

А.П. Смирнов, А.А. Смирнов

БАЛАНС УГЛЕРОДА В ОСУШАЕМОЙ ЛЕСОБОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

Введение. По оценкам экспертов Рамсарской конвенции, в торфяных болотах, занимающих около 3% всей суши, содержится почти столько же углерода, сколько в атмосфере, или вдвое больше, чем во всех лесах мира [Parish et al., 2008]. Но осушенные торфяники способны выделять накопленный за тысячелетия углерод в атмосферу, в том числе, в результате хозяйственного использования и пожаров. По мнению учёных, обводнение ранее осушенных торфяных месторождений, обладая колоссальным климатическим потенциалом, представляет собой «перспективный» и «эффективный» вид климатических проектов [Гордеева и др., 2023; Птичников и др., 2023].

Специфичность биосферной функции болот – в положительном балансе веществ, в том числе, и в первую очередь, углерода [Вомперский, 1991], поэтому растущие болота являются уникальными в наземной биоте экосистемами постоянного стока в них углерода, накапливаемого в виде торфа. В естественном состоянии растущие болота постоянно поддерживают приток из атмосферы углерода, который практически навсегда выключается из дальнейшего круговорота. В этом проявляется важная биосферная функция болотных экосистем. Там же автор указывает, что в России общая площадь оторфованных, заболоченных и болотных земель составляет 3,69 млн км² (или 21,6% территории страны) с содержанием углерода 113,53 млрд т, в том числе площадь торфяных болот – 1,39 млн км², содержание углерода в них – 100,93 млрд т.

Гидромелиорация болот для нужд сельского хозяйства, в сочетании с обработкой почвы и ежегодным отчуждением урожая, часто не только прекращает процесс торфонакопления, но и способствует оттоку СО₂ в атмосферу. Гидролесомелиорация вследствие значительно меньшей интенсивности осушения, отсутствия пахоты почвы и возрастающей первичной продуктивности фитоценозов предопределяет существенно меньшую работу торфа и ее компенсацию ростом наземной биомассы. Тем не менее последствия лесосушения болот для запасов углерода в торфяной залежи

оцениваются специалистами по-разному, главным образом из-за недостатка знаний и трудностей прямого учета всех статей баланса почвенного углерода.

До постановки специальных исследований по определению запасов углерода в естественных и осушенных болотных экосистемах большинство авторов придерживалось мнения, что гидролесомелиорация приводит к отрицательным последствиям для углеродного цикла, способствуя переходу болот из накопителей углерода в источник увеличения его в атмосфере [Саковец, 2000]. В какой-то мере этому способствовали данные об увеличении поступления CO_2 в атмосферу с осушаемых болотных экосистем по сравнению с естественными [Вомперский, 1968; Кобак, 1988; Silvola, 1986]. Так, исследования К.И. Кобак показали, что выделение CO_2 тем больше, чем выше степень осушения лесных болот. При этом осушаемые болота выделяют углекислого газа в 2-3 раза больше, чем неосушенные. Подобные результаты были получены и финскими исследователями [Silvola et al., 1992]. Основная доля CO_2 при этом поступает из почвы в результате ускорения разложения растительных остатков в связи с активизацией микробиологических процессов и деятельности почвенных беспозвоночных. Однако степень разложения торфа в верхнем слое увеличивается (абсолютно) не более чем на 10-15%, за 30-40 лет действия мелиорации оставаясь небольшой – 20–30% [Вомперский, 1968]. В результате дальнейших исследований был сделан вывод, что процесс торфонакопления после осушения не прекращается до стабилизации после-мелиоративных сукцессий спустя несколько десятилетий [Vompersky, Smagina, 1984].

Под влиянием гидромелиорации происходит осадка торфа. Известно, что осадка, наиболее быстро проходящая в первые годы после осушения, обязана преимущественно уплотнению торфа, т. е. чисто физическому процессу, а последующая осадка рассматривается как следствие разложения органического вещества [Eggelsman, 1976; цит. по: Вомперский, 1994]. Наблюдения на Западно-Двинском стационаре в Тверской области показали, что осадка залежи глубиной 1,3–1,4 м в середине межканавных полос шириной 100-130 м составила за 17 лет после осушения 12 см на низинном и 17 см на верховом и переходном осушенных болотах [Вомперский, Иванов, 1993]. Если отнести первые 4-5 лет на физическую осадку, то последующее снижение в течение 12 лет составило на низинном, переходном и верховом болотах, соответственно, 2; 2,5 и 5 см, причем не регистрируется осадка в этом ряду в течение последних 6, 3 и 2 лет. Явная тенденция уменьшения темпа осадки или даже ее прекращение говорит о стабилизации процесса. Приведенный пример С.Э. Вомперский считает по темпам

осадки типичным для лесосушения, что подтверждается данными зарубежных исследователей [Laine et al., 1992]. Необходимо отметить, что снижение мощности верхнего слаборазложившегося слоя торфа (очёса) при осушении верховых торфяников происходит, как правило, лишь до определенного предела – даже при длительном и интенсивном осушении. Остатки сфагнового очеса обнаружены на большом количестве давно осушаемых участков [Буш, Залитис, 1977]. Это подтверждается и нашими исследованиями на Суланде, где даже через 150 лет после осушительных работ на поверхности почвы сохранился слаборазложившийся рыхлый слой торфа мощностью до 10 см [Смирнов, 2003]. По-видимому, стабилизация этого слоя поддерживается ежегодным поступлением наземного опада и опада корней и их замедленной минерализацией в условиях сильноокислой среды.

