

УДК 631.4: 631.487:574.4

М.В. Бобровский¹, С.В. Лойко²**ВОЗРАСТ И ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА ТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОЧВ
«КАЛУЖСКИХ ЗАСЕК»**

Исследовано морфологическое строение темногумусовых почв в старовозрастных дубравах на Южном участке заповедника «Калужские засеки» (Калужская обл.). Темногумусовые почвы в основном приурочены к участкам с расчлененным рельефом, встречаются как на плакорных участках, так и на склонах. Они занимают небольшие площади внутри ареалов дерново-подзолистых и серых почв. Проведен анализ строения трех траншей длиной от 2,5 до 6,5 м в темногумусовых почвах на плакорах. Определен радиоуглеродный возраст 15 образцов.

Профили темногумусовых почв имеют строение AU-C. Содержание Сорг. на глубине 0–10 см составляет 4,4–8%, глубже его содержание в гор. AU варьирует от 1 до 3%. В профилях можно выделить два основных морфологических уровня: (1) «фоновый» гор. AU глубиной до 40–60 см и (2) «котлы» с материалом гор. AU глубиной до 120–130 см. Последние представляют древние западины ветровалов: образование глубоких вывалов и перемещение материала гор. AU в западины приводило к увеличению мощности гумусового горизонта. Гумусовые профили изученных почв «Калужских засек» являются наиболее мощными на Русской равнине среди описанных бескарбонатных почв с темногумусовым горизонтом AU.

Возраст темногумусовых почв «Калужских засек» в целом соответствует возрасту изученных ранее дневных почв лесостепи Русской равнины. Возраст гумуса в верхней части гор. AU варьирует от 230±150 до 2690±110 кал. л. н.; в нижней части – около 6000 кал. л. н. Возраст гумуса в западинах вывалов – от 4320±130 до 8170±140 кал. л. н., в большинстве случаев он больше, чем в нижней части «фоновых» гор. AU.

Мы предполагаем, что первоначально мощность вывалов не превышала 60 см; мощные вывалы (глубиной до 150 см) являются более молодыми. В пользу этой гипотезы говорят результаты анализа особенностей строения профилей, в том числе трещинной сети в гор. С (BC); возраста гумуса, образованного на материале Стурб. после ветровалов; разницы возраста «погребенного» в западинах гумуса и гумуса «фоновых» гор. AU. Предполагаемый возраст глубоких вывалов находится в интервале от 700 до 2700 кал. л. н. и в основном соответствует позднему голоцену.

Изученные почвы «Калужских засек» представляют пример непрерывного лесного почвообразования, в результате которого сформирован мощный темногумусовый профиль. При этом в них отсутствуют традиционные признаки черноземной «степной» и подзолистой «лесной» стадий голоценового почвообразования, выделяемые для многих почв лесостепи.

Ключевые слова: генезис почв, ветровал, морфология почв, радиоуглеродный возраст, дубравы

Введение. Вопросы генезиса почв юга лесной зоны и лесостепи издавна привлекали внимание исследователей. В значительной мере это внимание связано с проблемами динамики природных зон на границе лесной и лесостепной зон в голоцене и выявлением причин безлесия русских степей [Комаров, 1951; Мильков, 1952]. Основной тренд позднеголоценового генезиса почв лесостепи многие исследователи представляют как переход от формирования почв с темногумусовым (или черноземным) горизонтом к формированию текстурно-дифференцированных профилей [Чендев с соавт., 2017]. При этом основное число работ посвящено эволюции черноземов и серых почв [Александровский, Чичагова, 1998; Александровский, Александровская, 2005; Гоняный с соавт., 2007; Чендев с соавт., 2017], собственно темногумусовые почвы обычно не рассматриваются при эволюционных построениях. Основ-

ная причина этого – малое распространение данных почв на территории Среднерусской возвышенности.

Типичные темногумусовые почвы имеют строение профиля AU – C, где AU – темногумусовый горизонт, C – почвообразующая порода [Классификация и диагностика ..., 2004]. Темногумусовые почвы, которые послужили объектом данной работы, впервые были описаны в 1989 г. Е.В. Пономаренко и Г.Ю. Офман в ходе исследований, посвященных подготовке материалов для организации заповедника «Калужские засеки» [Пономаренко, 1999]. В дальнейшем нами были изучены особенности распространения темногумусовых почв и строение их профилей [Бобровский, 2010; Бобровский с соавт., 2012]. Однако до настоящего времени отсутствовали данные о возрасте этих почв. Основная задача настоящей работы – выявление особенностей генезиса темногумусовых почв на территории заповедника

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН, лаборатория моделирования экосистем, вед. науч. с., доцент, докт. биол. н. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, докт. биол. н.; e-mail: maxim.bobrovsky@gmail.com

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, ст. науч. с., канд. биол. н.; e-mail: s.loiko@yandex.ru

«Калужские засеки» на основе возраста разных структурных элементов (комплексов морфонов) почвенных профилей.

Материал и методы исследований. Исследования проводили на юго-востоке Калужской области, в 62 квартале Южного участка государственного природного заповедника «Калужские засеки» (бывш. 8 кв. Ягодненского лесничества). Территория заповедника, как и более широко известных «Тульских засек», по лесорастительному районированию относится к северной лесостепи [Курнаев, 1980], по геоботаническому районированию расположена в пределах неморальной полосы [Ahti et al., 1962; Восточноевропейские леса ..., 2004].

Заповедник расположен в пределах Русской платформы, в северо-западной части Среднерусской возвышенности. Преобладают высоты 150–250 м над ур. м., наивысшая точка – 275 м. Рельеф Южного участка заповедника представляет собой приподнятую равнину, густо расчлененную овражно-балочно-долинной сетью. Коренные породы представлены нижнемеловыми отложениями (глинами, песками и песчаниками). Почвообразующие породы представлены покровными лессовидными суглинками и глинами мощностью 10–20 м, перекрывающими отложения днепровской морены, которая вскрывается в балках [Государственная геологическая карта, 1961; Петров, 2003].

В соответствии с почвенно-экологическим районированием [Урусевская с соавт., 2013], исследуемый участок относится к Тульскому округу серых, светло-серых и темно-серых лесных тяжелосуглинистых и суглинистых почв на лессовидных отложениях Среднерусской провинции серых лесных почв. Почвенный покров заповедника характеризуется большим разнообразием автоморфных почв [Бобровский, 2010]. Наиболее широко распространены на песчаных почвообразующих породах дерновые альфегумусовые, а на суглинистых – дерново-подзолистые и серые почвы. Темногумусовые почвы занимают сравнительно небольшие площади внутри ареалов дерново-подзолистых и серых (редко темно-серых) почв. В основном они приурочены к участкам с расчлененным мезорельефом на территории Южного участка заповедника, где могут быть встречены как на плакорных участках, так и на склонах.

