

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.472.5;631.92;631.468

МАКРОФАУНА И ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО
В ПОСТАГРОГЕННЫХ ПЕСЧАНЫХ И СУПЕСЧАНЫХ ПОЧВАХ
СЕВЕРО-ЗАПАДА СМОЛЕНСКОЙ ОБЛАСТИ (РОССИЯ)

© 2023 г. Д. А. Терехова^{a, b}, М. А. Смирнова^{b, c}, А. П. Гераськина^a, О. В. Шопина^{a, b},
А. И. Кузнецова^a, И. М. Бавшин^{a, d}, Г. В. Клинк^e, П. Р. Енчилик^{a, b}, В. Р. Хохряков^{a, f},
М. И. Герасимова^{b, c}, И. Н. Семенов^{a, b, *}

^aЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^cПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

^dНациональный парк “Смоленское Поозерье”, ул. Гуревича, 19, пос. Пржевальское, 216270 Россия

^eИнститут проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН,
Б. Каретный пер., 19, стр. 1, Москва, 127051 Россия

^fНациональный парк “Себежский”, ул. 7 ноября, 22, Себеж, 182250 Россия

*e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 28.01.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 11.04.2023 г.

Естественное лесовосстановление на месте бывшей пашни запускает изменение макрофауны и органического вещества почв. Оценка возможности восстановления свойств почв и почвенной макрофауны до состояния, характерного для условно коренных лесов, продолжительности этого периода, динамики запасов органического вещества почв и роль макрофауны в этом процессе востребована при прогнозировании изменений компонентов экосистем и их роли в депонировании углерода. Исследованы запас органического углерода, морфологические свойства почв, численность, биомасса и таксономическая структура почвенной макрофауны пашни, коренных лесов и 5 стадий восстановления соснового леса национального парка “Смоленское Поозерье”. В почвах 85–100-летнего сосняка сохраняется ровная нижняя граница гумусового горизонта. Первые признаки реградации почв появляются на луговой стадии – формируется маломощный гумусированный горизонт, пронизанный корнями, трансформирующийся в грубогумусовый горизонт в молодых лесах. К 80 годам запас органического углерода минеральной части почв восстанавливается практически до фоновых значений. Состав почвенной макрофауны кардинально меняется при переходе от луговых сообществ к лесным. На начальных этапах преобладает фауна органо-минеральных и минеральных горизонтов: собственно-почвенные дождевые черви и личинки пластинчатоусых жуков. Далее восстанавливается фауна органогенных горизонтов, среди которой высока доля сапрофагов – подстилочных и почвенно-подстилочных дождевых червей, способствующих дифференциации горизонтов подстилки. Биомасса сапрофагов отрицательно коррелирует с запасами углерода в минеральной части лесных почв, его запасами в подстилке и мощностью подстилки, положительно – с долей легкоразлагаемой фракции опада.

Ключевые слова: хроносерия, беспозвоночные, лесная подстилка, альфегумусовые почвы (Podzols), песчаные почвы (Arenosols), экологические индикаторы

DOI: 10.31857/S0032180X23600105, EDN: OERQKB

ВВЕДЕНИЕ

На 2017 г. в России было заброшено более 38 млн га сельскохозяйственных угодий [28], на большей части которых происходит естественное лесовосстановление [29]. Следы прежней пашни сохраняются длительное время в морфологиче-

ских и химических свойствах почв, составе растительности и почвенной макрофауны [3, 7, 10, 19, 30, 36, 46]. Динамика восстановления свойств почв зависит от климатических условий, особенностей материнских пород и использования территории после прекращения распашки.

Скорость восстановления почв варьирует в широких пределах. Время формирования условно-коренного леса [48, 50] и стирания многих морфологических признаков пахотного горизонта в профиле оценивают в 80–120 лет [33], при необходимости более 150–200 лет для полного восстановления естественного профиля и всех его черт [2, 40, 44]. Естественное восстановление или реградация суглинистых почв [17, 34, 47] изучено лучше, чем песчаных [19, 34]. Имеются различные данные об изменении запасов углерода в песчаных почвах южной тайги при зарастании постпахотных земель [5, 19, 34]. При смене травянистой и кустарниковой растительности лесной, значительно сокращаются запасы углерода с минимумом на стадиях средневозрастных лесов и повышенными – в почвах старовозрастных лесов [20]. В контексте изменений климата, прогноза направления и мощности потоков углерода при различных сценариях землепользования недостаточно оценок продолжительности периода, необходимого для восстановления отдельных свойств разных почв, и в целом, возможности полного возврата почв в исходное состояние. Практически не проработан вопрос связи наблюдаемых морфологических изменений в свойствах почв (мощности и составе подстилки, запасов углерода), восстанавливающихся после распашки, и состава почвенной макрофауны – размерной группы почвенных беспозвоночных с шириной тела >2 мм [49]. Почвенная фауна (в особенности крупные почвенные макроспрофаги), активно участвующая в гумификации и биотурбации, выступает в качестве предиктора содержания органического углерода (C_{org}) в разных почвенных горизонтах [18].

Цель работы – анализ изменений свойств почв и состава почвенной макрофауны в ходе восстановления сосновых лесов на месте бывших пашен в Смоленском Поозерье. Особое внимание уделено связи наблюдаемых изменений в морфологических свойствах почв и составе почвенной макрофауны.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Физико-географическая характеристика территории. Объектами исследования являются песчаные и супесчаные пахотные, постагрогенные и условно не нарушенные распашкой почвы национального парка (НП) “Смоленское Поозерье”, образующие хроноряд [36]. Парк расположен между Валдайской и Смоленско-Московской возвышенностями, в северо-западной части Смоленской области, на территории Демидовского и Духовщинского районов. Среднегодовая температура

воздуха равна +4.3°C, количество осадков – 730 мм. Средняя температура января и июля составляет –8.6 и +17.0°C соответственно. Почвообразующие породы представлены четвертичными моренными суглинками, флювиогляциальными песками и супесями, реже – озерно-ледниковыми суглинками [27, 35]. Также широко распространены двучленные отложения, в которых верхний супесчаный или песчаный слой мощностью ≤1 м подстилается моренными суглинками.

В пределах национального парка, расположенного в экотоне между таежными и широколиственными лесами (где распространены гемибореальные широколиственно-хвойные и мелколиственные леса [23]), сохранились крупные массивы восточно-европейских лесов и, что особенно важно – весь исходный комплекс ценозов (ельники, сосновые боры, хвойно-широколиственные леса, черноольшаники, экосистемы болот, рек и озер), а также представлены все виды сельскохозяйственного использования (пашни, сенокосы, пастбища, залежи). Кроме того, на эту территорию имеются разнообразные картографические и исторические материалы и данные дистанционного зондирования Земли (табл. 1). Все это дает уникальную возможность исследования агрогенных сукцессий, так как из сельскохозяйственного оборота разные территории выводили поэтапно на фоне снижения численности сельского населения, которое по данным переписей¹ за последние 82 года (с 1939 по 2021 гг.) сократилось в 6.3 раза.

История сельскохозяйственного освоения. Современная территория НП была издревле густо заселена [1]. Согласно экономическим примечаниям к Планам генерального межевания конца XVIII в., в пределах современной территории НП культивировали овес, рожь, ячмень, пшеницу, гречиху, коноплю. Земли Поречского уезда Смоленской губернии, на территории которого сейчас расположен НП, относились преимущественно ко второму разряду: в озимом поле высевали рожь, 2/3 ярового поля приходилось на овес и 1/3 – на ячмень, гречиху, лен и горох [32]. До начала XX в. в Поречском уезде применяли трехпольную систему земледелия и реже – лядный² или подсечный способ обработки земли, поэтому часто случались неурожаи, так как внесение навоза³ не восполняло потери элементов питания. С конца

¹ Значения приведены к современным границам региона.

² В дальних частях дач практиковался переходный вариант (наподобие переложной системы земледелия) от чисто лядного хозяйства к трехпольному.

³ Сведения о внесении минеральных удобрений на рассматриваемой территории до начала XX в. не найдены.

