

DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-70-91

УДК 574.474:574.42:57.032:57.045



ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА В ГЕНЕЗИСЕ ПОЙМЕННОГО БОЛОТА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Е.М. Волкова, О.А. Леонова, В.В. Миронов

Цель – изучить влияние экологических условий на аккумуляцию углерода на разных этапах развития пойменного болота.

Материалы и методы. В образцах торфа ботанический состав и степень разложения торфов определяли микроскопическим методом, влажность и объемный вес – весовым методом. Содержание зольных элементов в торфе определяли методом сухого озоления, содержание органического вещества – по разнице между массой сухого торфа и зольностью. Содержание углерода (%) в образцах торфа рассчитывали, зная объемный вес образца, содержание органического вещества и массовой доли углерода в единице объема торфа. На основании результатов радиоактивного датирования рассчитывали скорость вертикального прироста торфа и интенсивность аккумуляции углерода в разные периоды голоцена.

Состояние окружающих ландшафтов в генезисе болота характеризовали по результатам спорово-пыльцевого анализа и пожарной активности. Интенсивность пожаров в палеоландшафтах определяли по содержанию частиц углей в каждом (1 см³) образце сырого торфа.

Результаты. В генезисе пойменного болота Подкосьмово выделено 5 стадий, формирование которых проходило в стабильных условиях водно-минерального питания. Аккумуляция углерода на всех этапах развития болота протекала со скоростью 45,7 г/м²/год в среднем. При этом, окружающие ландшафты отличались по степени облесенности и интенсивности антропогенной нагрузки.

Заключение. Умеренное увлажнение и питание минерализованными водами обеспечивает стабильность развития пойменного болота и аккумуляцию углерода, несмотря на изменение состояния окружающих ландшафтов под действием климата или человека. Однако в дальнейшем, активная трансформация окружающих ландшафтов может оказать негативное воздействие на функционирование болота и снизить интенсивность аккумуляции углерода.

Ключевые слова: пойменное болото; генезис; аккумуляция углерода; голоцен; палеоэкология

Для цитирования: Волкова Е.М., Леонова О.А., Миронов В.В. Палеоэкологические условия и аккумуляция углерода в генезисе пойменного болота Среднерусской возвышенности // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2022. Т. 14, №6. С. 70-91. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-70-91

PALEOECOLOGICAL CONDITIONS AND CARBON ACCUMULATION IN GENESIS OF INUNDATED MIRE OF MID-RUSSIAN UPLAND

E.M. Volkova, O.A. Leonova, V.V. Mironov

The **aim** is to study of influence of the ecological conditions on the carbon accumulation at the different stages of genesis of the inundated mire.

Materials and methods. The macrofossil analysis and the degree of peat decomposition were studied by the microscopic method, the moisture content and the dry bulk density were studied by the gravimetric method. The ash content was determined by burning, the content of organic matter was calculated by the difference between the mass of dry peat and the ash content. The carbon content (%) in peat samples was calculated based on the dry bulk density, the organic matter content and the mass fraction of carbon for each volume of peat. The rate of vertical growth of peat and intensity of peat accumulation in periods of Holocene were calculated based on the results of radioactive dating.

The parameters of surrounding landscapes during the mire genesis were characterized by the results of the palynology analysis and the estimation of fire activity. The intensity of fires in paleolandscapes was studied by the content of coal particles in each (1 cm³) sample of wet peat.

Results. The genesis of the Podkosmovo mire is presented by 5 stages which were took place under the stable conditions of water-mineral nutrition. The carbon accumulation in the genesis proceeded at the rate of 45.7 g/m²/year on average. At the same time, the surrounding landscapes differed in the degree of afforestation and the intensity of anthropogenic press.

Conclusion. The moderate hydration and nutrition with mineralized waters ensure the stability of the mire development and the intensity of carbon accumulation, despite the change of surrounding landscapes under the influence of climate or human. However, the active transformation of the surrounding landscapes can

have a negative impact on the functioning of the mire and reduce the intensity of carbon accumulation.

Keywords: *inundated mire; genesis; carbon accumulation; Holocene; paleoecology*

For citation. *Volkova E.M., Leonova O.A., Mironov V.V. Paleoeological Conditions and Carbon Accumulation in Genesis of Inundated Mire of Mid-Russian Upland. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 70-91. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-70-91*

Введение

Болотные экосистемы играют важную роль в процессах депонирования атмосферного углерода и среди наземных экосистем являются основным стоком углерода [12, 13, 16, 25, 31]. Это обусловлено высокой влажностью, низкой аэрацией и кислой средой болотных биотопов, что снижает активность микроорганизмов и, соответственно, интенсивность разложения отмерших растительных остатков. Накопление торфяных отложений и их активный вертикальный прирост способствуют аккумуляции углерода в органическом веществе торфа. Оценка интенсивности торфообразовательного процесса и скорости депонирования углерода в торфяных залежах болот является актуальной научной проблемой в связи с современными климатическими изменениями, что требует всестороннего и комплексного изучения.

Наиболее активно этот процесс протекает в болотах бореальной зоны северного полушария [14, 26, 29]. При этом, роль болот внетаежных регионов остается недооцененной, что обусловлено низкой заболоченностью территории. Тем не менее, здесь также сформированы разные типы болот, отличающиеся по геоморфологическому положению, времени возникновения и интенсивности вертикального прироста торфа [2-4]. В то же время, сведения по аккумуляции углерода болотами, расположенными в зоне широколиственных лесов и лесостепи Европейской России, отсутствуют, что подчеркивает актуальность проводимых исследований.

Одним из слабоизученных регионов является Среднерусская возвышенность, которая располагается на границе широколиственно-лесной и лесостепной природных зон и в силу комплекса физико-географических условий характеризуется низкой заболоченностью – 0,5%. В зависимости от рельефа и геолого-гидрологических особенностей территории заболоченность варьирует от 0,01% в центральной части до 1,5% на западных окраинах возвышенности. Несмотря на имеющееся разнообразие типов болот, наиболее площади заняты пойменными болотами (85%). Именно

эти болота являются наиболее «древними» для Среднерусской возвышенности – их возникновение началось около 10 тыс. лет назад и продолжалось в течение всего голоцена [3, 4, 11].

