

## АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ ПОЙМЕННЫХ БОЛОТ СЕВЕРО-ВОСТОКА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

© 2024 г. Е. М. Волкова<sup>а, \*</sup>, О. А. Леонова<sup>а</sup>, А. В. Головченко<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Тулский государственный университет, пр-т Ленина, 92, Тула, 300012 Россия

<sup>б</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: convallaria@mail.ru

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

После доработки 18.10.2023 г.

Принята к публикации 18.10.2023 г.

Изучено строение торфяных залежей пойменных болот Большеберезовское и Подкосьюмово, сформированных в атлантический – суббореальный периоды голоцена в долине р. Непрядва, в северо-восточной части Среднерусской возвышенности. Результаты исследований ботанического состава торфяных залежей показали, что генезис болот представлен эвтрофными палеоценозами, которые аккумулировали углерод со скоростью 21.8–95 г/м<sup>2</sup> в год. Образовавшиеся низинные торфа характеризовались высокой степенью разложения (45–55%) и низкой скоростью вертикального прироста (в среднем 0.3–0.6 мм/год), что обусловлено сезонной динамикой уровня залегания болотных вод. Содержание углерода в торфах по профилям торфяных залежей составляет 14% для болота Подкосьюмово и 31% для Большеберезовского болота. Различия обусловлены особенностями водно-минерального питания болот, что проявляется в высоком содержании карбонатов и зольности торфов болота Подкосьюмово. Запасы углерода в торфяных почвах пойменных болот варьируют от 51.5 до 125 кг/м<sup>2</sup> для горизонтов мощностью 10 см. Данный показатель определяется интенсивностью разложения растительных остатков, что зависит от состава и структуры микробных комплексов. На Большеберезовском болоте в микробном комплексе доминирует грибная составляющая, на болоте Подкосьюмово – бактериальная. Это объясняет отличия болот в микробной биомассе: 222 г/м<sup>2</sup> для болота Подкосьюмово, 898 г/м<sup>2</sup> – для Большеберезовского болота. Причиной различий пойменных болот является диапазон варьирования уровня болотных вод в течение вегетационного сезона, обусловленный проведенными мелиоративными мероприятиями на Большеберезовском болоте. Пойменные болота являются важными “депо” атмосферного углерода, а интенсивность его аккумуляции определяется комплексом факторов.

*Ключевые слова:* болотные экосистемы, динамика развития, торфяные залежи, запасы углерода, численность микроорганизмов, микробная биомасса

DOI: 10.31857/S0032180X24030055, EDN: YILRKQ

### ВВЕДЕНИЕ

Болотные экосистемы, с одной стороны, обладают способностью аккумулировать углерод в торфяных отложениях, с другой стороны, являются источником углерода для атмосферы. От соотношения этих процессов зависит функционирование болотных экосистем и их роль в регуляции ряда биосферных процессов [3–6, 14, 25, 44].

Проведенные исследования на болотах таежной зоны показали способность этих экосистем к активному депонированию углерода в торфяных почвах или залежах [15, 27, 31, 36, 40–43]. Для болот

зон широколиственных лесов и лесостепи такие сведения крайне немногочисленны, что обусловлено низкой заболоченностью региона [10, 46]. Отсутствие достаточных сведений о роли болот в депонировании углерода этих территорий не позволяет в полной мере оценить их роль в углеродном обмене с атмосферой.

Особого внимания среди болот зон широколиственных лесов и лесостепи заслуживают пойменные болота, которые занимают наибольшие площади (85% от общей площади болот региона) и играют важную роль в структуре ландшафтов.

Пойменные болота — особый тип болотных экосистем, возникновение, развитие и функционирование которых связано с гидрологическим режимом рек [28, 37–39]. В классификационной схеме болотных массивов Среднерусской возвышенности такие болота отнесены к классу типов пойменные и балочные болота [7], которые отличаются по характеру растительности и строению торфяных отложений от болот иного геоморфологического залегания.

В системе депонирование—эмиграция углерода болотных экосистем, включая пойменные, ключевую роль играют микроорганизмы. От микробного пула и его активности зависит скорость торфообразовательного процесса и интенсивность прироста торфяных отложений [2, 19, 23].

Изучение сохранившихся или малонарушенных пойменных болот с целостной торфяной залежью позволит реконструировать интенсивность аккумуляции углерода, выявить роль микроорганизмов в этом процессе, а также разработать рекомендации по сохранению столь редких для слабозаболоченных регионов экосистем. Актуальной является оценка влияния осушения на состояние пойменных болот и содержание углерода в торфяных залежах.

Цель работы — изучение интенсивности депонирования углерода в торфяных залежах в процессе развития пойменных болот северо-востока Среднерусской возвышенности и оценка роли микробных комплексов. Важным аспектом работы является сравнение функционирования ненарушенных болот и подверженных мелиорации.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Пойменные болота на северо-востоке Среднерусской возвышенности, несмотря на занимаемые площади, в наибольшей степени подвержены антропогенному воздействию, что способствовало разработке торфяных залежей или осушению. В ненарушенном или малонарушенном состоянии сохранились единичные болота. Объектами исследования явились наиболее сохранившиеся пойменные болота и подверженные антропогенному воздействию в минимальной степени. Болота Большеберезовское и Подкосьюмово сформировались в старичных понижениях центральной и притеррасной частей высокой поймы р. Непрядва (приток Дона, Тульская область), по правому и левому берегу соответственно. Болота подстилаются озерными глинами. Питание болот обеспечивают выклинивающиеся грунтовые (гидрокарбонатно-кальциевого типа), а также аллювиальные и делювиальные воды [1, 26, 30], что способствует формированию эвтрофной растительности.

Большеберезовское болото (53.662822° N, 38.584583° E) занимает площадь около 5 га.

Современный растительный покров болота является следствием мелиоративных мероприятий и выработки торфа в центральной части болота (ныне представлена зарастающим озером), проводимых в 70-е гг. XX в. Основная часть болота характеризуется сохранившейся структурой торфяной залежи с небольшими копанцами по поверхности. Осушение способствовало снижению уровня залегания болотных вод (УБВ), который варьирует от –30 см в весенний период до –97 см в летнее время, что обеспечило внедрение древесных пород. Растительность представлена сообществами формации *Betuleta pubescentis* в центральной части болота, которая окружена ивово-травяными фитоценозами асс. *Salix cinerea* – *Calla palustris* [7, 8]. По окрайкам болота сформированы заостренноосоковые сообщества (асс. *Carex acutiformis*), а также сообщества асс. *Phragmites australis*, асс. *Equisetum fluviatile* и асс. *Filipendula ulmaria*. Такие фитоценозы формируются при питании водами с минерализацией 320–445 мг/л. Данное болото образовалось более 7 тыс. л.н. [13] и имеет максимальную мощность торфяных отложений 2 м.

Болото Подкосьюмово (53.668344° N, 38.587615° E) занимает площадь 1.2 га и образовалось более 5 тыс. л.н. [13]. Растительный покров болота представлен сообществами, относящимися к 4 ассоциациям. В наиболее обводненной центральной части болота сформированы сообщества асс. *Carex acutiformis* и асс. *Equisetum fluviatile*. Окрайные части болота характеризуются сообществами асс. *Scirpus sylvaticus* и асс. *Filipendula ulmaria*. Современная растительность формируется при питании минерализованными водами (425–690 мг/л) и уровне залегания болотных вод на глубине от –3 до –40 см от поверхности. Данное болото не подвергалось антропогенному воздействию [26]. Торфяная залежь имеет мощность 1.2 м.

