

СООБЩЕНИЯ

РАЗВИТИЕ СПЛАВИННЫХ КАРСТОВЫХ БОЛОТ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ И АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ

© 2023 г. Е. М. Волкова^{1,*}, О. А. Леонова^{1,**}, Д. В. Зацаринная^{1,2,***}

¹Тульский государственный университет
пр. Ленина, 92, Тула, 300012, Россия

²Тульский областной краеведческий музей
ул. Советская, 68, Тула, 300000, Россия

*e-mail: convallaria@mail.ru

**e-mail: ya.oly2012@yandex.ru

***e-mail: visloguzova@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 05.07.2023 г.

Сплавинные карстовые болота — уникальные природные экосистемы Среднерусской возвышенности. Они являются местообитаниями редких видов и сообществ в регионе с низкой заболоченностью (0.5%), а также участвуют в депонировании атмосферного углерода. Изучение развития сплавинных карстовых болот позволит разработать подходы к их сохранению.

В статье представлены результаты изучения особенностей развития сплавинных болот Среднерусской возвышенности, образованных в депрессиях карстового происхождения, и оценка интенсивности аккумуляции углерода в их торфяных отложениях. Объектами исследования являлись болота “Главное” и “Кочаки-1”, которые расположены в северо-восточной части Среднерусской возвышенности. Для выявления генезиса болот проведено бурение торфяных отложений и изучение ботанического состава торфов. В образцах торфа определено содержание углерода (%) и рассчитана скорость аккумуляции углерода палеоценотами болот.

На примере исследованных болотных экосистем выявлены особенности заболачивания карстовых депрессий, сопровождающиеся формированием сплавин. Показано, что наиболее активный вертикальный прирост торфяных отложений происходит в условиях высокого увлажнения болотных биотопов. Это способствует максимальной аккумуляции атмосферного углерода палеосообществами болот (в среднем по залежам до 79.3–125 гС/м²/год). Наиболее высокие показатели депонирования углерода свойственны сфагновым и травяно-сфагновым палеоценотам (до 151–305 гС/м²/год), сформировавшимся на сплавах во второй половине—конце субатлантического периода голоцена. Полученные результаты свидетельствуют о разнообразии генезиса сплавинных болот и характеризуют эти экосистемы как “депо” атмосферного углерода.

Ключевые слова: карстовые болота, сплавина, генезис, палеосообщества, депонирование углерода, Среднерусская возвышенность

DOI: 10.31857/S0006813623070074, **EDN:** EPPUVW

Болотные экосистемы развиваются при определенном сочетании геоморфологических, гидрологических, геологических и климатических факторов, что обеспечивает формирование специфической растительности и торфа. В процессе развития болот происходит накопление торфяных отложений, которые являются субстратом для новых растительных сообществ. По мере вертикального прироста торфа происходит постепенное изменение условий произрастания видов растений, что обеспечивает сукцессионную динамику растительности. Генезис болотных экоси-

стем характеризуется сочетанием как экзоэкогенетических (аллогенных), так и эндоэкогенетических (автогенных) процессов (Sukachev, 1926).

Прирост торфяных отложений сопровождается депонированием углерода, что свидетельствует о важной роли болотных экосистем в углеродном балансе биосферы (Turunen, 2003; IPCC, 2013; Ratcliffe, Payne, 2016; Zhang et al., 2018; Novenko et al., 2021; Zalesov, 2021). Интенсивность этого процесса определяет запасы углерода в торфе и, соответственно, специфику функционирования экосистем (Hugelius et al., 2020). Скорость аккумуляции

углерода зависит от гидролого-гидрохимического режима болот, влияющего на характер растительности и его продуктивность (McGuire et al., 2018; Andreeva, 2022).

Среднерусская возвышенность характеризуется низкой заболоченностью — 0.5% (Volkova, 2018, 2019), при этом болота на данной территории формируются в разных геоморфологических условиях. От характера подстилающих пород и гидрологического режима болот зависит направление их сукцессионной динамики, скорость прироста торфяных отложений и интенсивность депонирования углерода.

На Среднерусской возвышенности преобладают пойменные болота, занимающие около 85% от общей площади всех болотных экосистем. Торфяные отложения большинства таких болот разработаны. Водораздельные болота характеризуются более высокой сохранностью. Как правило, они образуются в депрессиях карстового или карстово-суффозионного происхождения. Небольшие размеры (не более 1 га) и приуроченность болот к облесенным ландшафтам уберегли их от промышленных разработок. Это обеспечило сохранение биологического разнообразия уникальных экосистем на южной границе зоны широколиственных лесов.

Водораздельные болота Среднерусской возвышенности формируются в разных геолого-гидрологических условиях. На песчаных зандровых и моренных отложениях, которыми перекрыты западные и северо-западные склоны возвышенности, развитие болот началось в бореальном периоде голоцена. Для этих болот характерна олиготрофная растительность и целостная (без разрывов) структура торфяных отложений. Мощность залежей не превышает 3 метров, а в их составе присутствуют переходные и верховые торфа.

Вне моренных и зандровых отложений болота приурочены к карстовым депрессиям глубиной до 10–20 м, подстилаемым делювиальными суглинками или озерными глинами. Воды, питающие такие болота, могут иметь, помимо атмосферного, поверхностное (делювиальное) или грунтовое происхождение. Количество накопившейся влаги зависит от соотношения источников питания, а также связано с глубиной и возрастом карстового провала, его геоморфологическим положением (вершина водораздела или его склон) и наличием дренирующей системы. Комбинация указанных факторов влияет на степень обводненности понижения и регулирует особенности заболачивания, что определяет различия в структуре торфяных залежей (сплошной, разорванной, сплавинной) (Volkova, 2010, 2011). При этом, по времени возникновения болотные экосистемы отличаются. Так, развитие болот с целостной залежью происходило в разные периоды голоцена, а болота с разорванной или сплавинной залежами

формировались, преимущественно, в субатлантический период (Volkova et al., 2020).

По составу растительных остатков торфяные залежи водораздельных болот чаще образованы низинными торфами, реже в составе залежей присутствуют переходные или верховые торфа. Это свидетельствует о преимущественно минерализованном питании на протяжении всего генезиса болота или продолжительной его части. Следствием выявленной специфики водно-минерального питания болот является доминирование эвтрофных сообществ в структуре растительности. Однако на сплавинах карстовых болот в питании участвуют как грунтовые и поверхностные воды, так и атмосферные осадки, что обеспечивает формирование мезо- и олиготрофных растительных сообществ, являющихся редкими в регионе. Выяснение особенностей возникновения таких ценозов и поиск оптимальных режимов для их сохранения являются актуальной научной проблемой.

Известно, что олиготрофные ценозы на сплавинных болотах характеризуются максимальными показателями интенсивности связывания атмосферного углерода (Olchev et al., 2012, 2013a, b, 2014; Karataeva et al., 2015; Leonova et al., 2021). При такой специфике функционирования сплавинные болота должны являться “депо” углерода, накапливая его в торфяных залежах. Отсутствие до настоящего времени сведения о динамике аккумуляции углерода в торфяных отложениях сплавинных болот не позволяют оценить их истинное значение в углеродном обмене.

Цель данной статьи — показать особенности развития водораздельных сплавинных болот северо-востока Среднерусской возвышенности и интенсивность аккумуляции углерода в их торфяных залежах на примере модельных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись сплавинные водораздельные болота “Главное” и “Кочки-1”, расположенные в северо-восточной части Среднерусской возвышенности (15–17 км на ЗЮЗ и ЮЗ от г. Тулы). Болота сформированы в карстовых провалах глубиной 4–6 и более метров. Торфяные залежи сплавинной и разорванной структуры, по крайкам болот торфяные отложения, помимо указанных, могут быть и целостными. Растительный покров болот характеризуется комплексностью — в нем представлены эвтрофные, мезотрофные и олиготрофные сообщества (Zatsarinnyaya et al., 2012; Zatsarinnyaya, 2015; Volkova et al., 2017a).

В комплексе болот у пос. Озерный болото “Главное” (54.05667° с.ш., 37.58927° в.д.) занимает площадь 1 га. Оно образовалось в результате объединения нескольких карстовых провалов об-

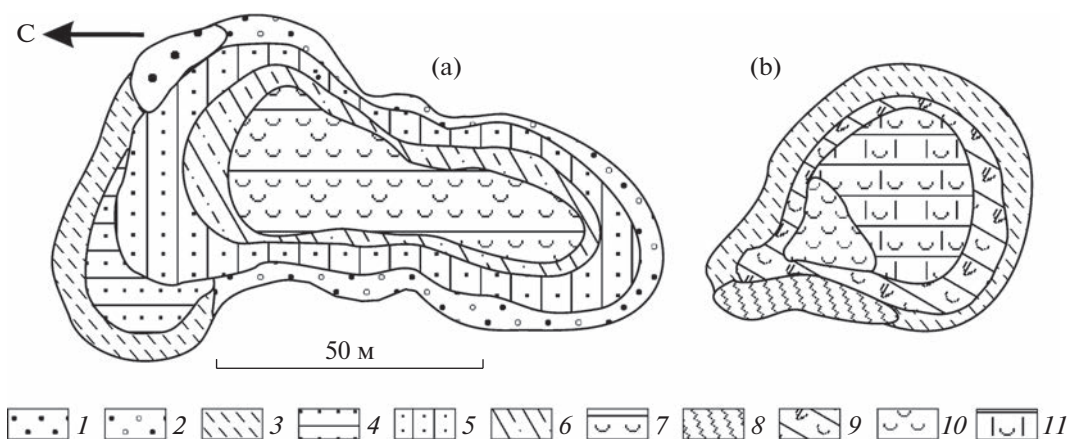


Рис. 1. Картограммы растительности модельных болот (обозначения сообществ — см. в тексте). а — “Главное”, б — “Кочки-1”.

