

ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА В КАРСТОВОМ БОЛОТЕ МОРДОВСКОГО ЗАПОВЕДНИКА В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

К.Н. Дьяконов¹, Н.Г. Мазей², А.С. Прокушкин³, А.Е. Шатунов⁴,
Э.П. Зазовская⁵, Е.Ю. Новенко⁶

^{1,2} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии и ландшафтоведения

³ Институт леса СО РАН, Лаборатория биогеохимических циклов в лесных экосистемах

^{4,6} Институт географии РАН, Лаборатория эволюционной географии

⁵ Институт географии РАН, Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии

¹ Зав. кафедрой, чл.-кор. РАН, д-р геогр. наук; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

² Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: natashamazei@mail.ru

³ Зав. лабораторией, канд. биол. наук; e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

⁴ Аспирант; e-mail: toxavilli@yandex.ru

⁵ Зав. лабораторией, канд. геогр. наук; e-mail: zaszovsk@gmail.com

⁶ Глав. науч. сотр., проф. РАН, д-р геогр. наук; e-mail: lenanov@mail.ru

В статье представлены результаты исследования депонирования углерода в течение последних 3000 лет в карстовом болоте Столбовое расположенного на территории Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича, находящегося на южной границе области распространения хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины. В торфяной залежи болота Столбовое представлены низинные (осоковый, древесно-осоковый, травяной) и переходные виды торфа (сфагновый, травяно-сфагновый, осоково-сфагновый, пушицевый). Болото находится на мезотрофной стадии развития. Содержание органического углерода (C_{org}) в исследованном болоте изменяется в диапазоне от 37,2 до 53,4%. В среднем содержание C_{org} составляет 49,7%. Содержание азота в торфе претерпевает существенно более выраженные колебания по глубине по сравнению с C_{org} – от 1,1 до 2,6% (среднее значение – 1,9%). Суммарный запас углерода в болоте Столбовое составил около 6,7 кг/м².

Полученные данные показали высокую способность быстрорастущего карстового болота связывать атмосферный углерод. Скорость аккумуляции углерода в изученном болоте варьирует в диапазоне от 32,0 до 158,4 г С/м² в год, при среднем значении 68,9 г С/м² в год, что существенно выше средних значений скоростей депонирования углерода болотами различных типов в голоцене. Анализ распределения скорости накопления углерода по глубине торфяной залежи болота Столбовое не выявил зависимости между депонированием углерода и климатическими изменениями в течение последних 3000 лет. Существенный рост скорости аккумуляции углерода на глубине 60 см (480 кал. лет назад), возможно, связан с высокой продуктивностью сообщества сосудистых растений даже при повышенных уровнях минерализации/гумификации их остатков.

Ключевые слова: скорость аккумуляции углерода, элементный состав торфа, азот, ботанический состав торфа, гумификация торфа

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.3

ВВЕДЕНИЕ

Исследования депонирования углерода в болотных экосистемах долгое время остаются одной из самых актуальных тем научных работ, поскольку эта проблематика напрямую связана с изучением глобальных изменений климата и парникового эффекта. Активные исследования по оценке пулов и потоков углерода в лесах и болотах России начались в 1990-х гг. вслед за принятием Рамочной конвенции ООН по изменению климата [Углерод в экосистемах лесов и болот России, 1994; Вомперский, 1994]. Интерес к данной проблеме не снижается и на протяжении последующих десятилетий. Опре-

деленным стимулом к исследованиям в данном направлении послужила реализация государственной научно-технической политики Российской Федерации в области экологического развития и климатических изменений в направлении перехода к низкоуглеродной экономике [Указ Президента РФ..., 2021].

Запасы и процессы аккумуляции углерода в болотных комплексах на территории России изучены неравномерно. Лучше всего изучена территория Западной Сибири [Borren et al., 2004; Beilman et al., 2009; Инишева и др., 2016, 2023; Головацкая и др., 2022]. В Центральной Сибири подобные исследования провели на болотах северной части Сым-

Дубческого междуречья [Прокушкин и др., 2017]. Согласно опубликованным данным, для низинных болот в долинах рек была характерна большая скорость накопления углерода, чем для верховых на междуречье, найдена связь с климатическими изменениями.

В европейской части России подобных работ значительно меньше. Оценки скоростей накопления углерода в торфе наиболее полно проведены в Карелии и на северо-западе России [Елина, Токарев, 2010; Kobak et al., 1998]. Существуют оценки скорости накопления углерода в голоцене для болот на юге Валдайской возвышенности [Минаева и др., 2008]. В последние несколько лет появилась серия работ, посвященных запасам углерода и особенностям его аккумуляции в болотах разного генезиса Среднерусской возвышенности [Волкова и др., 2022; Volkova et al., 2022].

За рубежом проблема аккумуляции углерода в болотах также является одной из актуальных тем научных исследований. Опубликовано огромное количество работ, посвященных запасам углерода в конкретных болотных экосистемах и скоростям его накопления в торфе на протяжении голоцена [Belyea, Warner, 1996; Borren et al., 2004; Loisel, Garneau, 2010; Yu, 2011; Bellen et al., 2012; Charman et al., 2013; Gallego-Sala et al., 2018; Amesbury et al., 2019]. По результатам многочисленных исследований накопления углерода в болотных комплексах в различных регионах составлена база данных, включающая около 300 болот, и проведено обобщение этих данных [Loisel et al., 2014].

В настоящей работе представлены результаты исследования депонирования углерода в позднем голоцене болотным комплексом на территории Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича, расположенного на южной границе зоны хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины. Способность болотных комплексов ландшафтов хвойно-широколиственных лесов связывать атмосферный углерод до настоящего времени мало изучена, а для исследуемого региона – это первые подобные исследования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучаемая территория. Мордовский государственный природный заповедник имени П.Г. Смидовича находится в центральном районе европейской части России, на территории Темниковского района в северо-западной части республики Мордовия. Заповедник занимает пологоволнистую равнину с глубоковрезанными долинами рек Мокша, Теш, Алатырь и их притоками. Коренные породы относятся к каменноугольной и юрской системам. Современная структура рельефа сформировалась

в четвертичный период. Плейстоценовые отложения представлены моренными суглинками донского оледенения и ранне- и среднелейстоценовыми флювиогляциальными песками [Ямашкин, 1998]. На участках, где четвертичные отложения имеют малую мощность, развиты карстовые процессы.

Территория Мордовского заповедника находится в умеренно-континентальной области умеренного климата. Среднегодовая температура на метеостанции в г. Темников составляет $+5,7^{\circ}\text{C}$ [Баянов, 2015]. Средняя температура воздуха в январе $-9,0^{\circ}\text{C}$, в июле $+17,2^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков достигает 560 мм.

Заповедник располагается на границе между Приволжской провинцией лесостепной области и Мещерской провинцией лесной области, расположенной в подзоне смешанных лесов. Площадь болот в Мордовском заповеднике по разным оценкам составляет от 2684 до 3288 га, а их количество превышает 300 [Гришуткин, 2011]. Флора болот заповедника, история их развития и возраст хорошо изучены [Гришуткин, 2011; Новенко, Куприянов, 2021; Новенко и др., 2018], однако оценка депонирования углерода болотами в голоцене не проводилась.

Объект исследования в представленной работе – болото Столбовое, расположено в юго-восточной части заповедника в карстовом понижении овальной формы (диаметром около 100 м) на водноледниковой слабовогнутой равнине в окружении соснового и березово-соснового леса. Перепад высот между поверхностью болота и окружающей его водно-ледниковой равниной составляет 4 м.

Окрайку болота формируют редкостойный березняк (береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) сомкнутость крон 0,3) высотой 10–12 м с редким подростом из березы и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), кустарниковый ярус представлен ивой (*Salix* sp.). В травяно-кустарничковом ярусе встречаются вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata* L.) нумбургия кистецветная (*Naumburgia thyrsiflora* L. (Rchb.)), осока (*Carex* sp.), вейник седеющий (*Calamagrostis canescens* (Weber.) Roth.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), на пристовольных повышениях куртинами произрастает голубика (*Vaccinium uliginosum* L.). Моховой ярус имеет 100%-е покрытие, доминантом выступает *Sphagnum fallax* H. Klinggr.

