

УДК 551.438.222

## Динамика развития, палеоэкологические условия и накопление углерода в генезисе олиготрофного болота на Среднерусской возвышенности

*Леонова О. А., Волкова Е. М.*

*Тульский государственный университет  
Тула, Россия  
Ya.oly2012@yandex.ru, convallaria@mail.ru*

Олиготрофное болото Клюква (1 га), расположенное в понижении задровых отложений долины Оки в северной части Среднерусской возвышенности, образовалось более 9 тыс. лет назад и является одним из наиболее древних болот этой территории. Реконструкция развития болота по результатам изучения ботанического состава торфа позволила выделить в генезисе болотной экосистемы 2 этапа. Наиболее продолжительным был мезотрофный этап, начавшийся в бореальном периоде и завершившийся в середине субатлантического периода голоцена. Олиготрофный этап в развитии болота является наиболее «молодым» – переход к этому этапу начался примерно 1000 лет назад. Скорость вертикального прироста торфяных отложений в генезисе болота варьировала от 0,15 до 0,9 мм/год, что обусловлено как климатическими показателями голоцена, так и локальными факторами. Вертикальный прирост торфяной залежи способствовал аккумуляции углерода со скоростью, в среднем, 43 г/м<sup>2</sup>/год. Наиболее интенсивным этот процесс был в атлантическом периоде голоцена, когда аккумуляция углерода достигала 219 г/м<sup>2</sup>/год. В результате длительного развития болота запасы углерода в торфяной залежи составили 3,24 тонн. Это означает, что олиготрофные болота на южной границе своего распространения, несмотря на небольшие площади, продолжают функционировать как «депо» углерода.

*Ключевые слова:* болото, генезис, аккумуляция углерода, Среднерусская возвышенность.

### ВВЕДЕНИЕ

Болота – природные экосистемы, выполняющие комплекс важнейших биосферных функций. Одной из таких функций является участие болот в биогеохимическом круговороте веществ, что проявляется в депонировании углерода в торфяных отложениях. Пул углерода определяется соотношением между связыванием углекислого газа болотной растительностью в процессе фотосинтеза и эмиссией углекислоты при дыхании растений и разложении органического вещества. По существующим расчетам, болота среди наземных экосистем остаются основным резервуаром накопления углерода (Gorham, 1991; Bridgham et al., 2006; Charman et al., 2009; IPCC, 2013; Ratcliffe, Payne, 2016; Zhang et al., 2018). При этом, наиболее активно этот процесс протекает на болотах таежной зоны северного полушария (Gorham, 1991; Turunen et al., 2002; Ratcliffe et al., 2018) – в торфяных отложениях болот аккумулировано более 30 % запасов почвенного углерода, что обусловлено комплексом природных условий, обеспечивающих высокую продуктивность растительности и низкую скорость разложения растительных остатков (Вомперский, 1994; Dorepaal et al., 2009; Yu et al., 2010; Yu, 2011; Crowther et al., 2016).

Болота в зонах широколиственных лесов и лесостепи Европейской части России, в целом, не вносят существенного вклада в суммарное поглощение углерода заболоченными территориями России, что связано с низкой заболоченностью таких регионов (Сирин, Минаева, 2001). Однако вклад болот разных типов крайне неоднозначен и потому отсутствие сведений об особенностях функционирования болот, сформированных в разных геолого-геоморфологических условиях, не позволяет в полной мере оценить их роль в круговороте углерода (Волкова, 2011; Olchev et al., 2013; Волкова и др., 2017). При этом, важно отметить, что именно на границе зоны широколиственных лесов и лесостепи проходит южная граница распространения олиготрофных болот, являющихся основным «депо» углерода. Выявление

специфики функционирования болот в таких условиях позволит на новом уровне оценить роль болотных экосистем внетаежных регионов в аккумуляции углерода.

Целью данной работы является изучение этапов развития и интенсивности аккумуляции углерода в генезисе олиготрофного болота, расположенного на южной границе зоны широколиственных лесов в Европейской части России, а также оценка запасов углерода в торфяной залежи олиготрофного болота.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом данного исследования явилось олиготрофное болото Клюква (53.834812 с. ш., 36.252488 в. д.), расположенное в центральной части Восточно-Европейской равнины, в северной части Среднерусской возвышенности, в западной части Тульской области (рис. 1). Регион характеризуется умеренно-континентальным климатом. Среднегодовая температура воздуха на метеостанции в Туле составляет +5,5 °С, а количество осадков около 600 мм в год. Зональная растительность представлена хвойно-широколиственными лесами (с участием *Picea abies*, *Pinus sylvestris*).



Рис. 1. Географическое расположение болота Клюква (■) на территории Тульской области

В геологическом строении территории доминируют известняки карбонового возраста, которые залегают близко к поверхности. Это приводит к активным карстовым процессам, в результате чего формируются провалы, способные к заболачиванию.

Болото Клюква образовано в карстово-суффозионном понижении на склоне водораздела по правому берегу реки Ока (Белевский район) и занимает площадь 1 га (Волкова, 2011). Питание осуществляется слабоминерализованными грунтовыми водами и атмосферными осадками, что способствует формированию олиготрофной растительности (рН 2,8–2,9; минерализация 42 мг/л) (Волкова и др., 2017, 2019). В растительном покрове болота доминируют сосново-пушицево-сфагновые сообщества. Древостой формирует *Pinus sylvestris* высотой 10–12 метров. В травяно-кустарничковом ярусе высоким обилием характеризуются *Oxycoccus palustris* и *Eriophorum vaginatum* на микроповышениях (кочках) и *Carex rostrata* в мочажинах и межкочечных понижениях. Моховой покров формируют *Sphagnum magellanicum*, *S. angustifolium*, *S. fallax* (Волкова и др., 2019). Торфяная залежь болота имеет мощность 250 см и подстилается зандровыми песками.