Таблица 1. Динамика состояния наземного покрова современной территории НП “Смоленское Поозерье” за 1777–2020 гг., в % площади парка

Наземный покров	Год							
	1777	1855	1927	1957	1970	1999	2014	2020
Пашня	26.7	26.9	23.6	14.7	10.3	0.01	0.04	0.2
Травянистая и кустарниковая растительность	3.8	15.3	11.0	22.4	16.3	20.4	14.0	9.0
Лес	59.1	47.2	54.4	50.7	61.0	70.0	76.7	82.8
Реки и водоемы	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.3	1.2	0.7
Болота	8.7	8.7	8.4	8.2	8.1	7.6	7.3	7.0
Строения	0.2	0.6	0.9	2.9	2.9	0.8	0.7	0.2
Нет данных	0	0	0.38	0	0.4	0	0	0.01
Источник	РГАДА	[32]	РККА	[22]	CORONA	ТОПО	[8]	[45]

Примечание. РГАДА – Российский государственный архив древних актов (Фонды 1355 “Экономические примечания к материалам Генерального межевания. 1766–1861 гг. Поречский уезд”; 1356 “Губернские, уездные и городские атласы, карты и планы генерального межевания 1766–1883 гг. (коллекция). Опись 1. 1766–1891 г. Поречский уезд”; 1510 “Экономические примечания на 348 дач, каталог к генеральному плану на 348 дач, перечневый табель и описание рек. 2”; 5384 “Генеральный уездный план (атлас) в 3-х частях м-2 в. Часть 1”; 5385 “Генеральный уездный план (атлас) в 3-х частях м-2 в. Часть 2”; 5386 “Генеральный уездный план (атлас) в 3-х частях м-2 в. Часть 3”). РККА – Карты Генерального Штаба Рабоче-Крестьянской Красной Армии масштаба 1 : 50000. CORONA – снимки космической программы CORONA (дата съемки 27.07.1970; разрешение 1.8 м). ТОПО – топографическая карта масштаба 1 : 25000.

XIX в. все чаще стали внедрять 7–8-польные севообороты (1 год – ранний или занятой пар, 2 – озимые рожь и пшеница, 3– корнеплоды, 4 – яровые ячмень и овес с подсевом клевера, 5–7– клевер⁴, 7 и 8 – лен, конопля), которые в 1916 г. занимали 34% пашни Смоленской губернии [9, 38]. В конце 1920-х гг. по уровню интенсивности сельского хозяйства Смоленская губерния занимала одно из первых мест в европейской части Советского Союза. В ходе коллективизации и ликвидации хуторского расселения крестьянства в 1930-е гг. в Смоленской губернии многопольные севообороты с двумя полями многолетних трав полностью вытеснили трех- и четырехпольные.

В середине XIX в. навоз вносили перед посевом озимых хлебов в июне, после чего легкие почвы сразу засевали, а тяжелые дополнительно бороновали. Семена высеванных яровых хлебов (прежде всего, овса и ячменя) запахивали и бороновали. Яровую пшеницу в Смоленской губернии сеяли исключительно в озимом поле. На оставленную для этого землю летом вывозили навоз, который перепаживали осенью и следующим маем. После боронования пахали в третий раз и сеяли обычно под борону, реже – под соху с последующим боронованием. Для возделываемых здесь масличных растений, конопли и льна почву обрабатывали особенно тщательно: при первой возможности весной ее распахивали, затем вно-

сили навоз, запахивали его и бороновали. Перед посевом, в начале июня, пахали в третий раз и снова бороновали. Иногда начинали пахать одновременно с вывозом и разброской навоза. По расчетам середины XIX в., в Смоленской губернии в среднем одна лошадь и корова производили по 6.2 т/год навоза каждая, а мелкий скот (овцы, козы или свиньи) – на порядок меньше. Исходя из размеров крестьянских наделов и количества домашнего скота в Поречском уезде (табл. S1), на участок могли вносить около 3.2 т/га навоза ежегодно, но реально это могло случиться лишь раз в 9 лет [32], что в 1.5–1.9 раза ниже, чем в 1960–1990-е гг., и в 0.9–3.2 раза выше, чем в постсоветский период для Смоленской области (табл. S2).

Уже в середине XIX в. было понятно, что в российском Нечерноземье урожай хлебов и огородных растений не столько зависят от почвы, сколько от внесения удобрений [32]. Однако, несмотря на увеличение урожайности при фосфоритовании в ходе опытов А.Н. Энгельгардта в Дорогобужском уезде Смоленской губернии [21, 24, 37], минеральные удобрения не вносили в почву до XX в. Пик внесения удобрений⁵ в Смоленской области пришелся на 1975–1990 гг., когда вынос элементов питания с полей практически свелся к нулю. Положительный баланс Р и К в пахотных почвах Смоленской области отмечен только в 1980–1990 гг. при сохранении выноса N. По со-

⁴ В заметных объемах клевер начали возделывать в Смоленской губернии с 1840-х гг. [32].

⁵ На Смоленщине минеральные удобрения широко стали применять с 1930-х гг.

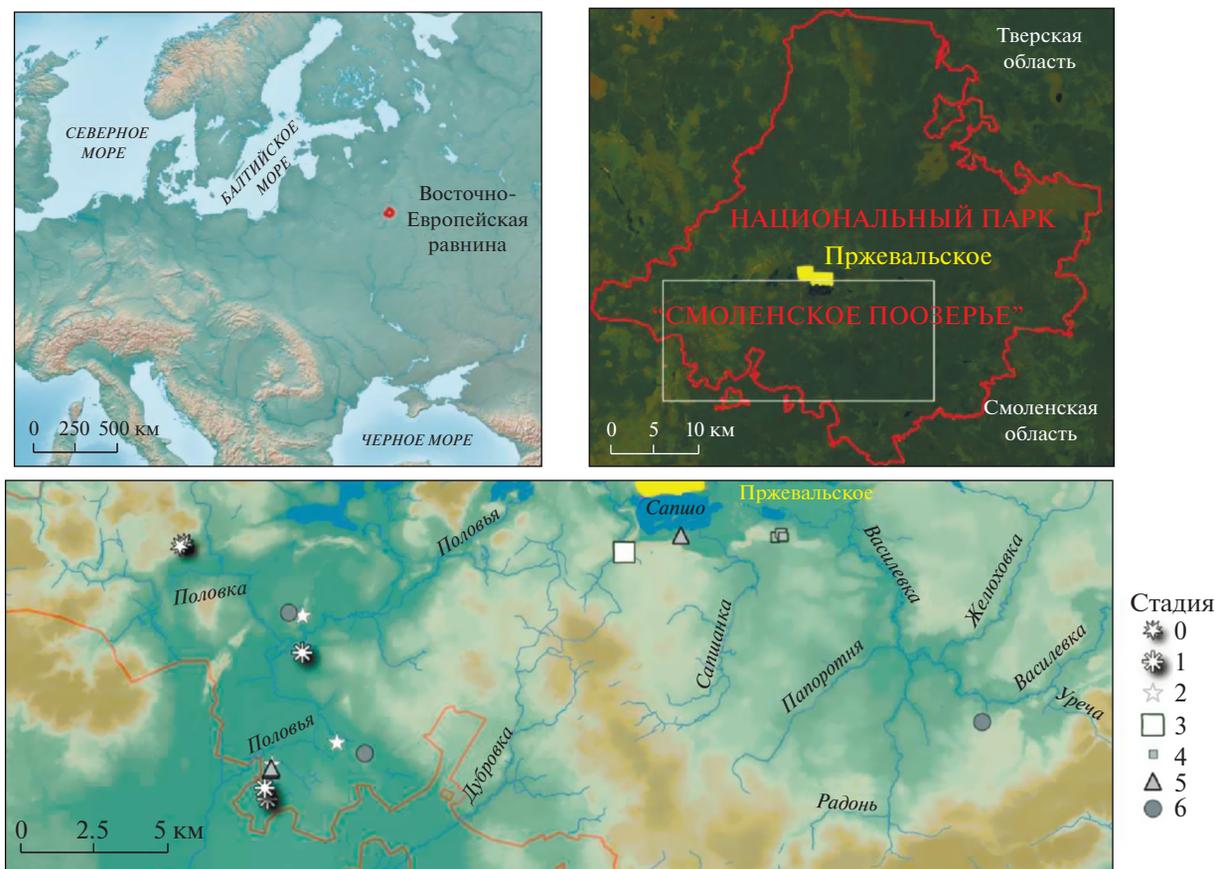


Рис. 1. Территория обследования. 1–6 – стадии восстановления сосняков.