Для отбора образцов проводили бурение торфяных залежей в наиболее глубокой точке (предварительно по результатам рекогносцировочного бурения был составлен профиль торфяных отложений) буром конструкции Инсторфа до минерального дна. Образцы торфа (каждые 10 см) отбирали по профилям залежей, пакетировали и хранили в холодильнике до проведения лабораторных исследований [9].

В образцах торфа определяли состав растительных остатков и степень разложения (%) микроскопическим методом [24, 32]. По результатам анализа растительных остатков во всех образцах торфа были построены стратиграфические диаграммы ботанического состава торфяных залежей в программе “Korpi” [29] для каждого болота. На основании полученных диаграмм были выделены стадии развития болот, где палеосообщества названы по доминирующим остаткам видов растений.

Для определения возраста палеосообществ в образцах торфа с разных глубин в радиоуглеродной

лаборатории Института географии РАН определяли содержание изотопа углерода  $^{14}\text{C}$ . Полученные результаты были откалиброваны с использованием программы Calib 9.0 и калибровочного набора данных Intcal09 [47, 48] и опубликованы [12, 45, 46]. На основании полученных результатов была рассчитана скорость вертикального прироста торфяных отложений (мм/год).

Для каждого образца торфа по профилю торфяных залежей определена плотность. Для этого образцы влажного торфа размером  $1\text{ см}^3$  извлекали из кернов и помещали в металлический бюкс, сушили при  $105^\circ\text{C}$ , а затем взвешивали. Влажность торфа также определяли весовым методом [9, 32, 40].

В каждом образце торфа определяли зольность [21] и содержание карбонатов [22] гравиметрическим методом. Потери от прокаливания вычисляли по формуле:  $100\% - \text{зольность} (\%)$ . Из полученного значения вычитали содержание карбонатов, что позволило определить долю органического вещества (**ОВ**) для каждого образца торфа (%).

Для расчета содержания углерода (%) использовали полученное значение **ОВ** в единице объема торфа, которое умножали на массовую долю углерода, полученную с использованием CHNSO-анализатора LECO TruSpecMicro в Институте органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН.

Для оценки скорости накопления углерода ( $\text{г С/м}^2$  в год) палеосообществами болот содержание углерода (%) умножали на мощность торфяного горизонта, на его плотность ( $\text{г/см}^3$ ) и на соответствующую вертикальную скорость прироста торфа (мм/год) [49].

Показатели микробного обилия определяли с использованием люминесцентной микроскопии [33]. Суспензию для приготовления препаратов готовили из расчета 1 г торфа на 100 мл стерильной воды. Для десорбции клеток микроорганизмов с частиц торфа суспензию обрабатывали на ультразвуковом диспергаторе Bandelin Sonopuls HD 2070 (Германия) при 50% мощности в течение 2 мин.

Для учета бактерий и актиномицетного мицелия в одном образце готовили 6 препаратов на двух тщательно обезжиренных предметных стеклах. На каждый препарат наносили 0.01 мл обработанной ультразвуком суспензии, которую равномерно распределяли на площади  $4\text{ см}^2$ . Для учета грибов проделывали ту же процедуру, но аликвота на каждый препарат составляла 0.02 мл. Приготовленные препараты высушивали на воздухе при комнатной температуре, а затем фиксировали легким нагреванием над пламенем газовой горелки. Далее препараты окрашивали водным раствором акридина оранжевого (для учета клеток бактерий и актиномицетного мицелия) и калькофлуором белым (для учета мицелия и спор грибов). Методика

окрашивания и просмотра препаратов на люминесцентном микроскопе приведена в статье [18].

Расчет показателей обилия микроорганизмов на основании данных, полученных люминесцентно-микроскопическим методом, проводили по формулам, приведенным в [16]. При расчетах микробной биомассы принимали, что содержание воды и углерода в клетках исследуемых микроорганизмов соответствует 80 и 50% [35].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования ботанического состава торфяных отложений Большеберезовского болота показали, что, образовавшись в атлантический период голоцена [10, 11, 46], болото развивалось в стабильных условиях водно-минерального питания и это способствовало формированию эвтрофной палеорастительности с доминированием тростника (*Phragmites australis*). В горизонтах 90–130 см, которые соответствуют второй половине суббореального периода, отмечены древесные остатки, что указывает на более сухие условия в это время, обеспечившие внедрение древесных пород (рис. 1). Таким образом, в генезисе Большеберезовского болота можно выделить одну стадию – тростниковую (с редким участием *Equisetum* sp., *Carex* sp., *Comarum palustre*, *Menyanthes trifoliata*, *Scirpus sylvaticus*, *Calla palustris* и др.). При этом гидрологический режим болота, сопровождающийся сезонным изменением УБВ, обеспечил достаточно высокую степень разложения торфов, составляющую в среднем 45–55%. Интенсивность вертикального прироста торфа варьировала в процессе развития болота от 0.1 до 1.8 мм/год [46].

Болото Подкосьюмово, образовавшееся в суббореальный период голоцена [12, 45], в процессе развития характеризовалось последовательной сменой эвтрофных древесного (с участием *Salix* sp.), древесно-травяных (*Phragmites australis*, *Carex* sp., *Equisetum* sp., *Poaceae*, др.) и осокового (*Carex cespitosa*, *C. acuta*) палеоценозов (рис. 2). Это означает, что гидрологический режим болотного биотопа менялся незначительно. Так, слабое обводнение и высокая аэрация способствовали не только поселению древесных пород на начальных стадиях генезиса болота, но и активной трансформации отмерших растительных остатков, что способствовало формированию торфов с высокой степенью разложения (до 70%). По мере накопления торфа сезонная амплитуда УБВ снижалась, древесные породы выпадали из состава палеорастительности, начинали доминировать влаголюбивые травы. Кроме того, степень разложения торфов в таких условиях становилась ниже и в среднем по профилю залежи составляет 40–50%. Интенсивность торфообразовательного процесса в ходе развития болота изменялась от 0.16 до 0.5 мм/год.