Болото Клюква является уникальным элементом ландшафта региона, что обусловлено не только специфичной растительностью, но и временем возникновения экосистемы. Результаты радиоуглеродного датирования нижних образцов торфяной залежи свидетельствуют о возникновении болота в бореальный период голоцена – 9332±117 лет назад (калиброванный возраст) (Волкова и др., 2020), что позволяет рассматривать болото как репрезентативный объект для реконструкции палеоэкологических условий голоцена на южной границе леса.

Отбор образцов торфа для проведения комплекса биологических и химических исследований проводили в ходе бурения торфяной залежи в наиболее глубокой части болота при помощи торфяного бура конструкции Инсторфа (ныне – Восточно-Европейский институт торфяного дела) (Волкова, 2009). В образцах торфа определяли степень разложения, состав растительных остатков, объемный вес, зольность, кислотность и содержание органического углерода.

Степень разложения торфа (R, %) определяли микроскопическим методом как процент аморфной массы, состоящей из продуктов разложения и тканей без клеточной структуры (Лиштан, Король, 1975). Образцы торфа для анализа растительных остатков (каждые 5–10 см керн) промывали под водой через сито с диаметром ячеек 0,25 мм. Затем остатки растений просматривали под бинокулярным микроскопом и идентифицировали в соответствии с определителями (Домбровская и др., 1959). Содержание остатков растений конкретного вида отражали в процентах от общего объема макрофоссилий в образце.

По результатам анализа растительных остатков во всех образцах торфа была построена стратиграфическая диаграмма ботанического состава торфяной залежи болота Клюква в программе «Cogr» (Кутенков, 2013). На основании этой диаграммы были выделены этапы развития болота. Для каждого этапа характерно одно или несколько палеосообществ, которые названы по доминирующим остаткам видов растений.

Видовой состав палеосообществ отражает экологические особенности болотного биотопа в конкретный временной период. Экологические параметры палеосообществ оценивали на основе результатов ботанического анализа торфа с применением к видовому составу каждого палеосообщества амплитудных шкал Д. Н. Цыганова, а также точечных экологических шкал Г. Элленберга и Э. Ландольта (Ellenberg, 1974; Landolt, 1977). Для анализа использовали такие параметры, как увлажнение, трофность, богатство биотопов азотом и кислотность.

Для определения «возраста» палеосообществ в образцах торфа с конкретной глубины методом радиоуглеродного датирования в радиоуглеродной лаборатории Института географии РАН определяли содержание C<sup>14</sup>. Полученные результаты были откалиброваны с использованием программы Calib 9.0 и калибровочного набора данных Intcal09 (Reimer et al., 2013). На основании полученных результатов была рассчитана скорость вертикального роста торфа (мм/год).

Для каждого образца торфа по профилю торфяной залежи определен объемный вес (Chambers et al., 2011). Для этого образцы влажного торфа размером 1 см<sup>3</sup> извлекали из кернов и помещали в металлический бокс, сушили при 105 °С, а затем взвешивали. Влажность торфа также определяли весовым методом. Актуальную кислотность образцов торфа определяли в водной суспензии при помощи рН-метра Combo.

Для определения зольности сухой образец торфа с известной массой сжигали в муфельной печи при температуре 800–820 °С и выдерживали при этой температуре до постоянной массы. Образовавшуюся золу взвешивали. Зольность торфа рассчитывали как отношение массы золы к массе торфа (в %). Долю органического вещества в каждом образце торфа (%) определяли как: 100 % – зольность (%).

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

Запас углерода в каждом горизонте торфяной залежи рассчитывали, исходя из произведения содержания углерода (%) и объемного веса торфа. Послойное суммирование

запасов в горизонтах залежи позволило определить запас углерода на 1 м<sup>2</sup> болота, а затем рассчитать запас углерода в торфяной залежи болота в целом (с учетом площади болота).

Для оценки скорости накопления углерода (гС/м<sup>2</sup>/год) палеосообществами болота Клюква содержание углерода (%) каждого образца торфа умножали на его объемный вес (г/см<sup>3</sup>) и на соответствующую вертикальную скорость прироста торфа (мм/год) (Tugunen et al., 2002).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты радиоуглеродного датирования показали, что болото Клюква образовалось более 9 тыс. лет назад (табл. 1). Скорость накопления торфа в процессе развития болота варьировала от 0,16 до 0,9 мм/год, что обусловлено, в первую очередь, климатическими условиями, а также антропогенным воздействием на окружающий ландшафт (Novenko et al., 2015).

Таблица 1

Результаты радиоуглеродного анализа образцов торфа болота Клюква и их калиброванные даты

Номер образца	Материал	Глубина, см	Радиоуглеродный возраст, 14С л.н.	Калиброванный возраст (1σ), кал.л.н.
IG RAN 4062	Торф	30–40	1050±70	985 (917–1056)
IG RAN 4064	«	60–70	2400±70	2420 (2346–2495)
IG RAN 4063	«	130–140	4880±70	5620 (5582–5664)
IG RAN 4058	«	220–230	6980±80	7800 (7730–7869)
IG RAN 4049	«	240–250	8140±100	9135 (8992–9273)
IG RAN 4069	Гиттия	265–270	8350±100	9370 (9256–9483)