стоянию на 2017 г. почвы пашен Демидовского и Духовщинского районов преимущественно содержали среднее количество подвижного Р (51–100 мг/кг) и органического вещества (21–25 г/кг), мало обменного К (41–80 мг/кг) и имели слабокислую среду (величина рН 5.1–5.5) при более высоких значениях показателей в Демидовском районе (рис. S1), на территории которого располагалось абсолютное большинство обследованных участков. В результате достаточно интенсивного ведения сельского хозяйства средневзвешенные агрохимические показатели в пахотном слое почв Смоленской области улучшились к середине первой трети XXI в. относительно середины XX в. [31]: величина рН с 4.7 до 5.2, содержание подвижного Р, К и $C_{орг}$ – в 2.3, 1.2 и 1.1 раза соответственно.

Методы исследования. В ходе полевых работ исследованы почвы ровных поверхностей между речий, соответствующие шести стадиям восстановления соснового леса (рис. 1, табл. 2). В качестве эталонов выбраны почвы старовозрастных сосняков на участках, которые, по имеющимся данным, не подвергались распашке за последние

100 лет. Современные пашни приняты за условный нуль-момент. Растительность и почвы каждой стадии изучены на трех площадках (табл. 3) – т.е. в тройной повторности, за исключением⁶ стадии 3, исследованной в однократной повторности. Продолжительность постпахотного периода оценена по особенностям растительного покрова, опросам местных жителей, топографическим картам и спутниковым изображениям. Для выделения лесов возрастом 50–100 лет (на месте сельхозугодий, заброшенных в 1927–1970 гг.) использованы лесоустраительные данные [11]. Динамика растительного покрова НП за 1985–2020 гг. оценена с использованием разновременных снимков Landsat.

В июле 2021 г. на каждой площадке описаны растительность и почвенный разрез, погоризонтно отобраны образцы, охарактеризованы мощность, строение и запасы подстилки (горизонт О),

⁶ На выровненных поверхностях междуречья не удалось найти подходящих средневозрастных сосняков в достаточной повторности ввиду их малочисленности на территории НП, так как они соответствуют участкам, выводимым из сельхозоборота в период пика сельскохозяйственного освоения.

Таблица 2. Наземный покров изученных площадок, характеризующих стадии восстановления сосновых лесов в Смоленском Поозерье, по состоянию на 1777–2020 гг.

Стадия	Повторность	Год и источник								
		1777, ПГМ	1863, ТВТК	1927, РККА	1970, CORONA	1982, ЗУП	1996, JERS	2010, ALOS	2012, SPOT	2020 [45]
0	1	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Луг	Луг	Луг
	2	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Луг	Луг	Луг
	3	Поле	Поле	Поле	Лес	Лес	Лес	К	К	К
1	1	Луг	Луг	Д	Поле	Поле	Поле	Луг	Луг	Лес
	2	Луг	Луг	Поле	Луг	Луг	Луг	Луг	Луг	Луг
	3	Д	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	К
2	1	Луг	Лес	Лес	Поле	Поле	Поле	Лес	Лес	Лес
	2	Лес	Лес	Лес	К	Лес	К	Лес	Лес	Лес
	3	Луг	Луг	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Поле	Лес
3	1	Поле	Поле	Поле	Поле	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
4	1	Луг	Луг	Поле	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
	2	Поле	Луг	Поле	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
	3	Луг	Луг	Поле	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
5	1	Луг	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
	2	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
	3	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
Фон	1	Поле	Поле	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
	2	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес
	3	Лес	Луг	Поле	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес	Лес

Примечание. Д – деревня, К – кустарник. Карты: ПГМ (Планы генерального межевания и экономические примечания к ним; см. табл. 1), ТВТК (Трехверстная военная топографическая карта Российской империи. 1856. Масштаб 1 : 126000), РККА (Карты Генерального Штаба Рабоче-Крестьянской Красной Армии масштаба 1 : 50000), ЗУП (землеустроительные планшеты масштаба 1 : 10000). Аэрофотоснимки и данные дистанционного зондирования: CORONA (снимки космической программы CORONA; дата съемки 27.07.1970; разрешение 1.8 м), JERS (снимки системы JERS-1 1996 г. разрешением 5–20 м; <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jers-1>), ALOS (снимки системы ALOS/AVNIR-2 ORI 2010 г. с разрешением около 10 м; https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JAXA_ALOS_AVNIR-2_ORI#description), SPOT (снимки миссии SPOT-5 2010 г. с разрешением 2.5 м; <https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot-5>).

определен ее тип [4]. Подгоризонты подстилки как важного местообитания почвенной макрофауны выделены согласно классификации форм гумуса [4, 51]: О1 – опад, О2 – ферментативный горизонт подстилки, О3 – горизонт гумификации. Подстилка изучена и опробована для определения ее запасов по подгоризонтам в пятикратной повторности по квадратам со стороной 25 см (суммарно 190 образцов), которые располагали в непосредственной близости от мест сбора почвенной макрофауны. Опад (О1) вручную разделяли на легкоразлагаемые (лиственный опад) и трудноразлагаемые (ветви, кора, семена, хвоя) компоненты [33, 34]. Грубогумусовый АО и гумусово-слаборазвитый W горизонты отнесены к органо-минеральным, а не органогенным за счет высокой доли минерального субстрата [12, 26].

Изменения морфологических свойств почв, возникающие в результате распашки и после выведения территории из сельскохозяйственного использования, в наибольшей мере затрагивают верхнюю пахотную толщу. Диагностика этих изменений и их отражение в классификационном положении почв является сложной задачей при использовании любой из существующих классификаций. На наш взгляд, современные российские подходы [12, 26] в наиболее полной мере позволяют принять во внимание наблюдаемые изменения. Помимо специфических пахотных горизонтов, выделенных в [13, 42], и диагностической роли возможного переуплотнения в подпахотной толще [42], современные российские подходы позволяют отразить в названии почвы и индексах горизонтов начальные стадии форми-

Таблица 3. Краткая характеристика почв и растительности стадий восстановления сосновых лесов на месте пахотных угодий в НП “Смоленское Поозерье”

Стадия	Длительность сукцессии, лет*	Растительность	Почвы
0	0–2	Посевы кукурузы или однолетняя залежь: луг полевично-овсяницево-разнотравный или пырейно-разнотравный с участием сеgetальных видов	Агроземы
1	>5	Залежный низкотравный овсяницево-полынно-золотарниковый, красноовсяницево-пыльный или среднетравный злаково-клеверовый луг	Агроземы (альфегумусовые)
2	10–26	Сосняк зеленомошный или разнотравный с лугово-опушечными видами	Агроземы альфегумусовые реградированные
3	60	Сосняк с березой кислично-разнотравный	Агрозем альфегумусовый оподзоленный постагрогенный
4	70–80	Сосняк чернично-зеленомошный	Агроземы альфегумусовые реградированные
5	85–100	Сосняк (орляково-)чернично-зеленомошный или чернично-ландышево-вейниковый	Дерново-подбуры оподзоленные постагрогенные
Фон	>100	Сосняк бруснично-зеленомошный или орляково-чернично-зеленомошный	Подбуры и подзолы грубогумусированные

Примечание. На площадках одной и той же стадии могут встречаться различные сообщества.

* Принято время последней распахки, восстановленное по возрасту наиболее старых деревьев и разнообразным материалам, включая данные дистанционного зондирования Земли.

рования дернины, грубого гумуса, оподзоливания, оглеения. Диагностика более не распаиваемого горизонта является наиболее дискуссионным вопросом классификации постагрогенных почв. Он может быть охарактеризован как пахотный горизонт с признаками реградации (Pw) или как серогумусовый постагрогенный горизонт (A_{Ур}). В настоящей работе диагностировали верхний горизонт как пахотный в случае его равномерной окраски, однородности сложения, слабой оструктуренности, мощности более 20 см и ровной ясно выраженной нижней границе.

Старопахотные и агрогумусовые горизонты и горизонты мощностью более 30 см опробованы в их верхней и нижней части. Плотность почв определяли на глубинах 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 40–50, 100–105 см буриком Качинского ($n = 114$). Для химико-аналитических работ пробы подстилки массой 300–500 г собирали с площадок 20 × 20 м. Содержание C_{орг} определяли методом бихроматного окисления по И.В. Тюрину с титриметрическим окончанием и фенилантраниловой кислотой в гумусовых и минеральных горизонтах ($n = 92$) и как потери при прокаливании для подстилки ($n = 38$). Общие запасы углерода рассчитывали отдельно для подстилки, верхней 30-сантиметровой толщи, включающей гумусовый и минеральные горизон-

ты без подстилки, а также верхней метровой толщи, включающей все почвенные горизонты, кроме подстилки.