Исследования проводили на плакорном участке старовозрастной дубравы, являющейся фрагментом некогда сплошного широколиственного массива Козельской Дубенской засеки – части Заокской засечной черты, представлявшей линию обороны Московского государства в XVI–XVIII вв. [Яковлев, 1916; Бобровский, 2002]. В составе древесного яруса преобладают широколиственные виды *Quercus robur*, *Fraxinus excelsior*, *Tilia cordata*, *Ulmus glabra*, *Acer platanoides* и *A. campestre*, встречаются *Populus tremula*, *Betula verrucosa*. Возраст отдельных дубов превышает 300 лет, максимальный возраст других широколиственных видов – более 150 лет. В кустарниковом ярусе доминирует

Corylus avellana; кроме подроста широколиственных деревьев встречаются *Euonymus europaea*, *E. verrucosa*, *Lonicera xylosteum*, *Padus avium*. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют неморальные виды: *Aegopodium podagraria*, *Asarum europaeum*, *Galeobdolon luteum*, *Pulmonaria obscura*, *Stellaria holostea*, *Mercurialis perennis*, *Milium effusum* и др.; заметно участие *Lunaria rediviva*, *Matteuchia struteopteris*. Хорошо представлена флора эфемероидов (*Allium ussimum*, *Corydalis marschalliana*, *C. solida*, *Anemonoides ranunculoides* и др.) [Бобровский, Ханина, 2000].

В 2011 и 2014 гг. на исследуемом участке с целью реконструкции истории экосистем были описаны три траншеи длиной от 2,5 до 6,5 м, проведен детальный морфологический (морфогенетический) анализ профилей. В 2014 и 2016 гг. отобрано 15 образцов для определения возраста органического вещества и физико-химических свойств почв. Радиоуглеродное датирование выполнено в Институте геохимии и геофизики НАН Беларуси (IGSB), физико-химические анализы – в Центре коллективного пользования Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пущино). Окраску по системе Манселла определяли на спектрофотометре X-Rite VS450. Калибровка радиоуглеродных дат проведена при помощи калибровочной кривой IntCal13 [Reimer et al., 2013].

Результаты исследований и их обсуждение. Профили почв во всех траншеях в общем виде имеют строение AU – C. Гумусовый горизонт фоновых почв на исследованном участке можно разделить на два подгоризонта по изменению структуры: в AU1 она мелкокомковато-комковатая с копрогенными агрегатами, в AU2 многопорядковая, призмовидные отдельности размером 2х3 см распадаются на угловато-ореховатые агрегаты с неровными гранями. Гор. AU имеет темно-серую до черной окраску с коричневым или буроватым оттенком; цвет гор. AU1 по системе Манселла – 9.9YR 3.4/1.4, а AU2 – 9.8YR 3.6/1.6, что позволяет относить этот горизонт к темногумусовому [Полевой определитель ..., 2008]. Содержание Сорг. на глубине 0–10 см составляет от 4,4 до 8%, глубже его содержание в гор. AU варьирует от 1 до 3%. Гор. AU характеризуется нейтральной или слабокислой реакцией: pHводн. от 6 до 7, преобладают значения между 6,5 и 7. Сумма обменных оснований варьирует от 26 до 60 мг-экв/100. В пределах изученной толщи (250 см) карбонаты в профилях не обнаружены. Таким образом, описанные почвы по большинству параметров соответствуют центральному образу темногумусовых почв [Классификация и диагностика ..., 2004].

Мощность гор. AU в исследованных почвах составляет от 40–50 до 130 см (рис. 1). Нижняя поверхность гор. AU имеет форму чаш или котлов, наклонных слоев или комплексов пятен (комков). Часто по границе горизонтов AU и C встречается материал [AU+C], представляющий результат механического перемешивания горизонтов A и C, иног-