Результаты ботанического анализа торфяной залежи показали, что в генезисе болота можно выделить 2 этапа: мезотрофный и олиготрофный. Детальный анализ остатков растений в торфе позволил реконструировать динамику растительных сообществ в процессе развития болота (рис. 2). На первой стадии мезотрофного этапа (рис. 2, 1-я стадия) в результате аккумуляции грунтовых и делювиальных вод образовалось палеосообщество гигрофильных трав (*Phragmites australis*, *Menyanthes trifoliata*, *Calla palustris*, *Calamagrostis canescens*, *Comarum palustre*, *Scirpus sylvaticus*, *Carex lasiocarpa*, *C. rostrata* и др.). Среди мхов наиболее высоким обилием характеризовались сфагновые мхи и, особенно, *Sphagnum fallax*, диагностирующий бедное водно-минеральное питание (Волкова и др., 2019). Подстилающие пески способствовали периодическому подсыханию болотного биотопа, что способствовало активному разложению отмерших растительных остатков и обеспечило высокую степень разложения торфа (R=35–50 %). Скорость вертикального прироста торфа на этой стадии составляла 0,9 мм/год (рис. 3), что обусловлено климатическими условиями бореального периода.

На 2-й стадии развития болота (7,5–8 тыс. лет назад) произошло разрастание *Menyanthes trifoliata*, увеличилось обилие сфагновых мхов, отмечено внедрение *Eriophorum* sp., что указывает на продолжающееся обеднение водно-минерального питания и сохранение мезотрофного характера травяно-сфагнового палеосообщества, но при этом свидетельствует о снижении влажности биотопа. Скорость торфообразовательного процесса в таких условиях снизилась до 0,15 мм/год.

Динамика развития, палеоэкологические условия и накопление углерода  
в генезисе олиготрофного болота на Среднерусской возвышенности

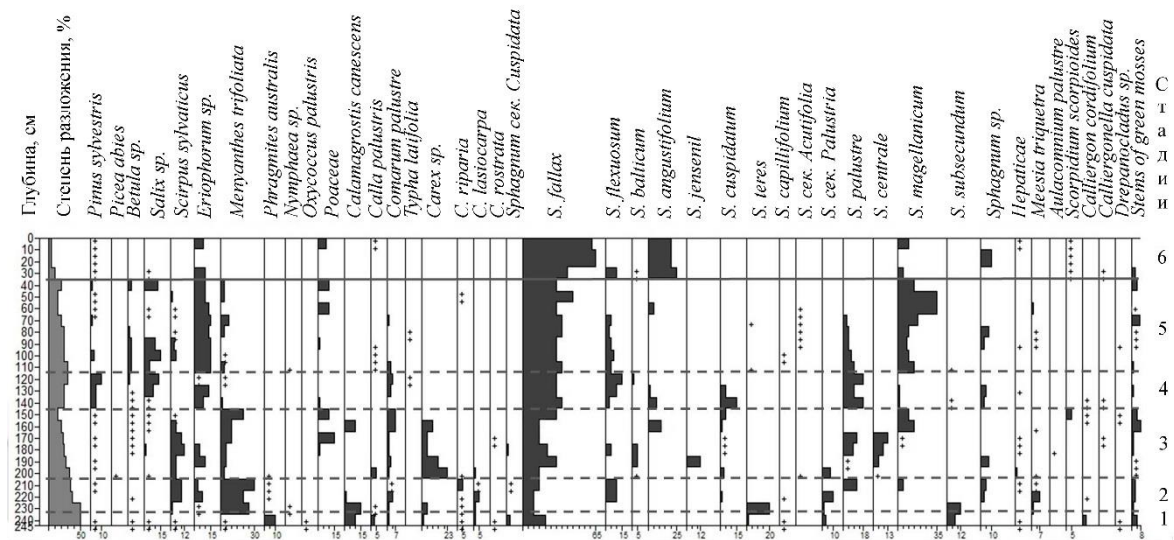


Рис. 2. Стратиграфическая диаграмма и стадии развития болота Клюквя  
Мезотрофный этап: 1–3 – травяно-сфагновая; 4 – сфагновая и древесно-сфагновая; 5 – травяно-сфагновая и сфагновая стадии. Олиготрофный этап: 6 – сфагновая стадия.