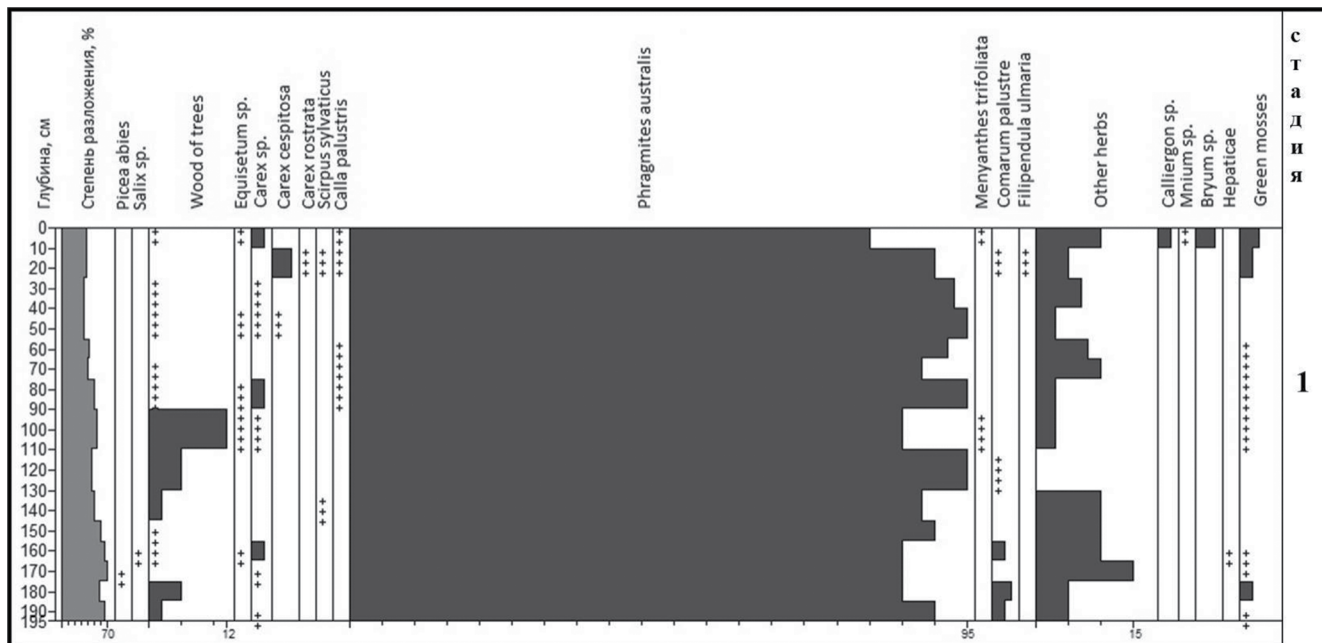


Рис. 1. Стратиграфическая диаграмма Большеберезовского болота (эвтрофный этап: 1 – тростниковая стадия).

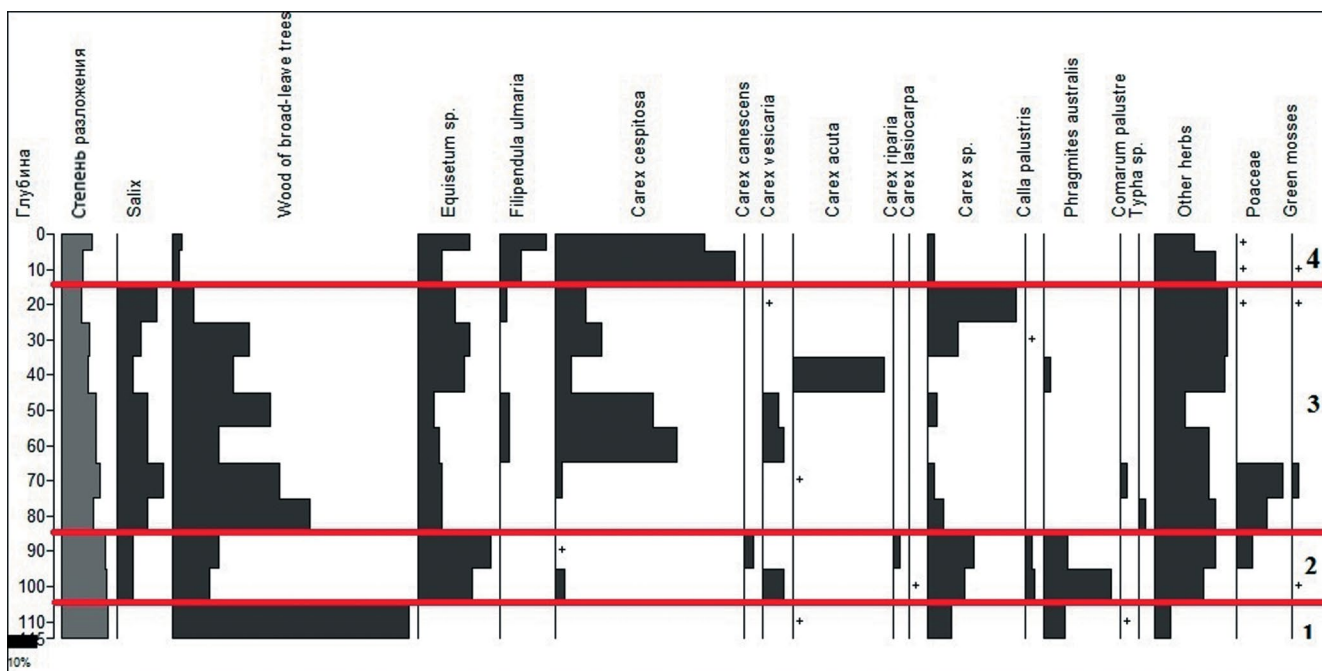


Рис. 2. Стратиграфическая диаграмма болота Подкосьюево (эвтрофный этап: 1 – древесная, 2 и 3 – древесно-травяная, 4 – осоковая стадии).

Смена эвтрофных палеоценозов в генезисе пойменных болот способствовала формированию низинных торфов с определенными водно-физическими и химическими свойствами. Так, постоянная подпитка болот грунтовыми водами является

причиной высокой влажности торфов. На Большеберезовском болоте показатель составляет в среднем 393.5% (рис. 3). При этом наиболее высокие значения характерны для нижней части торфяной залежи (до 470–553%). Поверхностный горизонт