Fig. 1. Map of vegetation of model mires (see the text for designations of communities). а — mire Glavnoe, б — mire Kochaki-1.

шей торфяной залежью в процессе их заболачивания. При этом, центр и периферическая части болота отличаются по структуре растительного покрова (рис. 1, а). Окраинная часть характеризуется эвтрофной растительностью, которая представлена сообществами ассоциаций *Filipendula ulmaria* (1), *Calla palustris* (2), *Salix cinerea* — *Calla palustris* (3), *Betula pubescens* — *Calla palustris* (суб-асс. *Betula pubescens* — *Thelypteris palustris*) (4), *Betula pubescens* — *Menyanthes trifoliata* — *Sphagnum riparium* (5) (Volkova, 2018). Все они формируются на целостной или разорванной по структуре залежи. Минерализация болотных вод (корнеобитаемый горизонт) в указанных сообществах окраинной части болота составляет, в среднем, 60–70 мг/л, однако в весенний период поверхностный сток с прилегающих минеральных почв увеличивает показания до 120–130 мг/л; pH = 4.5–5.5.

Центральная часть болота образована мезо- и олиготрофной растительностью — асс. *Betula pubescens* — *Menyanthes trifoliata* + *Calla palustris* — *Sphagnum angustifolium* + *S. fallax* (6) и комплексом сообществ (7), включающих асс. *Rhynchospora alba* — *Sphagnum angustifolium* + *S. fallax*, фитоценозы которой распространены на ковровых участках сплавины, и асс. *Chamaedaphne calyculata* + *Oxycoccus palustris* — *Sphagnum angustifolium*, сообщества которой приурочены к микроповышениям на сплавине (рис. 1, а). Такие ценозы формируются в условиях бедного водно-минерального питания (минерализация 30–42 мг/л, pH = 3.8–4.6).

Болото “Кочки-1” (54.05739° с.ш., 37.53072° в.д.) имеет площадь около 0.5 га. Торфяные отложения представлены сплавиной. На окрайке сплавины сформированы эвтрофные ивово-травяные (асс. *Salix cinerea* — *Calla palustris*, 3) и камышовые (асс. *Scirpus sylvaticus*, 8) сообщества (рис. 1, б).

При движении к центру болота они сменяются мезотрофными сообществами асс. *Betula pubescens* — *Carex lasiocarpa* — *Sphagnum fallax* (9). Центральная часть болота представлена олиготрофными ценозами, которые занимают основную часть сплавины. Таковыми являются сообщества асс. *Rhynchospora alba* — *Sphagnum angustifolium* + *S. fallax* (10), формирующие ковровую часть сплавины, а также сообщества асс. *Chamaedaphne calyculata* + *Oxycoccus palustris* — *Sphagnum angustifolium* (11) (рис. 1, б), характеризующиеся выраженным микрорельефом с крупными кочками (высота до 40–50 см, диаметр 1–2 м) и узкими (10–20 см) мочажинами между ними.

Для изучения генезиса модельных болот бурение торфяных залежей проводили с помощью торфяного бура конструкции Инсторфа. На основании зондирования торфяной залежи (шаг — 10 м) выявляли максимальную мощность отложений, где проводили послойный отбор образцов торфа (каждые 10 см либо по мере изменения морфологических показателей торфа) в пластиковые пакеты. На сплавах болот “Главное” и “Кочки-1” бурение проводили в сообществах асс. *Rhynchospora alba* — *Sphagnum angustifolium* + *S. fallax* или асс. *Chamaedaphne calyculata* + *Oxycoccus palustris* — *Sphagnum angustifolium*. На болоте “Главное” окраинная часть имеет как целостную, так и разорванную структуру торфяной залежи. Для выявления генезиса этой части болота бурение проводили в сообществе асс. *Betula pubescens* — *Menyanthes trifoliata* — *Sphagnum riparium*.

Во всех отобранных образцах торфа определяли степень разложения (%) и состав растительных остатков (Dombrowskaya et al., 1959) микроскопическим методом. На основании результатов анализа растительных остатков были построены стратиграфические диаграммы торфяных отложений в

Таблица 1. Результаты радиоуглеродного анализа образцов торфа сплавинных карстовых болот
Table 1. The results of radiocarbon analysis of peat samples of float karst mires

Глубина, см Depth, cm	Радиоуглеродный возраст, ^{14}C л.н. ^{14}C age (BP)	Интервал калиброванного возраста (1σ), кал.л.н. Calibrated age range (1σ -range), cal. yr BP	Вероятность Probability
Болото “Главное”/Mire Glavnoe			
190–200*	945 ± 65	789–918	1.00
460–470	2375 ± 110	2320–2539	0.71
Болото “Кочаки-1”/Mire Kochaki-1			
90–100	210 ± 60	139–222	0.52
190–200	430 ± 90	428–536	0.72
240–250	510 ± 80	495–563	0.65
290–300*	610 ± 70	579–651	0.77
540–550	950 ± 90	765–935	1.0
590–600	1080 ± 90	918–1087	0.90
640–650	1300 ± 80	1173–1302	0.92

Примечание: *нижняя часть сплавины.
 Note: * lower part of the float.

программе “Korpi” (Kutenkov, 2013), что позволило реконструировать стадии развития болот.

Для выявления времени начала болотообразовательного процесса и возраста конкретных палеосообществ (установлены по результатам ботанического анализа торфа, названия даны по доминирующим видам растительных остатков), а также скорости вертикального прироста торфа проведено определение абсолютного возраста 9-ти торфяных образцов в Радиоуглеродной лаборатории Института географии РАН (Москва). Полученные результаты были откалиброваны с использованием программы Calib 9.0 и калибровочного набора данных Intcal09 (Reimer et al., 2013). При расчетах вертикального прироста торфяных отложений использовали калиброванный возраст образцов (Volkova et al., 2020). Прирост торфа рассчитывали, исходя из мощности торфяных отложений, образовавшихся за определенный временной период (определен по разнице между имеющимися датировками).

Оценку содержания органического углерода (%) в образцах торфа по профилям залежей проводили, зная долю органического вещества в единице объема торфа (%) и массовую долю углерода (%), полученную с использованием CHNSO-анализатора LECO TruSpec Micro в Институте органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН. Долю органического вещества определяли на основании показателей зольности образца торфа (%) и содержания в нем карбонатов (%).

Для оценки скорости накопления углерода ($\text{гC}/\text{м}^2/\text{год}$) палеосообществами болот содержа-

ние углерода (%) умножали на мощность торфяного горизонта, на его объемный вес ($\text{г}/\text{см}^3$) и на соответствующую вертикальную скорость прироста торфа ($\text{мм}/\text{год}$) (Turunen et al., 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа ботанического состава торфа из разных частей болота “Главное” показали, что современная растительность сформирована на торфяных отложениях не только разной структуры, но и разного состава. Так, на окрайке болота отложения являются целостными или разорванными, но образованы только низинными торфами. При этом, датировки нижних горизонтов залежи (табл. 1) показывают, что заболачивание окраек карстового понижения началось в начале субатлантического периода.