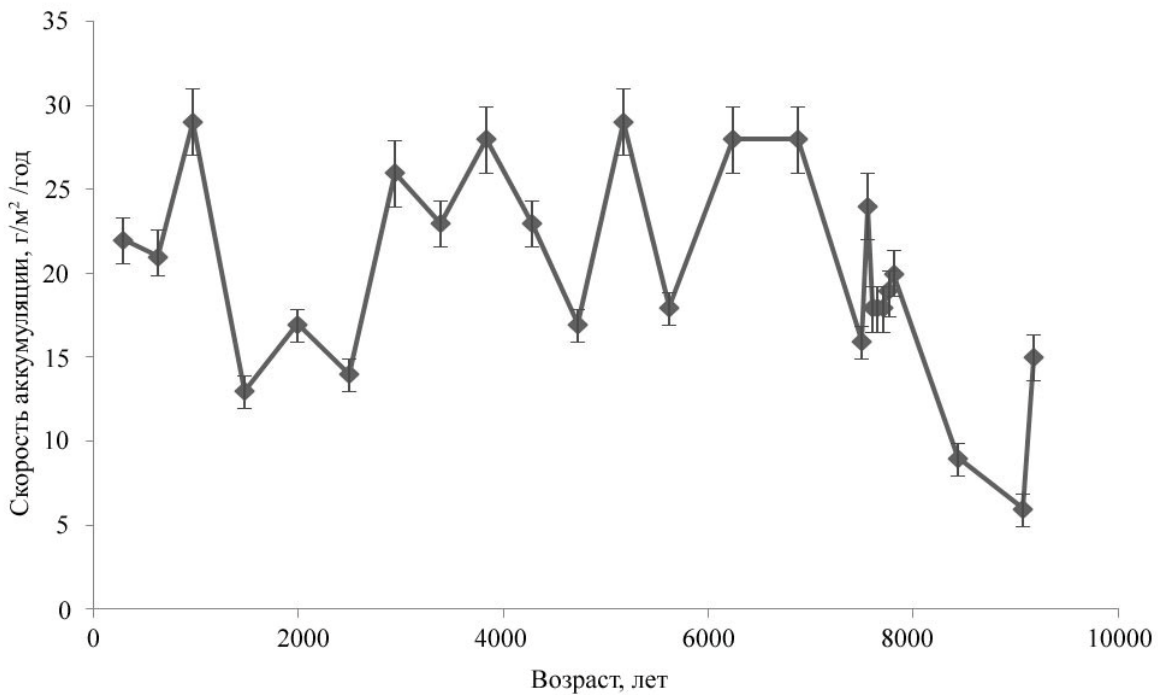


Рис. 3. Скорость аккумуляции углерода в генезисе болота Клюквя

К середине атлантического периода (6,5–7 тыс. лет назад) увеличивается влажность климата (Новенко и др., 2014), что коррелирует со снижением степени разложения торфа (20–25 %) и увеличением интенсивности его вертикального прироста до 0,4 мм/год. В составе палеосообществ увеличивается доля осок, *Sphagnum magellanicum* и *S. fallax*, появляется *S. angustifolium*, а также происходит снижение обилия *Menyanthes trifoliata* и *Scirpus sylvaticus* (рис. 2, 3-я стадия).

В суббореальном периоде (4–5,5 тыс. лет назад) доминирующими в растительном покрове болота Клюквя становятся сфагновые мхи (*Sphagnum fallax*, *S. flexuosum*, и др.)

(рис. 2, 4-я стадия). В этот период комплекс природных условий способствовал снижению уровня грунтовых вод (Novenko, 2015), что привело к повышению степени разложения торфа ( $R=25-30\%$ ) и уменьшению интенсивности торфообразовательного процесса до 0,22 мм/год. В таких условиях на болото начинают вселяться древесные породы (*Pinus sylvestris*, *Betula* sp., *Salix* sp.). Как видно, растительность на данной стадии развития болота представлена сфагновым и древесно-сфагновым палеоценозами.

В конце суббореального – начале субатлантического периода (2,5–3,5 тыс. лет назад) произошло увеличение доли атмосферных осадков, что способствовало разрастанию *Eriophorum* sp., *Sphagnum magellanicum* и *S. fallax* (рис. 2, 5-я стадия). В таких условиях степень разложения торфа снижается ( $R=15-20\%$ ), но скорость вертикального прироста болота существенно не меняется.

Вторая половина субатлантического периода (915–1058 лет назад) характеризуется формированием олиготрофных условий, в которых формируются сфагновые палеосообщества с участием *Sphagnum angustifolium*, *S. magellanicum*, *S. fallax*, *Eriophorum* sp. Переход к новому этапу развития сопровождается небольшим увеличением скорости торфообразовательного процесса – 0,3 мм/год.

Таким образом, реконструкция сукцессионного развития палеорастительности болота Клюква, проведенная на основании результатов ботанического состава торфов, позволила восстановить динамику палеосообществ на разных стадиях/этапах развития. Формирование болота началось в конце бореального периода голоцена с мезотрофного этапа, что обусловлено бедностью водно-минерального питания. Переход на атмосферное питание, начавшийся в середине субатлантического периода, диагностирует начало олиготрофного этапа. Как видно, важнейшим фактором развития болота является обеднение водно-минерального питания.

Динамику палеоэкологических показателей в генезисе болота Клюква отражают значения разных экологических шкал (табл. 2).

Таблица 2

Экологические параметры болотных биотопов для разных палеосообществ в генезисе болота Клюква (по результатам применения экологических шкал)

Палеосообщества	Увлажнение			Трофность	Богатство азотом			Кислотность		
	1	2	3	1	1	2	3	1	2	3
Сфагновое	15,8	7,4	4,3	4,4	4,2	2,5	1,8	6,7	2,5	1,9
Травяно-сфагновое и сфагновое	15,8	7,7	4,5	5,0	4,2	3,1	1,9	6,0	3,0	2,0
Сфагновое и древесно-сфагновое	15,8	7,7	4,7	4,6	4,5	3,2	2,0	6,0	2,8	2,0
Травяно-сфагновое	15,9	8,0	4,7	5,4	4,2	3,5	2,3	6,0	3,1	2,4

Примечание к таблице. Экологические шкалы: 1 – Д. Н. Цыганова; 2 – Г. Элленберга; 3 – Э. Ландольта (обозначается в баллах).

Анализ изменения влажности биотопа в генезисе болота Клюква, исходя из значений экологических шкал Д. Н. Цыганова, свидетельствует о стабильности этого параметра в генезисе болота – условия характеризовались как сыро-лесолуговые/болотно-лесолуговые. Применение шкал Э. Ландольта и Г. Элленберга отражает некоторую динамику увлажнения – условия меняются от влажных, что характерно для начальной стадии (травяно-сфагновое палеосообщество) до сырых при переходе к олиготрофному этапу развития болота. В целом,

значения разных шкал характеризуют низкую изменчивость данного параметра. Сделанный вывод подтверждают результаты изучения влажности торфяных образцов по профилю залежи (в среднем, 1808 %, варьируя от 1108 до 3080 %) (рис. 4).

Трофность биотопов также варьирует несущественно, что отражают шкалы Д. Н. Цыганова. В генезисе болота по обеспеченности питательными веществами биотопы следует характеризовать как бедные/небогатые. Однако, для травяно-сфагнового палеосообщества мезотрофного этапа показатели имеют более высокие значения, что диагностирует поступление питательных веществ с делювиальными и грунтовыми водами на ранних стадиях развития болота. При переходе к олиготрофному этапу (сфагновое палеосообщество) показатель снижается, что обусловлено изменением водно-минерального питания биотопа в результате увеличения доли атмосферных осадков.