В растительном покрове центральной части болота выделены два фитоценоза, занимающие почти равные площади. Северо-восточную часть болота, включая его центральную часть, где расположена точка бурения, занимает кустарничково-осоково-сфагновый фитоценоз. В довольно рыхлом травяно-кустарничковом покрове доминирующая роль принадлежит *Carex rostrata* и *Calamagrostis canescens*,

по сфагновому ковру (*Sphagnum fallax*) разрастается клюква болотная *Oxycoccus palustris* Pers.

Юго-западная часть болота представлена вейниково-моховым фитоценозом. В растительном покрове преобладает *Calamagrostis canescens*, в небольшом количестве отмечены *Menyanthes trifoliata*, *Naumburgia thyrsoflora*, *Comarum palustre*. Моховой ярус представлен сфагновыми мхами (ПП 80%): *Sphagnum fallax*, *Sph. majus* (Russow) С.Е.О. Jensen.

Методы исследования. Бурение торфяной залежи и отбор кернов выполнено в июле 2020 г. буром Сукачева производства фирмы Eijkelkamp с диаметром пробоотборника 5 см и длиной 50 см. Глубина торфяной залежи составила 240 см. В основании скважины вскрыты среднезернистые пески с включением органических остатков. Отбор образцов на все виды анализов проведен с интервалом 2 см, за исключением ботанического анализа торфа, где шаг опробования составил 4 см.

Определение абсолютного возраста трех образцов растительных остатков проведено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН. Для калибровки радиоуглеродных дат (табл.) использована программа Calib 8.20 и калибровочная

кривая IntCal20 [Reimer et al., 2020]. Модель роста отложений выполнена в программе Bacon [Blaauw, Christen, 2011] в программной среде R.

Потери при прокаливании определены методом сухого озоления в муфельной печи при температуре 550°C [ГОСТ 28245-09]. Для последующих расчетов удельной плотности торфа потери при прокаливании определены в высушенном образце фиксированного объема 5 см³. Содержание гигроскопической влаги определено в сушильном шкафу при 105°. Объемная плотность торфа определена как отношение массы высушенного образца торфа к его объему в свежем состоянии. Удельная плотность сухой массы торфа (г/см³) рассчитана как произведение объемной плотности торфа и потерь при прокаливании.

Степень гумификации торфа, измеренная как оптическая плотность раствора торфяной вытяжки, подготовленного по стандартной методике [Chambers et al., 2010], определена при помощи спектрофотометра СПЕКТРОД-М при длине волны 540 нм. В значения измерений оптической плотности затем внесена поправка на зольность торфа [Chambers et al., 2010]. Для образцов торфа выполнен детальный анализ ботанического состава [Домбровская и др., 1959; Кац и др., 1977].

Таблица

Результаты радиоуглеродного датирования и калиброванные значения возраста образцов торфа болота Столбовое

Лабораторный номер образца, ИГ РАН	Глубина, см	Радиоуглеродный возраст, ¹⁴ C лет назад (1σ)	Интервал калиброванного возраста 2σ, кал. л. н. (вероятность калибровки)
8355	55	275±20	157–163 (0,015) 288–322 (0,556) 376–427 (0,430)
8356	100	995±20	799–812 (0,050) 821–868 (0,292) 902–936 (0,565) 944–955 (0,093)
8357	236	2900±25	2957–3080 (0,845) 3091–3150 (0,155)

Анализ содержания углерода и азота проведен в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН на анализаторе Vario Isotope Cube с модулем IRMS IsoPrime100 (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) методом сухого сжигания. Навеску торфа массой 1 г высушивали при температуре 105°C и измельчали в пудру с помощью вибрационной мельницы. Для измерений на анализаторе измельченный образец взвешивался на высокоточных ультрамикровесах XPR2U (Mettler Toledo, Швейцария) и упаковывался в

индивидуальную капсулу из оловянной фольги. Масса навески для исследуемых образцов варьировала от 2,1 до 3,0 мг. Капсула с образцом помещалась в карусель CHNS анализатора. Сжигание образца происходило в кварцевом реакторе в токе кислорода при температуре около 920°C. Далее газообразные продукты разложения поступали в токе газа-носителя (гелия) в реактор восстановления, где происходила реакция восстановления оксидов азота в элементный азот. Для разделения продуктов сжигания в данном типе анализатора используется метод температурно программируе-

мой десорбции (TPD), при котором очередное повышение температуры на адсорбционной колонке происходит только при завершении детектирования предыдущего пика. Такой метод обеспечивает полное разделение пиков, даже при большой разнице концентраций исследуемых элементов. Далее с потоком газа-носителя разделенные газы (азот и углерод) попадали на детектор теплопроводности (Thermal conductivity detector – TCD). Работа TCD детектора основана на процессе передачи тепла от нагретого чувствительного элемента к более холодному корпусу детектора за счет теплопроводности газового потока. С изменением состава газового потока меняется его теплопроводность, это через ряд последовательных процессов меняет электрическое сопротивление чувствительного элемента. В TCD возникает сигнал в виде разности потенциалов (напряжения), величина которого пропорциональна концентрации определяемого вещества в газе-носителе [Зауэр, 2018].

Для калибровки анализатора использовались высокочистые стандартные образцы производства Elemental Microanalysis (Великобритания) – ацетанилид (массовая доля углерода, азота – 71,09, 10,36%) и сульфаниламид (массовая доля углерода, азота – 41,85, 16,27%). Стандартные образцы как слепые измерялись каждым 10-м образцом в серии,

чтобы следить за стабильностью работы прибора. Прибор рассчитывает значения содержания углерода (C) и азота (N) в % от массы.

Скорость накопления углерода, г C/м² в год (CAR, carbon accumulation rate) рассчитана по формуле [Chambers et al., 2010]:

$$CAR = \text{УПСМТ} \cdot C \cdot \text{ПТ} \cdot 100,$$

где УПСМТ – удельная плотность сухой массы торфа, рассчитанная, как произведение объемной плотности торфа и потерь при прокаливании, г/см³; C – содержание углерода, %; ПТ – прирост торфа, год/см. Удельную плотность сухой массы торфа вычисляли как произведение объемной массы торфа на потери при прокаливании [Chambers et al., 2010]. Прирост торфа рассчитан на основании модели роста отложений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно радиоуглеродному датированию (см. табл.), накопление торфа в болоте Столбовое началось около 3000 кал. л. н. (календарных лет назад). В период с 3000 до 1000 кал. л. н. скорость вертикального прироста торфа составляла 0,65 мм/год (рис. 1), в 1000–450 кал. л. н. она возросла до 0,87 мм/год и затем в течение последних 450 лет еще увеличилась до 1,5 мм/год.