В этот период увлажнение было умеренным за счет притока поверхностных вод на болото, что обеспечило произрастание древесных пород (*Betula* sp., *Salix* sp.), влаголюбивых трав (*Menyanthes trifoliata*, *Comarum palustre*, *Calla palustris*, *Calamagrostis canescens*) и мхов (*Sphagnum teres*, *S. obtusum*, *S. riparium*, редко – *Calliergon cordifolium*, *Drepanocladus aduncus*). Это диагностируют древесный и древесно-травяной (древесно-вахтовый) торфа, залегающие в нижних горизонтах торфяной залежи (рис. 2) (в дальнейшем, на основании состава растительных остатков торфов будут выделены палеосообщества). Постепенное накопление торфяных отложений способствовало увеличению влажности болотного биотопа, что привело к

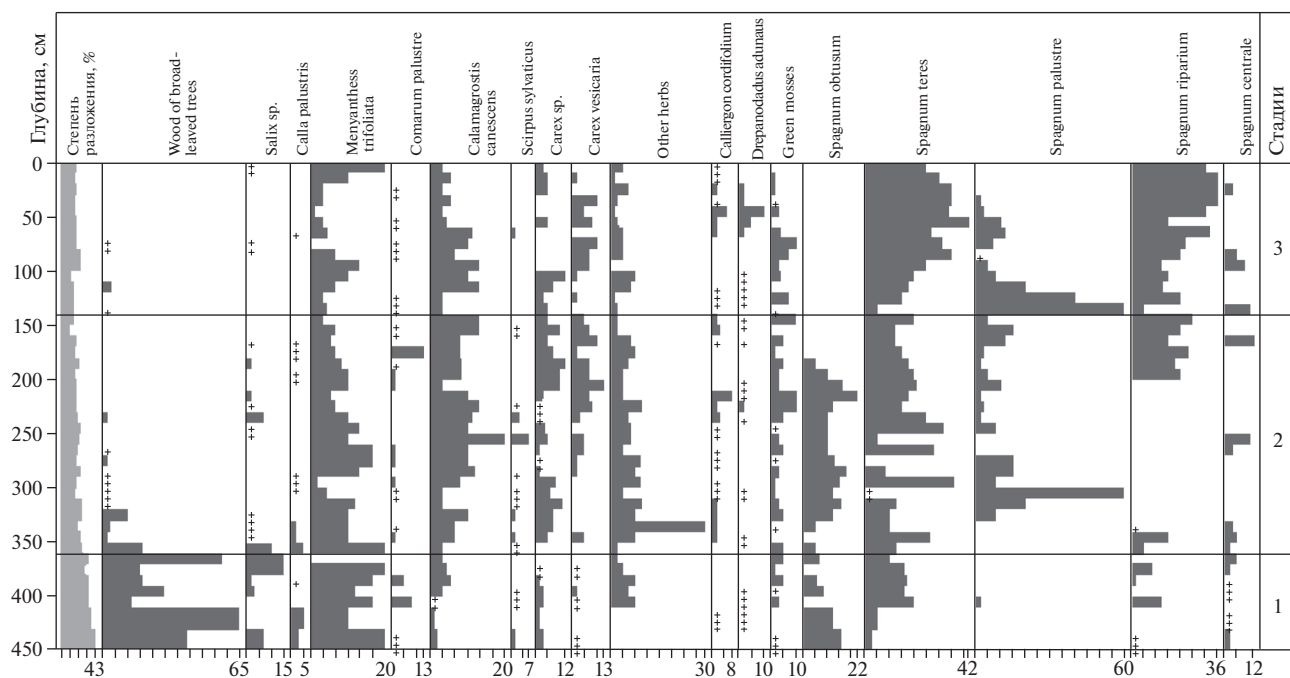


Рис. 2. Стратиграфическая диаграмма строения торфяных отложений окраинной части болота Главное и стадии развития: 1 — древесно-травяная, 2 — травяно-сфагновая, 3 — сфагновая (эвтрофный этап).

Fig. 2. Stratigraphic diagram of the structure of peat deposits on the marginal part of the mire Glavnoe and the stages of development: 1 — woody-herb, 2 — herb-sphagnum, 3 — sphagnum (eutrophic stages).

снижению участия древесных пород, увеличению доли трав (*Menyanthes trifoliata* — 25%) и сфагновых мхов (*Sphagnum teres* — 20%, *S. riparium* — 12%). Такие изменения свойственны травяным и травяно-сфагновым торфам, залегающим с глубины 3.5 м, формирование которых началось примерно 1800 лет назад.

В дальнейшем в структуре залежи наблюдается чередование травяно-сфагновых и травяных торфов (с участием *Menyanthes trifoliata*, *Calamagrostis* sp., *Comarum palustre*, *Carex vesicaria*, *Equisetum* sp., *Scirpus sylvaticus*, *Typha* sp., *Sphagnum teres*, *S. palustre*, *S. riparium*, *S. obtusum*), что характеризует локальные изменения режима водно-минерального питания болотного биотопа, обусловленные интенсивностью поверхностного стока. С глубины 165 см в залежи появляется сфагновый низинный торф (его формирование началось примерно 740 лет назад), что свидетельствует о снижении минерализации питающих вод. В любом случае, доминирующим видом торфа в залежи окраинной части болота является травяно-сфагновый низинный. Это означает, что в течение почти 2500 лет гидрологический режим этой части болота оставался достаточно стабильным.

Оценка скорости торфонакопления на окрайке составила, в среднем, 1.8 мм/год (Volkova, 2011). Столь высокие показатели обусловлены стабильным увлажнением этой части болота. В таких условиях отмершие растительные остат-

ки разлагаются медленно и потому степень разложения образцов торфа по профилю составляет, в среднем, 20–30%, увеличиваясь до 45% только в придонных образцах.

Таким образом, развитие окраинной части болота “Главное” происходило при достаточно богатом водно-минеральном питании, о чем свидетельствует формирование эвтрофных палеосообществ и, соответственно, накопление низинных видов торфа в залежи. В процессе формирования этой части болота менялась лишь интенсивность увлажнения. На первой стадии (примерно 1800–2500 лет назад) увлажнение было умеренным и потому в составе палеорастительности произрастали древесные породы (рис. 2, 1-я стадия). В дальнейшем, увлажнение стало обильным, что способствовало переходу к гидрофильно-моховой растительности (рис. 2, 2-я стадия). При этом, постепенно происходило снижение минерализации питающих вод, что обеспечило увеличение обилия сфагновых мхов и формирование сфагнового палеосообщества (рис. 2, 3-я стадия).

Олиготрофная растительность центральной части болота сформирована на сплаvine мощностью 2 метра, которая образована сфагновым и травяно-сфагновым переходными торфами (рис. 3) с низкой (5–15%) степенью разложения и высокой влажностью (в среднем, по профилю залежи — 1531%). В составе торфов обнаружены остатки

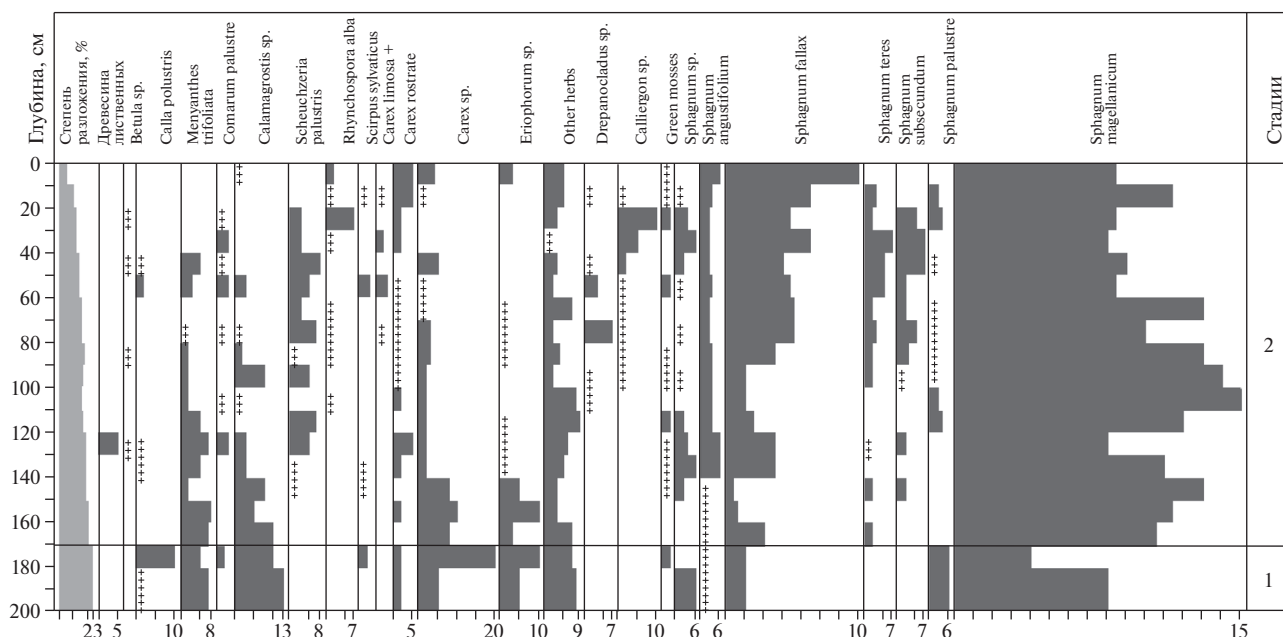


Рис. 3. Стратиграфическая диаграмма строения торфяных отложений сплавины в центральной части болота Главное и стадии развития: 1 — травяно-сфагновая, 2 — сфагновая (мезотрофный этап)

Fig. 3. Stratigraphic diagram of the structure of float peat deposits in the central part of the mire Glavnoe and the stages of development: 1 — herb-sphagnum, 2 — sphagnum (mesotrophic stages)

Sphagnum magellanicum, *S. fallax*, *S. angustifolium*, *Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *Rhynchospora alba*, *Scheuchzeria palustris*, *Oxycoccus palustris*, *Eriophorum* sp. В нижней части сплавины (170–200 см) сохранились также остатки *Calamagrostis* sp., *Menyanthes trifoliata* и др. Такое строение торфяной залежи свидетельствует о том, что сплавина в последние 800–900 лет формировалась в условиях высокого обводнения и бедного атмосферного питания. Обильное увлажнение явилось причиной низкой степени разложения торфов, благодаря чему вертикальный прирост торфяных отложений составлял, в среднем, 2,3 мм/год (Volkova, 2011).