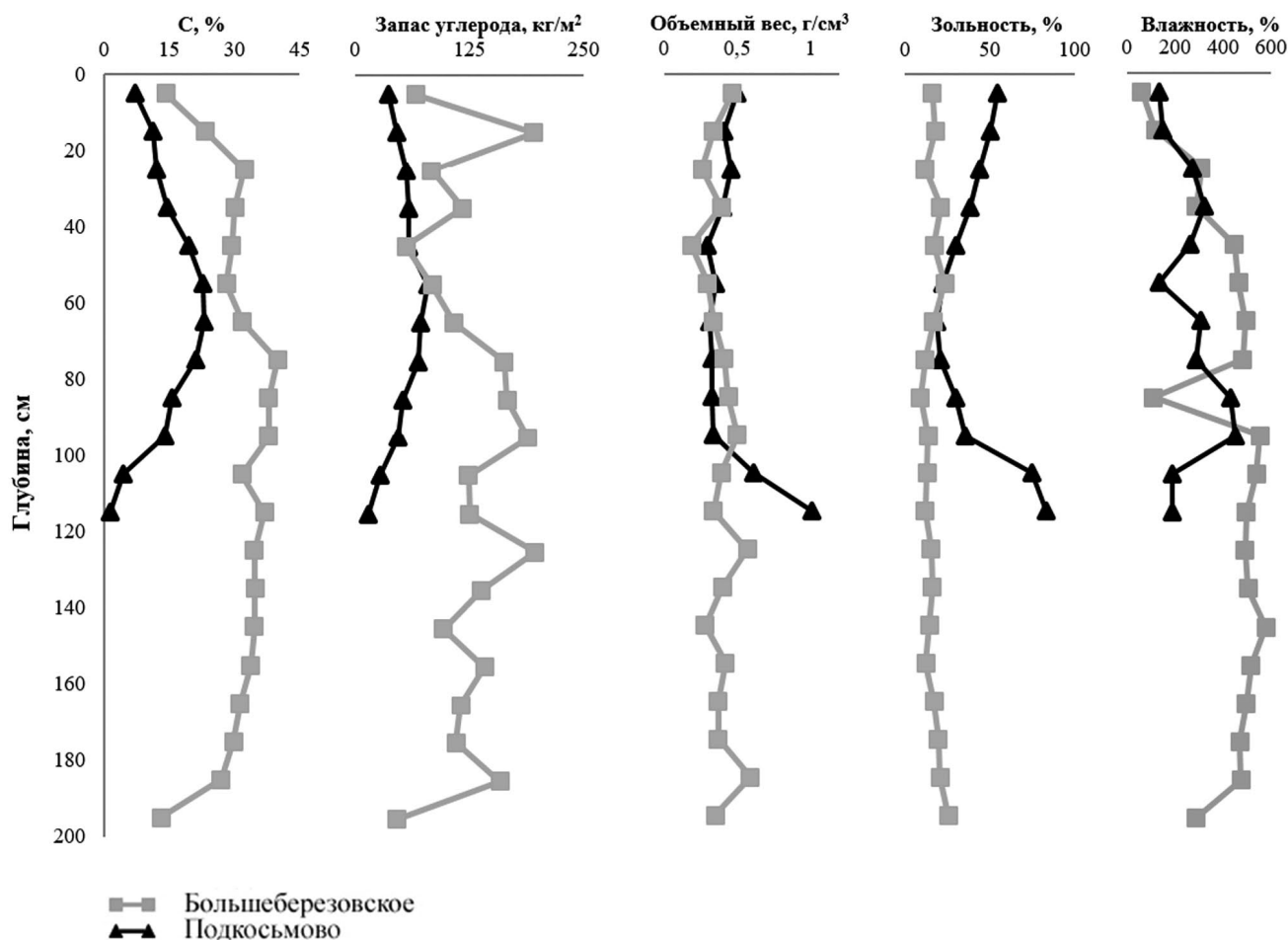


Рис. 3. Водно-физические и химические параметры торфов пойменных болот.

отличается низкими значениями (42.3–82.2%), что обусловлено влиянием мелиорации. Влажность торфяных образцов болота Подкосьюмово менялась от 133.6 до 450.3% по всему профилю залежи (в среднем 267.4%).

Гидрологический режим пойменных болот, сопровождающийся сезонным изменением УБВ, способствует формированию торфов с высокой плотностью (в среднем 0.4 г/см<sup>3</sup>). Так, по профилю Болшeберезовского болота показатель меняется от 0.2 до 0.8 г/см<sup>3</sup>, увеличиваясь в торфах с участием древесных остатков (рис. 3). Плотность торфяных отложений болота Подкосьюмово варьирует от 0.3 до 0.6 г/см<sup>3</sup> (рис. 3).

Минерализация питающих вод на изучаемых пойменных болотах коррелирует с зольностью торфов. По профилю торфяной залежи Болшeберезовского болота показатель составляет в среднем 16%, увеличиваясь в придонных горизонтах до 25%. Показатели зольности болота Подкосьюмово значительно выше и составляют в среднем 41.8%.

Максимальные значения характерны также для придонных горизонтов, что обусловлено наличием глинистых частиц с минерального дна болота (74.7–83.4%), и отмечены в верхних горизонтах (до 54.6%) в связи с активным эрозийным стоком с прилегающих полей, расположенных на коренном склоне (рис. 3).

Как видно, экологические условия, в которых развивались модельные болота, определили особенности развития этих экосистем, характер палеорастительности и свойства торфов. При этом в генезисе болот палеосообщества с разной интенсивностью депонировали углерод в органическом веществе торфа, что отражают показатели содержания углерода в образцах торфа и скорость его аккумуляции на разных этапах развития (рис. 3, 4).

Для оценки содержания органического углерода, помимо зольности, определяли содержание карбонатного (неорганического) углерода и массовой доли углерода в каждом образце торфа. Результаты показали, что содержание карбонатов

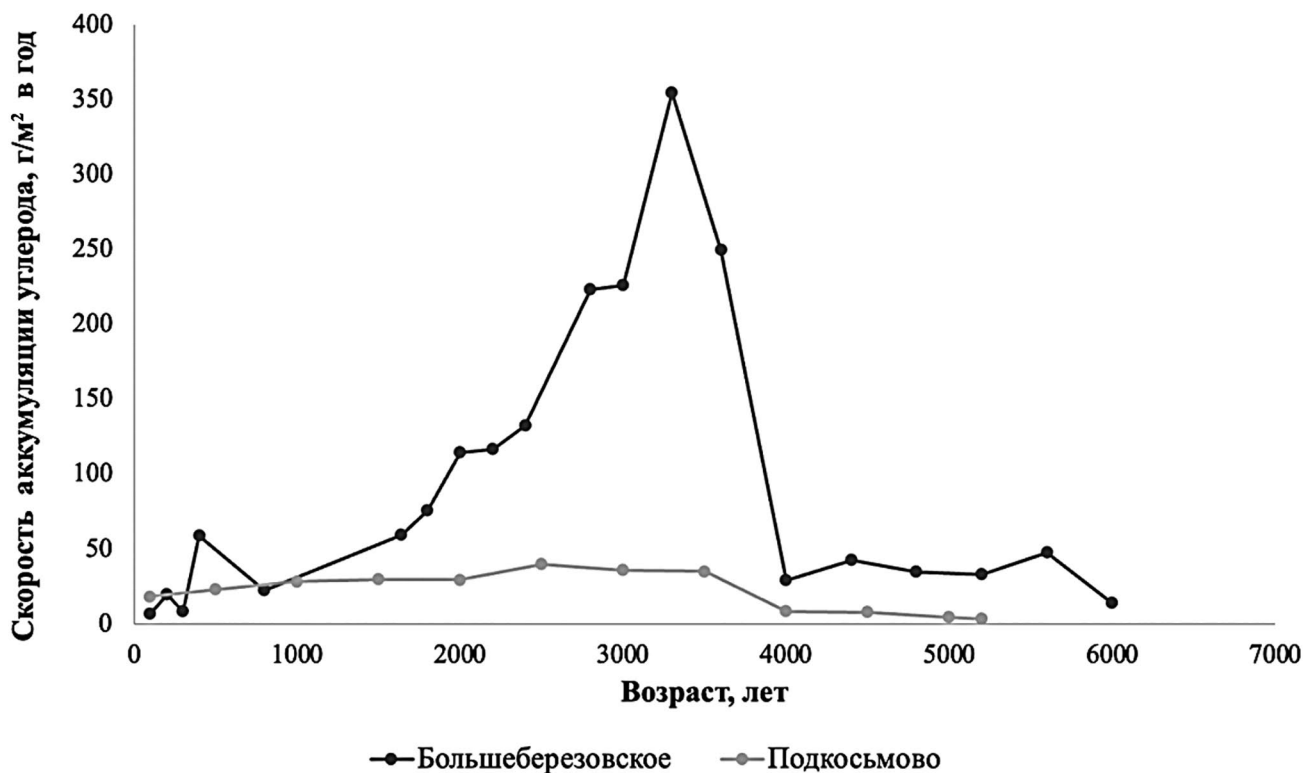


Рис. 4. Скорость аккумуляции углерода в генезисе пойменных болот.

по профилю залежи Большеберезовского болота составляет в среднем 6.8%, а по профилю болота Подкосьмово – 15.1%, достигая 30% в придонных горизонтах. Массовая доля углерода в торфах изучаемых пойменных болот составляет 0.3–0.4%. Расчет содержания органического углерода показал, что в образцах торфа Большеберезовского болота значения варьируют от 13 до 38.6% (в среднем 30.7%). В торфах болота Подкосьмово показатели существенно ниже – от 1.5% до 23% (в среднем 14%) (рис. 3), что обусловлено активным привнесением карбонатов с грунтовыми водами и высокой зольностью образцов (корреляция между зольностью и органическим углеродом для изучаемых болот составляет  $-0.65$  и  $-0.97$  соответственно).