Таким образом, изученность проблемы изменения углеродного баланса в результате гидромелиорации на экосистемном уровне, при всей ее важности, явно недостаточна. Поэтому нами была сделана попытка оценить, хотя бы в первом приближении, изменение углеродного баланса в условиях экспериментального осушения сосняка кустарничково-сфагнового (*Pinetum fruticoso-sphagnosum*).

Объекты и методика исследования. Исследования проводились на Госненском стационаре кафедры почвоведения Лесотехнического университета. Стационар заложен в 1967 г. проф. Б.В. Бабиковым для осуществления гидрологических и лесоводственных исследований в условиях экспериментального осушения. Он расположен на осушаемой части верхового торфяника (Госненский район Ленинградской области). Каналы глубиной 0,9–1,1 м проведены в целях эксперимента через 65, 130 и 205 м. Торфяная залежь на объекте – верховая, сложная. На момент осушительных работ верхний слой залежи был представлен слаборазложившимся сфагновым торфом (очёсом) мощностью 0,4–0,7 м (степень разложения – 0–10%, зольность – 2–4%, плотность – 0,040–0,045 г/см³). Ниже расположен горизонт верхового торфа с высокой степенью разложения, подстилаемый далее переходным торфом также с высокой степенью разложения. Общая мощность торфа на момент осушения варьировала от 1,0 до 2,2 м. До мелиорации на объекте произрастал разновозрастный сосновый древостой III–V классов возраста, Va класса бонитета, с полнотой 0,3–0,5. Средняя высота древостоя составляла 3–5 м, запас не превышал 30 м³/га. Тип леса до осушения – сосняк кустарничково-сфагновый (*Pinetum fruticoso-sphagnosum*) [Бабиков, 1980].

Опытные участки (ОУ) распределены по двум сериям. В каждой из них, в месте впадения под острым углом осушителя в собиратель, дополнительно заложены опытные участки со средним расстоянием между каналами 45 м. В 1-й серии ОУ общая мощность торфяной залежи достигала 2 м, мощность сфагнового очёса составляла 0,4–0,5 м. Ниже залегал горизонт верхового торфа со степенью разложения 40–60%, подстилаемый переходным торфом на глубине 1,3–1,8 м. На момент начала исследований (1982 г.) рост молодых деревьев на интенсивно осушаемых участках (45 и 65 м между каналами) соответствовал здесь III–III,5 классам бонитета. Во 2-й серии ОУ (серия А) лесорастительные условия были лучше. Мощность очёса была меньше (0,3–0,4 м), слой переходного торфа залегал на меньшей глубине (0,8–1 м). На участках с интенсивным осушением молодая сосна росла здесь по II классу бонитета. Известно, что стратиграфия торфяной залежи верховых болот имела для последующего роста осушаемых древостоев определяющее значение [Пятецкий, Морозова, 1968; Пятин, 1973, 1978; Смирнов, 2003]. Напочвенный покров на объекте повсеместно представлен сфагновыми мхами (*Sphagnum angustifolium* (Warnst.) С.Е.О. Jensen, *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Н. Klinggr., *Sphagnum magellanicum* Brid.), пушицей влагалищной (*Eriophorum vaginatum* L.), кустарничками: кассандрой (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench), багульником болотным (*Ledum palustre* L.), подбелом (*Andromeda polifolia* L.).

Наблюдения проводились в течение 42 лет (1982–2023 гг.).

За основу расчета углеродного баланса на *середине опытных участков* принято сравнение важнейших статей расхода и прихода углерода в лесоболотные осушаемые экосистемы. Расход связан в первую очередь с минерализацией торфа. Ее темпы могут быть определены путем расчета сработки поверхностных слоев залежи за счет уплотнения почвы. Приход в основном определяется нарастанием биомассы при регулировании водного режима, причем основную ее долю составляет древостой. Разница между ежегодным приростом и опадом фитомассы растений живого напочвенного покрова (нетто-продукция, или чистый прирост) в *неосушенных сосняках* кустарничково-сфагновых составляет всего 0,19 т/га [Саковец и др., 2000]. При интенсивном осушении (35 м между каналами) эта разница, по данным авторов, уменьшается до 0,04 т/га. Эти величины, в сущности, очень малы, если их сравнивать с чистым приростом за год фитомассы древостоя (стволы, кроны, корни) после осушения. Для сосняка травяно-сфагнового осушаемого, по данным тех же авторов, он составляет 2,3–2,9 т/га, т. е. в десятки раз больше по сравнению с нетто-продукцией напочвенного покрова, при

приросте стволовой древесины 5-7 м³/га в год. Примерно такие же величины накопления древесины характерны в последние десятилетия для интенсивно осушаемых участков и на нашем объекте. Поэтому чистый прирост напочвенного покрова в дальнейших расчетах не учитывался. Не учитывалась также фитомасса подроста по причине полного отпада подроста сосны и малой густоты (0,5-2 тыс. экз./га) мелкого подроста березы и ели.

Для расчетов нами были условно приняты следующие допущения. Содержание углерода в торфе и биомассе деревьев – 50% (на абсолютно сухое вещество). Плотность древесины сосны (базисная) – 0,4 т/м³ [Смирнов, 2003]. Суммарная фитомасса кроны и корней деревьев в осушаемых сосняках – 50% от фитомассы стволовой древесины [Саковец и др., 2000].