Особенности водно-минерального питания палеосообществ в генезисе болота можно охарактеризовать по зольности образцов торфа. По профилю торфяной залежи показатели зольности являются низкими (3–9 %). Увеличение значений на глубине 170–190 см до 14 % (рис. 4) коррелирует с наличием в торфах остатков древесных пород, поселение которых стало возможно в суббореальный период (рис. 2, 3-я стадия). Как видно, данные по зольности торфов не коррелируют со значениями экологических шкал, что свидетельствует об ограниченности последних и необходимости применения комплексного подхода к реконструкции условий водно-минерального питания в генезисе болота.

По обеспеченности азотом условия болотных биотопов можно охарактеризовать как бедные или очень бедные. При этом, шкалы Г. Элленберга отражают снижение доступности азотистых соединений по мере накопления торфяных отложений, то есть в генезисе болота биотопы становятся беднее по мере перехода от мезотрофного к олиготрофному этапу. Сходную тенденцию отражают шкалы Э. Ландольта: по обеспеченности азотом болотные биотопы на мезотрофном этапе развития являются бедным, а на олиготрофном этапе – очень бедными. По шкалам Д. Н. Цыганова отличий на разных стадиях/этапах развития болота не обнаружено и условия остаются стабильными (бедные азотом). Это свидетельствует об ограниченности применения шкал Д. Н. Цыганова для выявления динамики обеспеченности биотопов азотом в генезисе болота.

По кислотности биотопы болота являются кислыми или слабокислыми. Применение шкал Г. Элленберга и Э. Ландольта показало, что на протяжении всего развития болота условия следует характеризовать как кислые. Шкалы Д. Н. Цыганова отражают изменение условий биотопов от слабокислых на мезотрофном этапе до кислых – на олиготрофном. Для подтверждения выявленных закономерностей изменения кислотности биотопов в генезисе болота была изучена кислотность водных вытяжек из торфяных образцов по профилю залежи. Полученные значения pH варьируют в пределах 2,4–3,4 (табл. 2), что диагностирует торфа (и, соответственно, палеоусловия) как мезо- и олиготрофные.

Таким образом, развитие болота Клюква проходило в бедных условиях водно-минерального питания. На ранних этапах генезиса питание более минерализованными водами обеспечило произрастание как мезотрофных, так и эвтрофных видов. Дальнейшее обеднение водно-минерального питания болота способствовало переходу от мезотрофного к олиготрофному этапу развития. Применение экологических шкал Д. Н. Цыганова, Г. Элленберга и Э. Ландольта отражает общий характер изменчивости условий биотопов. Наиболее детально изменение трофности характеризуют шкалы Д. Н. Цыганова, а обеспеченность азотом – шкалы Г. Элленберга.

Палеосообщества в разных экологических условиях с разной интенсивностью депонировали атмосферный углерод в органическом веществе. Для определения запасов и динамики накопления углерода в генезисе болота Клюква проведено определение содержания органического вещества и объемного веса образцов торфа по профилю залежи (рис. 4). Результаты показали, что объемный вес варьирует от 0,14 до 0,53 г/см<sup>3</sup> и, в среднем, составляет 0,26 г/см<sup>3</sup>. Максимальные значения характерны для торфов с наиболее высокой долей древесных остатков, залегающих на глубине 90–120 см (R=25–30 %). В единице объема торфа (1 см<sup>3</sup>) доля органического вещества варьирует от 85,7 до 97 %. При этом, массовая

доля углерода в торфах составляет 44–58 % (по результатам элементного анализа). Расчет содержания углерода в торфах по профилю залежи болота показал, что данный параметр варьирует от 41 % до 57 % (рис. 4). При этом, наиболее низкие значения (41–43 %) свойственны верховым торфам, которые характеризуются высокой долей сфагновых мхов, низкой степенью разложения и минимальными значениями объемного веса. Увеличение содержания углерода до 57 % характерно для переходных торфов с высокой долей древесных остатков (130–140 см).

Определение запасов углерода в образцах по профилю торфяной залежи болота Клюква показало, что в каждом десятисантиметровом слое содержится, в среднем, 13 кгС/м<sup>2</sup>. В самом нижнем горизонте запасы углерода составили 12,6 кг/м<sup>2</sup>. Наиболее высокие значения (29–51 кгС/м<sup>2</sup>) характерны для сфагнового и древесно-сфагнового переходных торфов (глубины 90–100 и 200–210 см), что отражает функционирование соответствующих палеосообществ в суббореальном периоде.

Общий запас углерода на 1 кв. метре болота составляет 324,8 кг. По данному показателю функционирование болота Клюква не имеет существенных отличий от болот бореальной зоны (Holmquist et al., 2014). В целом, болото Клюква, имеющее площадь 1 га, содержит около 3,24 тыс. тонн углерода. В общих запасах аккумулированного углерода такие показатели невелики (Инишева, Головацкая, 2002; Hribljan et al., 2014; Бабилов, Кобак, 2016), однако они свидетельствуют о том, что олиготрофные болота на южной границе распространения в Европейской России продолжают функционировать как «депо» углерода. Изучение интенсивности аккумуляции углерода в генезисе болота показало, что по мере вертикального прироста торфа, начиная с бореального периода голоцена, происходило накопление углерода со средней скоростью 43,8 г/м<sup>2</sup>/год (рис. 4).