С другой стороны, именно пойменные болота характеризуются низкой степенью сохранности. Их геоморфологическое положение, увлажнение минерализованными (в первую очередь, аллювиальными) водами, высокая продуктивность растительного покрова, а также свойства торфяных отложений явились причиной активного освоения болот этого типа человеком (осушение и разработка торфа, использование под выпас или сенокос). Такая антропогенная трансформация способствовала деградации многих пойменных болот, что не позволяет использовать многие из них в качестве объектов изучения процессов торфонакопления и оценки аккумуляции углерода в голоцене.

Тем не менее, пойменные болота являются редкими элементами лесостепного ландшафта, центрами флористического и ценотического разнообразия, а также характеризуются существенными запасами торфа [2], являясь «депо» углерода. Все это подтверждает необходимость изучения экосистем пойменных болот, включая оценку влияния экологических факторов на торфонакопление и депонирование углерода на разных этапах их развития, как основу для разработки рекомендаций по сохранению этих экосистем.

Объект и методы

Территория исследований располагается в северо-восточной части Среднерусской возвышенности, в верховьях р. Дон. Климат региона умеренно-континентальный, среднегодовая температура составляет 4,9°C, годовое количество выпадающих осадков – 534 мм. В рельефе выражены водоразделы в виде узких протяженных поверхностей с высотами 180–220 м, которые разделены долинно-балочной сетью. Речные долины глубоко врезаны (до 40 – 60 м) и характеризуются попеременно-асимметричным поперечным профилем. Район исследования лежит в междуречье долин рек Дона и Непрядвы и их притоков. В речных системах надпойменно-террасовые комплексы слабо выражены. Днище речных долин занято поймой, имеющей сложный рельеф [5].

В геоботаническом отношении территория исследований располагается в северной части Среднерусской подпровинции Восточноевропейской лесостепной провинции Евразийской степной области [10]. Зональными типами растительности являются остепненные дубравы и луговые сте-

пи. Однако высокий уровень антропогенной трансформации ландшафтов способствовал деградации естественной растительности и сегодня в растительном покрове доминируют сельскохозяйственные поля и разновозрастные залежи. Степные сообщества и леса сохранились на небольших площадях, преимущественно, на склонах речных долин и балок. В структуре почвенного покрова доминируют зональные почвы северной лесостепи – черноземы, реже встречаются серые лесные и азональные почвы (аллювиальные пойменные, лугово-черноземные, болотные низинные).

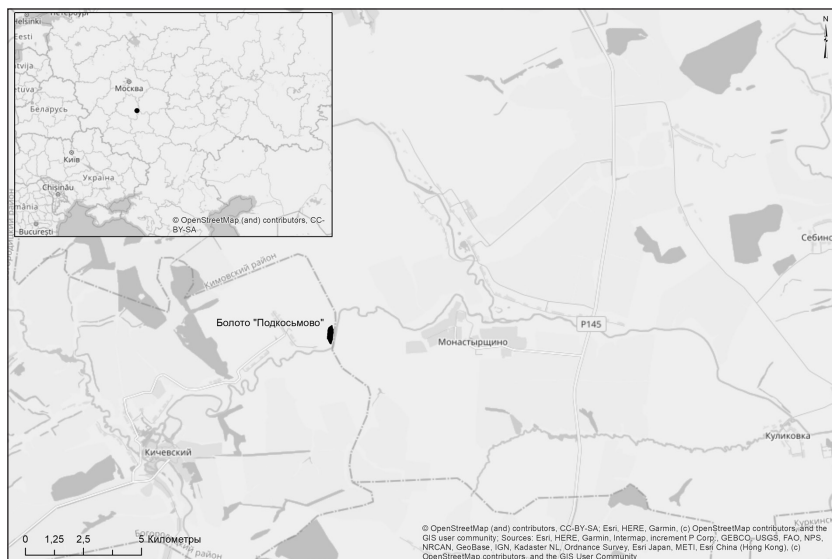


Рис. 1. Географическое положение болота Подкосьмово

Объектом данного исследования явилось ненарушенное болото Подкосьмово (рис. 1), сформированное в левосторонней части поймы р. Непрядва (приток р. Дон). Болото занимает площадь 1,2 га и подпитывается минерализованными (в первую очередь – грунтовыми, а также аллювиальными и делювиальными) водами (содержание солей – 425-690 мг/л). Уровень болотных вод в течение вегетационного сезона варьирует от 0 до – 55 см от поверхности. В растительном покрове болота доминируют сообщества ассоциаций *Filipendula ulmaria*, *Carex acutiformis* и *Equisetum fluviatile*, а на окрайке – асс. *Scirpus sylvaticus*. Торфяные отложения имеют мощность 1,2 метра и представлены низинным торфом.

Для изучения генезиса болота и интенсивности аккумуляции углерода в 2019 году проведено бурение торфяной залежи в наиболее глубокой части при помощи торфяного бура конструкции Инсторфа. В отобранных образцах торфа определяли биологические (степень разложения, состав растительных остатков) и химические (объемный вес, зольность, влажность, содержание органического вещества и содержание углерода) показатели.

Степень разложения торфа (R, %) определяли микроскопическим методом как процент аморфной массы, состоящей из продуктов разложения и тканей без клеточной структуры [8]. Образцы торфа для анализа растительных остатков (каждые 5-10 см керна) промывали под струей воды через сито диаметром 0,25 мм. Затем остатки растений просматривали под бинокулярным микроскопом и идентифицировали в соответствии с определителями [15]. Содержание остатков растений конкретного вида отражали в процентах от общего объема макрофоссилий в образце.

По результатам анализа растительных остатков во всех образцах торфа была построена стратиграфическая диаграмма ботанического состава торфяной залежи болота Подкосьюмово в программе «Cogri» [7]. На основании этой диаграммы были выделены этапы развития болота (палеосообщества), которые названы по доминирующим остаткам видов растений. Видовой состав палеосообществ характеризует состояние палеорастительности и отражает экологические особенности болотного биотопа в конкретный временной период. Для характеристики экологических условий палеосообществ применяли шкалы Д.Н. Цыганова и программу Ecoscale [1].

Для каждого образца торфа по профилю торфяной залежи определены влажность и объемный вес. Влажность (W) определяли весовым методом и рассчитывали по формуле:

$$W = (m_2 - m_3 / m_3 - m_1) * 100\%,$$

где m_1 – масса пустого бюкса (г), m_2 – масса навески торфа в бюксе (г), m_3 – масса высушенного торфа в бюксе (г),

Для определения объемного веса образцы влажного торфа размером 1 см³ извлекали из кернов и помещали в металлический бюкс, сушили при 105°C, а затем взвешивали.