На большинстве опытных участков за 20 лет (1982-2001 гг.) существенно изменилась лишь плотность коренасыщенного горизонта (0-20 см). Она была определена по общепринятым методикам (высушиванием до постоянной массы образца, вырезанного и обмеренного в поле). Повторность измерения 7-10-кратная для каждого участка, что обеспечило получение средних величин с точностью 6-10%. В расположенных ниже слабо-разложившихся слоях торфа степень разложения (следовательно, и плотность) почти не изменилась, увеличение степени разложения составило 2-5% (абсолютных). В более глубоких горизонтах на всех участках степень разложения торфа осталась неизменной.

Дополнительный вынос углерода со стоком, по данным наблюдений в Карелии [Саковец и др. 2000], составил за 20 лет интенсивного осушения сосняка кустарничково-сфагнового всего 1,1 т/га, поэтому потери углерода с дренажными водами нами также не учитывались. Не учтены запасы углерода и в отпаде деревьев из-за малой величины отпада в осушаемых сосновых древостоях, когда даже старые деревья улучшили свой рост.

Темп осадки торфа за пятнадцать лет после осушения, в 1967–1982 гг., был рассчитан на основе последующих измерений с корректировкой темпа осадки в первые годы на основе литературных данных [Вомперский, 1994]. В первые 5 лет после осушения (1967–1972 гг.) осадка была условно отнесена к чисто физическому процессу (уплотнение торфа в результате ускорения внутрипочвенного стока в каналы). Последующая осадка (начиная с 1972 г.) рассматривалась как следствие минерализации органического вещества, с потерей углерода, в основном, в форме углекислого газа. Величина сработки торфа за счет разложения получена путем перемножения величины осадки в конкретном году на среднюю плотность торфа в конкретный

и предыдущий годы наблюдений. Динамика осадки залежи через 15–35 лет после гидромелиорации, в 1982–2001 гг., определена по результатам нивелировок поверхности почвы в 1982, 1993 и 2001 гг. Нивелировка проводилась относительно постоянных реперных сваяк, установленных на каждом опытном участке в 1982 г. Первоначальная, до осушения, глубина залежи (1967 г.) на опытных участках определена по схеме изолиний мощности торфа на стационаре, составленной в 1967 г. Б.В. Бабиковым.

Результаты исследований и их обсуждение. Мощность залежи торфа за 20 лет (с 15 до 34 лет после осушения) за счет минерализации верхнего горизонта и его уплотнения на большинстве объектов уменьшилась незначительно – на 5–15 см (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики торфяной почвы на опытных участках через 15 лет и 34 года после осушения

Peat soil characteristics in experimental plots 15 and 34 years after drainage

Номер ОУ	L, м	Класс бонитета	Мощность торфяной залежи, м		Изменение, см	Плотность торфа (0–20 см), г/см ³		Изменение, %
			1982 г.	2001 г.		1982 г.	2001 г.	
II	45	III	1,04	0,95	–9	0,061	0,078	+28
III	65	III	2,0	1,95	–5	0,053	0,066	+25
IV	130	V	2,20	2,20	0	0,042	0,047	+12
IIA	45	II	1,0	0,91	–9	0,072	0,110	+53
IIIA	65	II,5	1,3	1,15	–15	0,053	0,083	+57
IVA	130	III	1,5	1,4	–10	0,053	0,079	+49
VA	205	V	1,09	1,10	+1	0,048	0,043	–10

Примечание. L – расстояние между каналами

Увеличение плотности торфа наиболее существенно (на 49–57%) произошло во второй серии опытных участков, где в нижнюю часть 20-сантиметрового слоя почвы в 2001 г. уже примешались хорошо разложившиеся слои торфа.

Запасы стволовой древесины определены на объекте в 1982, 2001 и 2023 гг. (табл. 2). Наибольшие изменения запаса древесины за последние три десятилетия произошли на интенсивно осушаемых участках (45 и 65 м между каналами), а также на участке IVA (130 м).

Таблица 2

**Таксационные показатели древостоев на опытных участках
по годам наблюдений**

Forest stand taxation indicators in experimental plots by observation year

Номер ОУ	L, м	Класс бонитета	Запас древостоя, м ³ /га				Увеличение запаса за период, м ³ /га		
			1967	1982	2001	2023	1967–1982		1982–2023
									всего
II	45	III	(20)	50	132	279	(30)	229	5,6
III	65	III	(20)	55	132	246	(35)	191	4,7
IV	130	V	(20)	33	74	109	(13)	76	1,9
IIA	45	II	(20)	56	158	318	(36)	262	6,4
IIIA	65	II,5	(20)	65	143	271	(45)	206	5,0
IIVA	130	III	(20)	49	129	221	(29)	172	4,2
V A	205	V	(20)	29	49	80	(9)	51	1,2

Примечание. В скобках приведены данные, полученные экстраполяцией

В табл. 3 приведен пример расчета баланса углерода на интенсивно осушаемом объекте (45 м между каналами).

Из табл. 3 следует, что осадка торфа за счет его минерализации на середине участка II прекратилась ориентировочно в 1993 г. Определение года наступления баланса углерода в осушаемой экосистеме проведено по следующей схеме:

1. В 2023 г. запас углерода в древостое составил 84 т/га и превысил потери его в торфе (62 т/га). Разность $84 - 62 = 22$ т/га;

2. Накопление углерода в древостое за период 2001–2023 гг.: $84 - 40 = 44$ (т/га), в среднем 1,9 т/га в год;

3. Год наступления баланса определен из расчета: $22 \text{ т/га} / 1,9 \text{ т/га в год} = 12$ лет; $2023 - 12 = 2011$ г.