Исходя из содержания, рассчитан запас углерода в торфяных залежах болот. В каждом 10 см слое торфяной залежи Большеберезовского болота запас углерода составляет в среднем  $125 \text{ кг С/м}^2$ . Максимальные значения ( $118.5\text{--}210.8 \text{ кг С/м}^2$ ) свойственны торфам с древесными остатками, залегающими на глубине 90–100 и 120–130 см, которые образовались в суббореальном периоде голоцена. В это время интенсивность аккумуляции углерода тростниковыми палеосообществами болота достигала  $208 \text{ г/м}^2$  в год (от  $109.4$  до  $379.4 \text{ г/м}^2$  в год), что обусловлено увеличением скорости торфообразовательного процесса до  $1.8 \text{ мм/год}$ . На начальных

этапах развития болота скорость аккумуляции углерода составляла  $13.7 \text{ г/м}^2$  в год, впоследствии увеличиваясь в атлантический период до  $42.5 \text{ г/м}^2$  в год. В субатлантическом периоде показатель снизился до  $7\text{--}20 \text{ г/м}^2$  в год, однако это является следствием мелиоративных мероприятий, усиливших процессы трансформации торфа в верхних горизонтах торфяной залежи. Общий запас органического углерода на  $1 \text{ м}^2$  залежи Большеберезовского болота составляет  $2499 \text{ кг}$ .

Запас углерода в торфяных отложениях болота Подкосьмово составляет в среднем  $51.5 \text{ кгС/м}^2$ , увеличиваясь до  $70\text{--}80 \text{ кгС/м}^2$  на глубине 50–80 см, что соответствует первой половине субатлантического периода. При этом скорость аккумуляции углерода в этот период древесно-травяными палеоценозами варьирует в пределах  $35\text{--}40 \text{ г/м}^2$  в год. В суббореальном периоде показатель не превышает  $3\text{--}8 \text{ г/м}^2$  в год, что следует объяснять высокой степенью разложения торфов и низкой скоростью торфообразовательного процесса ( $0.16 \text{ мм/год}$ ). Увеличение доли трав и переход к осоковой стадии развития болота в конце субатлантического периода сопровождалось, в условиях увеличения влажности биотопа, аккумуляцией углерода со скоростью  $18\text{--}29.4 \text{ г/м}^2$  в год, что обеспечило запас углерода в диапазоне  $36\text{--}58.7 \text{ кгС/м}^2$  (для каждого 10 см слоя залежи). Общий запас органического

углерода на 1 м<sup>2</sup> залежи болота Подкосьюмово составляет 618.6 кг.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость аккумуляции углерода, как и запасы, зависят от интенсивности вертикального прироста торфа и его плотности. Эти показатели, в свою очередь, определяются скоростью разложения растительных остатков микроорганизмами в соответствующих экологических условиях. Для понимания специфики данного процесса в разных типах болот необходима оценка запасов и структуры микробной биомассы.

Микробная биомасса в профиле исследуемых болот варьировала от 0.1 до 4.6 мг/г (рис. 5). Большая часть профиля болота Подкосьюмово характеризовалась слабыми колебаниями микробной биомассы (от 0.4 до 0.6 мг/г), однако, начиная с глубины 80 см и до подстилающей породы, фиксировали ее снижение (до 0.1 мг/г). В профиле болота Большеберезовское наблюдали уменьшение микробного титра вниз по профилю, которое носило более резкий характер в толще 0–80 см и плавный — на глубине 80–200 см.

Различались болота не только профильным распределением микробной биомассы, но и ее структурой. Так, в большей части профиля торфяной залежи болота Подкосьюмово в микробной биомассе преобладала бактериальная составляющая (58–93%), тогда как в болоте Большеберезовское — грибная (58–95%) (рис. 6).

Структура микробной биомассы (с преобладанием в большей части профиля бактериальной составляющей), выявленная в ненарушенном болоте Подкосьюмово, характерна для других эвтрофных болот [16–20, 23]. Преобладание грибной биомассы в профиле эвтрофных болот имеет место после проведения мелиоративных работ [19, 20].

В торфяной залежи болота Подкосьюмово доминирование грибного мицелия (активного компонента грибной биомассы) наблюдали до глубины 30 см, тогда как в болоте Большеберезовское — до 80 см, что совпадает с нижней границей диапазона уровня болотных вод (зона максимальной аэрации). Абсолютная величина длины грибного мицелия в этой части торфяной залежи болота Подкосьюмово не превышала 111 м/г торфа, тогда как в залежи Большеберезовского болота диапазон ее значений был гораздо выше — от 201 до 1279 м/г торфа. В остальной части торфяных залежей болот грибная биомасса была представлена исключительно грибными спорами, численность которых на разных глубинах колебалась от 1 до 22 млн спор/г торфа (табл. 1).

Доминирование грибного мицелия в структуре микробной биомассы верхних слоев логично, так как грибы, находясь в условиях достаточного обеспечения кислородом и биогенными элементами,

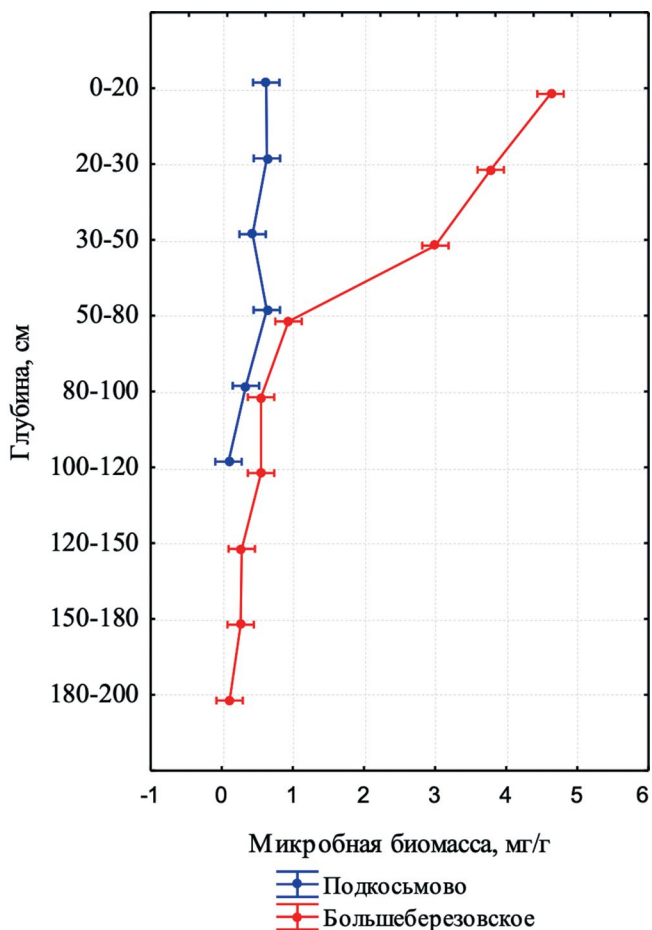


Рис. 5. Распределение микробной биомассы в торфяных залежах пойменных болот.

а также благодаря мицелиальной организации и мощному ферментному аппарату, эффективнее бактерий используют органический субстрат. В глубоких горизонтах залежей (в анаэробных условиях) их работа невозможна, и потому грибной пул представлен исключительно спорами.