В дальнейшем, определяли зольность высушенного образца сжиганием в муфельной печи при температуре 800°C и последующем выдерживанием при этой температуре до постоянной массы. Образовавшуюся золу взвешивали. Зольность торфа рассчитывали как отношение массы золы к массе торфа (в %). По разнице массы сухого торфа и зольности определяли долю органического вещества в каждом образце торфа [28].

Определение содержания углерода (%) в образцах торфа по профилю залежи проводили, зная объемный вес, содержание органического вещества в единице объема торфа, а также массовую долю углерода, что получено с использованием CHNSO-анализатора LECO TruSpec Micro в Институте органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН [29].

Запас углерода в каждом горизонте торфяной залежи рассчитывали, исходя из произведения содержания углерода (%) и объемного веса торфа. Послойное суммирование запасов в горизонтах залежи позволило определить запас углерода на 1 м² болота, а затем рассчитать запас углерода в торфяной залежи болота в целом (с учетом площади болота).

В образцах, отобранных ранее (2009 г.) в той же точке, проведено определение радиоуглеродного возраста образцов торфа с разных глубин. Полученные результаты по C¹⁴ калибровали в программе Calib 9.0 с использованием калибровочного набора данных Intcal09 [27]. На основании полученных результатов была рассчитана скорость вертикального роста торфа (мм/год).

Для оценки скорости накопления углерода (г/м²/год) в разные периоды развития болота содержание углерода (%) каждого образца умножали на объемный вес (г/см³) и на соответствующую вертикальную скорость накопления торфа (мм/год) [29].

Для характеристики состояния ландшафтов в процессе развития болота в образцах торфа проведен спорово-пыльцевой анализ, результаты которого опубликованы [21].

Активность пожаров в палеоландшафтах характеризовали по содержанию частиц углей в каждом (1 см³) образце сырого торфа. Подсчет частиц угля в торфе осуществляли по стандартной методике [19]. Процесс анализа включал отбеливание каждого образца торфа в 10%-м водном растворе NaOCl объемом 100 мл в течение не менее 24 ч при комнатной температуре. В результате органический материал, не подвергавшийся сильному термическому воздействию, обесцвечивался, но частицы угля сохраняли темный цвет. Затем образец промывали дистиллированной водой через сито с диаметром ячеек 125 мкм и помещали в чашку Петри. Частицы угля подсчитывали под стереоскопическим микроскопом МБС-10 при 28-кратном увеличении.

Статистическую обработку полученных данных проводили в программе Excel.

Результаты и обсуждение

Болото Подкосьюмово сформировано в старице поймы Непрядвы и подстилается озерными глинами. Изучение ботанического состава и степени

разложения торфа по профилю залежи показало наличие только низинных видов торфа (древесный, древесно-травяной, древесно-осоковый, травяной и осоковый) (рис. 2), степень разложения которых варьирует от 35-40% в верхних горизонтах залежи до 65% – в придонных.

Изучение водно-физических и некоторых химических показателей позволило выявить отличия между торфами с разных глубин (рис. 3). Влажность варьирует от 1397 % в средней (70-80 см) части залежи до 3002% в придонном и поверхностном горизонтах, что свидетельствует о выклинивании грунтовых вод и активном увлажнении поверхностными водами.

Объемный вес торфов, в среднем, по залежи меняется в пределах 0,3-0,5 г/см³, однако в придонных горизонтах (100-120 см) увеличивается до 0,61-1,01 г/см³ (рис. 3), что обусловлено примесью глинистых частиц.

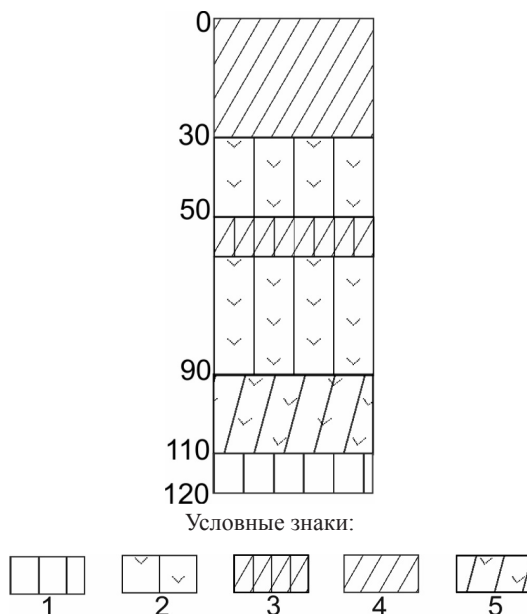


Рис. 2. Строение торфяной залежи болота Подкошьмово
Виды торфа: 1 – древесный, 2 – древесно-травяной, 3 – древесно-осоковый,
4 – осоковый, 5 – травяной

Показатель зольности существенно варьирует по профилю залежи. Наиболее низкие значения отмечены на глубине 50-80 см – 18,4-21,9% (древесно-травяной торф). В поверхностных образцах (0-20 см) осокового

торфа показатель повышается до 50-54,6% (рис. 3). Возможной причиной этого является активная сельскохозяйственная деятельность на прилегающих склонах, усиливающая эрозионный сток на болото. В придонных образцах показатель увеличивается до 74,7-83,4% за счет подпитки грунтовыми водами и наличия глинистых примесей.

Содержание органического вещества в торфе имеет обратную тенденцию изменчивости: максимальные значения характерны для древесно-травяного торфа с долей древесных остатков до 50% (глубина 50-80 см) – 78-81,6%. В осоковом торфе показатель снижается до 45,4-56,1% (0-30 см). В придонных образцах травяного и древесного торфов (100-120 см) содержание органического вещества составляет 16,6-25,3%.