Таким образом, суммарные потери углерода за счет минерализации торфа были компенсированы приростом биомассы древостоя ориентировочно в 2011 г., т. е. через 44 года после проведения осушительных работ.

Таблица 3

**Баланс углерода на опытном участке II
(расстояние между каналами 45 м, класс бонитета III)**

**Carbon balance at experimental site II
(distance between channels 45 m, quality class III)**

Показатели	Годы							Изменения за 1967- 2023 гг.
	1967	1972	1982	1987	1993	2001	2023	
Мощность торфа, см	(130)	(115)	104	(97)	95	95	(95)	(-35)
Осадка торфа, см	(0)	(15)	(11)	(7)	(2)	(0)	(0)	(-35)
в т. ч. за счет минерализации		(0)	(11)	(7)	(2)	(0)	(0)	(-20)
Плотность торфа (0–20 см), г/см ³	(0,045)	(0,055)	0,061	(0,069)	(0,074)	0,078	(0,078)	(+0,033)
Сработка торфа за счет минерализации, т/га	(0)	(0)	(64)	(46)	(14)	(0)	(0)	(-124)
Потери углерода в торфе, т/га	(0)	(0)	(32)	(23)	(7)	(0)	(0)	(-62)
Запас стволовой древесины, м ³ /га	(20)	(30)	50	(70)	(100)	132	279	(+259)
Общий объем биомассы (корни, ветви, ствол), м ³ /га	(30)	(45)	(75)	(105)	(150)	(198)	(419)	(+389)
Запас углерода в древесном, т/га	(6)	(9)	(15)	(24)	(30)	(40)	(84)	(+78)
Баланс углерода в экосистеме, т/га	(+6)	(+9)	(-17)	(+1)	(+23)	(+40)	(+84)	(+16)

Примечание. В скобках приведены данные, полученные расчетом, интерполяцией или экстраполяцией. Измеренные величины выделены полужирным шрифтом

Наибольшие потери углерода в торфе произошли через 15-20 лет после осушения, с последующим постепенным прекращением темпа осадки, что подтверждает стабилизацию процесса.

При расстоянии между каналами 205 м в середине между ними осадки торфа за счет минерализации не выявлено (табл. 4). Мощность торфа даже несколько возросла (на 1 см), что, естественно, находится в пределах точности опыта.

Таблица 4

**Баланс углерода на опытном участке VA (расстояние
между каналами 205 м, класс бонитета V)**

**Carbon balance at experimental site VA (distance
between channels 205 m, quality class V)**

Показатели	Годы							Изменения за 1967– 2023 гг.
	1967	1972	1982	1987	1993	2001	2023	
Мощность торфа, см	(115)	(109)	109	(109)	(109)	110	(110)	(–6)
Осадка торфа, см	(0)	(6)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(–6)
в т. ч. за счет минера- лизации		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Плотность торфа (0– 20 см), г/см ³	(0,045)	(0,048)	0,048	(0,048)	(0,045)	0,043	(0,043)	(–0,002)
Сработка торфа за счет минерализации, т/га	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Потери углерода в тор- фе, т/га	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Запас стволовой древе- сины, м ³ /га	(20)	(25)	29	(34)	(40)	49	80	(+60)
Общий объем био- массы (корни, ветви, ствол), м ³ /га	(30)	(38)	(44)	(51)	(60)	(74)	(120)	(+90)
Запас углерода в древо- стое, т/га	(6)	(8)	(9)	(10)	(12)	(15)	(24)	(+18)
Баланс углерода, т/га	(+6)	(+8)	(+9)	(+10)	(+12)	(+15)	(+24)	(+18)

К 1972 г. произошло лишь небольшое уменьшение мощности торфа как физический процесс – примерно на 5–6 см. При подобном экстенсивном осушении верховых торфяников лишь возле каналов бонитет древостоя может повыситься на 2–3 класса (с Va до III–IV). На остальной, преобладающей по площади территории бонитет возрос всего на один класс (с Va до V), и минерализации торфа также не происходило. Прирост биомассы древостоя здесь минимальный – около 1,5 м³/га в год.

На объектах с интенсивностью осушения 45 и 65 м рост древостоя практически на всем межканальном промежутке был равномерным.

Осадка торфа за весь срок после осушения (56 лет) составила по разным участкам от 6 до 38 см, в том числе в результате минерализации – от 0 до 20 см (табл. 5).

Таблица 5

Баланс углерода в осушаемом сосняке кустарничково-сфагновом за 56 лет после осушения (на середине между каналами)

Carbon balance in a drained dwarf shrub-sphagnum pine forest 56 years after drainage (midway between canals)

Показатели	Номер опытного участка						
	II	III	IV	IIA	IIIA	IIVA	V
Расстояние между каналами, м	45	65	130	45	65	130	205
Класс бонитета после осушения	III	III	V	II	II,5	III	V
Сработка торфа, см, в т. ч. за счет минерализации	35 20	26 11	7 3	38 18	25 9	14 4	6 0
Продолжительность сработки за счет минерализации, лет (с 1972 г.)	29	29	15	29	21	21	0
Потери углерода в торфе за счет минерализации, т/га	62	31	5	70	34	13	0
Прирост стволовой древесины за весь срок после осушения, м ³ /га	259	236	109	303	260	201	60
Прирост всей древесины за срок после осушения, м ³ /га	389	354	164	455	390	302	90
Общий прирост углерода в экосистеме за срок после осушения, т/га	78	71	22	89	78	60	18
Год нулевого баланса углерода в экосистеме	2011	1993	1973	2012	1995	1979	–
Срок компенсации потерь углерода после осушения, лет	44	26	6	45	28	12	0
Баланс углерода за 56 лет после осушения, т/га	+16	+40	+17	+19	+44	+47	+18

Расчетные сроки компенсации потерь углерода в торфе, в соответствии с интенсивностью осушения, стратиграфией торфяной залежи и приростом древесной биомассы изменялись от нуля (межканальное расстояние – 205 м) до 44-45 лет после осушения (расстояние между каналами – 45 м).