По мере увеличения мощности сплавины ее корнеобитаемый горизонт постепенно переходил на использование атмосферного питания, что способствовало появлению и разрастанию олиготрофных видов трав и мхов, а также формированию травяно (осоково)-сфагновых (рис. 3, 1-я стадия), а затем сфагновых мезотрофных палеоценозов (рис. 3, 2-я стадия). При этом, от “основного тела” сплавины постепенно отделялись ее нижние части, которые зависали в толще воды или опускались на дно понижения. В результате, толщина сплавины составляет 2 метра (Volkova, 2010). Такое происхождение сплавины объясняет отсутствие горизонтов, соответствующих начальным этапам ее развития.

Как видно, центральная и окраинная части болота имеют разную специфику генезиса, что обусловлено различиями в их гидролого-гидрохими-

ческом режиме. При этом, изначально образовавшаяся карстовая депрессия характеризовалась высоким обводнением и представляла собой небольшое озеро. Об этом свидетельствуют слои озерных глин, выстилающих дно понижения. В дальнейшем гидрологический режим территории изменился, уровень воды в озере понизился. В это время (субатлантический период голоцена) началось заболачивание, как окраинной части понижения, так и формирование сплавины в центре. Постепенное стекание поверхностных вод в понижение, наряду с выклиниванием грунтовых вод, обеспечили увеличение объема воды и изменили положение сплавины. Вертикальный прирост торфяных отложений сплавины и ее разрастание в горизонтальном направлении, наряду с повышением уровня воды в депрессии, способствовали перекрытию торфяных отложений на окрайке. В результате, в центральной части болота торфяная залежь осталась в виде сплавины, а на окрайке залежь может быть как целостной/сплошной, так и разорванной (Volkova, 2010).

При формировании разных частей болота по-разному происходило накопление углерода в торфяных отложениях (рис. 4). В окраинной части болота в торфах, образовавшихся на начальных этапах болотообразовательного процесса, содержание углерода составляет, в среднем, 17,7%, увеличиваясь до 34,3%. Расчет скорости аккумуляции углерода показал, что в начале субатлантического периода, на 1-й стадии развития, представленной

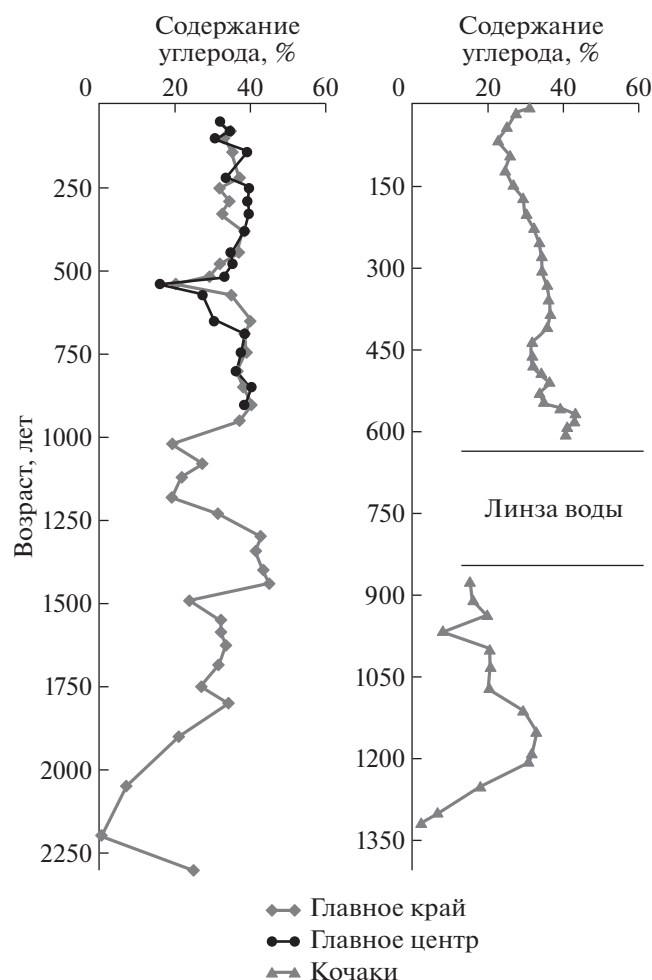


Рис. 4. Содержание углерода (%) по профилям торфяных отложений болот Главное и Кочаки-1.

Fig. 4. Carbon content (%) on the profiles of peat deposits of the mires Glavnoe and Kochaki-1 (abscissa axis – carbon content, %; ordinate axis – age, years).

древесными и древесно-травяными палеоценозами, аккумуляция углерода проходила со средней скоростью 17.5 гС/м²/год, варьируя от 1.5 до 29.6 гС/м²/год (рис. 5).

В травяных и травяно-сфагновых торфах, формирование которых началось около 1800 кал.л.н., содержание углерода увеличивается до 33.3% в среднем (19.2–45%) (рис. 4). Это означает, что на 2-й стадии генезиса окраинной части болота “Главное” аккумуляция углерода палеосообществами составила, в среднем, 6.9 гС/м²/год (показатель меняется от 1 до 14.1 гС/м²/год) (рис. 5). Этой стадии соответствуют торфа, залегающие на глубине 165–365 см.

Примерно 750 кал.л.н. в генезисе болота отмечается переход к сфагновой стадии, характеризующейся возрастанием доли сфагновых мхов в торфах до 65–70%. Содержание углерода в сфаг-

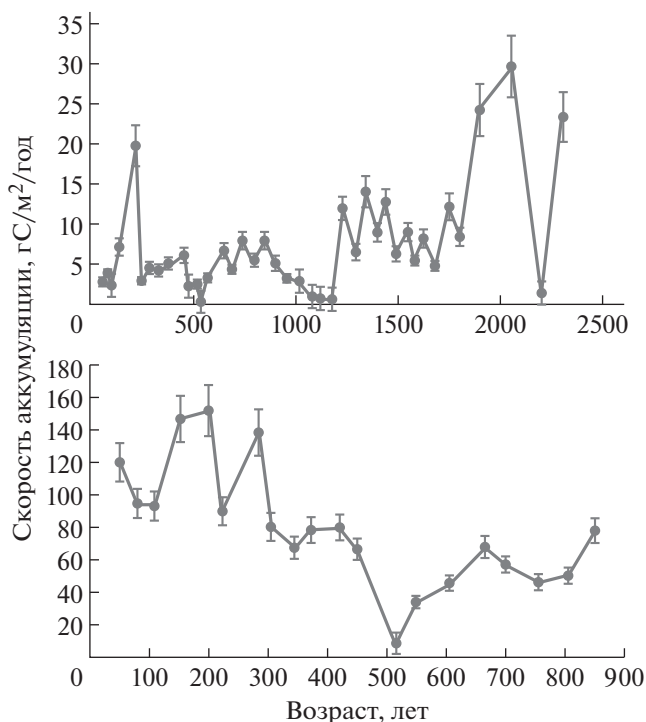


Рис. 5. Скорость аккумуляции углерода (гС/м²/год) в генезисе окраинной (вверху) и центральной (внизу) частей болота Главное.

Fig. 5. Rate of carbon accumulation (gC/m²/year) in the genesis of the marginal (top) and central (bottom) parts of the mire Glavnoe (abscissa axis – age, years; ordinate axis – rate of carbon accumulation, gC/m²/year).

новых низинных торфах, залегающих в верхнем 165-сантиметровом слое торфяной залежи, составляет, в среднем, 34.1% (20–40.1%) (рис. 4). Это означает, что эвтрофные сфагновые палеоценозы аккумулировали углерод со средней скоростью 5.2 гС/м²/год (показатель меняется от 0.4 до 19.7 гС/м²/год) в указанный период (рис. 5).

Таким образом, в развитии окраинной части болота “Главное” наиболее активная аккумуляция углерода происходила в начале субатлантического периода, на 1-й стадии, когда в условиях умеренного увлажнения и достаточно богатого водно-минерального питания были сформированы палеосообщества с высокой долей древесных пород (*Betula* sp., *Salix* sp.). Постепенное накопление торфяных отложений способствовало увеличению влажности биотопа и снижению доли древесных пород, а изменение гидрохимических показателей обеспечило увеличение обилия сфагновых мхов (*Sphagnum riparium*, *S. teres*). В целом, палеосообщества окраинной части болота депонировали углерод со средней скоростью 7.4 гС/м²/год в течение субатлантического периода.