Бактерии отличаются устойчивостью к экстремальным условиям среды, поэтому их обнаруживали по всему профилю торфяных залежей исследуемых болот. Колебания численности бактерий по вертикальному градиенту изучаемых болот были незначительными. Так, в большей части залежи болота Подкосьюмово численность бактерий находилась в диапазоне 12–27 млрд кл./г торфа, в залежи болота Большеберезовское — 8–15 млрд кл./г торфа. В подстилающих породах численность бактерий снижалась в 2–4 раза и достигала минимальных значений — 3–5 млрд кл./г торфа. Доля бактерий в микробной биомассе нарастала вниз по профилю торфяных залежей: в болоте Подкосьюмово — от 40 до 93%; в болоте Большеберезовское — от 5 до 88% (рис. 6).

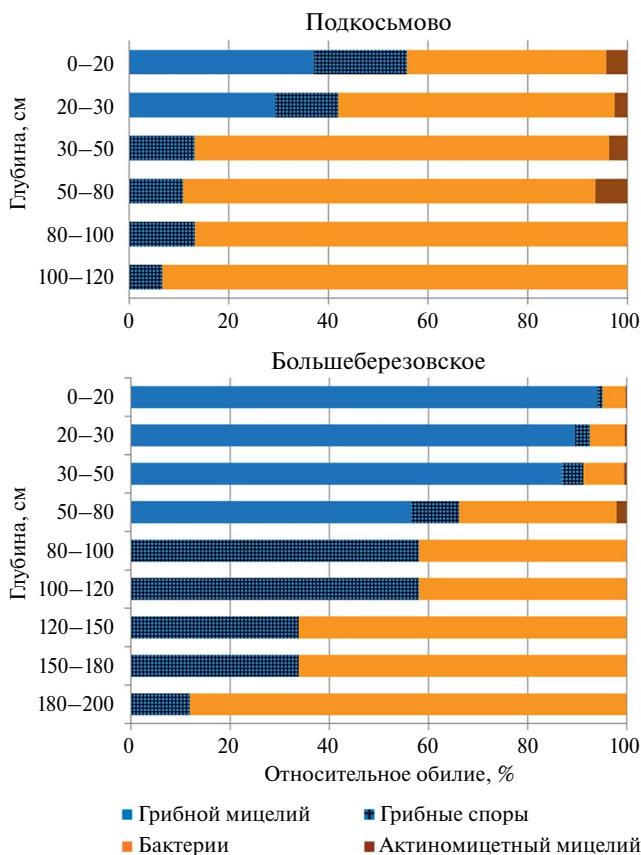


Рис. 6. Структура микробной биомассы в торфяных залежах исследуемых болот.

Актиномицетный мицелий выявляли только в верхней 80-сантиметровой толще залежей исследуемых болот. Его длина варьировала от 194 до 1123 м/г торфа. Доля актиномицетного мицелия в микробной биомассе не превышала 6%. Показатель был выше в торфяной залежи болота Подкосьюмово (3–6%), чем в отложениях болота Большеберезовское (0.2–2%) (рис. 6).

Для выявления зависимости микробной биомассы в торфяных отложениях болот с содержанием и скоростью аккумуляции углерода был осуществлен поиск корреляционных связей между указанными параметрами. Между параметрами для болота Подкосьюмово была выявлена прямая связь (коэффициент корреляции 0.56–0.85, объем выборки – 6 образцов). Стабильные условия водно-минерального питания, присущие болоту на всех этапах его развития, обеспечивали постоянство как запасов и структуры микробной биомассы, так и запасов углерода и скорости его аккумуляции.

Между анализируемыми параметрами для Большеберезовского болота была выявлена обратная связь ( $r = -0.41 \dots -0.55$ , объем выборки – 9 образцов). Это означает, что благоприятные условия

для развития микроорганизмов, складывающиеся в этих палеоценозах (прежде всего, аэрация), способствовали активной трансформации отмерших растительных остатков, что увеличило степень разложения торфов, снизило содержание углерода и скорость его аккумуляции.

Для исследуемых болот с учетом плотности торфов и мощности горизонтов были рассчитаны запасы микробной биомассы. Запасы, рассчитанные на полный профиль, составили в Большеберезовском болоте 898 г/м<sup>2</sup>, что в 4 раза больше, чем в болоте Подкосьюмово (222 г/м<sup>2</sup>). Поскольку мощность профиля болота Подкосьюмово составляет 1.2 м, а мощность Большеберезовского болота – 2 м, был также произведен расчет запасов микробной биомассы на толщ 1.2 м. Результаты показали, что тенденция превышения микробной биомассы в Большеберезовском болоте сохранялась (824 г/м<sup>2</sup>).

Исследуемые болота кардинально отличаются по диапазону варьирования УБВ в течение вегетационного сезона. Мощность деятельного слоя Большеберезовского болота в 2 раза превосходит такую для болота Подкосьюмово. Усиление аэрации за счет проведения мелиоративных мероприятий на Большеберезовском болоте способствовало развитию главных аэробных деструкторов органического детрита – мицелиальных грибов, что привело к перестройке структуры и, как следствие, запасов микробной биомассы. Если в ненарушенном болоте Подкосьюмово доминировала бактериальная биомасса, то в Большеберезовском болоте – биомасса грибного мицелия. Высокие показатели обилия грибов, выявляемые в Большеберезовском болоте, обеспечили запасы микробной биомассы, в 4 раза превосходящие запасы микробной биомассы ненарушенного болота Подкосьюмово.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования пойменных болот северо-востока Среднерусской возвышенности позволили выявить динамику их развития и оценить интенсивность аккумуляции углерода в торфяных залежах.

Развитие болот Большеберезовское и Подкосьюмово началось в старичных понижениях поймы р. Непрядва (приток р. Дон) в атлантический и суббореальный периоды голоцена соответственно. На начальных стадиях заболачивания старицы и формирования Большеберезовского болота увлажнение не было обильным, и потому отмирающие растения тростникового палеоценоза активно разлагались микроорганизмами, о чем свидетельствует высокая степень разложения придонных образцов торфа. Показатели содержания и запасов углерода, а также скорости его аккумуляции минимальны. Прирост торфов в таких условиях



**Таблица 1.** Пределы колебаний длины грибного и актиномицетного мицелия, численности бактерий и спор грибов в профиле исследуемых болот

Горизонт, см	Длина мицелия, м/г		Численность	
	грибного	актиномицетного	бактерий, 10 <sup>9</sup> кл./г	спор грибов, 10 <sup>6</sup> спор/г
Подкосьюмово				
0–20	83–111	608–811	12–13	11–14
20–30	43–86	314–470	17–18	13–17
30–50	0	329–494	17–18	5–9
50–80	0	899–1123	26–27	6–12
80–100	0	0	14–15	6–13
100–120	0	0	3–4	1–3
Большеберезовское				
0–20	1236–1279	194–233	9–10	4–6
20–30	658–702	319–479	13–14	9–13
30–50	496–596	362–452	12–13	10–11
50–80	201–268	488–500	14–15	13–14
80–100	0	0	11–12	15–22
100–120	0	0	10–11	14–21
120–150	0	0	8–9	7–14
150–180	0	0	8–9	7–14
180–200	0	0	4–5	1–4

происходил со скоростью 0.3 мм/год. Постепенное накопление торфяных отложений, обладающих более высокой водоудерживающей способностью, нежели минеральные субстраты, увеличило влажность болотного биотопа. Снижение аэрации сопровождалось уменьшением микробного титра и, как следствие, понижением степени разложения торфов. При этом скорость аккумуляции углерода возрастала, что приводило к увеличению его содержания и запасов в торфах. В таком состоянии болото развивается до середины суббореального периода (соответствует глубине 130–140 см).