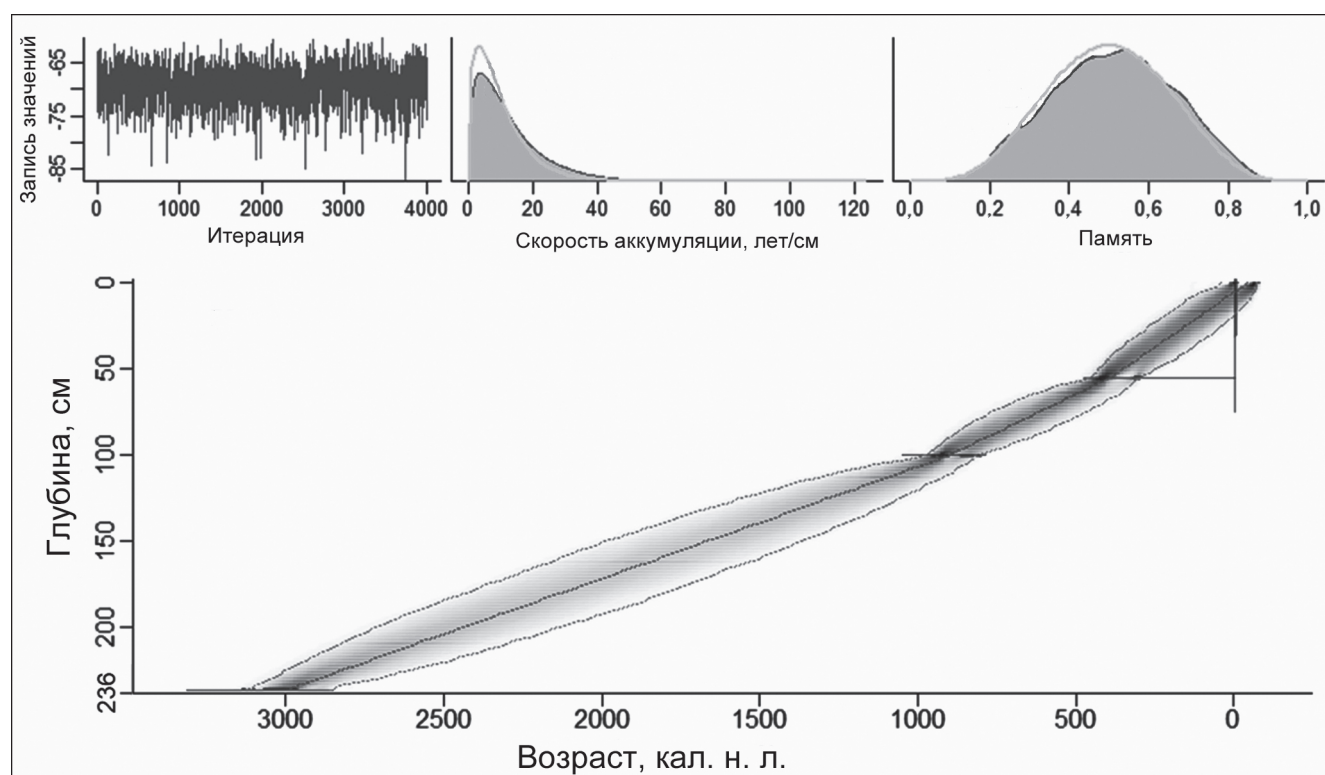


Рис. 1. Модель вертикального прироста торфа в болоте Столбовое, построенная по радиоуглеродным датировкам (см. табл.)

Fig. 1. Model of vertical peat growth in the Stolbovoye peatland, based on radiocarbon dates (see Table)

В торфяной залежи болота Столбовое представлены низинные (осоковый, древесно-осоковый, травяной) и переходные виды торфа (сфагновый, травяно-сфагновый, осоково-сфагновый, пушицевый) (рис. 2). Болото находится на мезотрофной стадии развития. Потери при прокаливании колеблются в диапазоне от 90 до 98% за исключением интервала 29–37 см, где привнос минеральных частиц существенно увеличился, ППП сократились до 75–80%. Степень гумификации торфа, измеренная нами как величина оптической плотности, значительно изменяется по глубине торфяной залежи от 0,1 до 0,6, однако прослеживается отчетливый тренд к уменьшению гумификации торфа вверх по разрезу, начиная с глубины 140 см. Удельная плотность сухой массы торфа колеблется от 0,04 до 0,15 г/см³, возрастающая в верхней части торфяной залежи, где больше потепление минеральных частиц.

Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в исследованном болоте изменяется в диапазоне от 37,2 до 53,4% (рис. 3). В среднем, содержание $C_{\text{орг}}$ составляет 49,7% (CV = 9%). Содержание азота в торфе претерпевает существенно более выраженные колебания по глубине по сравнению с $C_{\text{орг}}$ – от 1,1 до 2,6% (среднее значение – 1,9% (CV = 23%)). Повышенные значения концентрации азота наблюдаются в нижних слоях торфа (236–100 см) – $2,1 \pm 0,4\%$ и характеризуются средней по силе корреляцией с содержанием $C_{\text{орг}}$ ($r = 0,68$, $p < 0,05$). В вышележащем горизонте (98–62 см) концентрация азота снижается до 1,5%, но сохраняет положительную связь с $C_{\text{орг}}$ ($r = 0,59$, $p < 0,05$). В горизонтах 60–38 и 36–0 см содержание азота возрастает от 1,6 до 1,8%, однако, связь с содержанием $C_{\text{орг}}$ недостоверна – изменяется от положительной ($r = 0,22$, $p > 0,05$) до отрицательной ($r = -0,21$, $p > 0,05$).

Суммарный запас углерода в болоте Столбовое составил около 6,7 кг/м². Однако аккумуляция углерода в торфяной залежи не была равномерной во времени, четко выделяются несколько этапов по изменению интенсивности этого процесса. Так, скорости накопления углерода варьировали от 4,7 г С/м² в год на нижней границе торфяной залежи до 158,4 г С/м² в год на глубине 54 см, при среднем значении 68,9 г С/м² в год.

Для удобства интерпретации мы разделили торфяную залежь на 10 зон, соответствующих этапам развития болота и различающихся по ботаническому составу торфа, содержанию углерода и азота, интенсивности аккумуляции углерода (см. рис. 2 и 3).

Заболачивание карстовой воронки началось со стадии переувлажненного осокового березняка (зона 1, 240–200 см, 3000–2500 кал. л. н.), которое постепенно перешло в березовое осоково-травя-

ное болото. На это указывает большое количество остатков древесины лиственных пород деревьев, в том числе фрагменты ствола березы, остатки древесины ивы и обилие остатков осок (*Carex acuta*, *C. cespitosa*, *C. omskiana*, *C. sp.* – 20–40%), вахты (*Menyanthes trifoliata*, до 30%) и камыша (*Scirpus* – 10–35%). Относительно кратковременный этап развития сфагновых мхов маркируется слоем, сформированным преимущественно из остатков *Sphagnum* sect. *Sphagnum* и стеблей сфагнума (зона 2, 200–185 см, 2500–2200 кал. л. н.). Выше залегает слой торфа (зона 3, 185–155 см, 2200–1755 кал. л. н.), образованный остатками осок (*C. lasiocarpa*, *C. rostrata*, 20–30%), *Eriophorum* sp. (20–40%), *Scheuchzeria palustris* (15–20%), с небольшим участием трав (*Menyanthes trifoliata*, *Phragmites australis*, *Scirpus* sp.).

Содержание $C_{\text{орг}}$ резко возрастает в основании торфяной залежи с 7 до 52,3% и в интервале глубин 236–155 см в низинных осоково-травяных, древесно-осоковых, осоково-пушицевых и пушицево-сфагновом торфах содержание углерода не испытывает значительных колебаний и составляет 49,9–53,3%. Для этих слоев торфа характерно высокое содержание азота 2,0–2,6% и узкие соотношения С : N (20:1–25:1), которые показывают, что болото находилось в низинной стадии развития в условиях богатого минерального питания. Скорость аккумуляции углерода возрастает в нижних 20 см торфяной залежи с 4,7 до 70 г С/м² в год и в интервале глубин 218–115 см скорость накопления углерода варьирует в пределах 32,0 и 79,1 г С/м² в год при средних значениях 57,3 г С/м² в год. Изменения условий торфонакопления зафиксированы в период формирования слоя сфагнового торфа, сформированного остатками *S. sect. Sphagnum* (зона 2, 200–185 см), где содержание азота падает до 1,0–1,5%, а С : N возрастает до 35:1–40:1. В этом слое выявлена пониженная скорость аккумуляции углерода 32–50 г С/м² в год.

В течение следующей стадии развития болота происходит его зарастание сосновым древостоем (зона 4, 155–115 см, 1755–1130 кал. л. н.). В составе растительных остатков доля сосны и древесины хвойных достигает 8%, преобладает *Sphagnum* sect. *Sphagnum* (40–60%), присутствуют остатки осок, шейхерии, сабельника и пушицы (3–5%). Содержание углерода в этом слое оставляет 50,1–53,4%. Относительно высокие значения содержания азота (1,6–2,6%) обуславливают низкие соотношения С : N – 20:1–25:1, что указывает на сохранение достаточной обеспеченности элементами минерального питания в карстовой воронке. Скорость накопления углерода выявлена в пределах 46,8 и 68,3 г С/м² в год.