Почвенную макрофауну количественно учитывали при ручном разборе почвенных монолитов размером 25 × 25 × 30 см в пятикратной повторности на каждой площадке отбора подстилки. На лесных участках дополнительно разбирали сосновый и березовый валеж 2–3 стадий разложения как важное местообитание крупных почвенных беспозвоночных. Всех отобранных беспозвоночных фиксировали в растворе этанола (96% — для дождевых червей, 70% — для других групп) и идентифицировали до семейств и родов по определителям [6, 15, 16, 25]. Биомассу макрофауны определяли путем взвешивания особей, зафиксированных в этаноле. Всего разобрали 115 почвенных проб и 15 фрагментов валежа, собрали 498 особей беспозвоночных. Так как представители ряда семейств беспозвоночных не всегда идентифицированы до рода и/или вида (что важно для отнесения к той или иной трофической группе), то трофическая принадлежность указана для преобладающих таксонов, для которых она установлена внутри соответствующего семейства.

Статистическую обработку данных выполняли в программе Statistica и в среде R. Рассчитывали

выборочные средние, медианы, стандартные отклонения и медианные абсолютные отклонения, коэффициенты корреляции r Спирмена. Статистические различия выявляли с помощью непараметрических тестов – U-критерия Манна–Уитни (p_U , в том числе для макрофауны – p_{U1} и p_{U2} для неосредненных и осредненных по соответствующим площадкам значений), H-критерия Краскела–Уоллиса (p_H , в том числе для макрофауны – p_{H1} и p_{H2} для неосредненных и осредненных по соответствующим площадкам значений). В качестве пороговых значений для статистически значимых отличий принято $p = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические свойства почв

Фоновые почвы (стадия 6) старовозрастных сосновых лесов НП “Смоленское Поозерье” представлены подзолами и подбурами. Последние имеют следующее строение профиля. Под гумифицированной подстилкой (ОН) мощностью 3.5–10 см залегает буро-серый грубогумусовый горизонт мощностью до 3 см с большим количеством (до 20%) светлых песчаных зерен. Под ним расположен желтовато- или рыжевато-охристый (5YR 5/6, 10YR 6/8) горизонт BF мощностью до 31 см. В подзолах над ним находится белесый, пепельно-серый (10YR 6/3) подзолистый горизонт E мощностью до 8 см (рис. 2, табл. 4).

Стадия 0. Под агроценозом и однолетней залежью вскрыты агроземы с однородным рыхлым бесструктурным бурым агрогоризонтом мощностью 20–25 см с ровной нижней границей. Ниже следует почвообразующая порода, что свидетельствует о полном запахивании прежнего альфегумусового горизонта или его отсутствии в исходных почвах. Содержание гумуса и структура агрогоризонта сильно варьируют, сочетая черты (агро)темногумусового, грубогумусового и серогумусового, поэтому агроземы с таким горизонтом можно назвать гумусовыми.

Стадия 1. На поверхности почвы залежных лугов находится слой травянистых остатков мощностью 1–3 см. Под ними располагается сероватобурый агрогоризонт P мощностью 20–25 см с непрочной слабовыраженной комковатой структурой, лучше оформленной по корням, и с ровной нижней границей. В его верхней части иногда встречается маломощный (2 см) серый горизонт W, густо пронизанный живыми корнями. Нижние 8 см горизонта P в двух разрезах заметно уплотнены. В агроземах альфегумусовых под горизонтом P залегает палево-охристый горизонт BF, а в агроземах гумусовых – почвообразующая порода.

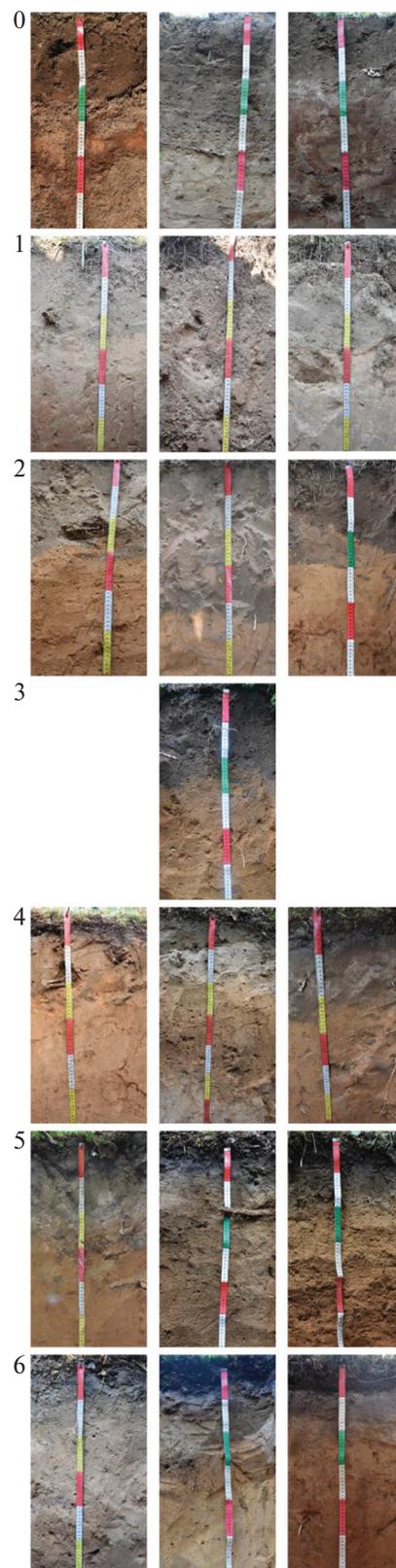


Рис. 2. Почвы изученных стадий постагрогенной сукцессии. Цветовая дифференциация ленты выполнена по дециметрам. 1–6 – стадии восстановления сосняков. Приведены фотографии передней стенки всех почвенных разрезов, характеризующих соответствующую стадию.

Таблица 4. Характерные морфологические свойства почв обследованных стадий восстановления сосновых лесов в НП “Смоленское Поозерье”

Стадия	Подстилка*, мм			Горизонт А		Граница между (старо)пахотным и верхним естественным горизонтом	Признаки оподзоливания	Специфические горизонты**
	O1	O2	O3	окраска	структура			
0	2 ± 1	0	0	7.5–10YR 3/4, 10YR 4/6	Неясная комковато-ореховатая/отсутствует	Ровная/слабоволнистая	–	P
1	10 ± 0	0	0	2.5, 10YR 5/6	Неясная комковатая по корням/отсутствует	Ровная	–	W, BF
2	20 ± 7	10 ± 0	0	10YR 5/6, 10YR 4/4	Отсутствует/комковатая по корням в верхней части	Ровная	ОЗПМ единично	
3	15 ± 7	25 ± 7	10 ± 0	10YR3/3	Непрочная мелкокомковатая	Волнистая	До 40% ОЗПМ в верхней части горизонта P	AУе
4	20 ± 7	15 ± 7	10 ± 7	10YR 5/(4–6)	Отсутствует	Пятнистая	До 50% ОЗПМ в грубогумусовом горизонте	АОе, аое
5	10 ± 0	15 ± 7	15 ± 7	7.5–10YR 4/(4–6)	Отсутствует	Слабоволнистая/постепенный переход	Пятна осветления	e
Фон	25 ± 7	20 ± 15	15 ± 7	5YR 3/3	Отсутствует	Слабоволнистая	Горизонт E	E

* Средняя мощность (медиана и медианное абсолютное отклонение, $n = 15$; для третьей стадии $n = 5$).

** Возникающие на данной стадии.

Примечание. Прочерк – отсутствие соответствующего свойства. ОЗПМ – отмытые от пленок зерна первичных минералов.