Климатические условия суббореала, характеризующиеся сокращением увлажнения и повышением летних температур [34], затронули и болотную экосистему, что проявилось в разрастании древесных пород. Это сопровождалось увеличением интенсивности торфообразовательного процесса и скорости аккумуляции углерода тростниковыми палеоценозами. Содержание и запасы углерода также максимальны для торфов, образовавшихся в это время (соответствуют глубине 80–140 см).

Микробная биомасса при этом существенно не увеличилась.

Повышение увлажнения в субатлантический период коррелирует с выпадением древесных пород из структуры палеорастительности (соответствуют глубине 75–80 см). Однако на свойства торфа, образовавшегося в этот период, оказала влияние мелиорация. Изменения в режиме аэрации вызвали перестройку микробного сообщества в сторону доминирования грибной составляющей, представленной преимущественно мицелием, что привело к активизации процесса разложения растительных остатков. Как результат, содержание и запас углерода в торфах, а также показатели интенсивности аккумуляции углерода палеосообществами явно снижаются, достигая минимальных значений в поверхностных горизонтах. Это свидетельствует о негативном влиянии мелиоративных мероприятий на депонирование углерода в торфяных отложениях болот.

Образовавшееся в суббореальный период голоцена болото Подкосьюмово не испытало

антропогенного воздействия. Развитие болота началось с древесных палеоценозов, формирующихся при умеренном увлажнении и периодическом пересыхании понижения. Отмершие растительные остатки активно разлагались, и потому аккумуляция углерода такими палеоценозами протекала с низкой скоростью. Содержание и запасы углерода также минимальны в придонных горизонтах торфяной залежи. Увеличение интенсивности депонирования углерода отмечено в субатлантическом периоде (соответствует глубине 75–80 см). Повышение атмосферного увлажнения, наряду с грунтовым стоком (имеющим высокое содержание карбонатов), обеспечили, помимо древесных пород (ивы), разрастание влаголюбивых трав. Это ускорило аккумуляцию углерода (до 39.7 г/м<sup>2</sup> в год), хотя и не так активно, как на Большеберезовском болоте. Показатели содержания углерода и его запасов в торфах, образованных в первой половине субатлантического периода, также максимальны. В торфах, образованных во второй половине субатлантического периода, показатели аккумуляции углерода снижаются, что обусловлено современным гидрологическим режимом болота, сочетающим высокое обводнение в весенний период и снижение УБВ (до –40 см) летом. Такие условия наиболее благоприятны для грибов и актиномицетов, активно участвующих в разложении растительных остатков. Кроме того, снижение содержания углерода в верхних горизонтах торфяной залежи связано с высокой зольностью образцов. Причиной этого является интенсивный эрозивный смыв с расположенных рядом сельскохозяйственных полей [26].

Проведенные исследования показывают, что пойменные болота являются важными “депо” атмосферного углерода, а интенсивность его аккумуляции определяется комплексом условий как климатических, так и локальных. Антропогенные воздействия негативно сказываются на сохранении углерода в торфяных залежах болот, усиливая его эмиссию. По этой причине пойменные болота, особенно в лесостепных регионах, должны находиться под охраной в сети ООПТ регионов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-24-10054 “Оценка роли разных типов болот Среднерусской возвышенности в углеродном обмене с атмосферой как основа для создания карбонового полигона (на примере Тульской области)”, соглашения с комитетом Тульской области по науке и инноватике № 10 от 11.04.2023 г.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арлянов В.А., Нечаева И.А., Скворцова Л.С., Волкова Е.М.* Комплексная экологическая оценка состояния водных объектов Тульской области // *Вода: химия и экология*. 2016. № 6. С. 9–21.
2. *Архипченко И.А.* Микробиологические особенности торфяных субстратов // *Гавриш*. 2007. № 2. С. 5–9.
3. *Бабиков Б.В., Кобак К.И.* Поглощение атмосферного углекислого газа болотными экосистемами территории России в голоцене. Проблемы заболачивания // *ИВУЗ. Лесной журнал*. 2016. № 1. С. 9–36.
4. *Балезина К.С.* Анализ потоков парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири / К. С. Балезина // *Интернаука*. 2020. № 21-1(150). С. 54–55. EDN: CAGELS.
5. *Бирюкова О.Н., Орлов Д.С.* Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // *Почвоведение*. 1995. № 1. С. 21–32.
6. *Васильев С.В.* Скорость торфонакопления в Западной Сибири // *Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене*. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2000. С. 56–59.
7. *Волкова Е.М.* Болота Среднерусской возвышенности: генезис, структурно-функциональные особенности и природоохранное значение: Автореф. дис... докт. биол. наук. СПб., 2018. 46 с.
8. *Волкова Е.М.* Древесная, древесно-моховая и кустарничковая растительность болот Среднерусской возвышенности // *Разнообразие растительного мира*. 2022. № 2 (13). С. 5–29.
9. *Волкова Е.М.* Методы изучения болотных экосистем. Тула: Гриф и К, 2009. 94 с.
10. *Волкова Е.М.* Пойменные болота северо-востока Среднерусской возвышенности // *Бот. журн.* 2011. Т. 96. № 4. С. 503–514.
11. *Волкова Е.М., Калинина М.М., Дорогова А.В.* Особенности генезиса водораздельных и пойменных болот Тульской области // *Известия ТулГУ. Естественные науки*. 2019. Вып. 4. С. 118–131.
12. *Волкова Е.М., Леонова О.А., Миронов В.В.* Палеоэкологические условия и аккумуляция углерода в генезисе пойменного болота Среднерусской возвышенности // *Siberian J. Life Sciences and Agriculture*. 2022. № 6. С. 70–91.
13. *Волкова Е.М., Новенко Е.Ю., Юрковская Т.К.* Возраст болот Среднерусской возвышенности // *Известия РАН. Сер. географическая*. 2020. Т. 84. № 4. С. 551–561.
14. *Головацкая Е.А.* Моделирование углеродного баланса болотных экосистем южной тайги при различных сценариях изменения климата. Томск, 2007. 26 с.
15. *Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г., Смирнов С.В.* Оценка динамики