Сплавина центральной части болота формировалась в условиях стабильно высокого увлаж-

нения и бедного атмосферного питания в течение последних 800–900 лет. В таких условиях содержание углерода в травяно-сфагновых и сфагновых переходных торфах (с участием *Sphagnum magellanicum*, *S. fallax*, *S. angustifolium*) варьирует от 16 до 39.8% (в среднем, 34.7%) (рис. 4). При этом, скорость аккумуляции углерода на разных стадиях развития сплавины меняется, что обусловлено интенсивностью вертикального прироста торфа. На травяно-сфагновой стадии показатель составил 57.6 гС/м²/год (от 45.7 до 77.3 гС/м²/год). На сфагновой стадии генезиса сплавины скорость депонирования углерода палеоценозами увеличилась, в среднем, до 67.4 гС/м²/год, а в верхнем 50-сантиметровом слое – до 146–151.8 гС/м²/год (рис. 5). В целом, в развитии сплавины во второй половине субатлантического периода аккумуляция углерода протекала со скоростью 79.3 гС/м²/год (от 8 до 151.8 гС/м²/год).

Сравнение содержания углерода по профилям торфяных отложений разных частей болота “Главное” и скоростей аккумуляции углерода палеоценозами свидетельствует о том, что именно сплавинные мезо- и олиготрофные сообщества являются основными резервуарами углерода. Натурные измерения потоков углерода также показали преобладание процессов связывания углекислоты над ее эмиссией в атмосферу для растительных сообществ центральной части сплавины в течение всего вегетационного сезона. В сообществах окрайки болота интенсивность депонирования углерода снижалась и показатель соответствовал интенсивности эмиссии или становился существенно ниже (Olchev et al., 2012, 2013, 2014; Volkova et al., 2017b; Leonova et al., 2021). Это свидетельствует о том, что окрайка болота может являться как резервуаром, так и источником углекислого газа. При этом сплавина центральной части, благодаря интенсивному увлажнению, низкой степени разложения растительных остатков, бедному водно-минеральному питанию и доминированию сфагновых мхов, характеризуется активным вертикальным приростом торфа и высокой скоростью аккумуляции углерода.

Растительный покров болота “Кочки-1” сформирован на сплавине. Однако по дну понижения также обнаружены торфяные отложения, что позволяет рассматривать залежь как разорванную и состоящую из сплавинной и придонной частей, разделенных “линзой” воды. Глубина провала, в котором сформировано болото, достигает 7.5 м (Volkova et al., 2017a). Торфяные отложения подстилаются озерными глинами. Бурение залежи проведено в 2016 и 2020 гг. Результаты бурения показали, что колонки отличаются по мощности (7.5 и 5.7 м), что обусловлено формой дна карстового понижения. Тем не менее, структура и ботанический состав торфяных колонок весьма сходен, что позволяет экстраполировать

радиоуглеродные датировки 2016 г. на соответствующие по структуре горизонты торфяной колонки, отобранной в 2020 г.

Придонная часть залежи имеет мощность около 70 см по дну понижения и залегает на глубине от 500–570 см до 680–750 см. Формирование этих отложений началось в середине субатлантического периода (приблизительно 1200 калиброванных лет назад). Как показали результаты изучения ботанического состава торфяной колонки 2020 года, на глубине 520–570 см залегает гипновый торф, в котором участие *Drepanocladus* sp. достигает 60–90% (рис. 6). На глубине 500–520 см в составе торфа увеличивается доля остатков трав – *Calamagrostis* sp., *Menyanthes trifoliata*, *Scirpus sylvaticus*, *Carex* sp. (суммарно – до 55%), а также сфагновых мхов (*Sphagnum palustre*, *S. teres*, др.). Это, наряду с сохранением остатков *Drepanocladus* sp. и *Calliergon* sp., обеспечило формирование травяно-мохового низинного торфа примерно 800–1000 лет назад. В условиях высокого увлажнения степень разложения торфов придонной части залежи не превышает 20–25%.

Далее в структуре залежи имеется разрыв (с 450 см до 300 см), представляющий собой “линзу” воды, выше которой сформирована сплавина. Нижняя часть сплавины (200–300 см) образована травяным и травяно-сфагновым низинными торфами (степень разложения – 15–20%) с участием *Menyanthes trifoliata*, *Scirpus sylvaticus*, *Comarum palustre*, *Carex* sp., *Calamagrostis* sp., *Equisetum* sp., а также *Sphagnum palustre*, *S. teres*, *S. fallax* и др. Такой состав торфов сходен с торфом придонной части залежи и свидетельствует о возможном “отрыве” сплавины в результате резкого обводнения понижения.

Дальнейшее развитие сплавины сопровождалось постепенным увеличением доли атмосферных осадков в питании болота и обилия сфагновых мхов в составе палеосообществ, что диагностирует сфагновый низинный торф на глубине 80–190 см, образовавшийся в период 130–530 кал. лет назад. В верхних горизонтах торфяной залежи такой торф чередуется с травяно-сфагновым либо моховым (с *Calliergon* sp. на глубине 30–40 см) торфами. Скорость прироста торфа на начальных этапах формирования сплавины составляла 8.3 мм/год, затем интенсивность торфообразования снизилась до 3–5 мм/год. Современная растительность болота сформирована на травяно-сфагновом торфе, что характеризует быстрый переход сплавины на атмосферное питание и “молодость” сформированных мезо- и олиготрофных сообществ.

Таким образом, заболачивание понижения началось с зарастания на дне небольшой “лужи”, которую заселили гипновые мхи в середине субатлантического периода (рис. 6, 1-я стадия). В дальнейшем, на торфяной субстрат вселились травы (*Menyanthes trifoliata*, *Calamagrostis* sp., *Carex* sp.)

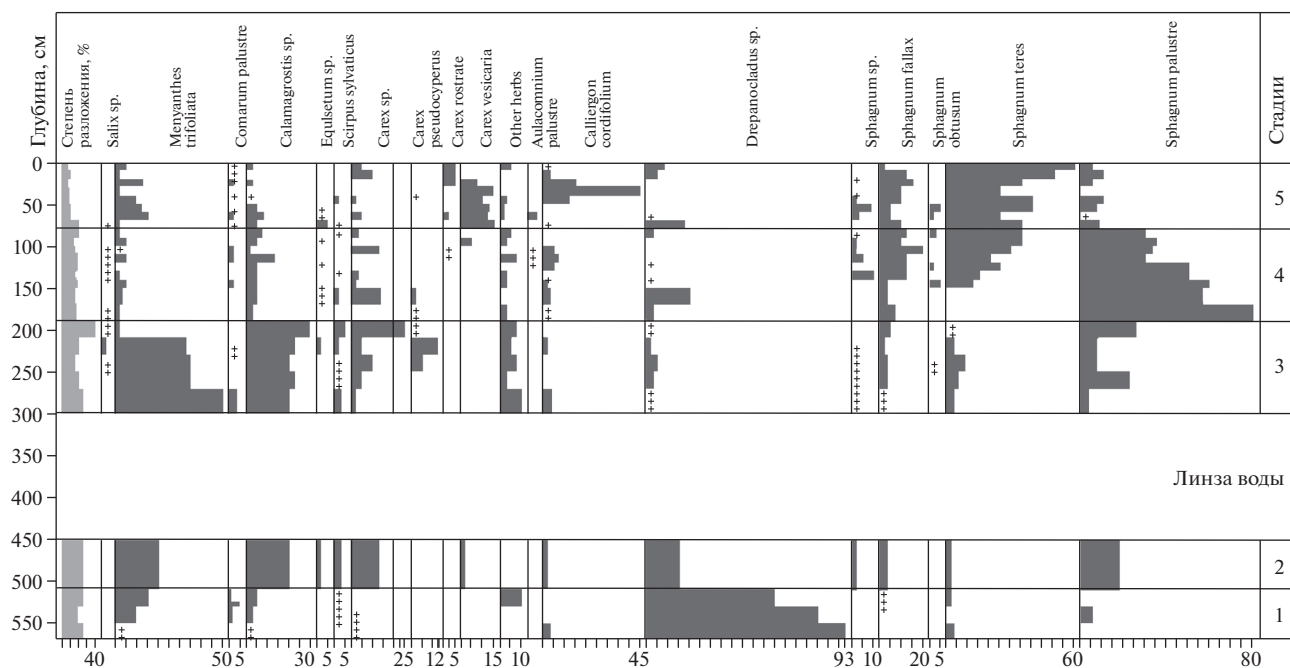


Рис. 6. Стратиграфическая диаграмма строения торфяных отложений болота Кочаки-1 и стадии развития: 1 — гипновое, 2 — травяно-моховое, 3 — травяное; 4 — сфагновое, 5 — травяно-сфагновое (эвтрофный этап).