Стадия 2. Под молодым лесом (<30 лет) все три разреза вскрыли агрозоны альфегумусовые реградируемые. Основное их отличие от почв предыдущей стадии заключается в формировании подстилки средней мощностью 3 см, состоящей из двух подгоризонтов – деструктивного (O1) и ферментативного (O2). Ниже выделяется горизонт W мощностью 2–4 см с неясно комковатой по корням структурой. Он сменяется однородным по окраске палево-серым агрогоризонтом мощностью 28–40 см. Как и на предыдущей стадии, переход к нижележащему горизонту ясный по цвету с резкой ровной границей. Большая мощность пахотного горизонта может объясняться внесением органических удобрений и участием в севообороте пропашных культур. Ниже встречаются морфоны агрогоризонта диаметром 2–3 см, что может быть следствием деятельности личинок пластинчатых жуков (Scarabaeidae), в частности крупных (длиной до 6 см) личинок майских жуков, живу-

щих в почве 4 года. Они перемещаются в верхней метровой (по отдельным данным, двухметровой) толще и питаются корнями растений на глубине 20–30 см, что в случае рассматриваемых агрозонов соответствует горизонту P. При этом личинки заглатывают много почвы, поэтому последние сегменты их тела часто более темные. Уходя на зимовку на глубину 1–2 м, личинки майских жуков прокладывают ход, раздвигая передними конечностями почвенные частицы, поэтому какая-то часть материала верхних горизонтов может механически перемещаться, а другая часть (с содержимым кишечника) хорошо склеивается кишечными соками и может быть выброшена в минеральном горизонте. Несколько личинок майских жуков могут обитать довольно близко, что подтверждается частым обнаружением групп из 2–3 личинок. Иные механизмы образования обозначенных морфонов диаметром 2–3 см из материала агрогоризонта в обследованных почвах

кажутся маловероятными (по крайней мере, в литературе такого рода информация не обнаружена). Кроме того, в почвах стадии 2 отсутствуют иные животные, способные формировать подобные морфоны. Отдельно стоит отметить, что личинки майского жука в средней полосе России предпочитают почвы легкого гранулометрического состава, в которых легче проделывать ходы.

Стадия 3. Почвы под средневозрастными лесами (30–60 лет) диагностированы как агроземы альфегумусовые, оподзоленные, реградированные. Несмотря на наличие мощного (23–28 см) агрогоризонта, резко переходящего к нижележащему, его граница волнистая с элементами языковатости, а в верхних 3–5 см имеются признаки оподзоливания в виде светлых песчаных зерен, отмытых от красящих пленок и составляющих около 40% всех зерен. В агрогоризонте присутствуют морфоны нижележащего, вероятно, так же, как в почвах предыдущей стадии, перемещенные личинками пластинчатоусых жуков.

Стадия 4. Под средневозрастным лесом обнаружены только агроземы альфегумусовые реградированные с хорошо развитой подстилкой мощностью 4–5 см, представленной подгоризонтами О1, О2 и О3. Под ней залегает грубогумусовый бесструктурный рыхлый серый горизонт А0 мощностью 2–3 см с признаками оподзоливания в нижней части. Он сменяется буровато-серым агрогоризонтом со слабооформленной неясно комковатой структурой и мелкими Fe–Mn-конкрециями.

Стадия 5. Почвы под старовозрастными лесами (85–100 лет) значительно отличаются от почв предшествующих стадий свойствами агрогоризонта с чертами естественного горизонта АУ в структуре и с размытой нижней границей. Признаки оподзоливания отмечены во всех трех почвах данной стадии в виде однородного осветления горизонта АУра. В некоторых почвах присутствуют морфоны подзолистого горизонта Е. Мощность подстилки (2–8 см) несколько меньше, чем на стадии 4, но в ней больше мощность подгоризонта О3. Эти почвы отнесены не к агроземам, а к альфегумусовым — дерново-подбурам оподзоленным постагрогенным.

Таким образом, песчаные почвы постагрогенных ландшафтов НП “Смоленское Поозерье” представлены следующими типами отделов агроземов и альфегумусовых почв: агроземами альфегумусовыми и гумусовыми и дерново-подбурами постагрогенными.

В целом, выявленные тренды восстановления морфологических свойств песчаных почв согласуются с описанными ранее в южной тайге Нов-

городской области, где альфегумусовые почвы диагностированы только под старовозрастным лесом (около 100 лет), а под средневозрастным (43 года) выделены различные подтипы агроземов. В почвах НП не формируется горизонт ВН в нижней части горизонта Р как в постагрогенных почвах Новгородской области [19, 20], что может объясняться более южным положением НП.

ПОЧВЕННАЯ МАКРОФАУНА

Стадия 0. На пашне минимальна численность почвенной макрофауны: 46 ± 15 экз./м² ($p_{H1} < 0.001$; $p_{H2} = 0.081$). Из-за отсутствия подстилки здесь не встречены такие крупные сапрофаги, как дождевые черви, двупарноногие многоножки (кивсяки) и моллюски. В сохранившихся фрагментах травянистого опада обнаружены мелкие хищные беспозвоночные (пауки), миксофаги (личинки и имаго жуков-стафилинид), фитофаги (имаго жуков-шелкунов и жуков листоедов), сапрофаги (имаго лесных тараканов и личинки комаров-долгоножек (табл. 5)), которые суммарно составляют около 30% биомассы макрофауны. Более 70% биомассы составляют беспозвоночные, населяющие пахотный горизонт. Среди них сильнее всего на свойства почвы влияют крупные собственно почвенные дождевые черви за счет прокладывания ходов и трофической активности, среди которых доминирует “пашенный червь” *Aporrectodea caliginosa* и личинки пластинчатоусых жуков, главным образом — майского жука. Однако при полевом описании копролиты и ходы землероев не обнаружены. Возможно, это связано с низким обилием этих почвенных беспозвоночных в почвах рассматриваемой серии [35] и слабой устойчивостью таких биогенных новообразований в почвах легкого гранулометрического состава.

Стадия 1. На залежных лугах численность и биомасса беспозвоночных (84 экз./м² и 6.0 г/м² соответственно) значимо выше, чем на пашне ($p_{U1} = 0.05$, $p_{U2} = 0.19$ и $p_{U1} = 0.01$, $p_{U2} = 0.28$ соответственно). Вероятно, это связано с богатством травяного опада и активным заселением освобожденных от антропогенного вмешательства открытых луговых биотопов летающими насекомыми, личинки которых вносят особенно значительный вклад в биомассу. На этой стадии среди подстилочной фауны больше разнообразие хищных беспозвоночных (пауки, жужелицы, стафилиниды родов *Staphylinus*, *Xantholinus*). Появление двупарноногих многоножек-кивсяков свидетельствует об улучшении трофических условий и для сапрофагов. В верхней части горизонта Р обитают круп-

Таблица 5. Состав макрофауны почвенных горизонтов на разных стадиях восстановления сосновых лесов в НП “Смоленское Поозерье”

Таксон (семейство), онтогенетическое состояние	Органогенные горизонты (подстилка – О)	Органо-минеральные горизонты (гумусовые и пахотные – АО, АУ, Р, W)	Органо-минеральные и минеральные горизонты (Е, ВF, ВС, С, D)	Минеральные горизонты (Е, ВF, ВС, С, D)
Chrysomelidae (листоеды): И	0, 1, 3, 5, 6	–	–	–
Elateridae (щелкуны): И	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	–	–	–
Elateridae (щелкуны): Л		0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 6	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6
Pentatomidae (щитники): И	6	–	–	–
Ectobiidae (лесные тараканы): И	0, 1, 2, 4, 6	–	–	–
Julidae (кивсяки): П, Ю	1, 2, 3, 4, 5, 6	–	–	–
Limacidae (легочные улитки): П	5, 6	–	–	–
Tipulidae (комары-долго- ножки): Л	0, 2, 3, 5	–	–	–
Lumbricidae (дождевые черви – подстилочная группа): П, Ю	2, 3, 4, 5, 6	–	–	–
Lumbricidae (дождевые черви – почвенно-подстилочная группа): П, Ю	–	1, 5, 6	–	–
Lumbricidae (дождевые черви – собственно-почвенная группа*): П, Ю	–	–	0, 1	–
Araneidae (пауки-кругопряды): И	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	–	–	–
Cantharidae (жуки мягкотелки): И	1, 2	–	–	–
Carabidae (жужелицы): И	1, 2, 3, 4, 5, 6	–	–	–
Carabidae (жужелицы): Л		0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	–	–
Staphylinidae (стафилиниды): И, Л	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 6	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6
Scarabaeidae (пластин-чато- усые жуки): Л	–	0	–	1, 2, 3, 4, 5
Lithobiidae (костянки): П, Ю	–	–	–	1, 2, 3, 4, 5, 6
Geophilidae (геофилы): П, Ю	–	–	–	2, 3, 5, 6

* В засушливый сезон и на зиму переходят в диапаузу на глубины 30–60 см.

Примечание. 0–6 – стадии восстановления сосновых лесов. Прочерк – представители данного таксона не встречены. Л – личинка, И – имаго, П – половозрелый, Ю – ювенильный.