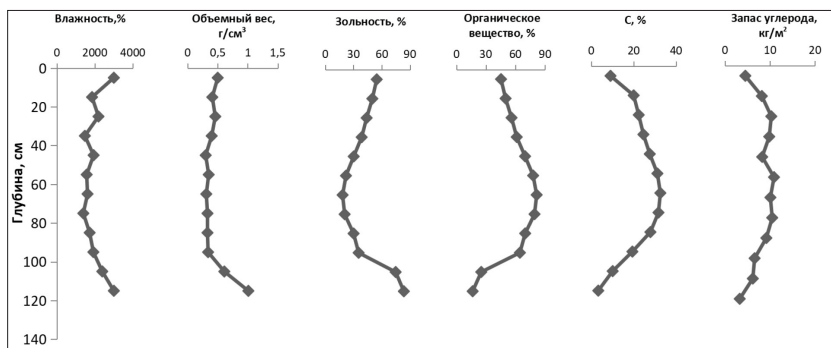


Рис. 3. Изменение водно-физических и химических свойств торфов по профилю залежи болота Подкосьюво

Содержание углерода в торфах по профилю залежи составляет, в среднем, 21,6%, варьируя от 3,3% в придонном древесном торфе до 31,2-32,6% в древесно-травяном торфе средней части залежи (50-80 см). В осоковом торфе содержание углерода снижается до 9,1-22,4% (рис. 3). Как видно, наиболее высокое содержание углерода свойственно древесно-травяному торфу, который характеризуется максимальным содержанием органического вещества и наиболее низкими значениями влажности (коэффициент корреляции между влажностью и содержанием углерода составляет -0,91). Полученные значения и тенденции изменчивости показателя соответствуют имеющимся в литературе сведениям [18, 24].

Запасы углерода в торфах меняются соответственно: наиболее низкие значения характерны для торфа с минимальным содержанием органического вещества и углерода – 3,3-6,2 кг/м² (100-120 см). При этом, мак-

симальные запасы углерода свойственны древесно-травяному торфу на глубине 50-80 см – 10,5-10,9 кг/м². Общий запас углерода по профилю торфяной залежи составляет 97,9 кг/м², а в целом в залежи – 1,17 т. Это означает, что болото является стоком углерода.

Для оценки интенсивности аккумуляции углерода в разные периоды развития болота проведены радиоуглеродное датирование образцов торфа с разных глубин (табл. 1), а также реконструкция состава палеосообществ в генезисе болота (рис. 4).

Таблица 1.

Результаты радиоуглеродного анализа образцов торфа болота Подкосьюмово

Материал	Глубина, см	Радиоуглеродный возраст, ¹⁴ C л.н.	Калиброванный возраст (1σ), кал.л.н.
Торф	45-50	607±95	598±85
«	75-80	2345±75	2407±80
«	110-120	4405±85	5042±95

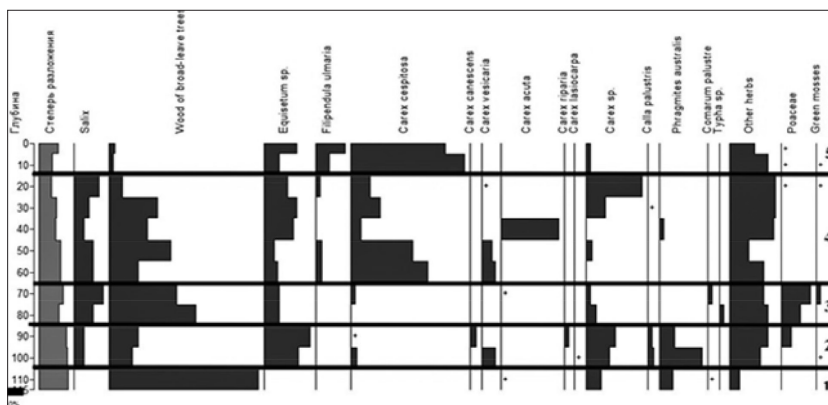


Рис. 4. Стратиграфическая диаграмма торфяных отложений болота Подкосьюмово (палеосообщества: 1 – ивовое, 2 – травяное, 3 – ивово-травяное, 4 – ивово-осоковое, 5 – осоковое)

Полученные результаты показали, что заболачивание старицы в пойме Непрядвы началось в раннем суббореале – 5000 л.н. с формирования ивового палеосообщества (остатки коры и древесины *Salix cinerea* составляют около 80%) с участием *Phragmites australis*, *Carex* sp. и других трав. В дальнейшем, участие трав увеличилось (*Equisetum* sp. – 25%, *Phragmites*

australis – 22%, *Carex* sp. – 20-23%, *Calla palustris* – 2-3%, Poaceae – 5%, другие травы – до 20%). Такие травяные палеоценозы существовали на болоте до конца суббореального периода, а в начале субатлантического периода вновь сменились ивово-травяными (*Salix cinerea* – 55%, *Equisetum* sp. – 8%, *Carex* sp. – 5%, *Typha* sp. – 2%, другие травы – до 30%) (рис. 4).

Умеренное увлажнение палеосообществ в суббореальном периоде обеспечило высокую степень разложения (от 50 до 65%) и низкий вертикальный прирост торфа – 0,16-0,2 мм/год. Аккумуляция углерода ивовыми и травяными палеосообществами в этот период составила 9,9-14,7 г/м²/год (рис. 5).

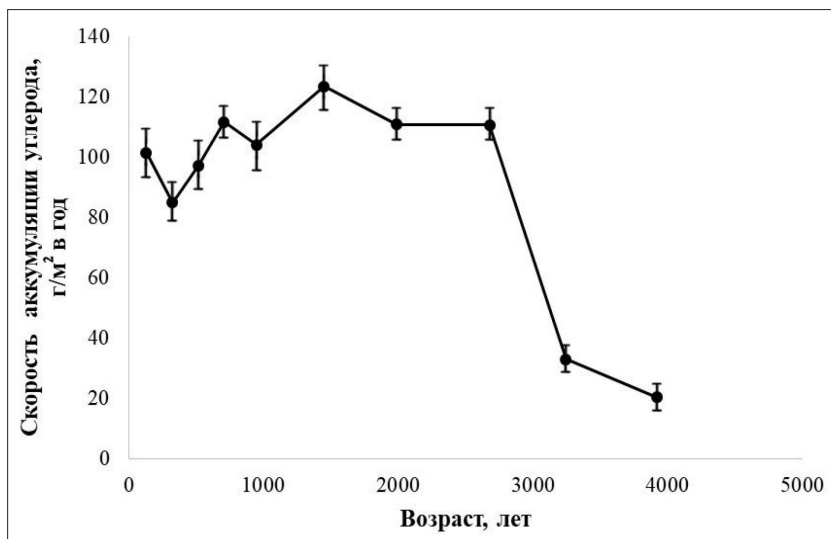


Рис. 5. Динамика интенсивности аккумуляции углерода в генезисе болота Подкосьмово

Окружающие болото ландшафты в конце атлантического периода характеризовались доминированием степных сообществ с участием *Artemisia*, Poaceae, Chenopodiaceae, а также *Ephedra* и *Echinops*. К началу суббореального периода в структуре ландшафтов увеличилась доля лесных сообществ (до 20%). Освоение ландшафтов человеком в этот период диагностируют не только результаты спорово-пыльцевого анализа, свидетельствующие о наличии индикаторов антропогенного воздействия – Cerealea и Cichogiaceae [21], но и весьма высокое содержание частиц угля в торфе – 121-129 шт/см³ (около 4000 л.н.) (рис. 6).

