. С. 38–53.
36. Справочник по торфу / Под ред. Соколова Б.Н. М.: Недра, 1982. 760 с.
37. *Михайлов О.А., Загирова С.В., Гончарова Н.Н., Мигловец М.Н.* Суточная динамика CO₂-газообмена в системе болото–атмосфера в период отсутствия активной вегетации растений // Изв. Коми научн. центра УРО РАН. Вып. 3(15). С. 35–40.
38. *Martikainen P.J., Nykänen H., Alm J., Silvola J.* Change in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophy // *Plant and Soil*. 1995. V. 168–169. P. 571–577.
39. *Alm J., Saarnio S., Nykänen H., Silvola J., Martikainen P.J.* Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands // *Biogeochem*. 1999. V. 44. P. 163–186.
40. *Титлянова А.А.* Роль подземных органов в круговороте углерода в болотных экосистемах // Болота и биосфера: Мат-лы VII Всерос. научн. школы с международ. участием (13–15 сентября 2010 г., Томск) / Под ред. Инишевой Л.И. Томск: ТГПУ, 2010. С. 109–112.
41. *Gill R.A., Jackson R.B.* Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems // *New Phytologist*. 2000. V. 147. P. 13–31.
42. *Subke J.-A., Inglis I., Cotrufo M.F.* Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: a metaanalytical review // *Glob. Change Biol*. 2006. V. 12. P. 921–943.
43. *Ларин И.В.* Луговое хозяйство и пастбищное хозяйство. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л.: Колос, 1969. 550 с.
44. *Kasimir-Klemetsson A., Klemetsson L., Berglund K., Martikainen P., Silvola J., Oenema O.* Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review // *Soil Use Manag*. 1997. V. 13. P. 245–250.

Carbon Losses from a Drained Peatland in Moscow Oblast Used for Peat Extraction and Agriculture

G.G. Suvorov¹, M.V. Chistotin^{1,2}, A.A. Sirin¹

¹*Institute of Forest Science, ul. Sovetskaya 21, Uspenskoe, Odintsovo raion, Moscow obl., 143030 Russia,*

E-mail: suvorov@ilan.ras.ru, sirin@ilan.ras.ru

²*D.N. Pryanishnikov Research Institute of Agricultural Chemistry, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow, 127550 Russia,*

E-mail: chistotinmv@yahoo.com

Carbon (C) losses from a drained forested peatland ecosystem were estimated for common types of use after drainage – peat extraction and agriculture. C losses due to the biomass removal could reach 20 mg/ha at a time in the course of site preparation, and 25–32 mg C/ha/year during peat extraction. CO₂ emissions from the peat extraction site abandoned without reclamation resulted in C losses between 1.6 and 4.7 mg C/ha, depending on weather conditions of the year, which means that the amount of uselessly mineralized peat lost over 10 years would be comparable with annual rate of milled peat production. The lower limit of C losses due to CO₂ emissions from an unused hayfield was estimated for particular year at 0.8 mg C/ha or 4 times lower as compared with abandoned peat extraction site. The present rate of C losses through CO₂ emissions from abandoned peatlands was one order of magnitude higher than the long-term apparent rate of carbon accumulation (LORCA) in the studied non-drained peatland, which is estimated at 0.14–0.17 mg C/ha/year according to ¹⁴C-dating.

Key words: carbon losses, drained peatland, Moscow oblast, peat extraction, agriculture.