Fig. 6. Stratigraphic diagram of the structure of peat deposits of the mire Kochaki-1 and the stages of development: 1 — hypnum, 2 — herb-moss, 3 — herb, 4 — sphagnum, 5 — herb-sphagnum (eutrophic stages).

и сфагновые мхи. Комбинация в моховом покрове сфагновых и гипновых мхов способствовала переходу к травяно-моховой стадии развития болота (рис. 6, 2-я стадия). Высокая влажность биотопов обеспечила слабое разложение растительных остатков и, как следствие, высокую скорость прироста торфа.

Имеющийся в структуре залежи разрыв следует объяснять резким и сильным обводнением этого понижения в период 650–750 кал. лет назад, что вызвало отрыв верхней слабо разложившейся части торфяной залежи и ее всплывание. В дальнейшем, из этой отделившейся части сформировалась сплавина. На начальных этапах развития сплавины были образованы травяные палеоценозы (рис. 6, 3-я стадия).

Постепенно в питании болота увеличивалась доля атмосферных осадков, что обеспечило доминирование сфагновых мхов и формирование эвтрофных сфагновых палеоценозов (рис. 6, 4-я стадия) в течение последующих 300 лет. Высокая влажность сплавины (в среднем, 1380%) способствовала слабому разложению отмерших частей растений и активному вертикальному приросту торфа.

Разрастание по сфагновой сплавине трав обеспечило переход к травяно-сфагновой стадии развития болота (рис. 6, 5-я стадия), что произошло примерно 200 кал. лет назад. Следует отметить наличие в сплавине прослойки мохового торфа, которая свидетельствует об увеличении увлажнения и трофности питающих вод, что является, по-

видимому, следствием усиления эрозионного смыва с прилегающих территорий (Volkova et al., 2017a). Впоследствии произошло восстановление, как окружающих ландшафтов, так и травяно-сфагновых палеоценозов на сплавине. Активный вертикальный рост сплавины и переход на атмосферное питание способствовали формированию мезо- и олиготрофных ценозов в современном растительном покрове.

По мере развития болота происходила аккумуляция углерода в его торфяных отложениях. Содержание углерода по профилю торфяной залежи болота “Кочаки-1” варьирует весьма существенно: от 1 до 43.3% (рис. 4). При этом, минимальное значение свойственно гипновому торфу, сформированному по дну понижения. Столь низкие показатели обусловлены высокой долей глинистых частиц (зольность придонных образцов 70–78.8%). Дальнейшее накопление гипнового торфа способствовало увеличению доли углерода до 23–24%. В среднем, содержание углерода в придонных горизонтах залежи составляет 14.5%. При этом, скорость аккумуляции углерода палеоценозами в середине субатлантического периода возрастала от 3.5 до 62.7 (в среднем, 40.3) гС/м²/год (рис. 7).

В травяных и травяно-сфагновых торфах, формирующих нижнюю часть сплавины (глубина 190–300 см), содержание углерода увеличивается до 43.3%. Интенсивность депонирования углерода такими палеоценозами возрастает, в сред-

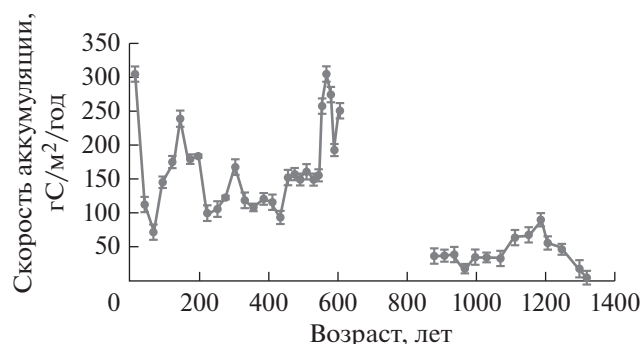


Рис. 7. Скорость аккумуляции углерода (гС/м²/год) в генезисе болота Кочаки-1.

Fig. 7. Rate of carbon accumulation (gC/m²/year) in the genesis of the mire Kochaki-1 (abscissa axis — age, years; ordinate axis — rate of carbon accumulation, gC/m²/year).

нем, до 200.3 гС/м²/год, изменяясь от 148.5 до 303.9 гС/м²/год).

Переход к сфагновой стадии развития сплавины произошел примерно 500 кал. лет назад, что диагностируют сфагновые торфа, залегающие в основной части сплавины (0–190 см). Содержание углерода в таких торфах составляет, в среднем, 29.7% (рис. 4). В указанный период скорость аккумуляции углерода составляла примерно 148.7 гС/м²/год (рис. 7), увеличиваясь до 305 гС/м²/год в травяно-сфагновых палеоценозах (соответствуют торфу на глубине 20–30 см), сформировавшихся в последние 30–40 лет.

Таким образом, по мере развития болота “Кочаки-1” происходило формирование сфагновой сплавины, что сопровождалось увеличением интенсивности депонирования углерода палеосообществами и способствовало увеличению содержания углерода в торфах. Наиболее активно этот процесс протекал на сфагновой стадии развития болота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное сравнение динамики развития водораздельных карстовых болот “Главное” и “Кочаки-1” показало, что их формирование началось в субатлантический период голоцена в условиях высокого увлажнения. Специфика гидрологического режима болот или их отдельных частей способствовала формированию разных по структуре торфяных залежей. Формирование целостных или разорванных отложений начиналось на дне понижения. При умеренном увлажнении происходило формирование палеоценозов с участием древесных пород, при высоком (небольшой объем “лужи” на дне) — с участием зеленых мхов. В дальнейшем, на прирост торфяных отложений существенное влияние оказывал гидроло-

гический режим. При стабильном увлажнении вертикальный прирост был достаточно равномерным, что способствовало формированию целостной структуры залежи. При резком обводнении происходил отрыв слоя торфяных отложений и начиналось развитие сплавины, т.е. залежь становилась разорванной.

Сплавинная залежь формировалась при обильном увлажнении (на поверхности воды в понижении). Начальные этапы ее генезиса могли быть различными (Volkova, 2010; Volkova, 2018), но использование в питании корнеобитаемого горизонта преимущественно атмосферных осадков способствовало переходу к мезо- и олиготрофному этапам развития. Следовательно, если разные части болота отличаются по характеру увлажнения, то заболачивание происходит разными путями, что в дальнейшем способствует формированию комплексного растительного покрова.

Таким образом, формирование сплавинных болот Среднерусской возвышенности, образовавшихся в депрессиях карстово-суффозионного происхождения, протекает по-разному, что позволяет выделить типы заболачивания. Вертикальное нарастание торфа происходит при слабом или умеренном увлажнении депрессии, что обычно свойственно начальным стадиям формирования болота или сохраняется по окрайкам. Сплавинное зарастание характерно для глубоких и сильнообводненных биотопов, расположенных обычно в центральной части депрессии. При изменившемся режиме увлажнения происходит последовательное чередование вертикального нарастания торфа (по дну понижения) и сплавинного зарастания (после отрыва отложений и их всплывания). Также возможно одновременное вертикальное нарастание торфа по окрайкам и сплавинное зарастание центральной части депрессии, что в дальнейшем может способствовать перекрытию сплавиной торфяных отложений на окрайке болота (Volkova, 2018). Как видно, несмотря на наличие сплавины, генезис таких болот весьма разнообразен.

Оценка роли сплавинных болот в депонировании атмосферного углерода показала, что наиболее высокое содержание углерода характерно для торфов с высокой долей сфагновых мхов (как низинных, так и переходных). При этом, максимальные скорости аккумуляции углерода (с учетом скорости вертикального прироста торфа) свойственны палеосообществам, которые сформировались в условиях высокого увлажнения, что отмечено как в придонной, так и в сплавинной частях торфяной залежи болота “Кочаки-1”. При этом, именно в сфагновой сплавине показатели достигают наиболее высоких значений (до 237–305.7 гС/м²/год). В сплавине болота “Глав-

ное” также отмечена высокая скорость аккумуляции углерода (до 146–151.7 гС/м²/год) по сравнению с окраинной частью (максимальные значения – 29.6 гС/м²/год).