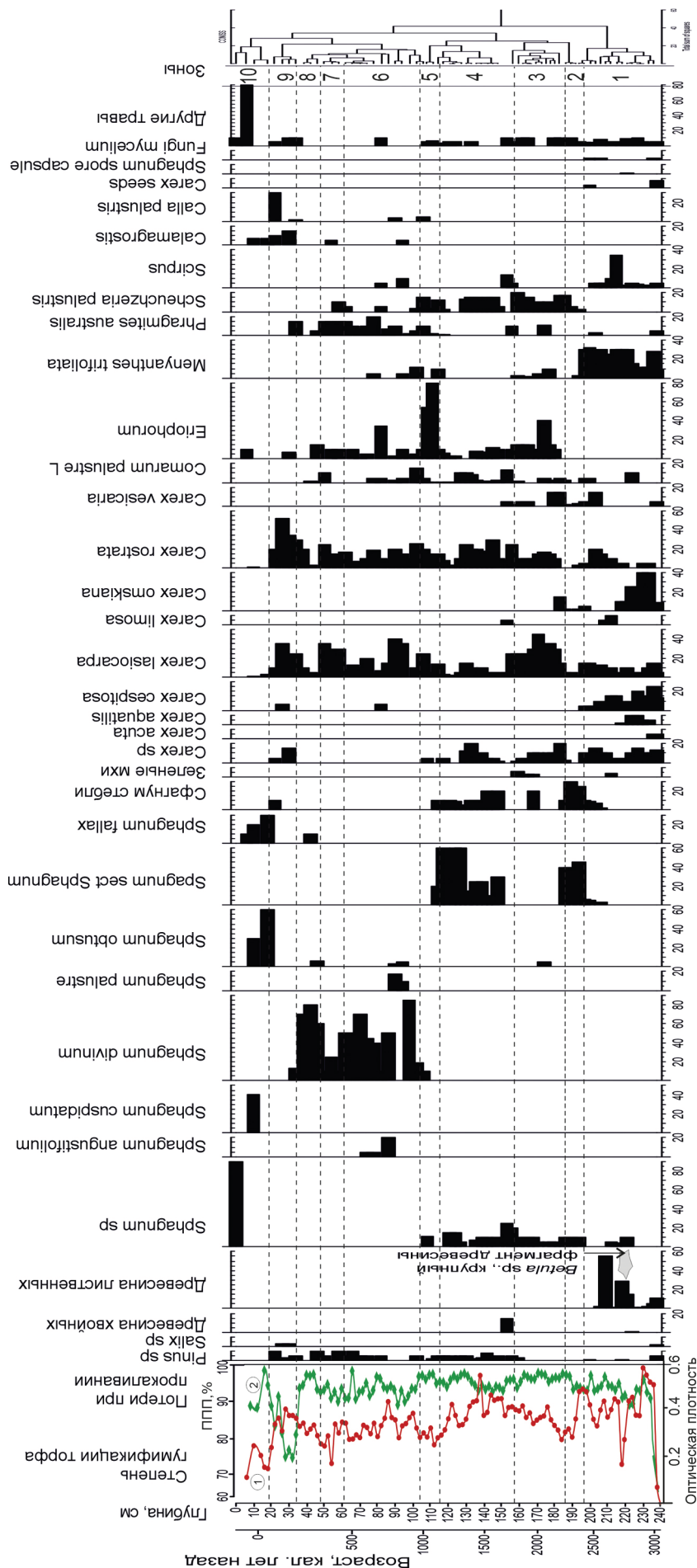


Рис. 2. Ботанический состав торфа, степень гумификации торфа (1) и потери при прокаливании (2) торфяной залежи болота Столбовое

Fig. 2. Botanical composition of peat, degree of peat humification (1) and loss on ignition (2) of peat deposits from the Stolbovoye peatland

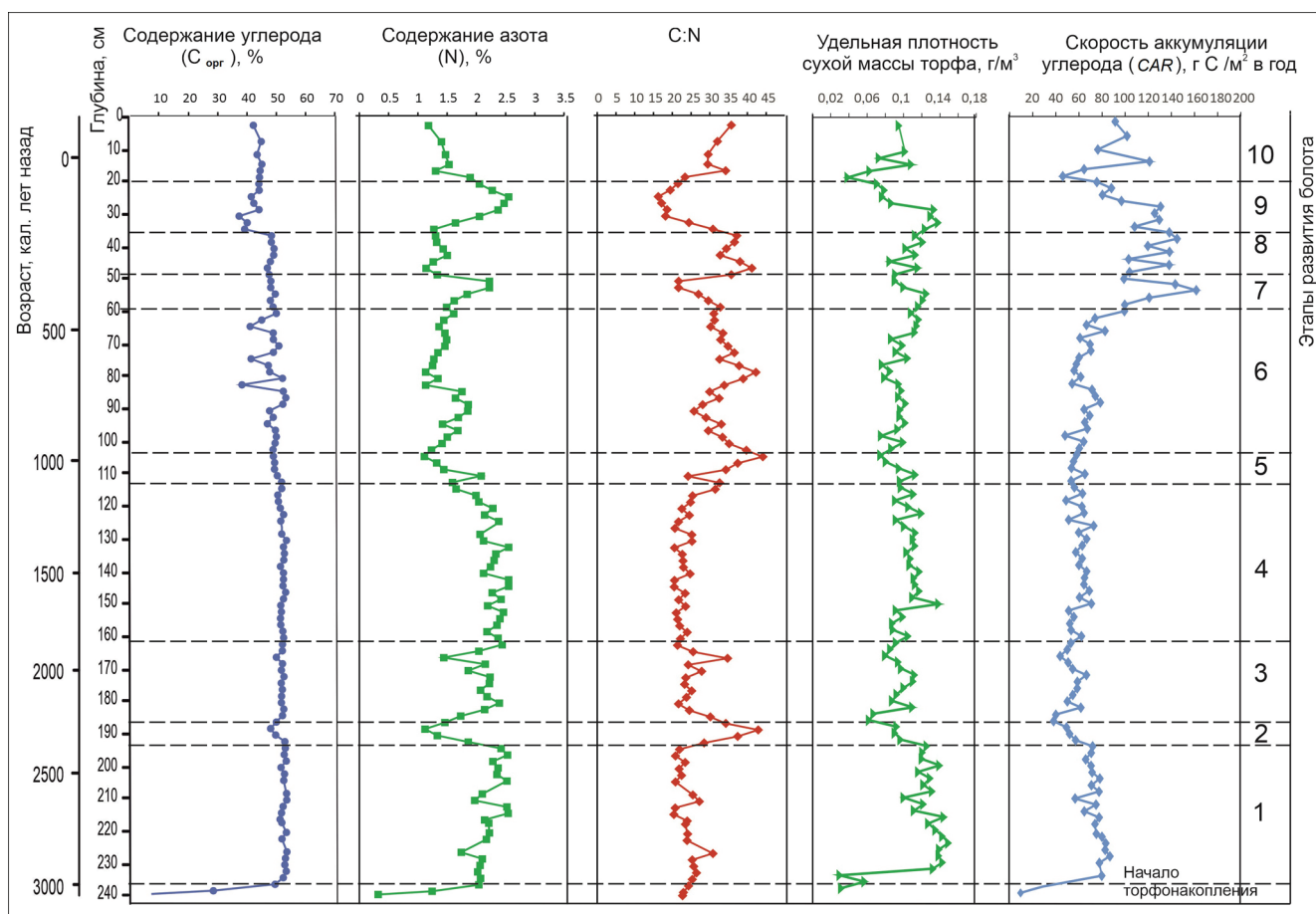


Рис. 3. Результаты анализа элементного состава, удельная плотность сухой массы торфа и скорость аккумуляции углерода в торфяной залежи болота Столбовое

Fig. 3. Macroelement composition, dry bulk density and carbon accumulation rate in the peat core from the Stolbovoye peatland

Тонкий прослой (10 см) пушицевого торфа (зона 5, 115–105 см, 1130–1110 кал. л. н.), для которого характерны увеличение степени гумификации и содержания органического вещества, указывает на резкие и кратковременные изменения условий в болоте. Среди растений-торфообразователей преобладают остатки *Eriophorum* sp. (70–80%), при участии *Scheuchzeria palustris* (10–15%) и прочих трав. Для основания этого горизонта характерен пик содержания азота до 2,08% при последующем его резком сокращении до 1,1%. Возможно формирование этого прослоя связано с восстановлением болотной экосистемы после пожара.

Выше залегает торф (зона 6, 105–60 см, 1110–480 кал. л. н.), образованный остатками *Sphagnum divinum* (до 80%), *C. lasiocarpa*, *C. rostrata* (15–20%), с участием *Phragmites australis* (5–7%), *Eriophorum* sp., *Scheuchzeria palustris*, *Comarum palustre* и остатков древесины сосны, который соответствует переходному сфагновому болоту с редким древостоем. Для этого слоя торфа характерны резкие колебания концентрации C_{org} от 38,2 до

52,3%. Понижение содержания азота до 1,0–1,6% и рост соотношения C : N до 30:1–40:1 указывает на переход болота к мезотрофной стадии развития. Скорость аккумуляции углерода варьирует от 44,8 до 79,8, при среднем значении 60,3 г C/м² в год, что в целом близко к предыдущей стадии развития болота.