На начальной стадии развития болота (более 9000 кал. лет назад) скорость торфонакопления была максимальна – 0,9 мм/год. Это обеспечило аккумуляцию углерода со скоростью 113 г/м<sup>2</sup>/год мезотрофными травяно-сфагновыми палеоценозами (рис. 4). Согласно Е. Новенко (2015), климат в этот период был холоднее, чем сегодня, что, наряду с интенсивным увлажнением и достаточно богатым водно-минеральным питанием, способствовало активному депонированию углерода в торфе. Столь высокие показатели отмечены и на болотах Западной Сибири, особенно – в пребореальном и бореальном периодах, когда скорость аккумуляции углерода достигала 70–137 г/м<sup>2</sup>/год (Лапшина, 2002; Инишева, 2012).

Позднее, скорость прироста торфа снижается до 0,16 мм/год и интенсивность аккумуляции углерода составляет 13–17 г/м<sup>2</sup>/год. Это коррелирует с тем, что примерно 8000 кал. лет назад показатели среднегодовых температур увеличились (Novenko et al., 2015), что усилило разложение торфа и снизило скорость депонирования углерода.

Примерно 7000 лет назад в атлантический период, являющийся климатическим оптимумом голоцена, скорость вертикального прироста торфа увеличивается до 0,43 мм/год, что обусловлено увеличением влажности болотного биотопа, разрастанием сфагновых мхов и снижением степени разложения отмерших растительных остатков. Это сопровождалось увеличением аккумуляции углерода в торфяных залежах до 219 г/м<sup>2</sup>/год.

В суббореальном периоде состоянии окружающих болото ландшафтов существенно меняется, что связано как с климатическими изменениями (климат стал теплее и суше), так и с деятельностью человека. Снижение влажности болотного биотопа и увеличение зольности древесно-сфагнового торфа свидетельствуют не только о локальных гидрологических изменениях, но и о распашке прилегающих земель и усилении эрозионного стока на болото (Novenko et al., 2015, 2017). Увеличение аэрации и трофности биотопа способствовало произрастанию на болоте древесных пород. Аккумуляция углерода в таком древесно-сфагновом палеосообществе происходила со скоростью 21–48 г/м<sup>2</sup>/год. Восстановление гидрологического режима и формирование сфагновых палеосообществ существенно не изменило интенсивность депонирования углерода. По этой причине максимальные значения скорости аккумуляции и запасов углерода в залежи отмечены для торфа, образовавшегося в этот период 2420–5620 лет назад.



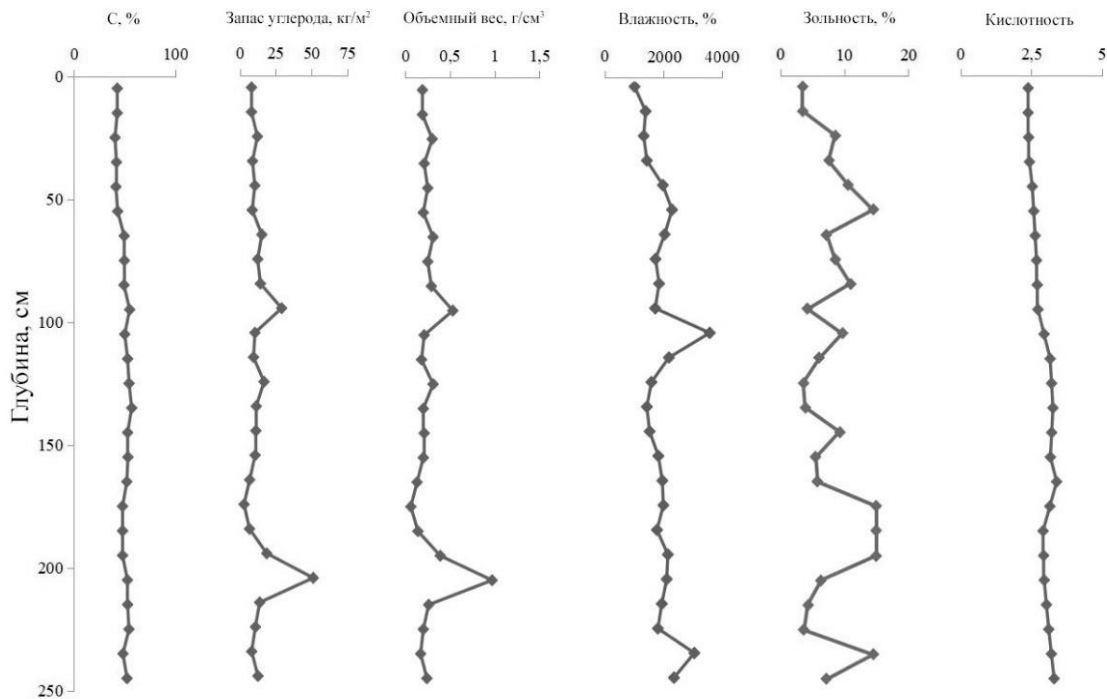


Рис. 4. Водно-физические и химические параметры торфов по профилю залежи болота Клюква

В начале субатлантического периода происходит снижение скорости накопления углерода до 16–20 г/м<sup>2</sup>/год, что обусловлено обеднением водно-минерального питания в результате увеличения доли атмосферных осадков. Доминирование сфагновых мхов и их низкая степень разложения обеспечивают формирование торфа с минимальным объемным весом. Во второй половине субатлантического периода (примерно 1000 лет назад) показатели стали возрастать, что коррелирует с увеличением скорости торфонакопления до 0,3 мм/год и приводит к накоплению углерода со скоростью 24 г/м<sup>2</sup>/год. Данная тенденция подтверждается и другими исследователями (Васильев, 2000; Лисс и др., 2001; Лапшина, 2004).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе развития олиготрофного болота Клюква расположенного в понижении зандровых отложений долины Оки в северной части Среднерусской возвышенности, нами выделено 2 этапа. Наиболее продолжительным был мезотрофный этап, представленный травяно-сфагновыми, древесно-сфагновыми и сфагновыми палеоценозами. Их формирование началось в бореальном периоде и завершилось в середине субатлантического периода голоцена. Вертикальный прирост торфа на этом этапе составлял в среднем 0,34 мм/год – это способствовало аккумуляции углерода палеосообществами со скоростью 43,8 г/м<sup>2</sup>/год. Наиболее активно депонирование углерода протекало в суббореальном периоде голоцена, что обусловлено формированием древесно-сфагновых палеоценозов под действием комплекса локальных факторов. В целом, развитие болота на мезотрофном этапе обеспечило 77,7 % запасов углерода в торфяной залежи.