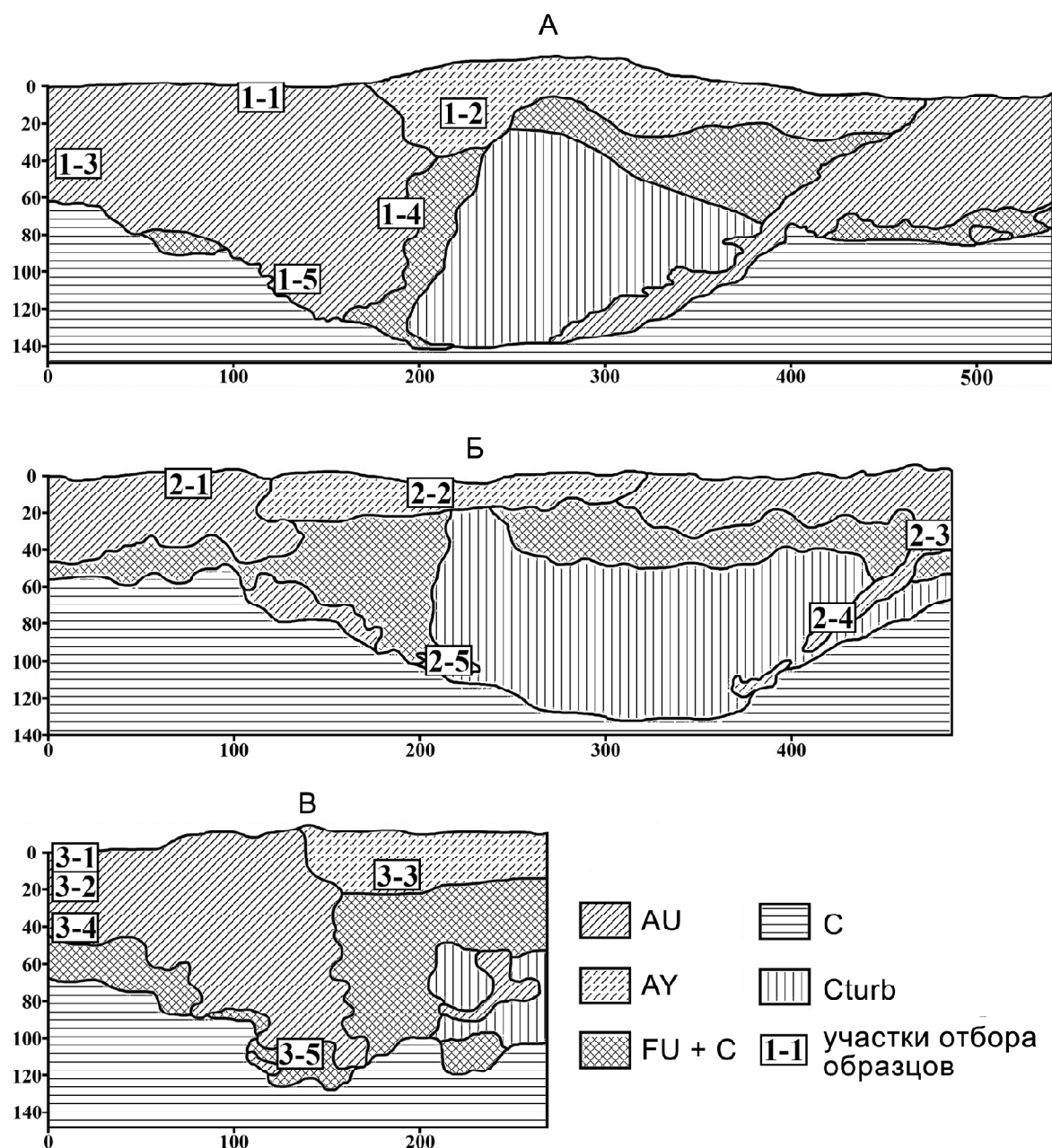


Рис. 1. Схемы строения профилей темногумусовых почв Калужских засек в траншеях А – № 1, Б – № 2, В – № 3. Обозначения горизонтов см. в тексте. Номера образцов на рисунке соответствуют табл.

Fig. 1. The profiles of dark-humus soils (Haplic Phaeozems) of the Kaluzskie Zaseki Nature Reserve: А – trench № 1, Б – trench № 2, В – trench № 3. The indices of horizons – see in the text. Sample numbers in the figure correspond to Table

да осложненный другими процессами (прежде всего, локальным оглеением). В результате элементарные почвенные ареалы этих почв состоят из двух типов педонов: (1) «типичные», в пределах которых гор. AU имеет глубину до 40–60 см и (2) предельные, представляющие собой котлы или слои материала гор. AU на глубине до 120–130 см [Бобровский, 2010; Бобровский с соавт., 2012].

Формирование «типичных» педонов, включая глубину перемешивания почвы и итоговую мощность гор. AU, определяется, прежде всего, трофической и локомоторной деятельностью дождевых червей. Наиболее активное перемешивание почвенной мас-

сы происходит на глубину до 60 см [Bastardie et al., 2005], что соответствует фоновым мощностям гор. AU в изученных темногумусовых почвах. Важно отметить, что население дождевых червей в темногумусовых почвах на исследованном участке «Калужских засек» характеризуется высокими значениями численности и биомассы (до 1000 кг/га) [Shashkov, 2014]. В пределах этой глубины также фиксируются нижние границы западин более мелких ветроалов.

Формирование более мощного гумусового профиля в виде котлов или слоев материала гор. AU на глубинах до 120–130 см может быть объяснено

особенностями перемещения материала почвы при образовании провернутых вывалов деревьев (рис. 2). Вывалы, или ветровальные почвенные комплексы, являются обычным результатом смерти деревьев, естественной или катастрофической [Скворцова с соавт., 1983]. Существует множество обзоров роли ветровалов в изменении профиля и формировании почв [Скворцова с соавт., 1983; Schaetzl et al., 1989a; Васенев, Таргульян, 1995; Samonil et al., 2010], предложено несколько классификаций строения вывалов в зависимости от особенностей перемещения почвы при их образовании [Дмитриев с соавт., 1978; Beatty, Stone, 1986; Скворцова с соавт., 1983; Schaetzl et al., 1989b; Allen, 1992; Langohr 1993; Пономаренко, 1999; и др.]. Большинство авторов различают два основных типа вывалов, названные Е.В. Пономаренко «непровернутым» («типичный» [Дмитриев с соавт., 1978]) и «провернутым». При непровернутом вывале падающее дерево поворачивается относительно точки, которая становится основанием вывального бугра, часть корней сохраняет контакт с почвой. При провернутом вывале все корни обрываются, происходит смещение кома обратно в западину (рис. 2, А).

При провернутых вывалах западина обычно имеет форму полусферы или параллелепипеда, бугор вывала находится внутри западины. При продвижении почвенного кома к центру или к задней части западины весь материал подстилки и верхнего слоя почвы с передней части кома ссыпается в переднюю часть западины [Langohr, 1993; Пономаренко, 1999]. При перемещении материала с прилегающих ненарушенных участков почвы образуется гумусовый слой, выстилающий заднюю и боковые части западины. В дальнейшем он перекрывается материалом задней части бугра (рис. 2, Б). Вынесенный на поверхность материал гор. С изменяется в ходе почвообразования; здесь формируется новый гумусовый горизонт, имеющий окраску по системе Манселла 9.7YR 5.3/2.2 (гор. АУ на рис. 2, Б).

Морфологический анализ показал, что во всех изученных профилях наблюдаются структуры, со-

ответствующие описанным выше (рис. 1). Траншея 1 (рис. 1, А) выполнена по оси падения дерева, в ней наблюдается наиболее полное соответствие строению почвы, представленному на рис. 2, Б. Возраст материала, отсыпанного из верхнего слоя почвы в западину (образец № 1–5 на рис. 1 и в табл.), моложе возраста материала почвенного кома, повернутого и перемещенного в центральную часть западины (№ 1–4), что согласуется с эмпирическими данными о механизмах перемещения и отсыпки материала почвы при провернутых вывалах.

Траншея 3 (рис. 1, В) также проходит по направлению падения дерева, но не по центру западины. Материал образца № 3–5 по расположению примерно соответствует образцу № 1–5. Строение профиля почвы в траншее 2 (рис. 1, Б) кажется похожим на профиль траншеи 1 (рис. 1, А), однако в действительности траншея пересекает задние части западин двух вывалов; направление падения обоих деревьев – от наблюдателя, оси падения стволов пересекаются. Участки, из которых отобраны образцы № 2–4 и № 2–5 в траншее 2 соответствуют языку материала АУ (на рис. 2, А справа).

Особый интерес представляет время формирования различных структурных элементов исследованных профилей. Поскольку эти почвы не содержат включений углей или погребенного органического материала, единственным подходом к определению их возраста является определение возраста гумуса. При этом данные о возрасте достаточно сложны для интерпретации; для дневных почв полученные даты обычно означают минимально возможный возраст органического вещества. Возраст гумуса в дневных почвах рассматривают также как его удельную активность, предполагая, что в горизонтах, пришедших в квазиравновесное состояние, эта активность не меняется с течением времени и показывает длительность цикла полной оборачиваемости углерода гумуса [Чичагова, 1985; Марголина с соавт., 1988].