ные почвенно-подстилочные дождевые черви (*Lumbricus rubellus*) и собственно-почвенные (*A. caliginosa* и *Octolasion lacteum*). Активной гумификации растительных остатков в большей степени способствуют почвенно-подстилочные черви и двупарноногие многоножки. На более поздних стадиях (2–5) их деятельность способствует превращению

свежего опада, сопровождающемуся увеличением мощности соответствующих подгоризонтов О2 и О3, в ферментированную и гумифицированную подстилку.

Стадии 2–5. На уровне тенденции можно отметить снижение биомассы и численности почвенной макрофауны при зарастании лугов древес-

ной растительностью за счет сокращения обилия летающих насекомых (при формировании древесного полога) и крупных сапрофагов – почвенно-подстилочных и собственно-почвенных дождевых червей. Отсутствие этих групп червей на ранних стадиях восстановления леса вызвано ухудшением трофических свойств опада в связи с существенным уменьшением доли легкоразлагаемых компонентов (на лугу она составляет 100%).

В ряду постагрогенных почв под разновозрастными сосняками увеличивается численность беспозвоночных от молодых (55 экз./м²) к средневозрастным (67 экз./м²; $p_{U1} = 0.24$ и $p_{U2} = 0.22$) и старовозрастным лесам (110 экз./м²; $p_{U1} = 0.001$ и $p_{U2} = 0.0495$). Значимых различий между биомассой беспозвоночных в почвах молодых (стадия 2) и средневозрастных (стадии 3 и 4) лесов не выявлено ($p > 0.05$): в этих лесах биомасса варьирует от 2.0 ± 0.4 до 3.0 ± 0.5 г/м². Увеличивается разнообразие подстилочной фауны. Начиная со второй стадии, постоянно встречаются мелкие лесные виды дождевых червей подстилочной группы – *Dendrobaena octaedra* и *Dendrodrilus rubidus tenuis*. Однако они не способны мигрировать в более глубокие почвенные горизонты, поэтому их прямое влияние ограничивается главным образом подстилкой, т.е. преобразованием грубых растительных остатков в лесной гумус типа модер. Среди беспозвоночных, перемещающих органическое вещество по почвенному профилю, можно отметить только личинок пластинчатоусых жуков, которые развиваются несколько лет в почве, зимуют на глубине более 1 м, а весной поднимаются в верхние минеральные и органогенные горизонты. Вероятно, жизнедеятельность этих личинок обуславливает наличие небольших биогенных морфонов в разных почвенных горизонтах стадий 2 и 3. Влияние почвенной макрофауны на морфологические свойства нижележащих минеральных горизонтов оценить трудно, так как обитающие здесь косянки и геофилы (хищные многоножки), а также личинки жуков-щелкунов (фитофагов) имеют небольшие размеры.

В старовозрастных лесах (стадия 5) возрастание доли легкоразлагаемой фракции опада определяет возможность восстановления крупных почвенно-подстилочных дождевых червей (*L. rubellus*), которые обитали на луговой стадии, но отсутствовали в более молодых лесах. *L. rubellus* за счет активного потребления листовного опада может способствовать восстановлению подгоризонта ОЗ.

В условно коренных сосняках (стадия 6) минимально участие листовных деревьев и трав – ис-

точника легкоразлагаемой фракции опада – основного трофического ресурса для подстилочных сапрофагов. Среди дождевых червей в условно коренных лесах в основном наблюдаем подстилочный *D. octaedra*, а почвенно-подстилочный *L. rubellus* обнаружен единично (только ювенильные особи). Относительно более молодых лесных стадий восстановления сосняков на поздних стадиях повышается разнообразие представителей всех трофических групп почвенных беспозвоночных, жизненный цикл (или его часть) которых может протекать в различных горизонтах.

ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

В подстилке запасы $C_{орг}$ увеличиваются практически монотонно от 0.01–0.02 кг/м² на пашне до 0.8–1.2 кг/м² в средне- и старовозрастных лесах и до 0.8–1.4 кг/м² в условно коренных лесах ($p_H = 0.01$).

В слоях 0–30 и 0–100 см почвы без подстилки запасы $C_{орг}$ максимальны на стадии залежного луга (рис. 3), что объясняется высокой продуктивностью луговых сообществ, поступлением в почву большого количества подземной фитомассы, а также активностью почвенных сапрофагов (главным образом почвенно-подстилочных и собственно-почвенных дождевых червей), и минимальны в лесах 60–80-летнего возраста ($p_H = 0.011$ –0.016). Появление древесной растительности меняет структуру опада, вероятно, снижая запасы $C_{орг}$ в верхних 30 см минеральной части профиля и во всей метровой толще. При обоих вариантах расчета запасы $C_{орг}$ в почвах луга превышают запасы на пашне более чем в 2 раза ($p_U = 0.05$ в обоих случаях), что связано с изъятием фитомассы на пашне, недостаточно компенсированным внесением органических удобрений. В старовозрастных лесах запасы $C_{орг}$ в верхней 30- и 100-сантиметровой части почв уже близки к таковым в ненарушенных почвах ($p_U = 0.1$ –0.4) и превышают оба показателя, выявленные в почвах стадии 4 ($p_U = 0.05$ в большинстве случаев за исключением сравнения стадий 4 и 6 для слоя 0–30 см, где $p_U = 0.28$; и в паре средневозрастные – старовозрастные леса 0.024 и 0.071 для слоя 0–30 и 0–100 см). Наблюдаемое сокращение запасов $C_{орг}$ при смене луговой растительности лесной, минимальные значения в почвах под средневозрастными лесами и повышение запасов в почвах старовозрастных лесов отмечали Люри с соавт. [20] в аналогичной хроносерии постагрогенных песчаных почв южной тайги Новгородской области. Предполагается, что повышение запасов $C_{орг}$ на стадии старовоз-

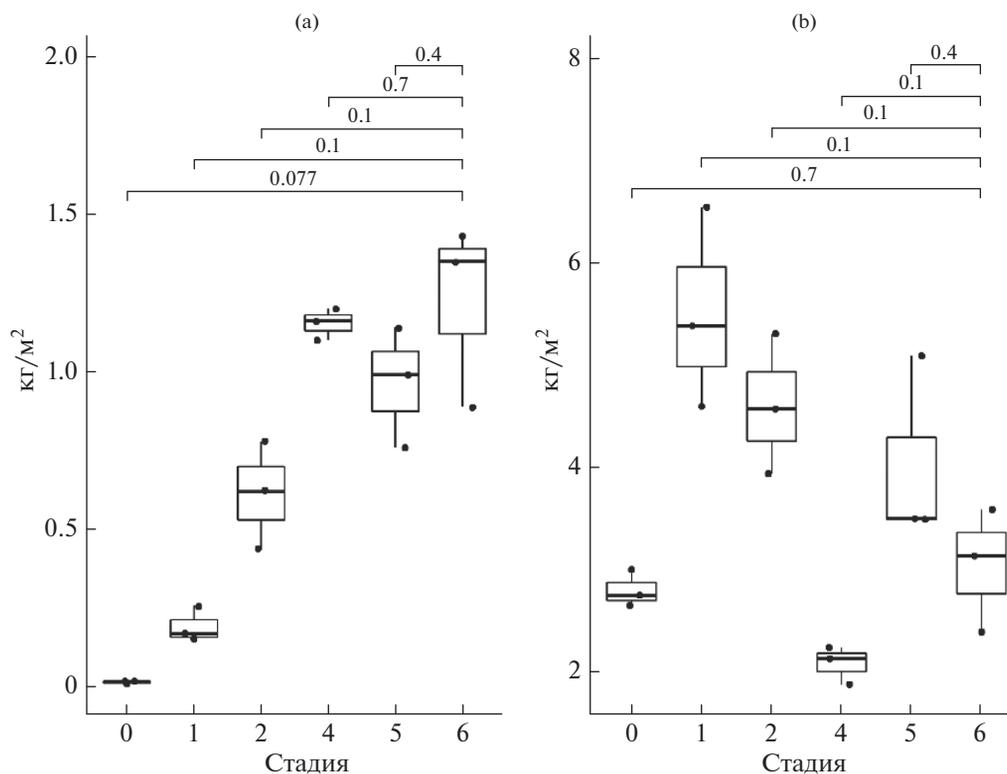


Рис. 3. Запасы $C_{\text{орг}}$ в почвах стадий 1–6 восстановления сосняков в НП «Смоленское Поозерье»: подстилка (а), 0–100 см слой почвы без подстилки (б). Вверху указаны значения p_U между соответствующими стадиями.