Переход к олиготрофному этапу развития болота начался в середине субатлантического периода и сопровождался обеднением водно-минерального питания, доминированием в составе палеорастительности сфагновых мхов и формированием более кислых условий. Скорость прироста торфа составила на этом этапе в среднем 0,25 мм/год. Интенсивность накопления углерода сфагновыми палеосообществами составила 24 г/м<sup>2</sup>/год.

Полученные результаты показали, что в генезисе олиготрофного болота Клюква депонирование углерода протекало с разной скоростью, что обусловлено характером палеорастительности, формирование которой зависит в первую очередь от климатических условий голоцена, оказывающих влияние на гидрологический режим болота и окружающих его территорий. Продолжительность развития болота Клюква и выявленные достаточно высокие темпы аккумуляции углерода означают, что олиготрофные болота на южной границе своего распространения продолжают функционировать как «депо» углерода и играют важную роль в углеродном обмене с атмосферой.

### Список литературы

- Бабилов Б. В., Кобак К. И. Поглощение атмосферного углекислого газа болотными экосистемами территории России в голоцене. Проблемы заболачивания // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2016. – № 1. – С. 9–36.
- Васильев С. В. Скорость торфонакопления в Западной Сибири // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. – С. 56–59.
- Волкова Е. М. Методы изучения болотных экосистем. – Тула, 2009. – 5 с.
- Волкова Е. М. Пойменные болота северо-востока Среднерусской возвышенности // Ботанический журнал. – 2011. – Т. 96, № 4. – С. 503–514.
- Волкова Е. М., Акатова Е. В., Бойкова О. И., Хлытин Н. В. Химические и микробиологические аспекты торфообразовательного процесса на карстовых болотах Тульской области // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 2. – С. 3–15.
- Волкова Е. М., Новенко Е. Ю., Носова М. Б., Зацаринная Д. В. Динамика развития водораздельных болот на южной границе леса в Европейской России // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2017. – Т. 122, № 1. – С. 47–59.
- Волкова Е. М., Новенко Е. Ю., Юрковская Т. К. Возраст болот Среднерусской возвышенности // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2020. – № 84 (4). – С. 551–561.
- Волкова Е. М., Ольчев А. В., Каратаева Т. А., Новенко Е. Ю. Оценка вклада растительных сообществ водораздельных карстово-суффозионных болот в CO<sub>2</sub>-обмен // Современная ботаника в России. Труды XIII Съезда Русского ботанического общества и конференции «Научные основы охраны и рационального использования растительного покрова Волжского бассейна» (Тольятти 16–22 сентября, 2013 г.). Систематика и география сосудистых растений. Сравнительная флористика. Геоботаника. Тольятти, Кассандра, 2013. – Т. 2. – С. 181–182.
- Вомперский С. Э. Роль болот в круговороте углерода // Биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование. М., Наука, 1994. – С. 5–37.
- Домбровская А. В., Коренева М. М., Тюремнов С. Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. Москва, 1959. – 137 с.
- Инишева Л. И., Головацкая Е. А. Элементы углеродного баланса олиготрофных болот // Экология. – 2002. – № 4. – С. 261–266.
- Инишева Л. И., Сергеева М. А., Смирнов О. Н. Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. Естественные науки и экология. – 2012. – № 7. – С. 61–74.
- Кутенков С. А. Компьютерная программа для построения стратиграфических диаграмм состава торфа «Корри» // Труды КарНЦ РАН. Серия экологические исследования. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. – № 6. – С. 171–176.
- Лапшина Е. Д. Болота юго-востока Западной Сибири: автореф. дисс. ... докт. биол. наук. – Томск, 2004. – 512 с.
- Лапшина Е. Д., Мульдьяров Е. Я. Основные этапы развития Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. – Томск, 2002. – С. 36–44.
- Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н. А. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. – Тула: Гриф и К, 2001. – 584 с.
- Лиштван И. И., Король Н. Т. Основные свойства торфа и методы их определения. – Минск, 1975. – 320 с.
- Новенко Е. Ю., Цыганов А. Н., Волкова Е. М., Бабешко К. В., Мазей Ю. А. Динамика ландшафтов и климата на северо-западе Среднерусской возвышенности в голоцене // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2014. – № 6. – С. 24–31.
- Сирин А. А., Минаева Т. Ю., Новиков С. М., и др. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / [Под ред. А. А. Сирина и Т. Ю. Минаевой]. Москва: Геос. – 2001. – 190 с.
- Bridgman S. D., Megonigal J. P., Keller J. K., Bliss N. B. and Trettin C. The carbon balance of North American wetlands // Wetlands. – 2006. – Vol. 26 (4). – pp. 889–916.
- Chambers F. M., Beilman D. W. and 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. – 2011. – Vol. 7 (07). – pp. 1–10.
- Charman D. J., Barber K. E., Blaauw M., Langdon P. G., Mauquoy D., Daley T. J., Hughes P. D. M. and Karofeld Climate drivers for peatland palaeoclimate records // Quaternary Science Reviews. – 2009. – Vol. 28. – pp. 1811–1818.