Результаты определения возраста органического вещества в описанных траншеях представлены в

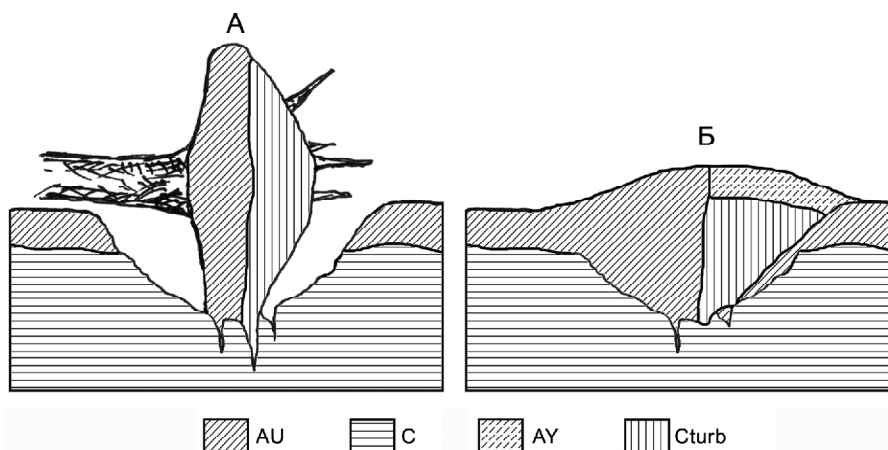


Рис. 2. Схема строения провернутого вывала после падения дерева (А) и после завершения перемещения материала почвы (Б)

Fig. 2. Rotational treefalls with uprooting: А – right after the tree fall and Б – after the relocation of soil material

Радиоуглеродный и калиброванный возраст образцов из темногумусовых почв «Калужских засек»

№ (разрез-образец)	Лабораторный номер	Горизонт	Глубина, см	Радиоуглеродная дата, л. н.	Калиброванная дата, л. н.
1–1	IGSB-1725	AU, фон	0–5	225±70	230±150
1–2	IGSB-1724	AY, над Стурб.	5–10	1240±80	1160±90
1–3	IGSB-1613	AU, фон	35–47	5150±130	5930±170
1–4	IGSB-1614	AU, западина	55–75	6400±120	7310±110
1–5	IGSB-1615	AU, западина	90–105	3900±90	4320±130
2–1	IGSB-1723	AU, фон	0–5	775±70	730±50
2–2	IGSB-1722	AU, над Стурб.	0–5	725±70	660±70
2–3	IGSB-1616	AU, фон	30–40	5250±90	6050±110
2–4	IGSB-1617	AU, западина	60–80	7340±140	8170±140
2–5	IGSB-1618	AU, западина	88–102	6820±130	7700±120
3–1	IGSB-1619	AU, фон	0–8	1140±85	1080±100
3–2	IGSB-1620	AU, фон	10–20	460±90	470±100
3–3	IGSB-1622	AY, над Стурб.	10–20	2620±70	2690±110
3–4	IGSB-1621	AU, фон	33–45	5580±130	6390±140
3–5	IGSB-1623	AU, западина	110–130	6540±150	7430±130

табл. Калиброванные даты для образцов из верхнего слоя (0–20 см) исследованных почв варьируют от 230±150 до 2690±110 л. н. (лет назад). Для сравнения, возраст гумуса верхних горизонтов серых почв 400–2000 лет [Александровский, Александровская, 2005; Гоняный с соавт., 2007], черноземов лесостепи – до 2000 лет, в основном около 1000 лет [Марголина с соавт., 1988; Александровский, Александровская, 2005].

Возраст гумуса в нижней части «типичного» гор. AU и в западинах вывалов (табл.) заметно больше, чем в верхних горизонтах. Возраст гумуса в нижней части гор. AU составляет около 6000 кал. л. н. (календарных лет назад), что примерно соответствует ^{14}C возрасту нижней части гумусового горизонта большинства черноземов (6000–5000 л. н.) [Чичагова, 1985; Александровский, Чичагова, 1998; Чичагова с соавт., 2008], а также возрасту вторых гумусовых горизонтов дерново-подзолистых и серых почв [Караваева с со-

авт., 1986; Величко с соавт., 1997; Чичагова, 1985; Александровский, Александровская 2005; и др.]. Возраст гумуса в западинах вывалов – от 4320±130 до 8170±140 кал. л. н. В большинстве случаев он старше гумуса в нижней части «типичного» гор. AU, что, вероятно, связано с большей скоростью обновления гумуса на глубине до 40–60 см вследствие роящей активности дождевых червей.

Для понимания как генезиса почв, так и истории экосистем в целом, важно определить время образования вывалов и формирования соответствующих почвенных структур. К сожалению, при отсутствии надежных датирующих артефактов невозможно точно установить возраст вывалов, образовавших глубокие западины. Однако можно оценить последовательность произошедших событий и минимальную давность этих вывалов. Согласно данным Е.В. Пономаренко [1999], в результате перемещения гумусированного материала в западины многократные педотурбации постепенно увеличивают

мощность гумусового горизонта. В результате длительно развивавшиеся лесные почвы характеризуются наличием мощного гумусового горизонта в пределах корнеобитаемого слоя деревьев. В темногумусовых почвах «Калужских засек» такому критерию соответствуют «типичные» почвы, пройденные вывалами мощностью до 50–70 см. Глубокие провернутые вывалы мощностью 70–150 см приводили к увеличению мощности гумусового горизонта (местами до 130 см) за счет отсыпки материала гор. А в западину и, вместе с тем, к локальному разрыву гумусового горизонта в результате выноса на поверхность материала гор. С (при повороте почвенного кома вывалом). При этом такие вывалы не успели перемешать всю толщу почвы. Минимальный возраст вывалов может быть примерно оценен (1) по соотношению возраста гумуса в западинах и «типичных» педонах, (2) по возрасту гумуса, сформированному на материале Стурб., перемещенному к дневной поверхности.

На момент перемещения гумуса в западину вывала его возраст не может быть старше, чем нижней части гор. АУ. В глубоких западинах создаются условия для «погребения» гумусового материала, его частичной изоляции (особенно в случаях, когда гумус в западине перекрыт материалом Стурб.). Поэтому подобно тому как можно устанавливать примерную скорость оборота гумуса в почвах при сравнении возраста гумуса дневных и погребенных почв [Александровский, Чичагова, 1998], разница возраста «погребенного» в западинах гумуса и гумуса «типичных» педонов примерно показывает минимальную давность ветровала. В траншее 1 разница между возрастом наиболее старого гумуса в западине и возрастом гумуса в нижней части «типичного» гор. АУ составляет около 1380 лет, в траншее 2 – примерно 1640 и 2110 лет, в траншее 3 – около 1040 лет.