Сработка залежи торфа на участках IV и IVA с интенсивностью осушения 130 м составила, соответственно, 7 и 14 см и продолжалась 15 лет и 21

год. Осадка на участке IV в целом соответствует величине осадки (5 см) и ее длительности (10 лет) в середине межканавной полосы в условиях верхового торфяника аналогичной интенсивности осушения на Западно-Двинском стационаре [Вомперский, Иванов, 1993].

Расчетный срок компенсации потерь углерода в торфе составил для средин межканавных расстояний 130 м для участка IV – 6 лет, для участка IVA – 14 лет с момента осушения. Следовательно, осушаемые с данной интенсивностью лесоболотные экосистемы на верховых торфяниках со сложной залежью торфа через 6–14 лет вновь обеспечивают положительный баланс углерода. При этом интенсивность осушения с каналами через 130 м достаточно характерна для большинства осушительных систем, созданных на верховых болотах в СССР в 1960–1980-е гг.

По литературным данным, примерно такие сроки (6-14 лет) будут применимы для всей межканавной полосы, поскольку с приближением к каналу возрастает прирост древостоя, но одновременно усиливается сработка торфа [Саковец, 2000].

С уменьшением межканавных расстояний вдвое (от 130 до 65 м) сработка залежи за счет разложения торфа возрастает в 2-4 раза. Участки III и IIIA имеют близкие величины по осадке торфа за счет минерализации (9–11 см), потерям углерода (31-34 т/га) и срокам компенсации потерь углерода с момента осушения (26-28 лет).

При дальнейшем сгущении осушительной сети до 45 м между каналами сработка залежи достигает максимальных величин – 35–38 см, в том числе за счет минерализации торфа 18–20 см. Почти не возрастает продуктивность древостоев, но резко увеличиваются потери углерода в торфе – до 62-70 т/га. Тем не менее убыль углерода в торфе оказалась сопоставимой с приростом углерода наземной биомассы сосняков (78–89 т/га) за всё время эксперимента. Продолжительность минерализации торфа составила 29 лет. Примерные сроки компенсации потерь углерода на участках с расстоянием между каналами 45 м составляют 44–45 лет после проведения осушительных работ. Для сравнения: при интенсивном осушении верхового торфяника в Карелии (35 м между каналами) осадка залежи за 20 лет составила 26 см, потери углерода в торфе равны 45 т/га, осадка торфа прекратилась [Саковец, 2000]. Некоторые отличия от наших результатов могут быть объяснены особенностями конкретных объектов.

Потери углерода в торфе и сроки компенсации потерь углерода тесно связаны с интенсивностью осушения (рис. 1, 2).

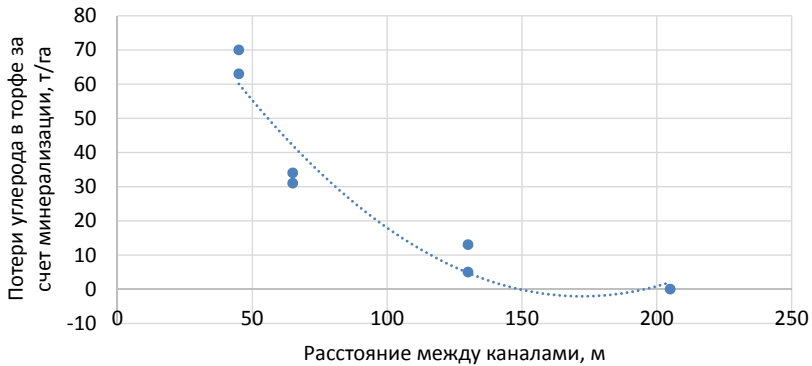


Рис. 1. Суммарные потери углерода за счет минерализации торфа в связи с интенсивностью осушения

Fig. 1. Total carbon losses due to peat mineralization in relation to drainage intensity

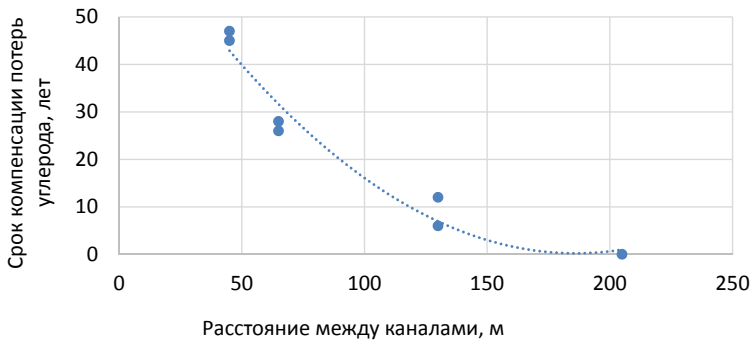


Рис. 2. Связь сроков компенсации суммарных потерь углерода в торфе с интенсивностью осушения

Fig. 2. Relationship between the timeframe for compensating for total carbon losses in peat and drainage intensity

Следует отметить, что срок компенсации потерь углерода от сработки торфа приростом древостоя даже при интенсивной мелиорации (45 м между каналами) почти вдвое меньше 80-летнего оборота рубок хвойных древостоев.