растного леса связано с гумификацией корневой массы и поступлением органического вещества из лесной подстилки на фоне снижения микробиологической активности. Также на стадии старовозрастного леса восстанавливается комплекс почвенных сапрофагов, обеспечивающих трансформацию подстилки.

Запасы $C_{\text{орг}}$ в верхних 0–30 см минеральной части почвы хорошо коррелируют с мощностью подстилки. Для лесных стадий наблюдается отрицательная корреляция запасов $C_{\text{орг}}$ в верхних 30 см почвы с мощностью горизонта O2 и запасами $C_{\text{орг}}$ в горизонтах O2 + O3 ($r = -0.72$ и -0.67 соответственно; $p < 0.05$, $n = 12$), а также положительная между запасами $C_{\text{орг}}$ в слое 0–30 см и долей легкоразлагаемых компонентов в подстилке ($r = 0.62$). Отрицательные корреляции выявлены между мощностью подстилки, запасами $C_{\text{орг}}$ и биомассой сапрофагов, потребляющих подстилку ($r = -0.76$, $p < 0.05$, $n = 12$). При этом биомасса сапрофагов и запасы $C_{\text{орг}}$ в верхних 30 см минеральной части почвы положительно связаны с долей легкоразлагаемых фракций опада ($r = 0.73$, $p < 0.05$, $n = 12$).

Таким образом, в почвах рассматриваемой хроносерии $C_{\text{орг}}$ накапливается как в органоген-

ных (подстилка), так и в органо-минеральных (гумусовых) горизонтах, что может быть обусловлено фиксацией образующегося наземного опада в виде ферментированной и гумифицированной подстилки, а также нейтрализацией образующихся гумусовых кислот Fe, Ca и Mg и низкой подвижностью таких соединений в слабокислых условиях, несмотря на легкий гранулометрический состав почв. Ненарушенные и постагрогенные почвы характеризуются более высокими запасами $C_{\text{орг}}$, чем почвы пашен: 3.2 и 5.7 кг/м² в почвах лесов возрастом 60–80 лет и лугов соответственно, при 2.8 кг/м² на пашнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Смоленском Поозерье почвы постагрогенных ландшафтов сосновых лесов на легких породах представлены агроземами и постагрогенными альфегумусовыми. В ходе постагрогенной сукцессии в старопашотном горизонте почв увеличивается количество отмытых зерен первичных минералов, переход к нижележащему становится постепенным, а граница – размытой. В почвах 85–100-летнего соснового леса сохраняются признаки пахотного состояния. Ненарушенные и постагрогенные альфегумусовые почвы характери-

зуются более высокими запасами органического углерода, чем агроземы. На долю подстилки приходится до 40% от всех запасов органического углерода почв.

Показано дифференцированное влияние почвенной макрофауны на морфологические свойства почв разных стадий изученной хроносерии. На начальных этапах постагрогенной сукцессии высока роль собственно-почвенных дождевых червей и личинок пластинчатоусых жуков, заселяющих в разные сезоны органоминеральные и более глубокие минеральные горизонты. При их вертикальном перемещении в почвенном профиле формируются морфоны, различимые невооруженным глазом. Далее, в ходе лесовосстановления возрастает роль подстилочных сапрофагов – подстилочных и почвенно-подстилочных дождевых червей, двупарноногих многоножек, моллюсков. Перерабатывая поступивший листовой опад, они способствуют формированию новых органогенных горизонтов О2 и О3. На поступление органического вещества в почву также влияют хищники (пауки, жужелицы, стафилиниды, геофилы, косянки) и фитофаги (жуки-листоеды, жуки-щелкуны), разнообразие которых восстанавливается в ходе сукцессии. Из-за мелких размеров и невысокой биомассы оценить их влияние на морфологические свойства почв сложно.

Выявлены отрицательные корреляции между запасами углерода в минеральной части лесных почв, отдельными свойствами подстилки (мощностью, запасами органического углерода) и биомассой сапрофагов, для которых подстилка является основным трофическим ресурсом. Биомасса сапрофагов и запасы углерода в верхних 30 см минеральной части почвы положительно связаны с долей легкоразлагаемых фракций опада.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарны участникам полевых работ: Д.Р. Бардашову, Е.В. Басовой, Ю.Б. Бачинскому, А.В. Титовец и Е.В. Тихоновой. Фотокопии материалов генерального межевания XVIII–XIX вв. получены в Государственном архиве Смоленской области и Российском государственном архиве древних актов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Распределение агрохимических показателей по пахотным почвам Демидовского и Духовщинского районов, а также всей Смоленской области по состоянию на 01.01.2017 г. [31].

Таблица S1. Сельскохозяйственная статистика по Поречскому уезду и Смоленской губернии и области.

Таблица S2. Характеристика агрохимических мер и показателей для пахотных почв Смоленской области [31].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках проекта РФФ № 21-74-20171.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Я.Я.* Очерк растительности Смоленской губернии // Сельское хозяйство Смоленской губернии. 1924. С. 107–119.
2. *Ахмалишев К.Б.* Влияние земледельческого освоения на свойства дерново-подзолистых суглинистых почв современных лесов. Дис. ... канд. с.-х. н. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2007. 149 с.
3. *Баранова О.Ю., Номеров Г.Б., Строганова М.Н.* Изменение свойств пахотных дерново-подзолистых почв при зарастании их лесом // Почвообразование в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1989. С. 60–78.
4. *Богатырев Л.Г.* О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
5. *Владыченский А.С., Телеснина В.М., Румянцева К.А., Чалая Т.А.* Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги на примере Костромской области // Почвоведение. 2013. № 5. С. 518–529. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1305016X>
6. *Гиляров М.С.* (ред). Методы почвенно-зоологических исследований. М.: Наука, 1975. 304 с.
7. *Дымов А.А.* Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 318 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>
8. *Ериов Д.В., Гаврилюк Е.А., Карпущина Д.А., Ковганко К.А.* Новая карта растительности центральной части европейской России по спутниковым данным высокой детальности // Доклады АН. 2015. Т. 464. № 5. С. 639–641. <https://doi.org/10.7868/S0869565215290289>
9. *Исянова Р.А., Коок В.А.* Организационно-экономические условия сельскохозяйственного производства Смоленской области. Комитет по земельным ресурсам и землеустройству Смоленской области. Смоленск, 1995. 352 с.
10. *Карпачевский Л.О., Строганова М.Н., Баранова О.Ю., Тощева Г.П., Щеголькова Н.М.* Эволюция почвенного покрова при лесовосстановлении // Успехи почвоведения. Советские Почвоведы к XIII Международному конгрессу почвоведов. М.: Наука, 1986. С. 135–142.