В дальнейшем, 3000-3500 л.н. пожарная активность снизилась и количество углей в образцах травяного и древесно-травяного торфа варьирует в пределах 44-85 шт/см³, хотя облесенность территории, согласно результатам палинологического анализа, увеличилась до 30%. Полученные результаты коррелируют со снижением доли антропогенных индикаторов в палинологическом спектре и свидетельствуют о снижении воздействия человека на окружающие ландшафты.

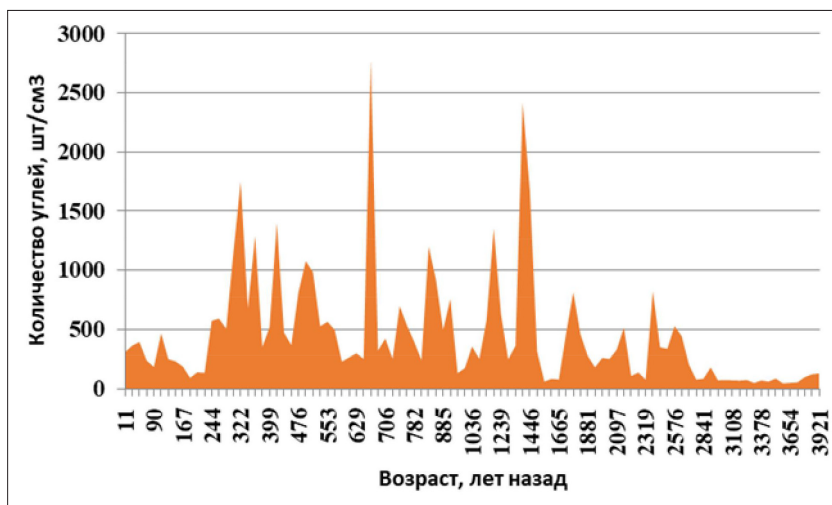


Рис. 6. Динамика накопления углей в генезисе болота Подкосьюмово

К началу субатлантического периода (примерно 2500 л.н.) растительность болота была представлена ивово-травяными палеоценозами (*Salix cinerea* – 40-50%, *Carex cespitosa* – 35-40%, *Equisetum* sp. – 7-8%, *Filipendula ulmaria* – 3%, другие травы и зеленые мхи). Такие палеоценоза сохранялись длительное время и лишь примерно 400 лет назад сменились осоковыми палеоценозами (*Carex cespitosa* – 50-60%, *Filipendula ulmaria* – 7-15%, *Equisetum* sp. – 8-17%, др.) (рис. 4). Тем не менее, в течение всего субатлантического периода были сформированы торфа с высоким содержанием углерода. Интенсивность вертикального прироста торфа увеличилась до 0,5 мм/год (табл. 1), что обеспечило аккумуляцию углерода со скоростью 41,4-54,5 г/м²/год (рис. 5). При этом, максимальные показатели свойственны палеоценозам, в составе которых высока доля *Salix cinerea*. Столь высокие показатели интенсивности свя-

звания углерода обусловлены как климатическими, так и гидрологическими условиями [23].

Климатические реконструкции субатлантического периода свидетельствуют об изменениях показателей температуры и влажности. Это, наряду с усилением антропогенного воздействия на окружающие ландшафты, способствовало вначале разрастанию лесной растительности (с участием *Quercus*, *Tilia*, *Ulmus* и др.), а затем антропогенной деградации лесов на водоразделах [21]. На месте вырубленных лесов (подсечно-огневое земледелие) формировались сельскохозяйственные поля или нарушенные земли.

Интенсивность воздействия человека на окружающие ландшафты отражает увеличение количества частиц углей в первой половине субатлантического периода с 202 до 815-824 шт/см³. Первый пик углей приходится на период 1300-1400 л.н. и составляет 1671-2416 шт/см³ (рис. 6). Это соответствует увеличению облесенности территории до 25% и свидетельствует об интенсивных рубках леса.

В дальнейшем (за исключением отдельных пиков), пожарная активность снижается до времени Куликовской битвы, что коррелирует с сокращением площадей лесных массивов. Антропогенное воздействие также крайне низко, поскольку население покинуло эту территорию [6, 9]. Второй и максимальный пик углей приходится на время Битвы (650-670 л.н.) – 2779 шт/см³ (рис. 6). Реконструкция палеоэкологических условий, основанная на спорово-пыльцевом анализе [21], показала небольшое увеличение облесенности (до 15%) в результате похолодания климата. Наличие в торфяных образцах крупных (более 250 мкм) углей свидетельствует о пожарах не только на окружающих территориях, но и на болоте. При этом, в составе болотной растительности были представлены ивово-травяные палеоценозы. По-видимому, пожарная активность ландшафтов способствовала возгоранию растительности на болоте (в первую очередь, ивы). После Битвы активность пожаров снизилась, но постепенное возвращение населения 500-550 л.н. коррелирует с повторным увеличением показателя.

Следует отметить, что выявленная динамика в состоянии ландшафтов на функционирование болота существенного влияния не оказала – скорость аккумуляции углерода болотными палеоценозами оставалась достаточно высокой (рис. 5). Причиной этого является стабильность гидрологического режима территории.