Сокращение участия сфагновых мхов в растительном сообществе болота, формирующем торф на глубине 60–50 см (зона 7, 480–390 кал. л. н.), при росте доли осок (*C. lasiocarpa*, *C. rostrata*, до 40%), пушицы (7–20%) и тростника (*Phragmites australis*, 15–20%) указывает, возможно, на обводнение болота и его обогащение минеральными веществами. Пик содержания азота до 1,8–2,2% и снижение соотношения C : N до 22:1–27:1 приходится на верхнюю часть этого слоя (56–50 см). Скорость аккумуляции углерода резко возрастает в этом слое с 70 до 158 г C/м² в год, достигая максимальных значений во всем разрезе.

Формирование переходного древесно-осоково-сфагнового (*S. divinum*) торфа (зона 8, 50–35 см, 390–300 кал. л. н.), близкого по составу к торфу, за-

легающему на глубине 105–60 см (зона 6), указывает на восстановление мезотрофных условий минерального питания на болоте. Следует отметить, однако, что переход к этим условиям крайне резкий: содержание азота снижается с 2,2 до 1,2–1,4%, а соотношение $C : N$, соответственно, возрастает до 33:1–41:1. Скорость накопления углерода снижается по сравнению с предыдущей фазой развития болота, но остается выше среднего значения для торфяной залежи и составляет от 96,5 до 142,4 г C/m^2 в год.

Резкое исчезновение сфагновых мхов из состава торфообразователей на глубине 35 см, увеличение доли осок (в сумме до 80%), появление остатков *Calamagrostis* sp. и *Calla palustris* и коры ивы (зона 9, 35–20 см, 300–200 кал. л. н.), значительное увеличение доли минеральной фракции (до 20%) и удельной плотности сухой массы торфа свидетельствует об увеличении эвтрофизации болота, возможно, в результате нарушений почвенно-растительного покрова на окружающей территории и поступления минеральных веществ из-за пожаров. В изученной торфяной колонке скоплений угольков не отмечено, но в других скважинах, пробуренных ближе к краю болота, на этой глубине выделены отчетливые угольные прослои. На нижней границе этого слоя в образцах торфа с максимальной зольностью (глуб. 36–30 см) концентрация C_{org} понижается до минимальных значений в разрезе 37,2–39,9%, выше по слою содержание углерода составляет 41,3–44,4%. Доля азота в основании слоя возрастает до 2,55–1,89% при снижении соотношения $C : N$ 16:1–23:1. Скорость аккумуляции углерода сокращается в зависимости от снижения плотности торфа от 128,6 до 44,9 г C/m^2 в год.

Верхняя часть торфяной залежи (зона 10, 20–0 см, примерно 200 кал. л. н. – наст. время) представлена слабо разложенным сфагновым переходным торфом (*S. fallax*, *S. cuspidatum*, *S. obtusum*, *S. sp.*). Поскольку этот слой сложен рыхлым, слабо уплотненным торфом и живыми стеблями сфагновых мхов, расчеты возраста по модели, основанной на радиоуглеродных датировках, для этой части залежи недостоверны. Торф этого слоя отличается относительно низкими значениями C_{org} и N , которые составляют 42,1–44,4 и 1,2–1,5% соответственно и ростом $C : N$ до 35:1. Скорость аккумуляции углерода приблизительно оценивается 75–100 г C/m^2 в год.

Анализ содержания углерода в торфяной залежи болота Столбовое показал, что в низинных торфах с преобладанием остатков сосудистых растений-торфообразователей содержание C_{org} составляет 50–53% и эти значения выше, чем концентрация C_{org} в переходных древесно-осоково-сфагновых торфах (47–49%). Наименьшие значения C_{org} характерны для переходных сфагновых торфов – 42–44%.

В среднем содержание C_{org} в болоте Столбовое составляет 49,7%. Многими исследователями принято, что в среднем, в органическом веществе торфа содержится 50% углерода [Chambers et al., 2010], и эта величина часто используется при расчетах скорости аккумуляции углерода в болотных комплексах. Также существуют оценки среднего значения C_{org} в торфе 51,8% [Vitt et al., 2000] и 52,6% [Bauer et al., 2006]. Изучение накопления углерода в торфяниках Западной Сибири показало, что содержание углерода практически не зависит от возраста торфа, но тесно связано с его ботаническим составом [Bogren et al., 2004; Beilman et al., 2009]. Содержание углерода в торфяниках Западной Сибири, накопившихся в течение последних 2000 лет, варьирует от 41,5 до 62,8% при среднем значении $52,0 \pm 0,3\%$ [Beilman et al., 2009], наибольшие концентрации C_{org} выявлены в древесных торфах, наименьшие – в сфагновых. В Средней Сибири торф низинных болот Сым-Дубческого междуречья с преобладанием сосудистых растений-торфообразователей характеризуется достоверно более высокими значениями содержания C_{org} (50–57%) по сравнению с торфом, сложенным сфагновыми мхами (46–49%, [Прокушкин и др., 2017]). В целом, нами выявлены близкие закономерности распределения концентрации C_{org} в различных видах торфа при немного более низких абсолютных значениях концентрации C_{org} , что может быть связано с локальными особенностями его накопления.

Содержание азота в торфе претерпевает существенно более выраженные колебания по глубине по сравнению с C_{org} , что предполагает значимые изменения условий торфонакопления в исследованном болотном массиве. Так, наблюдаемые величины содержания азота варьировали от 1,1 до 2,6% ($CV = 23\%$), отражая последовательные изменения состава растений-торфообразователей, условий минерального питания и скоростей деструкции органического вещества торфа. Полученные результаты согласуются с обобщенными данными по содержанию азота в торфах России [Ефремова и др., 2000]: торф низинного типа наиболее обогащен азотом по сравнению с переходными и верховыми. При этом следует отметить повышенный азотный фон ($>1\%$) верхнего слоя торфа, сложенного сфагновыми мхами, по сравнению с ранее приводимыми значениями для Западной и Средней Сибири ($<0,6\%$) [Прокушкин и др., 2017]. Данный факт, наряду с высокими значениями N в сфагновых слоях торфа, залегающих ниже по профилю, предполагает более высокую обеспеченность элементами минерального питания болота Столбовое.

С глубиной в слоях со сходным ботаническим составом наблюдается рост концентраций азота и

сужение соотношения C:N, что свидетельствует о разложении органического вещества, а именно минерализации $C_{\text{орг}}$ до CO_2 и метана при сохраняющихся количествах азота. Вместе с тем в формировании торфяной залежи выявлено несколько фаз, характеризующихся резким снижением содержания азота (на переходах между фазами 4–5, 7–8, 9–10). Помимо смены растительных группировок подобные изменения могут быть вызваны и нарушениями азотного цикла (потерями азота при относительно неизменном уровне содержания $C_{\text{орг}}$), как правило, возникающих в результате пожарного воздействия. С другой стороны, ряд фаз развития болота характеризуется обогащением торфа азотом за счет внедрения в болотный фитоценоз сосудистых растений, что также свидетельствует об обеспеченности этого массива элементами минерального питания, поступающими, вероятно, с грунтовыми водами.

Полученные данные показали, что скорость аккумуляции углерода в болоте Столбовое варьирует в диапазоне от 32,0 до 158,4 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год, если не учитывать самые нижние образцы, приуроченные к базальному горизонту торфяной залежи, при среднем значении 68,9 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год. Согласно оценкам [Инишева и др., 2013], в среднем по России современная скорость аккумуляции углерода колеблется от 10,3 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год в полигональных болотах до 51,7 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год в низинных травяных болотах. Средние значения скорости накопления углерода в болотах бореальной области Канады составляет от 13 до 30 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год, хотя в отдельных болотных комплексах были выявлены более высокие значения интенсивности накопления углерода: от 52,8 до 114,5 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год при средних значениях 73,6 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год [Loisel, Garneau, 2010]. Обобщение большого объема данных по болотам арктической и бореальной зон Евразии и Северной Америки показали, что в течение последнего тысячелетия скорость аккумуляции углерода находилась в диапазоне от 3 до 80 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год [Gallego-Sala et al., 2018], а средняя скорость накопления углерода болотами за весь голоцен составляла $22,9 \pm 2,0$ г $\text{C}/\text{м}^2$ в год [Loisel, Garneau, 2010].