В пользу не слишком большой давности образования глубоких вывалов говорят относительно малые мощности гумусовых горизонтов, сформированных на вынесенном на поверхность в результате турбации материале гор. С (рис. 1). Характеристики этих горизонтов в изученных почвах сильно варьируют: тип гумусового горизонта от серогумусового до темногумусового, мощность от 20 до 30 см. Возраст гумуса горизонтов, сформированных над Стурб., составляет 660 ± 70 , 1160 ± 90 и 2690 ± 110 кал. л. (табл.). Эти даты сопоставимы с приведенными выше возможными минимальными возрастными ветровалов. Следовательно, представляется наиболее вероятным, что глубокие вывалы в темногумусовых почвах на исследованном участке происходили в течение позднего голоцена.

Увеличение мощности вывалов в некоторый период времени могло быть связано с увеличением глубины распространения корневых систем деревьев, которая зависит, кроме прочего, от влажности почвы. Известно, что в более влажных условиях все деревья обычно формируют поверхностные корневые системы [Скворцова с соавт., 1983; Пономарен-

ко, 1999]. Уменьшение степени увлажнения почв могло быть как следствием общей аридизации климата региона, так и понижением базиса эрозии вследствие развития овражно-балочной сети (напомним, что для участка исследования характерен сильно расчлененный рельеф). В пользу последнего предположения говорят особенности строения трещинной сети в гор. С (ВС), представленной полыми трещинами с железистыми ореолами. Мы предполагаем, что эти трещины сформировались в тот период, когда исследуемая территория была значительно слабее расчленена овражной сетью, уровень грунтовых вод был намного выше, что определяло постоянно высокую влажность почвенной толщи. В таких условиях в нижней части профиля (глубже 160 см) формировался горизонт с признаками глея, вокруг трещин образовывались окислительные геохимические барьеры и накапливались гидроксиды и оксиды железа, формируя ожелезненные ореолы. При формировании и росте овражной сети уровень грунтовых вод понизился, произошла окислительная редукция глеевого горизонта и перестройка трещинной сети.

Таким образом, строение профилей исследованных темногумусовых почв позволяет предположить их моногенетичность, если рассматривать почвы как часть биогеоценоза, а вывалы как эндогенный фактор развития почв. Полученные результаты свидетельствуют о вероятной непрерывности формирования этих почв под лесом в течение не менее 8000 лет и о периодическом участии мощных вывалов деревьев в формировании профилей. В траншеях встречены и следы менее глубоких вывалов (глубиной до 60 см). Одновременно с присутствием во всех профилях признаков долговременного развития почв под лесом, в них отсутствуют признаки «степного» почвообразования, такие как следы деятельности степных землероев и характерная зоогенная перерывность. Карбонаты до глубин более двух метров не обнаружены.

Возможности длительного существования лесной территории и отсутствия на участке в прошлом степной растительности показывают реконструкции динамики растительности в голоцене для участков, расположенных менее чем в 50 км от места исследования. Реконструкции были выполнены Е.Ю. Новенко с соавторами по результатам спорово-пыльцевого анализа для болота Клюква вблизи г. Белев (Тульская обл.) [Novenko et al., 2015], болот на территории национального парка «Орловское Полесье» и у с. Селихово Орловской обл. [Novenko et al., 2016]. Результаты анализа показали, что в среднем и позднем голоцене в спорово-пыльцевых спектрах всех изученных разрезов преобладала пыльца древесных растений.

Для голоценового педогенеза на юге лесной зоны Восточно-Европейской равнины обычно выделяют две основных стадии: черноземную «степную» (ранний и средний голоцен) и подзолистую «лесную» (поздний голоцен) [Александровский, Чичагова, 1998; Александровский, Александровская, 2005;

и др.]. Вторую фазу обычно связывают с похолоданием климата и наступлением леса на степь, а ее длительность оценивают в 2,5–3,5 тыс. лет. На территории «Калужских засек» сохранились ареалы почв, в которых признаки столь кардинального изменения основного почвообразовательного процесса в этот период отсутствуют. При этом результаты изучения темногумусовых лесных почв «Калужских засек» показывают, что связь темногумусового почвообразования с условиями развития под травянистыми (степными) сообществами не является обязательной.

Выводы:

– гумусовые профили изученных почв «Калужских засек» являются наиболее мощными на Восточно-Европейской равнине среди ранее описанных бескарбонатных почв с темногумусовым горизонтом АУ. В них можно выделить два основных морфологических варианта педонов: (1) «типичный»

гор. АУ глубиной до 40–60 см и (2) западины ветровалов с материалом гор. АУ глубиной до 120–130 см; – возраст темногумусовых почв «Калужских засек» в целом соответствует возрасту других дневных почв в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины. Возраст гумуса закономерно увеличивается вниз по профилю: от сотен и первых тысяч лет в верхнем слое к 6000 лет в нижней части гор. АУ и 7000–8000 лет в глубоких западинах. Инверсии дат в средней части профиля объясняются перемещением материала при вывалах деревьев;

– изученные почвы «Калужских засек» представляют пример длительного лесного почвообразования, в результате которого сформирован мощный темногумусовый профиль. При этом в них отсутствуют признаки основных стадий голоценового почвообразования, традиционно выделяемых для почв лесостепи: черноземной «степной» и подзолистой «лесной».