Кардинальные изменения в ландшафтах Верхнего Дона произошли в последние 500 лет и агроценозы стали доминирующим компонентом в структуре ландшафтов [20-22], о чем свидетельствует увеличение доли

пыльцы *Cerealea*, *Cichoriaceae*, *Centaurea cyanus*, *Fagopyrum esculentum*, *Plantago major/media*, *Polygonum aviculare* в торфяных образцах. Освоение территории сопровождалось распашкой заброшенных земель, что отражают повторные пики количества углей в осоковом торфе – до 1400-1749 шт/м³. В дальнейшем, отмечено снижение показателя, особенно – в последние 200 лет (рис. 6). Это свидетельствует о низкой облесенности территории и редком применении подсеčno-огневого земледелия. Тем не менее, активное использование земель человеком (распашка) проявляется в усилении эрозионного смыва, что приводит к накоплению минеральных частиц и увеличению зольности в верхних горизонтах торфа и, соответственно, к снижению доли органического вещества и содержания углерода (рис. 3). В результате, интенсивность аккумуляции углерода осоковыми палеосообществами (*Carex* sp., *C. cespitosa*, *C. vesicaria* – 40-60%) снижается до 22,7 г/м²/год (рис. 5).

Таким образом, развитие болота Подкосьюмово проходило при стабильном водно-минеральном питании. Применение экологических шкал Д.Н. Цыганова подтвердило стабильность увлажнения (HD и FH), трофности (TR), богатства азотом (NT), кислотности (RC) и освещенности (LC) (табл. 2). Как видно, в генезисе болота увлажнение было умеренным (свежелесолуговая экологическая группа) и стабильным (слабо переменное увлажнение). Балл трофности соответствует достаточно богатому питанию (гликосубэвтрофная группа), но при низком содержании азотистых соединений (геминитрофильная группа). Балл кислотности биотопов соответствует pH=5,5-6,5, а показатель освещенности – полуоткрытым пространствам.

Таблица 2.

Экологические параметры биотопов для палеосообществ болота Подкосьюмово (с использованием шкал Д.Н. Цыганова)

Палео-сообщества	Значения экологических шкал					
	HD	TR	NT	RC	LC	FH
Осоковое	12,3	8,3	5,2	7,3	2,9	5,7
Ивово-осоковое	12,2	8,3	5,2	7,4	3,0	5,8
Ивово-травяное	12,2	8,3	5,2	7,3	2,9	5,7
Травяное	12,4	8,3	5,2	7,4	3,0	5,7
Ивовое	12,1	8,4	5,1	7,3	3,0	5,8

Тем не менее, выявленная динамика растительности в генезисе болота Подкосьюмово свидетельствует о том, что палеосообщества аккумуляировали углерод в торфах с разной скоростью. При этом, состояние

окружающих ландшафтов претерпевало изменения, обусловленные как климатическими показателями, так и антропогенной нагрузкой. Это проявлялось в динамике облесенности и интенсивности распашки территории. Однако существенное влияние на депонирование углерода палеоэкологические факторы оказали во второй половине субатлантического периода, что привело к некоторому снижению интенсивности аккумуляции углерода болотными палеосообществами.

Заключение

Изучение стратиграфии торфяной залежи болота Подкосьмово показало, что его развитие, начавшееся около 5000 лет назад, проходило в стабильных гидрологических условиях при питании минерализованными водами. Это обеспечило эвтрофный характер растительности на всех этапах генезиса болота, активный вертикальный прирост торфа (в среднем, 0,4 мм/год) и интенсивную аккумуляцию углерода – в среднем, 33,7 г/м²/год. Наиболее активно депонирование углерода осуществляли ивово-травяные палеоценозы в субатлантический период.

По мере развития болота состояние окружающих ландшафтов менялось, что проявлялось в облесенности территории и степени антропогенной трансформации. Реконструкция динамики пожаров по накоплению углей в торфяных отложениях показала, что активное освоение территории началось около 1500 лет назад.

В последние 200-300 лет интенсивность пожаров снизилась, что обусловлено максимальным преобразованием ландшафтов и снижением облесенности. Однако активное использование земель в сельскохозяйственных целях усилило эрозионных сток и накопление минеральных веществ в поверхностных горизонтах торфяной залежи болота, что привело к некоторому снижению интенсивности аккумуляции углерода растительностью болот.

Таким образом, гидролого-гидрохимические факторы обеспечили стабильное развитие болота Подкосьмово и активное накопление углерода в торфяных отложениях, несмотря на изменение состояния окружающих ландшафтов под действием климата или человека. Важно отметить, что продолжающаяся антропогенная трансформация ландшафтов может негативно отразиться на функционировании болота в будущем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-44-710001, договор с правительством Тульской области ДС/305 и ДС/268.

Список литературы

1. Бузук Г.Н., Созинов О.В. Регрессионный анализ в фитоиндикации (на примере экологических шкал Д.Н. Цыганова) // Ботаника. Минск: Право и экономика, 2009 – Вып. 37. С. 356-362.
2. Волкова Е.М. Пойменные болота северо-востока Среднерусской возвышенности // Бот. Журнал, 2011. Т. 96, № 4. С. 503-514.
3. Волкова Е. М. Редкие болота северо-востока Среднерусской возвышенности: растительность и генезис // Бот. журн. 2011а. Т. 96. № 12. С. 1575-1590.
4. Волкова Е.М., Новенко Е.Ю., Юрковская Т.К. Возраст болот Среднерусской возвышенности // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 551-561.
5. Гласко М. П., Гольева С. А., Сычева С. А., Бурова О. В. Ландшафты Донского побоища: возвращение утраченного // Труды Государственного исторического музея 150. 2005. С. 227–256.
6. Гоняный М.И., Александровский А.Л., Гласко М.П. Северная лесостепь бассейна Верхнего Дона времени Куликовской битвы. М.: ГИМ. 2007. 207 с.
7. Кутенков С.А. Компьютерная программа для построения стратиграфических диаграмм состава торфа «Когри» // Труды КарНЦ РАН. No 6. Сер. Экологические исследования. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 171-176.
8. Лиштван И. И., Король Н. Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск, 1975. 319 с.
9. Наумов А.Н., Наумова Т.В. Раскопки на селище Себино 2 Куликова поля // Археологические исследования в Центральном Черноземье. Воронеж: Полиграф. изд. «Новый взгляд», 2018. С. 193-195.
10. Растительность Европейской части СССР (под ред. С.А. Грибовой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко). Ленинград, Наука, 1980. 425 с.
11. Хмелев К.Ф. Закономерности развития болотных экосистем Центрального Черноземья. Воронеж, изд-во Воронежск. ун-та, 1985. 168 с.
12. Charman D. J., Amesbury M. J., Hinchliffe W, Hughes P. D. M., Mallon G, Blake W. H., Daley T. J., Gallego-Sala A. V., Mauquoy D. Drivers of Holocene peatland carbon accumulation across a climate gradient in northeastern // North America Quat. Sci. Rev. 2015, vol. 121, pp. 110–119.
13. Crowther T. W., Todd-Brown K. E. O., Rowe C. W., Wieder W. R. et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming // Nature. 2016, vol. 540, pp. 104–108. <http://doi.org/10.1038/nature20150>
14. Crill, P., Bartlett, K. and Roulet, N. Methane flux from Boreal peatlands // Suo (Mires and Peat). 1992, vol. 43 (4-5), pp. 173-182.