- Crowther T. W. et. al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming // *Nature*. – 2016. – Vol. 540. – pp. 104–108.
- Dorrepaal E., Toet S., van Logtestijn R. S. P., Swart E., van de Weg M. J., Callaghan T. V., Aerts R. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic // *Nature*. – 2009. – Vol. 460. – pp. 616–619.
- Ellenberg, H. *Ziegerwerte der Gefaspflanzen Mitteleuropas* // *Scripta geobotanica*. Gottingen. – 1974. – Vol. 9. – 197 p.
- Gorham E. Northern peatlands role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecological Applications*. – 1991. – Vol. 1. – pp. 182–195.
- Holmquist J. R., MacDonald G. M., Gallego-Sala A. Peatland Initiation, Carbon Accumulation, and 2 ka Depth in the James Bay Lowland and Adjacent Regions // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2014. – Vol. 46. – pp. 19–39.
- Hribljan J. A., Cooper D. J., Sueltenfuss J., Wolf E. C., Heckman K. A., Lilleskov E. A., Chimner R. A. Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia // *Mires and Peat*. – 2015. – Vol. 15(12). – pp. 1–14.
- IPCC. 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: Cambridge University Press). – 2013. – p. 33.
- Landolt, E. *Okologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora* // *Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Stiftung Rübel, in Zürich*. – 1977. – H. 64. – pp. 1–208.
- Lishtvan I. I., Korol N. T. Main features of peat and methods of identification (Minsk: Nauka i Technika). – 1975. – 319 p.
- Novenko E. Yu., Zyuganova I. S., Volkova E. M., Dyuzhova K. V. A 7000-year pollen and plant macrofossil record from the Mid-Russian Upland, European Russia: Vegetation history and human impact // *Quaternary International*. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.11.025>
- Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Babeshko K., Lavrentiev N., Payne R. and Mazei Yu. The Holocene palaeoenvironmental history of Central European Russia reconstructed from pollen, plant macrofossil and testate amoeba analyses of the Klukva peatland, Tula region // *Quaternary Research*. – 2015. – Vol. 83. – pp. 459–468.
- Olchev A., Volkova E., Karataeva T., Novenko E. Growing season variability of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and evapotranspiration of a sphagnum mire in the broad-leaved forest zone of European Russia // *Environmental Research Letters*. – 2013. – Vol. 8 (3). P.035051 (doi:10.1088/1748-9326/8/3/035051)
- Ratcliffe J., Andersen R., Anderson R., Newton A., Campbell D., Mauquoy D. and Payne R. Contemporary carbon fluxes do not reflect the long-term carbon balance for an Atlantic blanket bog // *Holocene*. – 2018. – Vol. 28 (1). – pp. 140–149.
- Ratcliffe J., Payne R. J. Palaeoecological studies as a source of peat depth data: A discussion and data compilation for Scotland // *Mires and Peat*. – 2016. – Vol. 18 (13). – pp. 1–7.
- 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. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 Years cal BP // *Radiocarbon*. – 2013. – Vol. 55. – pp. 1869–1887.
- Turunen J. Past and present carbon accumulation in undisturbed boreal and subarctic mires: A review // *Suo*. – 2003. – Vol. 54 (1). – pp. 15–28.
- Turunen J., Tomppo E., Tolonen K. and Reinikainen A. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions // *Holocene*. – 2002. – Vol. 12. – pp. 69–80.
- Yu Z. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications // *The Holocene*. – 2011. – Vol. 21 (5). – pp. 761–74.
- Yu Z., Loisel J., Brosseau D. P., Beilman D. W. and Hunt S. J. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum // *Geophysical Research Letters*. – 2010. Vol. 37 (13). – pp. 1–5.
- Zhang H., Gallego-Sala A. V., Amesbury M. J., Charman D. J., Piilo S. R., Väiranta M. M. Inconsistent Response of Arctic Permafrost Peatland Carbon Accumulation to Warm Climate Phases // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2018. – Vol. 32. – pp. 1605–1620.

**Leonova O. A., Volkova E. M. Dynamics of Development, Paleocological Conditions, and Carbon Accumulation in the Genesis of the Raised Bog on the Central Russian Upland** // *Ekosistemy*. 2022. Iss. 30. P. 167–178.

The raised bog Klukva (1 ha) located on the depression of fluvio-glacial deposits of the Oka river valley in the northern part of the Middle-Russian Upland. The bog was formed more 9000 cal years BP and now it is oldest peatland of the area. The reconstruction of the bog development based on microfossil analyses allowed to distinguish two stages in the ecosystem genesis. The mesotrophic stage, which began in the Boreal period of Holocene and ended in the middle of Subatlantic period was the longest one. The oligotrophic stage is the "youngest" in the bog development as the transition to this stage began about 1000 years ago. The rate of vertical growth of peat deposits in the bog genesis varied from 0.15 to 0.9 mm/year due to both Holocene climatic conditions and local factors. The vertical growth of the peat deposit contributed to the carbon accumulation at the average rate of 43 g/m<sup>2</sup>/year. This process was the most intense at the Atlantic period of Holocene, when the carbon accumulation reached 219 g/m<sup>2</sup>/year. As a result of the long-term development of the bog, the carbon reserves in the peat deposit amounted to 3.24 tons. It means that raised bogs on the southern border of their distribution, continue to function as a "depot" of carbon despite their small areas.

*Key words:* bogs, genesis, carbon accumulation, Central Russian Upland.

*Поступила в редакцию 24.06.22  
Принята к печати 01.08.22*