Благодарности. Благодарим руководство заповедника «Калужские засеки» за предоставленную возможность проведения исследования и содействие в выполнении работы; Г.И. Истигечева за помощь в полевых исследованиях. Работа выполнена в рамках тем государственных заданий ТГУ и ИФХиБПП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.
- Александровский А.Л., Чичагова О.А. Радиоуглеродный возраст палеопочв голоцена в лесостепи Восточной Европы // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1414–1422.
- Бобровский М.В. Козельские засеки (эколого-исторический очерк). Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. 92 с.
- Бобровский М.В. Лесные почвы Европейской России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 359 с.
- Бобровский М.В., Лойко С.В., Истигечев Г.И., Крицков И.В. Следы ветровалов в темногумусовых почвах заповедника «Калужские засеки» // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 4(20). С. 7–20.
- Бобровский М.В., Ханина Л.Г. Заповедник «Калужские засеки» // Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках Европейской России / Под ред. Л.Б. Заульковской. М.: Научный мир, 2000. С. 104–124.
- Васенев И.И., Таргульян В.О. Ветровал и таежное почвообразование (режимы, процессы, морфогенез почвенных сукцессий). М.: Наука, 1995. 247 с.
- Величко А.А., Зеликсон Э.М., Морозова Т.Д. и др. Палеогеографические условия атлантического периода голоцена центра Русской равнины (по данным изучения ископаемых почв) // Докл. РАН. 1997. Т. 335. № 4. С. 540–543.
- Восточноевропейские леса. История в голоцене и современность / Ред. О.В. Смирнова. Кн. 1. М.: Наука, 2004. 428 с.
- Гоняный М.И., Александровский А.Л., Гласко М.П. Северная лесостепь бассейна Верхнего Дона района Куликовской битвы. М.: Изд. ГИМ, 2007. 208 с.
- Государственная геологическая карта. Четвертичные образования. Лист N-36-XXIV. Масштаб 1:200 000 / Ред. С.Л. Бреслав. 1961.
- Дмитриев Е.А., Карпачевский Л.О., Строганова М.Н., Шоба С.А. О происхождении неоднородности почвенного покрова в лесных биогеоценозах // Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978. С. 212–218.
- Караваева Н.А., Черкинский А.Е., Горячкин С.В. Второй гумусовый горизонт и проблема эволюции подзолистых суглинистых почв Русской равнины // Эволюция и возраст почв СССР. Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1986. С. 120–138.
- Комаров Н.Ф. Этапы и факторы эволюции растительного покрова черноземных степей. М.: Географгиз, 1951. 328 с.
- Курнаев С.Ф. Теневые широколиственные леса Русской равнины и Урала. М.: Наука, 1980. 316 с.
- Марголина Н.Я., Александровский А.Л., Ильичев Б.А. и др. Возраст и эволюция черноземов. М.: Наука, 1988. 144 с.
- Мильков Ф.Н. Взаимоотношения леса и лесостепи и проблемы смещения ландшафтных зон на Русской равнине // Изв. Всесоюз. географ. о-ва. 1952. Т. 84. № 5. С. 431–447.
- Петров В.Г. Геологическое строение и полезные ископаемые Калужской области. Калуга: ИД «Эйдос», 2003. 440 с.
- Полевой определитель почв. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Пономаренко Е.В. Методические подходы к анализу сукцессионных процессов в почвенном покрове // Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия / Под ред. О.В. Смирновой, Е.С. Шапошников. СПб.: Российское ботаническое общество, 1999. С. 34–57.
- Скворцова Е.Б., Уланова Н.Г., Басевич В.Ф. Экологическая роль ветровалов. М.: Лесная промышленность, 1983. 192 с.
- Уруевская И.С., Алябина И.О., Винюкова В.П. и др. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:2 500 000. Москва, 2013.
- Чендев Ю.Г., Александровский А.Л., Хохлова О.С. и др. Эволюция лесного почвообразования на юге лесостепи Среднерусской возвышенности в позднем голоцене // Почвоведение. 2017. № 1. С. 3–16.
- Чичагова О.А. Радиоуглеродное датирование гумуса почв. М.: Наука, 1985. 158 с.
- Чичагова О.А., Хохлова О.С., Зазовская Э.П., Горячкин С.В. Радиоуглеродный анализ и проблемы памяти почв // Память почв. Почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий / Ред. В.О. Таргульян, С.В. Горячкин. М.: ЛКИ, 2008. С. 182–203.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.

- Яковлев А.И. Засечная черта Московского Государства в XVII веке. М.: Тип. Г. Лисснера и Д. Собко, 1916. 312 с.
- Ahti T., Hamet-Ahti L., Jalas J. Vegetation zones and their sections in northern Europe // *Ann. Bot. Fenn.* 1968. № 5. P. 169–211.
- Allen J.R.L. Trees and their response to wind: mid Flandrian strong winds, Severn Estuary and inner Bristol Channel, southwest Britain // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences.* 1992. V. 338. № 1286. P. 335–364.
- Bastardie F., Capowiez Y., Cluzeau D. 3D characterisation of earthworm burrow systems in natural soil cores collected from a 12-year-old pasture // *Applied Soil Ecology.* 2005. V. 30. № 1. P. 34–46.
- Beatty S.W., Stone E.L. The variety of soil microsites created by tree falls // *Agron. Pap.* 1986. V. 16. № 3. P. 539–548.
- Bobrovsky M., Loyko S. Patterns of pedoturbation by tree uprooting in forest soils // *Russian Journal of Ecosystem Ecology.* 2016. V. 1. № 1. P. 1–22.
- Langohr R. Types of tree windthrow, their impact on the environment and their importance for the understanding of archaeological data // *Helinium.* 1993. V. XXXIII. № 1. P. 36–49.
- Novenko E., Tsyganov A., Rudenko O. et al. Mid- and late-Holocene vegetation history, climate and human impact in the western Mid-Russian Upland: new data and a regional synthesis // *Biodiversity and Conservation.* 2016. V. 25. № 12. P. 2453–2472.
- Novenko E.Y., Tsyganov A.N., Volkova E.M. et al. The Holocene paleoenvironmental history of central European Russia reconstructed from pollen, plant macrofossil, and testate amoeba analyses of the Klukva peatland, Tula region // *Quaternary Research.* 2015. V. 83. № 3. P. 459–468.
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A. et al. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 Years cal BP // *Radiocarbon.* 2013. V. 55. P. 1869–1887.
- Sámonil P., Král K., Hort L. The role of tree uprooting in soil formation: a critical literature review // *Geoderma.* 2010. V. 157. № 3. P. 65–79.
- Schaetzl R.J., Burns S.F., Jonson D.L., Small T.W. Tree uprooting: review of impact on forest ecology // *Vegetation.* 1989a. V. 79. № 3. P. 165–176.
- Schaetzl R.J., Jonson D.L., Burns S.F., Small T.W. Tree uprooting: review of terminology, process, and environmental implication // *Canad. J. For. Res.* 1989b. V. 19. № 1. P. 1–11.
- Shashkov M.P. Earthworm communities (Oligochaeta: Lumbricidae) in young and old-growth forests in the State Nature Reserve «Kaluzhskie Zaseki» (Kaluga Region, Russia) // *Advances in Earthworm Taxonomy VI (Annelida: Oligochaeta). Proceedings of the 6th International Oligochaete Taxonomy Meeting (6th IOTM).* Palmeira de Faro, Portugal, 2014. P. 131–140.

Поступила в редакцию 26.03.2017

После доработки 01.03.2019

Принята к публикации 24.05.2019

M.V. Bobrovsky¹, S.V. Loiko²

FEATURES OF THE GENESIS AND THE AGE OF DARK-HUMUS SOILS (HAPLIC PHAEOZEMS) IN THE KALUZHSKIE ZASEKINATURE RESERVE

The morphological structure of dark-humus soils (Haplic Phaeozems) was studied in old-growth oak-dominated forests in the Southern area of the Kaluzhskie Zaseki Nature Reserve (the Kaluga region). Dark-humus soils are mainly confined to areas with ravine relief, both on the flat surfaces (placers) and on the slopes. They form small patches within vast areas of sod-podzolic and grey soils (Luvisols). The structure of three trenches from 2.5 to 5 meters long was analyzed and the radiocarbon age of 15 soil samples was determined.