15. Dombrovskaya A. V., Koreneva M. M., Turemnov S. N. Atlas of plant remains in peat. Moscow, 1959, 228 p.
16. Gorham E. Northern peatlands role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecological Applications*, 1991, vol. 1, pp. 182–195. <http://doi.org/10.2307/1941811>
17. Higuera P. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Bozeman: MT, Montana State University, 2009. 27 p.
18. Hribljan J. A., Cooper D. J., Sueltenfuss J., Wolf E. C., Heckman K. A., Lilleskov E. A., Chimner R. A. Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia // *Mires and Peat*. 2015, vol. 15(12), pp. 1–14.
19. Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments // *Mires and Peat*, 2011, vol. 7. pp. 1-18.
20. Novenko E. Yu., Volkova E. M., Glasko M. P., Zuganova I. S. Paleoecological evidence for the middle and late Holocene vegetation, climate and land use in the upper Don River basin (Russia) // *Veget. Hist. Archaeobot*, 2012, vol. 21. pp. 337-352.
21. 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 / Article of Special Issue on “Environment Evolution and Human Activity in the Late Quaternary: Geographical Pattern” // *Geographical Review of Japan Series B*. 2015, vol. 87(2), pp. 91-98.
22. Novenko E., Tsyganov A., Rudenko O., Volkova E., Zuyganova I., Babeshko K., Olchev A., Losbenev I., Payne R., Mazei Yu. Mid- and late-Holocene vegetation history, climate and human impact in the western Mid-Russian Upland: new data and a regional synthesis // *Biodiversity and Conservation*, 2016, pp. 2453-2472. <http://doi.org/10.1007/s10531-016-1051-8>
23. Novenko E. Yu. Landscape and climate dynamics in Central and Eastern Europe in the Holocene: paleogeographic aspects of predicting possible changes in the natural environment // *Ecosystems: Ecology and Dynamics*, 2020, vol. 4, pp. 57-80.
24. Piilo S. R., Zhang H., Garneau M., Gallego-Sala A., Amesbury M. J., Väliiranta M. M. Recent peat and carbon accumulation following the Little Ice Age in northwestern Québec, Canada // *Environ. Res. Lett.* 2019, vol. 14, pp. 1-15. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/AB11EC>
25. 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, vol. 18(13), pp. 1–7.

26. Ratcliffe J., Andersen R., Anderson R., Newton A., Campbell D., Mauquoy D., Payne R. Contemporary carbon fluxes do not reflect the long-term carbon balance for an Atlantic blanket bog Holocene. 2018, vol. 28(1), pp. 140–149. <http://doi.org/10.1177/0959683617715689>
27. Reimer P. J., Bard E., Bayliss A., Beck J. W., et. Al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50.000 years cal. BP // Radiocarbon. 2013, vol. 55, pp. 1869–1887. http://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
28. Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M., Kremenetski K. V., Frey K. E., Velichko A. A., Lee M., Beilman D. W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the West Siberian peat carbon pool // Global Biogeochemical Cycles, 2004, vol. 18(3), pp. 1-14. <http://doi.org/10.1029/2003GB002190>
29. Turunen J., Tomppo E., Tolonen K., Reinikainen A. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions // Holocene, 2002, vol. 12, pp. 69–80. <http://doi.org/10.1191/0959683602hl522rp>
30. Vorob'eva L. A. Chemical analyses of soil. Moscow: MGU, 1998, 272 p.
31. Yu Z. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications // The Holocene, 2011, vol. 21(5), pp. 761–774. <http://doi.org/10.1177/0959683610386982>

References

1. Buzuk G.N., Sozinov O.V. Regressionnyy analiz v fitoindikatsii (na primere ekologicheskikh shkal D.N. Tsyganova) [The regression analysis in phytointication (on the example of D.N. Tsyganov's ecological scales)]. *Botanika*. Minsk: Pravo i ekonomika, 2009, no. 37, pp. 356-362.
2. Volkova E.M. Poymennye bolota severo-vostoka Srednerusskoy vozvyshennosti [The undated mires of north-east of the Srednerusskaya hill]. *Bot. Zhurnal*, 2011, vol. 96, no. 4, pp. 503-514.
3. Volkova E. M. Redkie bolota severo-vostoka Srednerusskoy vozvyshennosti: ras-titel'nost' i genezis [The rare mires of the North-eastern of Central Russian Upland: vegetation and genesis]. *Bot. Zhurnal*, 2011, vol. 96, no. 12, pp. 1575-1590.
4. Volkova E.M., Novenko E.Yu., Yurkovskaya T.K. Vozrast bolot Srednerusskoy vozvyshennosti [The age of mires of the Central Russian Upland]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2020, vol. 84, no. 4, pp. 551-561.
5. Glasko M. P., Gol'eva S. A., Sycheva S. A., Burova O. V. Landshafty Donskogo poboishcha: vozvrashchenie utrachennogo [Landscapes of the Don massacre: the return of the lost]. *Trudy Gosudarstvennogo istoricheskogo muzeya 150*, 2005, pp. 227–256.