- баланса углерода в болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 4. С. e194. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194>
16. Головченко А.В., Волкова Е.М. Запасы и структура микробной биомассы в торфяниках карстовых ландшафтов Тульской области // Почвоведение. 2019. № 3. С. 370–376. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19030043>
17. Головченко А.В., Волкова Е.М. Численность, запасы и структура микробных комплексов низинных торфяников Тульской области // Мат-лы 5-й научной школы “Болота и биосфера”. Томск: ЦНТИ, 2006. С. 158–162.
18. Головченко А.В., Грачева Т.А., Семенова Т.А., Морозов А.А., Самигуллина С.Р., Глухова Т.В., Инишева Л.И. Мицелиальный компонент эвтрофных торфяных почв в зоне активной деструкции органического детрита // Почвоведение. 2023. № 5. С. 536–549. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601232>
19. Головченко А.В., Дмитриенко Ю.Д., Морозов А.А., Поздняков Л.А., Глухова Т.В., Инишева Л.И. Микробная биомасса в низинных торфяниках: запасы, структура, активность // Почвоведение. 2021. № 7. С. 838–848. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050099>
20. Головченко А.В., Тихонова Е.Ю., Звягинцев Д.Г. Численность, биомасса, структура и активность микробных комплексов низинных и верховых торфяников // Микробиология. 2007. Т. 76. № 5. С. 711–719.
21. ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ
22. ГОСТ 34467-2018. Грунты. Методы лабораторного определения содержания карбонатов. Soils. Laboratory methods for determination of calcium carbonate content
23. Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Кухаренко О.С., Якушев А.В., Семенова Т.А., Инишева Л.И. Структура микробных сообществ верховых и низинных торфяников Томской области // Почвоведение. 2012. № 3. С. 317–326.
24. Домбровская А.В. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе М.: Госэнергоиздат, 1959. 137 с.
25. Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. Расчетный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 73–83.
26. Зацаринная Д.В., Волкова Е.М., Леонова О.А. Разнообразие растительности пойменных болот юго-восточной части Тульской области // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2022. Вып. 1. С. 28–36.
27. Инишева Л.И., Сергеева М.А., Смирнов О.Н. Депопонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. Естественное знание и экология. 2012. № 7. С. 61–74.
28. Кац Н.Я. Болота Земного шара. М., 1971. 294 с.
29. Кутенков С.А. Компьютерная программа для построения стратиграфических диаграмм состава торфа “Korpi” // Труды КарНЦ РАН. № 6. Сер. Экологические исследования. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 2013. С. 171–176.
30. Ланин С.А. Сравнительная оценка гидролого-гидрохимического состояния водохранилищ Новомосковского района Тульской области в осенний период // Вопросы рыболовства. 2017. Т. 18. № 3. С. 328–335.
31. Лапшина Е.Д. Болота юго-востока Западной Сибири. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Томск, 2004. 512 с.
32. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск, 1975. 320 с.
33. Методы почвенной биохимии и микробиологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 304 с.
34. Новенко Е.Ю., Гласко М.П., Бурова О.В. Динамика климата и эволюция ландшафтов северной лесостепи в позднем голоцене (по палинологическим данным района Куликова поля) // Сб. науч. статей “Проблемы изучения и восстановления ландшафтов лесостепной зоны” Тула, 2010. С. 24–34.
35. Полянская Л.М., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г. Микробная биомасса в почвах // Доклады АН. 1995. Т. 344. № 6. С. 846–848.
36. Порохина Е.В., Инишева Л.И., Дырин В.А. Биологическая активность и сезонные изменения CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в торфяных залежах эвтрофного болота // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2015. № 3. С. 157–176.
37. Пьявченко Н.И. О типах болот и торфа в болотоведении // Основные принципы изучения болотных биогеоценозов. Л., 1972. С. 35–43.
38. Пьявченко Н.И. Торфяники Русской лесостепи. М., 1958. 191 с.
39. Хмелев К.Ф. Закономерности развития болотных экосистем Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во Воронежск. ун-та. 1985. 168 с.
40. Chambers Lisa G., Ping Chin Yu, Gabriel M.F., Christopher B.G., Herndon E.M., Long D.T., Lyons W.B. et al. Developing the scientific framework for urban geochemistry // Appl. Geochem. 2016. V. 67. P. 1–20.
41. Crowther T.W. Quantifying global soil carbon losses in response to warming // Nature. 2016. V. 540. P. 104–108.
42. Garsetiasih R., Heriyanto N.M., Adinugroho W.C., Gunawan H., Dharmawan I.W.S., Sawitri R., Yeny I., Mindawati N. Denny Connectivity of vegetation diversity, carbon stock, and peat depth in peatland ecosystems // Global J. Environ. Sci. Manage. 2022. V. 8. P. 369–388.

43. *Ivanov D.G., Kotlov I.P., Minayeva T.Yu., Kurbatova Ju. A.* Estimation of carbon dioxide fluxes on a ridge-hollow bog complex using a high resolution orthophotoplan // *Nature Conservation Research*. 2021. V. 6. P. 16–28.  
<https://doi.org/10.24189/ncr.2021.020>
44. *Magnan G., Garneau M., Stum-Boivin E., Grondin P., Bergeron Y.* Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forested Peatlands in Eastern Canada // *Ecosystems*. 2020. V. 23 P. 1481–1493.  
<https://doi.org/10.1007/s10021-020-00483-x>
45. *Novenko E.Yu., Volkova E.M.* The Middle and Late Holocene Vegetation and Climate History of the Forest-steppe Ecotone Area in the Central Part of European Russia // *Geographical Review of Japan Series B*. 2015. V. 87. P. 91–98.
46. *Novenko E.Yu., Volkova E.M., Glasko M.P., Zuganova I.S.* Paleocological evidence for the middle and late Holocene vegetation, climate and land use in the upper Don River basin (Russia) // *Veget. Hist. Archaeobot.* 2012. V. 21 P. 337–352.
47. *Ratcliffe J., Payne R.J.* Palaeoecological studies as a source of peat depth data: A discussion and data compilation for Scotland // *Mires and Peat*. 2016. V. 18. P. 1–7.
48. *Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E. et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 Years cal BP // *Radiocarbon*. 2013. V. 55. P. 1869–1887.
49. *Turunen J., Tolonen K., Tolvanen S., Remes M., Ronkainen J., Jungner H.* Carbon accumulation in the mineral subsoil of boreal mires. *Global Biogeochem Cycles*. 2002. V. 13. P. 71–79.

## Carbon Accumulation in Peat Soils of Floodplain Mires of the North-east of the Middle-Russian Upland

E. M. Volkova<sup>1, \*</sup>, O. A. Leonova<sup>1</sup>, and A. V. Golovchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Tula State University, Tula, 300012 Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

\**e-mail: convallaria@mail.ru*

The study of the structure of peat deposits of the Bolsheberezovskoye and Podkosmovo inundated mires which were formed during the Atlantic – subboreal periods of the Holocene in the valley of the Nepryadva River, in the north-eastern part of the Middle-Russian Upland. The results of the botanical composition of peat deposits showed that the genesis of mires is represented by eutrophic paleocenoses, which accumulated carbon at a rate of 21.8–95 g/m<sup>2</sup> per year. The formed eutrophic peat was characterized by a high degree of decomposition (45–55%) and a low rate of vertical growth (on average, 0.3–0.6 mm/year), which is due to the seasonal dynamics of the level of occurrence of mire waters. The carbon content in peat by peat deposit profiles is 14% for the Podkosmovo mire and 31% for the Bolsheberezovskoye mire. The differences are due to the peculiarities of the water-mineral nutrition of the mires, which is manifested in the high content of carbonates and ash content of the Podkosmovo mire. Carbon reserves in peat soils of inundated mires vary from 51.5 up to 125 kg/m<sup>2</sup> for horizons with a capacity of 10 cm. This indicator is determined by the intensity of decomposition of plant residues, which depends on the composition and structure of microbial complexes. On the Bolsheberezovskoye mire the microbial complex is dominated by the fungal component, on the Podkosmovo mire – by the bacterial component. This is the reason for the differences in the microbial biomass of the mires: 222 g/m<sup>2</sup> for the Podkosmovo, 898 g/m<sup>2</sup> for the Bolsheberezovskoye mire. The reason for the differences in inundated mires is the range of variation in the level of mire waters during the growing season, due to the reclamation measures carried out in the Bolsheberezovskoye mire. Nevertheless, inundated mires are important “depots” of atmospheric carbon and the intensity of its accumulation is determined by a complex of factors.

*Keywords:* mire ecosystems, dynamics of development, peat deposits, carbon reserves, number of microorganisms, microbial biomass