Profiles of the studied dark-humus soils have the structure AU-C, where AU is a dark-humus horizon and C is a bedrock (clay loam). The proportion of organic carbon at the depth of 0–10 cm is from 4.4 to 8%, with depth its content in AU varies from 1 to 3%. Two main morphological levels can be distinguished in the profiles: (1) a background horizon up to 40–60 cm thick and (2) ancient pits (cauldrons) resulting from rotational treefalls up to 120–130 cm thick with the dark-humus material. Humus profiles of the studied soils in the Kaluzhskie Zaseki reserve are the deepest among the described noncarbonate soils with dark-humus horizons within the Russian Plain.

The age of dark humus soils in the Kaluzhskie Zaseki reserve in general corresponds to the age of other forest-steppe soils of the Russian Plain. The humus age in the upper part of the AU horizon varies from 230±150 to 2690±110 cal. years BP; in the lower part it is about 6000 cal. years BP. Age of humus in the ancient pits varies from 4320±130 to 8170±140 cal. years BP; in most cases it exceeds the age of humus in the lower part of the background AU horizon.

We assume that the initial depth of pits caused by treefalls did not exceed 60 cm; deeper pits (up to 150 cm deep) are younger. This hypothesis is supported by (i) the results of analysis of the structural features of the profiles including the crack network in the C (BC) horizon; (ii) the age of humus formed on the material of Curb after treefalls and (iii) the difference in ages of humus «buried» in the pits and the «background» humus. The estimated age of treefalls ranges from 700 to 2700 cal. years BP (the late Holocene).

post-graduate The studied soils in the Kaluzhskie Zaseki reserve are the example of continuous formation of forest soils, with resulting deep dark-humus profile. At the same time, no traditional features

¹ Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science, RAS, Laboratory of Ecosystem Modeling, Leading Scientific Researcher, Associate Professor, D.Sc. in Biology. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, D.Sc. in Biology, e-mail: maxim.bobrovsky@gmail.com

² National Research Tomsk State University, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology, e-mail: s.loyko@yandex.ru

of the chernozem «steppe» and podzolic «forest» stages of soil formation during the Holocene were found in these soils.

Key words: soil formation, tree uprooting, soil morphology, radiocarbon age, oak-dominated forest

Acknowledgements. We express our gratitude to the management of the Kaluga Zaseki Nature Reserve for the opportunity to conduct research and the assistance in its implementation. We thank G.I. Istigechev for assistance in field research. The study was carried out within the framework of the state research themes of the TSU and ISSP RAS.

REFERENCES

- Ahti T., Hamet-Ahti L., Jalas J. Vegetation zones and their sections in northern Europe // *Ann. Bot. Fenn.* 1968. № 5. P. 169–211.
- Aleksandrovskii A.L., Aleksandrovskaja E.I. Evolyuciya pochv i geograficheskaya sreda [Evolution of soils and geographical environment]. Moscow: Nauka, 2005. 223 p. (In Russian)
- Aleksandrovskii A.L., Chichagova O.A. Radiouglerodniy vozrast paleopochv golocena v lesostepi Vostochnoy Evropy [Radiocarbon age of the Holocene paleosoils in the forest-steppe of Eastern Europe] // *Pochvovedenie*. 1998. № 12. P. 1414–1422. (In Russian)
- Allen J.R.L. Trees and their response to wind: mid Flandrian strong winds, Severn Estuary and inner Bristol Channel, southwest Britain // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. 1992. V. 338. № 1286. P. 335–364.
- Bastardie F., Capowiez Y., Cluzeau D. 3D characterisation of earthworm burrow systems in natural soil cores collected from a 12-year-old pasture // *Applied Soil Ecology*. 2005. V. 30. № 1. P. 34–46.
- Beatty S.W., Stone E.L. The variety of soil microsites created by tree falls // *Agron. Pap.* 1986. V. 16. № 3. P. 539–548.
- Bobrovsky M., Loyko S. Patterns of pedoturbation by tree uprooting in forest soils // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2016. V. 1. № 1. P. 1–22.
- Bobrovsky M.V. Kozelskie zaseki (ekologo-istoricheskiy ocherk) [Kozelsky zaseki (ecological and historical essay)]. Kaluga: Izd-vo N. Ershovoy, 2002. 92 p. (In Russian)
- Bobrovsky M.V. Lesnye pochvy Evropeyskoy Rossii: bioticheskie i antropogennyye factory formirovaniya [Forest soils of European Russia: biotic and anthropogenic factors of formation]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010. 359 p. (In Russian)
- Bobrovsky M.V., Khanina L.G. Zapovednik «Kaluzhskie zaseki» [The Kaluzhskie Zaseki Nature Reserve] // *Otsenka i sokhraneniye bioraznoobraziya lesnogo pokrova v zapovednikakh Evropeyskoy Rossii*. Moscow: Nauchnyi Mir, 2000. P. 104–124. (In Russian)
- Bobrovsky M.V., Loyko S.V., Istigechev G.I., Krickov I.V. Sledy vetrovalov v temnogumusovykh pochvakh zapovednika 'Kaluzhskie zaseki' [Traces of windfall pedoturbations in the dark-humus (Haplic Phaeozem) soil of the Kaluzhskie Zaseki Nature Reserve] // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2012. № 4(20). P. 7–20. (In Russian)
- Chendev O.A., Aleksandrovskii A.L., Khokhlova O.S. et al. Evolyuciya lesnogo pochvoobrazovaniya na yuge lesostepi Srednerusskoy vozvysheynosti v pozdnem golocene [Evolution of forest soil formation in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland in the late Holocene] // *Pochvovedenie*. 2017. № 1. P. 3–16. (In Russian)
- Chichagova O.A. Radiouglerodnoye datirovaniye vozrasta pochv [Radiocarbon dating of soil humus]. Moscow: Nauka, 1985. 158 p. (In Russian)
- Chichagova O.A., Khokhlova O.S., Zazovskaya E.P., Goryachkin S.V. Radiouglerodniy analiz i problemy datirovaniya pamyati pochv [Radiocarbon analysis and soil memory dating problems] // *Pamyat pochv*. Moscow: LKI, 2008. P. 182–203. (In Russian)
- Dmitriev E.A., Karpachevskiy L.O., Srtoganova M.N., Shoba S.A. O proishozhdenii neodnorodnosti pochvennogo pokrova v lesnykh biogeocenoza [The origin of heterogeneity of the soil cover in forest biogeocenoses] // *Problemy pochvovedeniya*. Moscow: Nauka, 1978. P. 212–218. (In Russian)
- Gonyaniy M.I., Aleksandrovskiy A.L., Glasko M.P. Severnaya lesostep basseyna verkhnego Dona raiona Kulikovskoy bitvy [Northern forest-steppe of the Upper Don River basin in the Kulikovo battle area]. Moscow: Izd. GIM, 2007. 208 p. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta. Chetvertichnyye obrazovaniya [State geological map. Quaternary formations], List N-36-XXIV, Scale 1:200 000. S.L. Breslav (ed.). 1961. (In Russian)
- Karavaeva N.A., Cherkinskii A.E., Goryachkin S.V. Vtoroy gumusoviy gorizont i problema evolyucii podzolistykh suglinistykh pochv Russkoy ravniny [The second humus horizon and the problem of the evolution of podzolic loamy soils of the Russian Plain] // *Evolyuciya i Vozrast Pochv SSSR*. Pushchino: ONT NCBI AN SSSR, 1986. P. 120–138. (In Russian)
- Komarov N.F. Etapy i factory evolutsii rastitelnogo pokrova chernozemnykh stepey [Stages and factors of the evolution of vegetation cover in the chernozem steppes]. Moscow: Geografiz, 1951. 328 p. (In Russian)
- Kurnaev S.F. Tenevye shirokolistvennyye lesa Russkoy ravniny i Urala [Shady broad-leaved forests of the Russian Plain and the Urals]. Moscow: Izd-vo Nauka, 1980. 316 p. (In Russian)
- Langohr R. Types of tree windthrow, their impact on the environment and their importance for the understanding of archaeological data // *Helinium*. 1993. V. XXXIII. № 1. P. 36–49.
- Margolina N.Ya., Aleksandrovskii A.L., Ilychev B.A. et al. Vozrast i evolyuciya chernozemov [The age and evolution of chernozems]. Moscow: Nauka, 1988. 144 p. (In Russian)
- Milkov F.N. Vzaimootnosheniya lesa i lesostepi i problemy smeshcheniya landshaftnykh zon na Russkoy ravnine [Relationships between forest and forest-steppe and the problem of the shifting of landscape regions in the Russian Plain] // *Izvestiya Vsesoyuznogo Geograficheskogo Obshchestva*. 1952. V. 84. № 5. P. 431–447. (In Russian)
- Novenko E., Tsyganov A., Rudenko O. et al. Mid- and Late-Holocene vegetation history, climate and human impact in the western Mid-Russian Upland: new data and a regional synthesis // *Biodiversity and Conservation*. 2016. V. 25. № 12. P. 2453–2472.
- Novenko E.Y., Tsyganov A.N., Volkova E.M. et al. The Holocene paleoenvironmental history of central European Russia reconstructed from pollen, plant macrofossil, and testate amoeba analyses of the Klukva peatland, Tula region // *Quaternary Research*. 2015. V. 83. № 3. P. 459–468.
- Petrov V.G. Geologicheskoye stroeniye i poleznyye iskopyayemye Kaluzhskoy oblasti [Geological structure and mineral resources of the Kaluga region]. Kaluga: ID «Eydos», 2003. 440 p. (In Russian)
- Polevoy opredelitel pochv [Field guide of soils]. Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, 2008. 182 p. (In Russian)
- Ponomarenko E.V. Metodicheskie podkhody k analizu sukcesionnykh processov v pochvennom pokrove [Methodical approaches to the analysis of succession processes in the soil cover] // *Sukcessionnyye processy v zapovednikakh Rossii i problemy*

sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya. Sankt-Petersburg: Izd-vo Russkogo Botanicheskogo Obshchestva, 1999. P. 34–57. (In Russian)

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A. et al. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 Years cal BP // Radiocarbon. 2013. V. 55. P. 1869–1887.

Samonil P., Kraňal K., Hort L. The role of tree uprooting in soil formation: a critical literature review // Geoderma. 2010. V. 157. № 3. P. 65–79.

Schaetzl R.J., Burns S.F., Jonson D.L., Small T.W. Tree uprooting: review of impact on forest ecology // Vegetation. 1989a. V. 79. № 3. P. 165–176.

Schaetzl R.J., Jonson D.L., Burns S.F., Small T.W. Tree uprooting: review of terminology, process, and environmental implication // Canad. J. For. Res. 1989b. V. 19. № 1. P. 1–11.

Shashkov M.P. Earthworm communities (Oligochaeta: Lumbricidae) in young and old-growth forests in the State Nature Reserve «Kaluzhskie Zaseki» (Kaluga Region, Russia) // Advances in Earthworm Taxonomy VI (Annelida: Oligochaeta). Proceedings of the 6th International Oligochaete Taxonomy Meeting (6th IOTM). Palmeira de Faro, Portugal, 2014. P. 131–140.

Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils of Russia]. Smolensk: Oykumena, 2004. 341 P. (In Russian)

Skvortsova E.B., Ulanova N.G., Basevitch V.F. Ekologicheskoe znachenie vetrovalov [Ecological value of windfalls]. Moscow: Izd-vo Lesnaya promyshlennost, 1983. 192 p. (In Russian)

Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Vinyukova V.P. et al. Karta pochvenno-ekologicheskogo rayonirovaniya Rossiyskoy Federatsii [Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation]. Scale 1:2 500 000. Moscow, 2013. (In Russian)

Vasenev I.I., Targulyan V.O. Vetroval i tayezhnoye pochvoobrazovaniye (rezhimi, protsessy, morfogenez pochvennykh suksessiy) [Windfall and taiga soil formation (modes, processes, morphogenesis of soil successions)]. Moscow: Nauka, 1995. 247 p. (In Russian)

Velichko A.A., Zelikson E.M., Morozova T.D. et al. Paleogeograficheskie usloviya atlanticheskogo perioda golocena centra Russkoy ravniny (po dannym izucheniya iskopaemykh pochv) [Paleogeographic conditions of the Atlantic period of the Holocene in the Central Russian Plain (according to the study of fossil soils)] // Doklady RAN. 1997. V. 335. № 4. P. 540–543. (In Russian)

Vostochnoyevropeyskiye lesa. Istoriya v golotsene i sovremennost [Eastern European forests. History in the Holocene and modern times] / O.V. Smirnova (ed.). Moscow: Nauka, 2004. V. 1. 428 p. (In Russian)

Yakovlev A.I. Zasechnaya cherta Moskovskogo Gosudarstva v XVII veke [Zaseka line of the Moscow State in the XVII century]. Moscow: Tip. G. Lissnera i D. Sobko, 1916. 312 p. (In Russian)

Received 26.03.2017

Revised 01.03.2019

Accepted 24.05.2019