Таким образом, изученное нами болото Столбовое характеризуется высокими, гораздо выше средних значений [Loisel et al., 2014], показателями скорости аккумуляции углерода в торфяной залежи. Однако высокие значения накопления углерода в изученном нами болоте по сравнению с региональными оценками, могут быть связаны с тем, что большинство исследований проведено на севере лесной зоны в таежных и лесотундровых ландшафтах. Исследования на юге лесной зоны в ландшафтах хвойно-широколиственных и широколиственных лесов до настоящего времени единичны, хотя интенсивность прироста биомассы в этих болотах

выше, чем в более северных районах [Титлянова, Вишнякова, 2022]. Высокие значения интенсивности накопления углерода в болотном комплексе, полученные нами в болоте Столбовое, не являются уникальными. Особенно это характерно для карстовых болот с высокой скоростью вертикального прироста торфа. По данным Е.М. Волковой с соавт. [Volkova et al., 2022], в карстовых болотах, расположенных на Среднерусской возвышенности в области распространения хвойно-широколиственных и широколиственных лесов, в климатических условиях, близких к Мордовскому заповеднику, скорость аккумуляции углерода в голоцене варьировала от 12 до 219 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год (в болоте Клюква) и от 16 до 291 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год (в болоте Источек). Исследования накоплений углерода в трех болотах на территории Польши [Karpińska-Kołaczek et al., 2024], расположенных в зоне широколиственных лесов и имеющих схожую морфологию с изученным нами болотом, выявили большую вариабельность значений скоростей аккумуляции углерода в голоцене. Приведены данные по так называемым kettle-holes, болотам, имеющим площадь 1–3 га и глубину до 4 м, которые показали средние значения 79,64, 74,6 и 37,29 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год и максимальные значения 271,3 и 114,58 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год. В тот же период времени скорость аккумуляции углерода в болотных комплексах таежной зоны на юге Финляндии не превышает 25 г $\text{C}/\text{м}^2$ в год [Charman et al., 2013].

Анализ распределения скорости накопления углерода по глубине торфяной залежи в интервале глубин от ее основания (240 см) до 60 см (3000–480 кал. л. н.), несмотря на значительные климатические изменения (например, Римское теплое время, похолодание темных веков и Средневековый климатический оптимум), не выявил связей между депонированием углерода и колебаниями климата [Новенко, 2021]. Мы предполагаем, что существенный рост скорости аккумуляции углерода на глубине 60 см связан с высокой продуктивностью сообщества сосудистых растений даже при повышенных уровнях минерализации/гумификации их остатков. Резкий рост скоростей аккумуляции углерода в верхней части торфяной залежи описан в ряде работ [Belyea, Warner, 1996; Loisel, Garneau, 2010]. Возможно, на процессы, протекающие в болотной экосистеме, повлияло увлажнение и похолодание климата Малого ледникового периода, поскольку начало резкого роста скорости аккумуляции углерода около 480 кал. л. н. совпадает активной фазой этого похолодания.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования депонирования углерода в позднем голоцене в болотном комплексе на

территории Мордовского заповедника в течение последних 3000 лет выявили высокую способность быстро растущих карстовых болот хвойно-широколиственных лесов связывать атмосферный углерод.

Торфяная залежь болота Столбовое, представленная низинными и переходными видами торфа, характеризуется высокой обеспеченностью элементами минерального питания. Скорость аккумуляции углерода в болоте Столбовое варьирует в диапазоне от 32,0 до 158,4 г С/м² в год при среднем значении

68,9 г С/м² в год, что существенно выше средних значений скоростей депонирования углерода различными типами болот в голоцене.

Возможно, интенсивное накопление углерода в торфяной залежи обусловлено высокой продуктивностью сообщества сосудистых растений карстового болота. Видимой взаимосвязи между климатическими изменениями в позднем голоцене и процессом аккумуляции углерода в болотном комплексе не установлено.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 24-27-00096.

Авторы благодарят директора Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича д-ра биол. наук А.Б. Ручина и сотрудников заповедника за помощь в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баянов Н.Г. Изменения климата северо-запада Мордовии за период существования Мордовского заповедника по данным метеонаблюдений в г. Темникове // Труды Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича. 2015. Вып. 14. С. 212–219.
- 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.
- Вомперский С.Э. Роль болот в круговороте углерода. М.: Наука, 1994. 37 с.
- Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э. и др. Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 4. С. 1–18. DOI: 10.31251/pos.v5i4.194.
- ГОСТ 28245-09. Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. М., 1990. 7 с.
- Гришуткин О.Г. Площадь и территориальное распределение болот в Мордовском государственном природном заповеднике // Труды Мордовского гос. природного заповедника им. П.Г. Смидовича. 2011. Вып. IX. С. 280–281.
- Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюрменов С.Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М.: Гос. энергетическое изд-во. 1959. 228 с.
- Зауэр Е.А. Современные автоматические CHNS/O/X-анализаторы органических соединений // Аналитика и контроль. 2018. № 1. С. 6–19.
- Елина Г.А., Токарев П.Н. Закономерности аккумуляции органики и углерода в болотных экосистемах Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2010. № 1. С. 34–51.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В. Азот в болотах России // Почвоведение. 2000. № 9. С. 1070–1083.
- Инишева Л.И., Кобак К.И., Турчинович И.Е. Развитие процесса заболачивания и скорость аккумуляции углерода в болотных экосистемах России // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 60–68.
- Инишева Л.И., Кобак К.И., Порохина Е.В. Роль болот в углеродном цикле (на примере Северо-Западного и Сибирского округов России) // Труды Инсторфа. 2016. № 14(67). С. 3–11.
- Инишева Л.И., Сергеева М.А., Головченко А.В. и др. Распределение диоксида углерода и метана в торфяной залежи олиготрофного лесного болота и их эмиссия в Западной Сибири // Лесоведение. 2023. № 1. С. 52–65. DOI: 10.31857/S0024114823010060.
- Кац И.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. Атлас растительных остатков в торфах. М.: Недра, 1977. 376 с.
- Минаева Т.Ю., Трофимов С.Я., Чичагова О.А. и др. Накопление углерода в почвах лесных и болотных экосистем южного Валдая в голоцене // Известия РАН. Серия биологическая. 2008. № 5. С. 607–615.
- Новенко Е.Ю. Динамика ландшафтов и климата в Центральной и Восточной Европе в голоцене – прогнозные оценки изменения природной среды // Геоморфология. 2021. № 52(3). С. 24–47. DOI: 10.31857/S0435428121030093.
- Новенко Е.Ю., Куприянов Д.А. Реконструкция истории лесных пожаров в южной части Мордовского заповедника в голоцене по данным анализа макроскопических частиц // Труды Мордовского гос. заповедника им. П.Г. Смидовича. 2021. Вып. 26. С. 176–192.
- Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Куприянов Д.А. и др. Динамика растительности и экологических условий в центре Восточно-Европейской равнины в голоцене // Экология. 2018. № 3. С. 184–193. DOI: 10.7868/S0367059718030034.
- Прокушкин А.С., Карпенко Л.В., Токарева И.В. и др. Углерод и азот в болотах северной части Сым-Дубческого междуречья // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 114–123. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(114-123).
- Титлянова А.А., Вишнякова Е.К. Изменение продуктивности болотных и травяных экосистем по широтному градиенту // Почвы и окружающая среда. 2022. № 2. С. 119. DOI: 10.31251/pos.v5i2.176.
- Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексеева, Р.А. Бердси. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 1994. 224 с.
- Ямашкин А.А. Физико-географические условия и ландшафты Мордовии. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 1998. 156 с.
- Amesbury M.J., Gallego-Sala A., Loisel J. Peatlands as prolific carbon sinks, *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, p. 880–881, DOI: 10.1038/s41561-019-0455-y.