Проведенные исследования позволяют охарактеризовать сплавинные болота как “депо” атмосферного углерода. Наряду с уникальным растительным покровом, сочетающим произрастание редких видов и сообществ, такие болота должны являться объектом охраны и заслуживают статус ООПТ. Важно отметить, что поддержание их функционирования возможно при сохранении гидрологического режима окружающих ландшафтов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 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)” и соглашения с комитетом Тульской области по науке и инноватике № 10 от 11.04.2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [Andreeva et. al.] Андреева А.С., Колокольников А.М., Трухляев Э.А. 2022. Влияние изменения климата на поглощающую способность болот на примере Ямало-Ненецкого автономного округа. – Проблемы анализа риска. 19 (4): 46–60.
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-4-46-60>
- [Dombrovskaya et al.] Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. 1959. Атлас растительных остатков в торфе. Москва. 228 с.
- Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R.B., Jones M., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D., Packalen M., Siewert M.B., Treat C., Turetsky M., Voigt C., Yu Z. 2020. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. – *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 117 (34): 20438–20446.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>
- IPCC. 2013. Summary for policymakers Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge. 33 p.
- [Karataeva et al.] Каратаева Т.А., Волкова Е.М., Ольчев А.В., Головацкая Е.А. 2015. Особенности углеродного обмена растительных сообществ болот Тульской области. – В сб.: Материалы Третьей междунауч. научно-практ. конф. “Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири”. Томск. С. 89–92.
- [Kutenkov] Кутенков С.А. 2013. Компьютерная программа для построения стратиграфических диаграмм состава торфа “Korpi”. – Труды КарНЦ РАН. Серия Экологические исследования. Петрозаводск, КарНЦ РАН. № 6. С. 171–176.
- [Leonova et al.] Леонова О.А., Волкова Е.М., Зацаринная Д.В., Ольчев А.В. 2021. Карстово-суффузионные болота Среднерусской возвышенности и интенсивность депонирования углерода. – В сб.: Материалы IV Междунар. науч. семинара “Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны”. Минск–Витебск, Беларусь. С. 66–70.
- McGuire A.D., Lawrence D.M., Koven C., Clein J.S., Burke E., Chen G., Jafarov E., MacDougall A.H., Marchenko S., Nicolsky D., Peng S., Rinke A., Ciais P., Gouttevin I., Hayes D.J., Ji D., Krinner G., Moore J.C., Romanovsky V., Schädel C., Schaefer K., Schuur E.A.G., Zhuang Q. 2018. Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change. – *Proc. Natl. Acad. Sci.* 15: 3882–3887.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1719903115>
- Novenko E., Mazei N., Kupryanov D., Kusilman M., Olchev A. 2021. Peatland initiation in Central European Russia during the Holocene: Effect of climate conditions and fires – *Holocen.* 31 (4): 545–555.
- [Olchev et al.] Ольчев А.В., Волкова Е.М., Каратаева Т.А., Новенко Е.Ю. 2012. Нетто СО₂-обмен и испарение сфагнового болота в зоне широколиственных лесов Европейской России. – *Известия ТулГУ. Естественные науки.* 3: 207–220.
- [Olchev et al.] Ольчев А.В., Волкова Е.М., Каратаева Т.А., Новенко Е.Ю. 2013 а. Роль карстово-суффузионных сфагновых болот лесостепной зоны Европейской России в углеродном и водном обмене. – В сб.: Материалы Междунар. науч. конф., посвященной 140-летию со дня рождения И.И. Спрыгина. Пенза. С. 376–379.
- Olchev A., Volkova E., Karataeva T., Novenko E. 2013 b. Growing season variability of net ecosystem CO₂ exchange and evapotranspiration of a sphagnum mire in the broad-leaved forest zone of European Russia. – *Environmental Research Letters.* 8(3): 035051.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035051>
- [Olchev et al.] Ольчев А.В., Волкова Е.М., Каратаева Т.А., Новенко Е.Ю. 2014. Оценка нетто-СО₂-обмена и испарения мезоолиготрофного сфагнового болота по результатам экспериментальных наблюдений и модельных расчетов. – В сб.: Материалы Всеросс. науч. конф. с междунар. участием “Прошлое, современное состояние и прогноз развития географических систем”. Киров. С. 140–145.
- Ratcliffe J., Payne R.J. 2016. Palaeoecological studies as a source of peat depth data: A discussion and data compilation for Scotland. – *Mires and Peat.* 18(13): 1–7.
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatte C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 Years cal BP. – *Radiocarbon.* Vol. 55. P. 1869–1887.

- [Sukachev] Сукачев В.Н. 1926. Болота, их образование, развитие и свойства. Л. 162 с.
- Turunen J. 2003. Past and present carbon accumulation in undisturbed boreal and subarctic mires: A review. — *Suo*. 54(1): 15–28.
- [Volkova] Волкова Е.М. 2010. Заболачивание карстовых и карстово-суффозионных депрессий на территории Тульской области. — В кн.: Направления исследований в современном болотоведении России. СПб. — Тула. С. 146–163.
- [Volkova] Волкова Е.М. 2011. Редкие болота северо-востока Среднерусской возвышенности: растительность и генезис. — *Бот. журн.* 96 (12): 1575–1590.
- [Volkova] Волкова Е.М. 2018. Болота Среднерусской возвышенности: генезис, структурно-функциональные особенности и природоохранное значение: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. СПб. 46 с.
- [Volkova] Волкова Е.М. 2019. Флора сосудистых растений болот Среднерусской возвышенности // *Бот. журн.*, том 104, № 10, с. 17–30.
- [Volkova et al.] Волкова Е.М., Новенко Е.Ю., Носова М.Б., Зацаринная Д.В. 2017а. Динамика развития водораздельных болот на южной границе леса в Европейской России. — *Бюл. МОИП. Отд. Биол.* 122 (1): 47–59.
- [Volkova et al.] Волкова Е.М., Новенко Е.Ю., Ольчев А.В. 2017b. Оценка нетто CO₂ обмена лесного сфагнового болота по результатам экспериментальных наблюдений и модельных расчетов. — В сб.: Матер. Междунар. конф. “Углеродный баланс болот Западной Сибири в контексте изменения климата”. Ханты-Мансийск. С. 48–50.
- [Volkova et al.] Волкова Е.М., Новенко Е.Ю., Юрковская Т.К. 2020. Возраст болот Среднерусской возвышенности. — *Изв. РАН. Серия географическая*. 84 (4): 551–561.
- [Volkova et al.] Волкова Е.М., Зацаринная Д.В., Собинова А.А. 2020. Особенности генезиса водораздельных сплавинных болот Тульской области. — *Изв. Тульского гос. ун-та. Естественные науки*. 4: 65–71.
- [Zalesov] Залесов С.В. 2021. Роль болот в депонировании углерода. — *Международный научно-исследовательский журнал*. 7: 6–9.
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.109.7.033>
- [Zatsarinnaya] Зацаринная Д.В. 2015. Экологические особенности и растительность карстовых болот зоны широколиственных лесов (на примере Тульской области): Дис. ... канд. биол. наук. М. 173 с.
- Zhang H., Gallego-Sala A.V., Amesbury M.J., Charman D.J., Piilo S.R., Väiranta M.M. 2018. Inconsistent Response of Arctic Permafrost Peatland Carbon Accumulation to Warm Climate Phases. — *Global Biogeochemical Cycles*. 32: 1605–1620.

DEVELOPMENT OF FLOATING KARST MIRES IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE MIDDLE RUSSIAN UPLAND, AND CARBON ACCUMULATION IN PEAT DEPOSITS

E. M. Volkova^{a,#}, O. A. Leonova^{a,##}, and D. V. Zatsarinnaya^{a,b,###}

^aTula State University
Lenina Ave., 92, Tula, 300012, Russia

^bTula Regional Museum of Local Lore
Sovetskaya Str., 68, Tula, 300000, Russia

[#]e-mail: convallaria@mail.ru

^{##}e-mail: ya.oly2012@yandex.ru

^{###}e-mail: visloguzova@mail.ru

The floating karst mires are unique natural ecosystems of the Middle Russian Upland, since they are habitats of rare species and communities in the region with low paludification (0.5%), and also participate in the deposition of atmospheric carbon. The study of the genesis of the floating karst mires will allow to develop approaches to their conservation.

The purpose of this work is to identify the features of development and to estimate the intensity of carbon accumulation in the peat deposits of the floating mires of the Middle Russian Upland. The objects of the study were the mires Glavnoe and Kochaki-1, located in the north-eastern part of the Middle Russian Upland. To identify the genesis of the mires, the peat deposits were drilled and the botanical composition of peat was studied. The carbon content (%) was determined in peat samples and the rate of carbon accumulation by mire paleocenoses was calculated.

The conducted studies have revealed different types of paludification in karst depressions, accompanied by the formation of a float, depending on a hydrological regime. It is shown that the most active vertical growth of peat deposits occurs in conditions of high moisture content of mire biotopes. This contributes to the maximum accumulation of atmospheric carbon by mire paleocommunities (up to 79.3–125 gC/m²/year). The highest carbon deposition rates are characteristic of the sphagnum and herb-sphagnum paleocenoses (up to 151–305 gC/m²/year) formed on the floats in the second half of the Subatlantic Holocene period. The results obtained indicate the diversity of the genesis of the floating mires and characterize these ecosystems as a “depot” of atmospheric carbon.

Keywords: karst mires, float, genesis, paleocommunities, carbon accumulation, Middle Russian Upland

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was supported by the grant of Russian Scientific Foundation № 23-24-10054 “The mires of the north-eastern part of the Central Russian Upland: diversity and role in the deposition of greenhouse gases (on the example of the Tula Region)” and the agreement with the Government of the Tula Region.