При увеличении потерь углерода за счет минерализации торфа закономерно возрастает продуктивность древостоев (рис. 3).

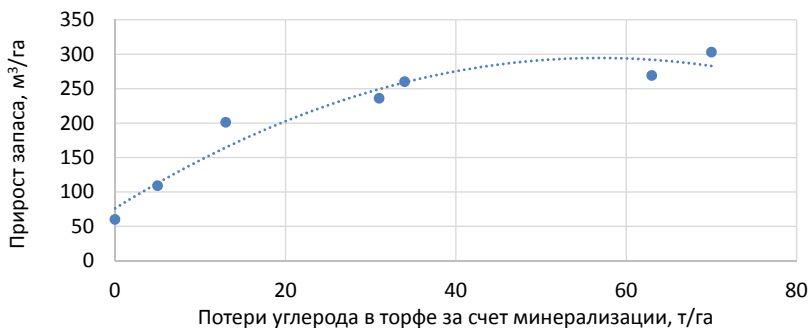


Рис. 3. Связь прироста запаса за 56 лет после осушения с потерей углерода за счет минерализации

Fig. 3. Relationship between the increase in stock over 56 years after drainage and the loss of carbon due to mineralization

По результатам этого почти полувекового эксперимента оказалось, что гидролесомелиорация умеренной интенсивности с густотой канав 65–130 м в данном конкретном случае при возрастании производительности древостоев с Va до II–III класса бонитета оказывается экологически нейтральной по общему балансу углерода.

Закключение. Известно, что растущие болота постоянно поддерживают приток углерода из атмосферы, который практически навсегда выключается из дальнейшего круговорота. В этом заключается важнейшая биосферная функция естественных болотных экосистем. В последние десятилетия экологами обсуждаются последствия осушения болот в виде минерализации торфа и эмиссии углерода в атмосферу как дополнительный фактор потепления климата. Однако в результате проведения гидролесомелиорации одновременно происходит компенсация потерь за счет возрастающей продуктивности фитоценозов.

Многoletними наблюдениями установлено, что при осушении залежи верхового торфа сложного строения, для достижения высокой эффективности гидромелиорации (II–III классы бонитета после осушения) и вместе с тем для быстрого восстановления положительного баланса углерода (20–30 лет), наиболее приемлемы расстояния между каналами в пределах 65–130 м. Увеличение расстояний между каналами приведет к потере лесоводственного эффекта; уменьшение (до 45 м) – к резкому удорожанию строительства осушительной сети, отсутствию улучшения роста древостоев,

увеличению потерь углерода в торфе до 60–70 т/га и возрастанию сроков компенсации потерь углерода в торфе до 45 лет после проведения лесосушения.

Таким образом, осушение заболоченных лесов и торфяных болот при достаточном и необходимом повышении продуктивности насаждений вполне может быть нейтральным и даже позитивным по балансу углерода.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бабилов Б.В. Гидрологический режим осушенных лесных болот, сформировавшихся на тяжелых почвах (на примере болота Гладкое Тосненского района Ленинградской области) // Значение болот в биосфере. М., 1980. С. 81-95.

Буи К.К., Залитис П.П. Леса на торфяных почвах // Торф в лесном хозяйстве. Рига, 1977. С. 5-26.

Вомперский С.Э. Биологические основы эффективности лесосушения. М.: Наука, 1968. 312 с.

Вомперский С.Э. Лес и болото: особенности круговорота веществ и проявления биосферной роли // Лесоведение. 1991. № 6. С. 54-64.

Вомперский С.Э. Роль болот в круговороте углерода // Биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование. М., 1994. С. 5-37.

Вомперский С.Э., Иванов А.И. Влияние гидролесомелиорации на осадку торфа и выделение CO₂ // Гидролесомелиорация и ведение лесного хозяйства на осушенных землях. СПб., 1993. С. 57-60.

Гордеева Е., Бахтина И., Фурса Ю., Шахматов К., Белик А. Водно-болотные угодья – новое направление реализации климатических проектов в России // Климатический вестник. 2023. №11. С. 3-7.

Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: ГМИ, 1988. 247 с.

Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А., Байбар А.С. Стратегия низкоуглеродного развития и роль лесов в её реализации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, №1. С. 48-61. DOI: 10.31857/S0869587323010073.

Пятецкий Г.Е., Морозова Р.М. Влияние осушения на плодородие почв верховых болот и продуктивность леса // Лес и почва. Красноярск, 1968. С. 339-347.

Пятин Г.М. О некоторых причинах различной отзывчивости на осушение верховых кустарничково-сфагновых болот // Осушение и восстановление леса на заболоченных землях Северо-Запада. Л., 1973. С. 72-80.

Пятин Г.М. К вопросу о характеристике мощных торфяных залежей при лесохозяйственной оценке болот // Осушение лесных земель. Л., 1978. С. 35-37.

Саковец В.И. Лесоводственно-экологическая оценка гидролесомелиорации в условиях Северо-Запада таежной зоны России (на примере Карелии): автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Петрозаводск, 2000. 41 с.