- Bauer I.E., Hurdle P.A., Bhatti J. et al. Carbon stock trends along forested peatland margins in central Saskatchewan, *Canadian Journal of Soil Science (Special Issue)*, 2006, vol. 86, p. 32–333, DOI: 10.4141/S05-085.
- Beilman D.W., MacDonald G.M., Smith L.C. et al. Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years, *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.1029/2007GB003112.
- Bellen S., Garneau M., Ali A. et al. Did fires drive Holocene carbon sequestration in boreal ombrotrophic peatlands of eastern Canada? *Quaternary Research*, 2012, vol. 78, p. 50–59, DOI: 10.1016/j.yqres.2012.03.009.
- Belyea L., Warner B. Temporal scale and the accumulation of peat in a Sphagnum bog, *Canadian Journal of Botany*, 1996, vol. 74(3), p. 366–377.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6, p. 457–474, DOI: 10.1214/ba/1339616472.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of Western Siberia, *Quaternary Research*, 2004, no. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics, *Mires and Peat*, 2010, vol. 7, p. 1–10.
- Charman D.J., Beilman D.W., Booth R.K. et al. Climate-related changes in peatland carbon accumulation during the last millennium, *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, p. 929–944, DOI: 10.5194/bg-10-929-2013.
- Gallego-Sala A., Charman D.J., Brewer S. et al. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming, *Nature Climate*, 2018, vol. 8, p. 907–913, DOI: 10.1038/s41558-018-0271-1.
- Karpińska-Kolaczek M., Kolaczek P., Marcisz K. et al. Kettle-hole peatlands as carbon hot spots: Unveiling controls of carbon accumulation rates during the last two millennia, *CATENA*, 2024, vol. 237, 107764, DOI: 10.1016/j.catena.2023.107764.
- Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Turchinovich I.E. Changes in carbon pools of peatland and forests in northwestern Russia during the Holocene, *Global and Planetary Change*, 1998, vol. 16–17, p. 75–84.
- Loisel J., Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 291, p. 493–533, DOI: 10.1016/j.palaeo.2010.03.020.
- Loisel J., Yu Z., Beilman D.W., Camill P. et al. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation, *The Holocene*, 2014, vol. 24(9), p. 1028–1042, DOI: 10.1177/0959683614538073.
- Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration Curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62(4), p. 1–62, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
- Vitt D.H., Halsey L.A., Bauer I.E. et al. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene, *Canadian Journal of Earth Science*, 2000, vol. 37, p. 683–693.
- Volkova E.M., Leonova O.A., Boikova O.I. et al. Carbon accumulation dynamics of the Klukva peatland at the southern boundary of broad-leaved forest zone in European Russia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1093, 012006, DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012006.
- Yu Z. Peatlands and Their Role in the Global Carbon Cycle, *Eos*, 2011, vol. 92(12), p. 97–98.

Электронный ресурс

Указ Президента Российской Федерации от 08.02.2021 № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102080007#:~:text=Указ%20Президента%20Российской%20Федерации%20от%2008.02.2021%20№%2076,Российской%20Федерации%20и%20климатических%20изменений%22%20Номер%20опубликования%3A%200001202102080007> (дата обращения 10.03.2024).

Поступила в редакцию 22.03.2024

После доработки 15.04.2024

Принята к публикации 24.04.2024

CARBON SEQUESTRATION IN A KARST MIRE OF THE MORDOVIAN RESERVE DURING THE LATE HOLOCENE

K.N. Dyakonov¹, N.G. Mazei², A.S. Prokushkin³, A.E. Shatunov⁴,
E.P. Zazovskaya⁵, E.Yu. Novenko⁶

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

³ V.N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS, Laboratory of biogeochemical cycles in forest ecosystems

^{4,6} Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of evolutionary geography

⁵ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of radiocarbon dating and electronic microscopy

¹ Head of the Department, Corresponding Member of the RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: natashamazei@mail.ru

³ Head of the Laboratory, Ph.D. in Biology; e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

⁴ Postgraduate student; e-mail: toxavilli@yandex.ru

⁵ Head of the Laboratory, Ph.D. in Geography; e-mail: zaszovsk@gmail.com

⁶ Chief Scientific Researcher, Professor of the RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: lenanov@mail.ru

The article presents the results of the study of carbon accumulation over the past 3000 years in the Stolbovoye karst mire located within the Smidovich Mordovian State Nature Reserve on the southern border of the coniferous-deciduous forests of the East European Plain. Minerotrophic (sedge, wood-sedge, grass) and mesotrophic (*Sphagnum*, grass-*Sphagnum*, sedge-*Sphagnum*, cotton grass) types of peat are present in the peat deposits of the Stolbovoye mire. The mire is at the mesotrophic stage of development. The content of organic carbon varies from 37,2 to 53,4% (49,7% on average). The nitrogen content in peat shows significantly higher variations along the core compared to organic carbon, i. e. from 1,1 to 2,6% (the average value is 1,9%). The total carbon pool in the Stolbovoye mire is about 6,7 kg/m².

The data obtained showed that a fast-growing peatland is capable to sequester large amounts of atmospheric carbon. The carbon accumulation rate in the studied peatland varies from 32,0 to 158,4 g C/m²/yr, with an average of 68,9 g C/m²/yr, which is significantly higher than the average carbon accumulation rates in different types of peatlands during the Holocene. A relationship between carbon accumulation rate and climatic changes over the past 3000 years was not revealed. A significant increase in the rate of carbon accumulation at a depth of 60 cm (480 cal. years BP) could be associated with the high productivity of vascular plants even at higher levels of mineralization/humification of their residues.

Keywords: carbon accumulation rate, elemental composition of peat, nitrogen, plant macrofossils in peat, peat humification

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-27-00096). The authors are grateful to A.B. Ruchin, D.Sc. in Biology, Director of the P.G. Smidovich Mordovian State Nature Reserve, and the staff of the reserve for their assistance in field studies.

REFERENCES

- Amesbury M.J., Gallego-Sala A., Loisel J. Peatlands as prolific carbon sinks, *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, p. 880–881, DOI: 10.1038/s41561-019-0455-y.
- Bajanov N.G. Izmeneniya klimata severo-zapada Mordovii za period suschestvovaniya Mordovskogo zapovednika po dannym meteorologicheskikh i geologicheskikh naizmeneniy v g. Temnikove [Climate changes in the northwest of Mordovia during the existence of the Mordovia State Nature Reserve according to meteorological observations in the Temnikov town], *Trudy Mordovskogo gos. prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2015, no. 14, p. 212–219. (In Russian)
- Bauer I.E., Hurdle P.A., Bhatti J., Errington R. Carbon stock trends along forested peatland margins in central Saskatchewan, *Canadian Journal of Soil Science (Special Issue)*, 2006, vol. 86, p. 32–333, DOI: 10.4141/S05-085.
- Beilman D.W., MacDonald G.M., Smith L.C., Reimer P.C. Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years, *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.1029/2007GB003112.
- Bellen S., Garneau M., Ali A., Bergeron Y. Did fires drive Holocene carbon sequestration in boreal ombrotrophic peatlands of eastern Canada? *Quaternary Research*, 2012, vol. 78, p. 50–59, DOI: 10.1016/j.yqres.2012.03.009.
- Belyea L., Warner B. Temporal scale and the accumulation of peat in a *Sphagnum* bog, *Canadian Journal of Botany*, 1996, vol. 74(3), p. 366–377.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6, p. 457–474, DOI: 10.1214/ba/1339616472.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of Western Siberia, *Quaternary Research*, 2004, vol. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics, *Mires and Peat*, 2010, vol. 7, p. 1–10.