11. Карта Лесоустройства, 2013, 2014. Смоленск: ФГБУ Национальный парк “Смоленское Поозерье” Смоленской области, 2015.
12. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Универсум, 2004. 341 с.
13. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос. 1977. 221 с.
14. Королева Н.В., Тихонова Е.В., Еришов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке “Смоленское Поозерье” за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. Т. 2018. № 2. С. 83–96.
15. Лихарев И.М., Раммельмейер Е.С. Наземные моллюски фауны СССР. М.: Рипол Классик, 2013. Т. 43. 511 с.
16. Локшина И.Е. Определитель двупарноногих многоножек (Diplopoda) равнинной части Европейской территории СССР. М.: Наука, 1969. 78 с.
17. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Кузяков Я.В. Изменение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов // Агрехимия. 2009. № 5. С. 5–12.
18. Лукина Н.В., Кузнецова А.И., Гераськина А.П., Смирнов В.Э., Иванова В.Н., Тебенькова Д.Н., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Тихонова Е.В. Неучтенные факторы, определяющие запасы углерода в лесных почвах // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 92–110. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-10-92-110>
19. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
20. Люри Д.И., Карелин Д.В., Кудиков А.В., Горячкин С.В. Изменение почвенного дыхания в ходе постагрогенной сукцессии на песчаных почвах в южной тайге // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1060–1072. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070058>
21. Милов Л.В. Великорусский пахарь и особенности российского исторического процесса. М.: РОССПЭН, 1998. 574 с.
22. Народное хозяйство Смоленской области за 1957 г. статистический сборник. Смоленск: Кн. изд-во, 1958. 160 с.
23. Огурева Г.Н., Леонова Н.Б., Булдакова Е.В., Кадетов Н.Г., Архипова М.В., Микляева И.М., Бочарников М.В., Дудов С.В., Игнатова Е.А., Игнатов М.С., Мучник Е.Э., Урбанавичюс Г.П., Даниленко А.К., Румянцев В.Ю., Емельянова Л.Г., Леонтьева О.А., Романов А.А., Константинов П.А. Биомы России. Масштаб 1 : 7500000. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2018.
24. Пичужкин Н.А. Хозяйство Александра Энгельгардта (к 150-летию “12 писем из деревни”) // Наука без границ. 2021. № 2(54). С. 11–15.
25. Плавильщиков Н.Н. Определитель насекомых: краткий определитель наиболее распространенных насекомых европейской части России. М.: Топикал, 1994. 544 с.
26. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
27. Раздел научного обоснования к ТЭО по национальному парку “Смоленское Поозерье”. Смоленск, 1992. 232 с.
28. Росстат. Российский статистический ежегодник / Под ред. Суринова А.Е. 2017. 686 с. https://www.gks.ru/free_doc/doc_2017/year/year17.pdf
29. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1435. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>
30. Скворцова Е.Б., Баранова О.Ю., Нумеров Г.Б. Изменение микростроения почв при зарастании пашни лесом // Почвоведение. 1987. № 9. С. 101–109.
31. Слюсарь И.А., Силаева О.П., Бабурченкова З.П. Динамика показателей почвенного плодородия и использование средств химизации в Смоленской области // Достижения науки и техники АПК. 2018. № 4. С. 10–15. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10402>
32. Соловьев Я.А. Сельскохозяйственная статистика Смоленской губернии. М.: Издвение учен. ком. М-ва гос. имуществ, 1855. 486 с.
33. Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И., Маслов М.И. Динамика поступления растительного опада и некоторых свойств лесных подстилок при постагрогенном лесовосстановлении в условиях южной тайги // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2019. № 4. С. 3–10.
34. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мишин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенной эволюции в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120115>
35. Шопина О.В., Герасимова М.И., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенов И.Н. Инвентаризация и картографирование почв национального парка “Смоленское Поозерье” // Лесоведение. 2022. № 5. С. 478–493. <https://doi.org/10.31857/S0024114822040088>
36. Шопина О.В., Гераськина А.П., Кузнецова А.И., Тихонова Е.В., Титовец А.В., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенов И.Н. Стадии постагрогенного восстановления компонентов экосистем основных лесов национального парка “Смоленское Поозерье” // Почвоведение. 2023. № 1. С. 10–24. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600706>
37. Энгельгардт А.Н. Из деревни. 12 писем: 1872–1887. СПб.: Наука, 1999. 714 с.
38. Якушев П.А. Сельское хозяйство Смоленской губернии в 1917 году // Исторические, философские, политические и юридические науки, культуроло-

- гия и искусствоведение // Вопросы теории и практики. 2012. № 5. С. 224–226.
39. *Dashora A., Lohani B., Malik J.N.* A repository of earth resource information – CORONA satellite programme // *Current Science*. 2007. V. 92. № 7. P. 926–932.
40. *Elgersma A.M.* Primary Forest succession on poor sandy soils as related to site factors // *Biodivers. Conserv.* 1998. V. 7. № 2. P. 193–206.
<https://doi.org/10.1023/A:1008884418570>
41. *Huang W., Gonzalez G., Zou X.* Earthworm abundance and functional group diversity regulate plant litter decay and soil organic carbon level: A global meta-analysis // *Appl. Soil Ecol.* 2020. V. 150. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103473>
42. IUSS Working Group WRB, 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
43. *Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L.* Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // *Geoderma*. 2013. V. 207–208. P. 221–233.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>
44. *Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L.* Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics // *Geoderma*. 2009. V. 152. P. 35–42.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014>
45. *Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J.C., Mathis M., Brumby S.P.* Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning // *IGARSS 2021-2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2021.
<https://doi.org/10.1109/igarss47720.2021.9553499>
46. *Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V., Smirnov V.E., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Gornov A.V., Ruchinskaya E.V., Tebenkova D.N.* Linking vegetation, soil carbon stocks, and earthworms in upland coniferous–broadleaf forests // *Forests*. 2021. V. 12. P. 1179.
<https://doi.org/10.3390/f12091179>
47. *Larionova A.A., Rozonova L.N., Yevdokimov I.V., Yermolayev A.M., Kurganova I.N., Blagodatsky S.A.* Land-use change and management effects on carbon sequestration in soils of Russia’s South Taiga zone // *Tellus B*. 2003. V. 55. P. 331–337.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2003.00042.x>
48. *Matuszkiewicz J.M., Kowalska A., Kozłowska A., Roo-Zielińska E., Solon J.* Differences in plant-species composition, richness and community structure in ancient and post-agricultural pine forests in central Poland // *For. Ecol. Manage.* 2013. V. 310. P. 567–576.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.060>
49. *Robertson G.P., Coleman D.C., Sollins P., Bledsoe C.S.* (Eds.). Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press on Demand, 1999. V. 2. 480 p.
50. *Woziwoda B., Parzych A., Kopeć D.* Species diversity, biomass accumulation and carbon sequestration in the understorey of post-agricultural Scots pine forests // *Silva Fennica*. 2014. V. 48. P. 1119–1123.
<https://doi.org/10.14214/sf.1119>
51. *Zanella A., Jabiol B., Ponge J.-F., Sartori G., de Waal R., Delft B.V., Graefe U., Cools N., Katzensteiner K. et al.* European Humus Forms Reference Base. 2011.
<http://doi.org/hal-00541496v2>

Macrofauna and Organic Matter in Postagrogenic Sandy Soils at the NW Smolensk Region (Russia)

D. A. Terekhova^{1, 2}, M. A. Smirnova^{2, 3}, A. P. Geraskina¹, O. V. Shopina^{1, 2}, A. I. Kuznetsova¹, I. M. Bavshin^{1, 4}, G. V. Klink⁵, P. R. Enchilik^{1, 2}, V. R. Khokhryakov^{1, 6}, M. I. Gerasimova^{2, 3}, and I. N. Semenov^{1, 2, *}

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

³Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

⁴National Park Smolensk Lakeland, Przhevalskoe, 216270 Russia

⁵Kharkevich Institute for Information Transmission Problems RAS, Moscow, 119017 Russia

⁶National Park Sebezhskiy, Sebezhs, 182250 Russia

*e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Natural reforestation on the abandoned arable lands is one of the characteristic processes that triggers the transformation of soils, accompanied by the change in the abundance, biomass, and taxonomic structure of the soil macrofauna. The assessment of the restoration potential of the soil properties and soil macrofauna to the natural state, the duration of this period, the dynamics of soil organic carbon stocks, and the role of macrofauna in this process at different stages of post-agrogenic successions is relevant for prediction of changes in ecosystem components and their role in the storage of organic carbon under various land use scenarios. The work is based on the data on organic carbon reserves, morphological properties of soils, abundance, biomass and taxonomic structure of the soil macrofauna of arable lands, primary forests and 5 stages of pine for-

est restoration (fallow meadows and pine forests of different ages) at the Smolenskoye Poozerye National Park (Smolensk region). It was revealed that in the soils of the 85–100-year-old pine forests, signs of plowing are preserved in the form of the smooth lower boundary of the humus horizon. At the same time, signs of soil regradation appear already at the meadow stage and are expressed in the formation of a thin humus horizon penetrated by roots, which transforms further at the next stages. In the litter and mineral part of the soil, the carbon stocks change non-monotonically with a maximum at the meadow stage and a minimum in 70–80-year-old forests. By the age of 80, the stock of organic carbon in the mineral part of soils is almost restored to the background values. The composition of soil macrofauna changes drastically during the transition from meadow to forest communities. At the initial stages (in agrocenoses and fallow meadows), the fauna of mineral soil horizons predominates: endogeic earthworms and larvae of lamellar beetles. Further, the fauna of organic horizons is restored, among which there is a high proportion of saprophages – epigeic and epi-endogeic earthworms, which contribute to the differentiation of litter. The biomass of saprophages has a negative correlation with the carbon reserves in the mineral part of forest soils, the thickness and reserves of organic carbon in the litter, and a positive correlation with the share of the easily decomposable litter fraction.

Keywords: chronosequence, post-agrogenic soils, invertebrates, litter, Podzols, Arenosols, time-for-substitution, ecological indicators