6. Gonyanyy M.I., Aleksandrovskiy A.L., Glasko M.P. *Severnaya lesostep' basseyna Verkhnego Dona vremeni Kulikovskoy bitvy* [Northern forest-steppe of the Upper Don basin during the Battle of Kulikovo]. M.: GIM, 2007, 207 p.
7. Kutenkov S.A. Komp'yuternaya programma dlya postroeniya stratigraficheskikh diagramm sostava torfa «Korpi» [Computer program for constructing stratigraphic diagrams of peat composition "Korpi"]. *Trudy KarNTs RAN. No 6. Ser. Ekologicheskie issledovaniya*. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2013, pp. 171-176.
8. Lishtvan I. I., Korol' N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [The main properties of peat and methods of their determination]. Minsk, 1975, 319 p.
9. Naumov A.N., Naumova T.V. Raskopki na selishche Sebino 2 Kulikova polya [Excavations near the village of Sebino 2 of Kulikovo field]. *Arkheologicheskie issledovaniya v Tsentral'nom Chernozem'e* [Archaeological research in the Central Chernozem region]. Voronezh: Poligraf. izd. «Novyy vzglyad», 2018, pp. 193-195.
10. *Rastitel'nost' Evropeyskoy chasti SSSR* [Vegetation of the European part of the USSR] (pod red. S.A. Gribovoy, T.I. Isachenko, E.M. Lavrenko). Leningrad, Nauka, 1980, 425 p.
11. Khmelev K.F. *Zakonomernosti razvitiya bolotnykh ekosistem Tsentral'nogo Chernozem'ya* [The patterns of development of swamp ecosystems of the Central Chernozem region]. Voronezh, izd-vo Voronezhsk. un-ta, 1985, 168 p.
12. Charman D. J., Amesbury M. J., Hinchliffe W., Hughes P. D. M., Mallon G, Blake W. H., Daley T. J., Gallego-Sala A. V., Mauquoy D. Drivers of Holocene peatland carbon accumulation across a climate gradient in northeastern. *North America Quat. Sci. Rev.* 2015, vol. 121, pp. 110–119.
13. Crowther T. W., Todd-Brown K. E. O., Rowe C. W., Wieder W. R. et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 2016, vol. 540, pp. 104–108. <http://doi.org/10.1038/nature20150>
14. Crill, P., Bartlett, K. and Roulet, N. Methane flux from Boreal peatlands. *Suo (Mires and Peat)*, 1992, vol. 43 (4-5), pp. 173-182.
15. Dombrovskaya A. V., Koreneva M. M., Turemnov S. N. Atlas of plant remains in peat. Moscow, 1959, 228 p.
16. Gorham E. Northern peatlands role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, vol. 1, pp. 182–195. <http://doi.org/10.2307/1941811>
17. Higuera P. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. *Bozeman: MT, Montana State University*, 2009, 27 p.
18. Hribljan J. A., Cooper D. J., Sueltenfuss J., Wolf E. C., Heckman K. A., Lilleskov E. A., Chimner R. A. Carbon storage and long-term rate of accumulation in

- high-altitude Andean peatlands of Bolivia. *Mires and Peat*, 2015, vol. 15(12), pp. 1–14.
19. Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, pp. 1-18.
 20. Novenko E.Yu., Volkova E.M., Glasko M.P., Zuganova I.S. Paleoecological evidence for the middle and late Holocene vegetation, climate and land use in the upper Don River basin (Russia). *Veget. Hist. Archaeobot*, 2012, vol. 21, pp. 337-352.
 21. 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 / Article of Special Issue on “Environment Evolution and Human Activity in the Late Quaternary: Geographical Pattern”. *Geographical Review of Japan Series B*, 2015, vol. 87(2), pp. 91-98.
 22. Novenko E., Tsyganov A., Rudenko O., Volkova E., Zuyganova I., Babeshko K., Olchev A., Losbenev I., Payne R., Mazei Yu. Mid- and late-Holocene vegetation history, climate and human impact in the western Mid-Russian Upland: new data and a regional synthesis. *Biodiversity and Conservation*, 2016, pp. 2453-2472. <http://doi.org/10.1007/s10531-016-1051-8>
 23. Novenko E. Yu. Landscape and climate dynamics in Central and Eastern Europe in the Holocene: paleogeographic aspects of predicting possible changes in the natural environment. *Ecosystems: Ecology and Dinamics*, 2020, vol. 4, pp. 57-80.
 24. Piilo S. R., Zhang H., Garneau M., Gallego-Sala A., Amesbury M. J., Väliiranta M. M. Recent peat and carbon accumulation following the Little Ice Age in northwestern Québec, Canada. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, pp. 1-15. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/AB11EC>
 25. 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, vol. 18(13), pp. 1–7.
 26. Ratcliffe J., Andersen R., Anderson R., Newton A., Campbell D., Mauquoy D., Payne R. Contemporary carbon fluxes do not reflect the long-term carbon balance for an Atlantic blanket bog. *Holocene*, 2018, vol. 28 (1), pp. 140–149. <http://doi.org/10.1177/0959683617715689>
 27. Reimer P. J., Bard E., Bayliss A., Beck J. W., et. Al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50.000 years cal. BP. *Radiocarbon*. 2013, vol. 55, pp. 1869–1887. http://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
 28. Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M., Kremenetski K. V., Frey K. E., Velichko A. A., Lee M., Beilman D. W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the West Siberian peat carbon pool. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, vol. 18(3), pp. 1-14. <http://doi.org/10.1029/2003GB002190>

29. Turunen J., Tomppo E., Tolonen K., Reinikainen A. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *Holocene*, 2002, vol. 12, pp. 69–80. <http://doi.org/10.1191/0959683602hl522tp>
30. Vorob'eva L. A. Chemical analyses of soil. Moscow: MGU, 1998, 272 p.
31. Yu Z. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications. *The Holocene*, 2011, vol. 21(5), pp. 761–774. <http://doi.org/10.1177/0959683610386982>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Волкова Елена Михайловна, д-р биол. наук, доцент, заведующая кафедрой биологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

*пр. Ленина, 92, г. Тула, 300026, Российская Федерация
convallaria@mail.ru*

Леонова Ольга Андреевна, аспирант кафедры биологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

пр. Ленина, 92, г. Тула, 300026, Российская Федерация

Мионов Василий Вячеславович, студент кафедры биологии

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

пр. Ленина, 92, г. Тула, 300026, Российская Федерация

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena M. Volkova, Dr. Sc. (Biology), Docent, Head of Biology Department

Tula State University

92, Lenina Sq., Tula 300026, Russian Federation

convallaria@mail.ru

SPIN-code: 2587-5900

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5496-8728>

ResearcherID: ABE-9154-2020

Scopus Author ID: 7102959319

Olga A. Leonova, Post-Graduate Student, Biology Department

Tula State University

92, Lenina Sq., Tula 300026, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7202-4576>

Vasyliy V. Mironov, Student, Biology Department

Tula State University

92, Lenina Sq., Tula 300026, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5086-4411>

Поступила 05.06.2022

После рецензирования 24.06.2022

Принята 28.06.2022

Received 05.06.2022

Revised 24.06.2022

Accepted 28.06.2022