- Charman D.J., Beilman D.W., Booth R.K., Blaauw M. Climate-related changes in peatland carbon accumulation during the last millennium, *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, p. 929–944, DOI: 10.5194/bg-10-929-2013.
- Dombrovskaja A.V., Koreneva M.M., Tjuremnov S.N. *Atlas rastitel'nyh ostatkov, vstrechaemyh v torfe* [Atlas of plant residues present in peat], Moscow, Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1959, 228 p. (In Russian)
- Efremova T.T., Efremov S.P., Melent'eva N.V. Nitrogen in Russian Bogs, *Eurasian Soil Science*, 2000, vol. 9, p. 934–946.
- Elina G.A., Tokarev P.N. Zakonomernosti akumuljatsii organiki i ugleroda v bolotnyh ekosistemah Karelii [Regularities of peat and organic matter accumulation in mire ecosystems of Karelia], *Trudy KarNC RAN*, 2010, no. 1, p. 34–51. (In Russian)
- Gallego-Sala A., Charman D.J., Brewer S. et al. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming, *Nature Climate*, 2018, vol. 8, p. 907–913, DOI: 10.1038/s41558-018-0271-1.
- Golovackaja E.A., Djukarev E.A., Veretennikova E.Je. et al. Ocenka dinamiki balansa ugleroda v bolotah juzhno-taezhnoj podzony Zapadnoj Sibiri (Tomskaja oblast') [Evaluation of the dynamics of the carbon balance for peatlands of the southern taiga subzone of West Siberia (Tomsk region)], *Pochvy i okruzhajushhaja sreda*, 2022, no. 4, p. 1–18, URL: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194>. (In Russian)
- GOST 28245-09, *Torf. Metody opredelenija botanicheskogo sostava i stepeni razlozhenija* [Peat. Test methods for botanical composition of peat and degree of peat humification], Moscow, 1990, 7 p. (In Russian)
- Grishutkin O.G. Ploshhad' i territorial'noe raspredelenie bolot v Mordovskom gosudarstvennom prirodnom zapovednike [Area and spatial distribution of mires in the Mordovia State Nature Reserve], *Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2011, no. IX, p. 280–281. (In Russian)
- Inisheva L.I., Kobak K.I., Turchinovich I.E. Evolution of the paludification process and carbon accumulation rate in bog ecosystems of Russia, *Geography and Natural Resources*, 2013, no. 3, p. 246–253.
- Inisheva L.I., Kobak K.I., Porohina E.V. Rol' bolot v uglerodnom cikle (na primere Severo-Zapadnogo i Sibirskogo okrugov Rossii) [The role of mires in carbon cycle (on example of North-West and Siberian regions of Russia)], *Trudy Instorfa*, 2016, no. 14(67), p. 3–11. (In Russian)
- Inisheva L.I., Sergeeva M.A., Golovchenko A.V., Babikov B.V. Raspredelenie dioksida ugleroda i metana v torfjanoy zalezhi oligotrofnogo lesnogo bolota i ih emissija v Zapadnoj Sibiri [Carbon dioxide and methane distribution in peat deposits of an oligotrophic forest swamp in Western Siberia and their emissions], *Lesovedenie*, 2023, no. 1, p. 52–65, DOI: 10.31857/S0024114823010060. (In Russian)
- Kac I.Ja., Kac S.V., Skobeeva E.I. *Atlas rastitel'nyh ostatkov v torfah* [Atlas of plant residues in peat deposits], Moscow, Nedra Publ., 1977, 376 p. (In Russian)
- Karpińska-Kolaczek M., Kolaczek P., Marcisz K. et al. Kettle-hole peatlands as carbon hot spots: Unveiling controls of carbon accumulation rates during the last two millennia, *CATENA*, 2024, vol. 237, 107764, DOI: 10.1016/j.catena.2023.107764.
- Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Turchinovich I.E. Changes in carbon pools of peatland and forests in northwestern Russia during the Holocene, *Global and Planetary Change*, 1998, vol. 16–17, p. 75–84.
- Kuprijanov D.A., Novenko E.Ju. Rekonstrukcija istorii lesnyh pozharov v juzhnoj chasti Mordovskogo zapovednika v golocene po dannym analiza makroskopicheskich chastic [Reconstruction of the Holocene Forest fires history in the southern part of the Mordovian State Natural Reserve based on the macrocharcoal analysis of the peat], *Trudy Mordovskogo gos. zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2021, no. 26, p. 176–192. (In Russian)
- Loisel J., Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 291, p. 493–533, DOI: 10.1016/j.palaeo.2010.03.020.
- Loisel J., Yu Z., Beilman D.W. et al. database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation, *The Holocene*, 2014, vol. 24(9), p. 1028–1042, DOI: 10.1177/0959683614538073.
- Minaeva T.Ju., Trofimov S.Ja., Chichagova O.A. et al. Carbon accumulation in soils of forest and bog ecosystems of Southern Valdai in the Holocene, *Biology Bulletin*, 2008, no. 5, p. 524–532.
- Novenko E.Ju. Dinamika landshaftov i klimata v Central'noj i Vostochnoj Evrope v golocene – prognozyne ocenki izmenenija prirodnoj sredy [Landscape and climate dynamics in Central and Eastern Europe during the Holocene – assessment of future environmental changes], *Geomorfologija*, 2021, no. 52(3), p. 24–47, DOI: 10.31857/S0435428121030093. (In Russian)
- Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A. et al. Holocene dynamics of vegetation and ecological conditions in the center of the East European Plain, *Russian Journal of Ecology*, 2018, no. 3, p. 218–225.
- Prokushkin A.S., Karpenko L.V., Tokareva I.V. et al. Ugle-rod i azot v bolotah severnoj chasti Sym-Dubcheskogo mezhdurech'ja [Carbon and nitrogen in the bogs of the northern part of the Sym-Dubches interfluves], *Geografija i prirodnye resursy*, 2017, no. 2, p. 114–123, DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(114-123). (In Russian)
- Timoshenko E.S. Soderzhanie obshhego ugleroda i azota v perehodnyh i nizinyh torfah Brjanskoj oblasti [Content of the total carbon and nitrogen in transitional and lowland peat in Bryansk region], *Agrohimicheskij vestnik*, 2013, no. 2, p. 21–22. (In Russian)
- Titljanova A.A., Vishnjakova E.K. Izmenenie produktivnosti bolotnyh i travjanyh jekosistem po shirotnomu gradient [Productivity changes of wetland and grassland ecosystems along a latitudinal gradient], *Pochvy i okruzhajushhaja sreda*, 2022, no. 2, p. 1–19, DOI: 10.31251/pos.v5i2.176. (In Russian)
- Uglerod v ekosistemah lesov i bolot Rossii [Carbon in forest and bog ecosystems of Russia], V.A. Alekseev, R.A. Berdsi (eds.), Krasnojarsk, In-t lesa SO RAN Publ., 1994, 224 p. (In Russian)
- Vitt D.H., Halsey L.A., Bauer I.E., Campbell C. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene, *Canadian Journal of Earth Science*, 2000, vol. 37, p. 683–693.

- Volkova E.M., Leonova O.A., Boikova O.I. et al. Carbon accumulation dynamics of the Klukva peatland at the southern boundary of broad-leaved forest zone in European Russia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1093, 012006, DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012006.
- Volkova E.M., Leonova O.A., Mironov V.V. Paleoekologicheskie uslovija i akumuljacija ugleroda v genezise poimennogo bolota Srednerusskoj vozvyshehnosti [Paleoecological conditions and carbon accumulation in genesis of inundated mire of Mid-Russian Upland], *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, no. 14(6), p. 70–91, DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-70-91. (In Russian)
- Vomperskij S.Je. *Rol' bolot v krugovorote ugleroda* [Role of bogs in the carbon cycle], Moscow, Nauka Publ., 1994, 37 p. (In Russian)
- Yamashkin A.A. *Fiziko-geograficheskie uslovija i landshafty Mordovii* [Physical-geographical conditions and landscapes of Mordovia], Saransk, Izd-vo Mordovskogo unta, 1998, 156 p.
- Yu Z. Peatlands and Their Role in the Global Carbon Cycle, *Eos*, 2011, vol. 92(12), p. 97–98.
- Zauer E.A. Sovremennye avtomaticheskie CNS/O/X-analizatory organicheskikh soedinenij [Modern automatic CNS/O/X organic compound analyzers], *Analitika i kontrol*, 2018, no. 1, p. 6–19. (In Russian)
- Web source*
Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 08.02.2021 no. 76 “O merah po realizacii gosudarstvennoj nauchno-tehnicheskoy politiki v oblasti jekologicheskogo razvitija Rossijskoj Federacii i klimaticheskikh izmenenij”, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102080007#:~:text=Ukaz%20Prezidenta%20Rossijskoj%20Federacii%20ot%2008.02.2021%20№%2076,Rossijskoj%20Federacii%20i%20klimaticheskikh%20izmenenij%22%20Nomer%20opublikovanija%3A%200001202102080007> (access date 10.03.2024). (In Russian)

Received 22.03.2024

Revised 15.04.2024

Accepted 24.04.2024