Саковец В.И., Германова Н.И., Матюшкин В.А. Экологические аспекты гидроресомелиорации в Карелии. Петрозаводск, 2000. 154 с.

Смирнов А.П. Лесорастительный потенциал осушенных торфяно-болотных почв и его рациональное использование: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб, 2003. 41 с.

Laine J., Vasander H., Pyhalainen A. Effect of forest drainage on the carbon balance of mire ecosystems // Proc. IX International peat congress. Uppsala, 1992. P. 170-181.

Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M. Assessment on Peatland, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Kuala Lumpur; Wageningen, 2008. 179 p.

Silvola U. Carbon dioxide dynamics in mire reclaimed for forestry in eastern Finland // Ann. Bot. Fenn. 1986. Vol. 23. P. 59-67.

Silvola U., Alm J., Ahlholm U. The effect of plant roots on CO₂ release from peat soil // Suo. 1992. Vol. 43, no. 4-5. P. 13-17.

Vompersky S.E., Smagina M.V. The impact of hydroreclamation of forests on peat accumulation // Proc. VII International peat congress. Dublin, 1984. Vol. 4. P. 86-95.

References

Babikov B.V. Hydrological regime of drained forest swamps formed on heavy soils (using the Gladkoe swamp in the Tosnensky district of the Leningrad region as an example). *The Importance of Swamps in the Biosphere*. Moscow, 1980, pp. 81-95. (In Russ.)

Bush K.K., Zalitis P.P. Forests on peat soils. *Peat in forestry*. Riga, 1977, pp. 5-26. (In Russ.)

Gordeeva E., Bakhtina I., Fursa Yu., Shakhmatov K., Belik A. Wetlands – a new direction for the implementation of climate projects in Russia. *Climate Bulletin*, 2023, no. 11, pp. 3-7. (In Russ.)

Kobak K.I. Biotic components of the carbon cycle. Leningrad: GMI, 1988, 247 p. (In Russ.)

Laine J., Vasander H., Pyhalainen A. Effect of forest drainage on the carbon balance of world ecosystems. *Proc. IX International peat congress*. Uppsala, Sweden, 1992, pp. 170-181.

Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M. Assessment on Peatland, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Kuala Lumpur; Wageningen, 2008. 179 p.

Ptichnikov A.V., Schwartz E.A., Popova G.A., Baibar A.S. Low-carbon development strategy and the role of forests in its implementation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2023, vol. 93, no. 1, pp. 48-61. DOI: 10.31857/S0869587323010073. (In Russ.)

Pyatetsky G.E., Morozova R.M. Effect of drainage on the fertility of raised bog soils and forest productivity. *Forest and Soil*, Krasnoyarsk, 1968, pp. 339-347. (In Russ.)

Pyatin G.M. On some reasons for different responsiveness of raised shrub-sphagnum bogs to drainage. *Drainage and forest restoration on wetland lands of the Northwest*. Leningrad, 1973, pp. 72-80. (In Russ.)

Pyatin G.M. On the Characteristics of Thick Peat Deposits in Forestry Assessment of Bogs. *Drainage of Forest Lands*. Leningrad, 1978, pp. 35-37. (In Russ.)

Sakovets V.I. Silvicultural and Ecological Assessment of Forest Reclamation in the Northwest Taiga Zone of Russia (using Karelia as an example): author's abstract. Diss. ... Dr. Agr. Sci. Petrozavodsk, 2000. 41 p. (In Russ.)

Sakovets V.I., Germanova N.I., Matyushkin V.A. Ecological Aspects of Forest Reclamation in Karelia. Petrozavodsk, 2000. 154 p. (In Russ.)

Silvola U. Carbon dioxide dynamics in peat reclaimed for forestry in eastern Finland. *Ann. Bot. Fenn.*, 1986, vol. 23, pp. 59-67.

Silvola U., Alm J., Ahlholm U. The effect of plant roots on CO₂ release from peat soil. *Suo*, 1992, vol. 43, no. 4-5, pp. 13-17.

Smirnov A.P. Forest potential of drained peatland soils and its rational use: author's abstract. Diss. ... Dr. Agr. Sci. St. Petersburg, 2003. 41 p. (In Russ.)

Vompersky S.E. Biological foundations of forest drainage efficiency. Moscow: Nauka, 1968. 312 p. (In Russ.)

Vompersky S.E. Forest and swamp: features of the cycle of substances and manifestations of the biosphere role. *Lesovedenie*, 1991, no. 6, pp. 54-64. (In Russ.)

Vompersky S.E. The role of swamps in the carbon cycle. *Biogeocenotic features of swamps and their rational use*. Moscow, 1994, pp. 5-37. (In Russ.)

Vompersky S.E., Smagina M.V. The impact of hydroreclamation of forests on peat accumulation. *Proc. VII International Peat Congress*. Dublin, 1984, vol. 4, pp. 86-95.