REFERENCES

- Andreeva A.S., Kolokoltsev A.M., Trukhlyaev E.A. 2022. Problemy izmeneniya klimata na pogloshchayushchuy-usposobnost' bolot na primere Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [The impact of climate change on the absorption capacity of mires on the example of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]. — *Problemy analiza riska*. 19 (4): 46–60 (In Russ.).
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-4-46-60>
- Dombrovskaya A.V., Koreneva M.M., Turemnov S.N. 1959. Atlas rastitel'nykh ostatkov v torfe. — Moskva, 228 p. (In Russ.).
- Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R.B., Jones M., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D., Packalen M., Siewert M.B., Treat C., Turetsky M., Voigt C., Yu Z. 2020. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. — *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 117 (34): 20438–20446.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>
- IPCC. 2013. Summary for policymakers Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge. 33 p.
- Karataeva T.A., Volkova E.M., Olchev A.V., Golovatskaya E.A. 2015. Osobennosti uglerodnogo obmena rastitel'nykh soobshchstv bolot Tul'skoy oblasti [Features of carbohydrate metabolism of plant communities of the mires of the Tula region]. — In: *Materialy Tret'ey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Problemy izucheniya i ispol'zovaniya torfyanykh resursov Sibiri”*. Tomsk. P. 89–92 (In Russ.).
- Kutenkov S.A. 2013. Comp'yaternaya programma dlya postroeniya stratigraficheskikh diagram sostava torfa “Kppri” — Tr. KarNTs RAN Ser. Ekologicheskie issledovaniya 6. P. 171–176 (In Russ.).
- Leonova O.A., Volkova E.M., Zatsarinna D.V., Olchev A.V. 2021. Karstovo-suffuzionnye bolota Srednerusskoy vozvyshennosti intensivnost' deponirovaniya ugleroda [Karst-suffusion mires of the Middle-Russian Upland and the intensity of carbon deposition] — In: *Materialy IV mezhdunarodnogo nauchnogo seminara “Rastitel'nost' bolot: sovremennye problemy klassifikatsii, kartografirovaniya, ispol'zovaniya i okhrany”*. Minsk–Vitebsk, Belarus'. P. 66–70 (In Russ.).
- McGuire A.D., Lawrence D.M., Koven C., Clein J.S., Burke E., Chen G., Jafarov E., MacDougall A.H., Marchenko S., Nicolsky D., Peng S., Rinke A., Ciais P., Gouttevin I., Hayes D.J., Ji D., Krinner G., Moore J.C., Romanovsky V., Schädel C., Schaefer K., Schuur E.A.G., Zhuang Q. 2018. Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change. — *Proc. Natl. Acad. Sci.* 15: 3882–3887.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1719903115>
- Novenko E., Mazei N., Kupryanov D., Kusilman M., Olchev A. 2021. Peatland initiation in Central European Russia during the Holocene: Effect of climate conditions and fires. — *Holocen*. 31 (4): 545–555.
- Olchev A.V., Volkova E.M., Karataeva T.A., Novenko E.Yu. 2012. Netto CO₂-obmen i isparenije sfagnovogo bolota v zone shirokolistvennykh lesov Evropeyskoy Rossii [Net CO₂ exchange and evaporation of sphagnum mires in the zone of broad-leaved forests of European Russia]. — *Izvestia TulGU. Estestvennye nauki*. 3: 207–220 (In Russ.).
- Olchev A.V., Volkova E.M., Karataeva T.A., Novenko E.Yu. 2013. Rol' karstovo-suffuzionnykh sfagnovukh bolot le-sostepnoy zony Evropeyskoy Rossii v uglerodnom i vodnom obmene [The role of karst-suffusion sphagnum mires of the forest-steppe zone of European Russia in carbon and water exchange]. — In: *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 140-letiyu so dnya rozhdeniya I.I. Sprygina*. Penza. P. 376–379 (In Russ.).
- Olchev A., Volkova E., Karataeva T., Novenko E. 2013. Growing season variability of net ecosystem CO₂ exchange and evapotranspiration of a sphagnum mire in the broad-leaved forest zone of European Russia. — *Environmental Research Letters*. 8(3): 035051.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035051>
- Olchev A.V., Volkova E.M., Karataeva T.A., Novenko E.Yu. 2014. Otsenka netto-CO₂-obmena i ispareniiya mezoooligotrofnogo sfagnovogo bolota po rezul'tatam eksperimental'nykh nablyudeniy i model'nykh raschyotov [Estimation of net CO₂ exchange and evaporation of mesooligotrophic sphagnum mires based on the results of experimental observations and model calculations]. — In: *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem “Proshloe, sovremennoe sostoyanie i prognoz razvitiya geograficheskikh sistem”*. Kirov. P. 140–145 (In Russ.).
- Ratcliffe J., Payne R.J. 2016. Palaeoecological studies as a source of peat depth data: A discussion and data compilation for Scotland. — *Mires and Peat*. 18 (13): 1–7.
- Reimer P. J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatte C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M. and van der Plicht J. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 Years cal BP. — *Radiocarbon*. Vol. 55. P. 1869–1887.
- Sukachev V.N. 1926. Bolota, ikh obrazovanie, razvitie i svoystva [Mires, their formation, development and properties]. Leningrad. 162 p. (In Russ.).
- Turunen J. 2003. Past and present carbon accumulation in undisturbed boreal and subarctic mires: A review. — *Suo*. 54 (1): 15–28.
- Volkova E.M. 2010. Zabolachivanie karstovykh i karstovo-suffuzionnykh depressiy na territorii Tul'skoy oblasti [Waterlogging of karst and karst-suffusion depressions in the Tula region]. — In: *Napravleniya issledovaniy v*

- sovremennom bolotovedenii Rossii. St. Petersburg — Tula. P. 146–163 (In Russ.).
- Volkova E.M. 2011. Rare mires of the North-east of the Middle-Russian Upland: vegetation and genesis. — Bot. Zhurn. 96 (12): 1575–1590 (In Russ.).
- Volkova E.M., Novenko E.Yu., Nosova M.B., Zatsarin-naya D.V. 2017a. Dinamika razvitiya vodorazdel'nykh bolot na yuzhnoy granitse lesa v Evropeiskoy Rossii [Dynamics of the development of watershed mires on the southern border of the forest in European Russia] — Byullyuten' MOIP. Otdel biologii. 122 (1): 47–59 (In Russ.).
- Volkova E.M., Novenko E.Yu., Olchev A.V. 2017b. Otsenka netto-CO₂-obmena lesnogo sfagnovogo bolota po resul'tatam eksperimental'nykh nablyudeniy i model'nykh raschetov [Estimation of net CO₂ exchange of forest sphagnum peat bog using results of field measurements and model calculations]. — In: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Uglerodnyy balans bolot Zapadnoy Sibiri v kontekste izmeneniya klimata". Khanty-Nansiisk. P. 48–50 (In Russ.).
- Volkova E.M. 2018. Bolota Srednerusskoy vozvyshennosti: genesis, strukturno-funktsional'nye osobennosti i prirodoohrannoe znachenie: [Mires of Middle-Russian Upland: genesis, structural and functional features, environmental significance] Abstr. ... Diss. Doct. Biol. Sci. St. Peterburg. 46 p. (In Russ.).
- Volkova E.M. 2019. Flora sosudistyykh rasteniy bolot Srednerusskoy vozvyshennosti — Bot. Zhurn. 104 (10): 17–30 (In Russ.).
- Volkova E.M., Novenko E.Yu., Yurkovskaya T.K. 2020. Vozrast bolot Srednerusskoy vozvyshennosti [The age of the mires of the Middle-Russian Upland]. — Izvestiya RAS. Seria geograficheskaya. 84 (4): 551–561 (In Russ.).
- Volkova E.M., Zatsarin-naya D.V., Sobina A.A. 2020. Osobennosti genesis vodorazdel'nykh splavinnyykh bolot Tul'skoy oblasti [Features of the genesis of the watershed floating mires of the Tula region]. — Izvestia TulGU. Estestvennye nauki. 4: 65–71 (In Russ.).
- Zalesov S.V. 2021. Rol' bolot v deponirovanii ugleroda [The role of mires in carbon deposition]. — Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 7: 6–9 (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.109.7.033>
- Zatsarin-naya D.V. 2015. Ekologicheskie osobennosti i rastitel'nost' karstovykh bolot zony shirokolistvennykh lesov (na primere Tul'skoy oblasti): [Ecological features and vegetation of karst mires of deciduous forest zone (on the example of Tula region)] Diss. ... Kand. Biol. Sci. Moscow. 173 p. (In Russ.).
- Zhang H., Gallego-Sala A.V., Amesbury M.J., Charman D.J., Piilo S.R., Väiranta M.M. 2018. Inconsistent Response of Arctic Permafrost Peatland Carbon Accumulation to Warm Climate Phases. — Global Biogeochemical Cycles. 32: 1605–1620.