Vompersky S.E., Ivanov A.I. Effect of forest hydromelioration on peat sedimentation and CO₂ emission. *Forest hydromelioration and forest management on drained lands*. St. Petersburg, 1993, pp. 57-60. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 06.10.2025

Смирнов А.П., Смирнов А.А. Баланс углерода в осушаемой лесоболотной экосистеме // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 258. С. 80–97. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.258.80-97

В торфяных болотах, занимающих около 3% всей суши, содержится вдвое больше углерода, чем во всех лесах мира. Осушаемые торфяники способны выделять накопленный за тысячелетия углерод в атмосферу. Однако последствия осушения болот в лесном фонде в отношении запасов углерода в торфяной залежи оцениваются специалистами по-разному. Имеются трудности прямого учета всех статей баланса почвенного углерода. Нами была сделана попытка оценить, хотя бы в первом приближении, изменение углеродного баланса в условиях экспериментального длительного осушения сосняка кустарничково-сфагнового. Известно, что осадка торфа после устройства каналов и понижения уровня почвенно-грунтовых вод состоит из уплотнения торфа (физический процесс) и его минерализации (биохимический процесс). Общая осадка торфа на объекте в середине межканальных расстояний за весь срок после осушения (56 лет) составила

по разным вариантам опыта от 6 до 38 см, в том числе в результате минерализации торфа – от 0 до 20 см. Наибольшие потери углерода в торфе произошли через 15-20 лет после осушения, с последующим постепенным прекращением темпа осадки, что свидетельствует о стабилизации процесса. Расчетные сроки компенсации потерь углерода в торфе, в соответствии с интенсивностью осушения, стратиграфией торфяной залежи и приростом древесной биомассы изменялись от нуля (расстояние между каналами – 205 м) до 44-45 лет после осушения (расстояние между каналами – 45 м). Установлено, что при осушении залежи верхового торфяника сложного строения, для достижения высокой эффективности гидромелиорации и вместе с тем для быстрого восстановления положительного баланса углерода (20-30 лет), наиболее приемлемы расстояния между каналами в пределах 65-130 м. Увеличение расстояний приводит к потере лесоводственного эффекта. Уменьшение (до 45 м и менее) – к резкому удорожанию строительства осушительной сети, отсутствию улучшения роста древостоев и возрастанию сроков компенсации потерь углерода в торфе до 40-50 лет после проведения лесоосушения. По результатам почти полувекового эксперимента можно заключить, что гидроресомелиорация средней интенсивности с густотой канав 65-130 м в данном конкретном случае при возрастании производительности древостоев с Va до II-III класса бонитета оказалась экологически позитивной по общему балансу углерода. Следовательно, осушение заболоченных лесов и торфяных болот при необходимом и достаточном повышении продуктивности насаждений, вполне может быть нейтральным и даже позитивным по балансу углерода.

Ключевые слова: осушаемый верховой торфяник, сосновый древостой, осадка торфа, минерализация торфа, углеродный баланс.

Smirnov A.P., Smirnov A.A. Carbon balance in a drained forest-marsh ecosystem. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2026, iss. 258, pp. 80–97 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.258.80-97

Peat bogs, swamps and mires cover about 3% of the world's land area, but they contain twice as much carbon as all the world forests. Drained peat bogs release this accumulated carbon into the atmosphere. However, the impact of peat bogs on forest carbon stocks is a subject of varying interpretations. There are difficulties in accurately accounting of soil carbon balance all aspects. We have made an attempt to assess, at least in the first approximation, the change of the carbon balance under the conditions of experimental long-term drainage of the dwarf-shrub sphagnum Scots pine forest. It is known that the decrease of peat thickness after the construction of canals and the lowering groundwater table consists of the compaction of peat (physical process) and its mineralization (biochemical process). The total peat thickness decrease ranged from 6 to 38 cm in the middle of the inter-channel distances over the entire period after drainage (56 years) in different experimental variants, including from 0 to 20 cm as a result of peat mineralization. The greatest carbon loss occurred 15 to 20 years after drainage, followed by a gradual decrease in the rate of carbon loss, indicating that the

process had been stabilized. The estimated time for compensating carbon losses ranged from zero (205 m between channels) to 44-45 years after drainage (45 m between channels). It happens in dependence on the intensity of drainage, the stratigraphy of the peat deposit, and the growth of woody biomass. It has been found that the optimal distances between channels are within 65-130 m for draining a complex-structured peat deposit in order to achieve high efficiency of hydro-reclamation. It allows restoration the positive carbon balance as quickly as possible (20-30 years). An increase in distances of more than 130 m leads to a loss of the forestry effect. A decrease (to 45 m or less) leads to a sharp increase in the cost of building a drainage network, a lack of improvement in the growth of tree stands, and an increase in the time required to compensate the loss of carbon in peat up to 40-50 years after the start of forest drainage. Based on the results of an almost half-century-long experiment, it can be concluded that medium-intensity drainage with a ditch density of 65-130 m in this particular case was environmentally positive in terms of the overall carbon balance, with the productivity of the stands increase from Va to II-III site index. Therefore, the drainage of wet forests and peat bogs, with the necessary and sufficient increase in the productivity of forest stands, can be neutral or even positive in terms of the carbon balance.

Key words: drained high-moor peatland, pine forest stand, peat sedimentation, peat mineralization, carbon balance.

СМИРНОВ Александр Петрович – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-7720-216X. SPIN-код: 9945-4870.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: frontera12@gmail.com

SMIRNOV Aleksandr P. – DSc (Agricultural), Professor, Department of Forestry, St.Petersburg State Forestry Technical University. ORCID: 0000-0001-7720-216X. SPIN-code: 9945-4870.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: frontera12@gmail.com

СМИРНОВ Алексей Александрович – доцент кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: filsmi@yandex.ru

SMIRNOV Aleksey A. – PhD (Agricultural), Associate Professor, Department of Forestry, St.Petersburg State Forestry Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: filsmi@yandex.ru