

Д.А. Данилов, А.А. Яковлев, Д.А. Зайцев, А.А. Иванов

ИЗМЕНЕНИЯ В ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВАХ В ХОДЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЮГО-ЗАПАДА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. В последние десятилетия наблюдается значительное сокращение площадей пахотных земель; данный процесс имеет повсеместный устойчивый характер в бореальной зоне как на территории России [Kalinina et al., 2019; Anpilogova, Pakina, 2022], так и в других странах мира, особенно на территории умеренного пояса [Susyan et al., 2011; Spohn et al., 2015; Kukuļs et al., 2019; Segura et al., 2020]. Данный процесс связан с глубокими экономическими и социальными изменениями, произошедшими в последние десятилетия конца XX и начале XXI веков. На вышедших из активного сельскохозяйственного пользования землях начинается процесс восстановления лесной аборигенной растительности [Люри и др., 2010; Карпин и др., 2017; Государственный (национальный) доклад ..., 2020; Захарченко и др., 2021; Данилов и др., 2023; Danilov et al., 2020]. Вследствие процесса восстановления естественного растительного покрова на постагрогенных территориях происходят изменения в экологических функциях почвы и в почвообразовательном процессе, которые в свою очередь ведут к эволюционным изменениям во всем почвенном комплексе. В ряде исследований отмечается влияние растительного покрова на изменения, происходящие в микробном сообществе и восстановление его естественного баланса [Курганова и др., 2018; Susyan et al., 2011; Gunina et al., 2018; Lopes de Gerenyu et al., 2018; Ovsepyan et al., 2019]. Изменения в постагрогенных почвах идут в направлении к состоянию, максимально приближенному к ненарушенному [Апарин, 1992; Шафран и др., 2021; Бурдуковский, Перепелкина, 2022; Литвинович и др., 2022; Kukuļs et al., 2019; Anpilogova, Pakina, 2022]. В ходе восстановительной сукцессии в первую очередь эти изменения затрагивают агрохимические, физические и биологические свойства почвы. Почвенное плодородие на бывших пахотных землях в значительной степени зависит от истории использования залежных территорий; почвенные условия будут определять последующую смену и развитие растительного покрова [Захарченко и др., 2021; Spohn et al., 2015; Kalinina et al., 2019; Kukuļs et al., 2019; Danilov et al., 2020]. Анализ исследований по данной проблематике показывает, что изу-

чение изменений почвенных условий в ходе сукцессии древесно-кустарниковой растительности постагрогенных земель является актуальным не только для России, но и для других стран мира.

В связи со сложностью и большим количеством факторов, влияющих на такой объект исследования, как антропогенно нарушенная почва, в научной литературе, освещдающей вопросы взаимоотношений почвенного комплекса и естественной растительности, встречаются данные и результаты, которые противоречат друг другу, что свидетельствует о необходимости продолжения проведения исследований в данном направлении. Вследствие этого целью проводимого исследования было выявление закономерностей почвенного состояния под растительностью начальных сукцессионных стадий постагрогенных почв.

Материалы и методика исследования. Ленинградская область входит в состав двух физико-географических стран: Фенноскандии (страны Балтийского щита) и Русской (Восточно-Европейской) платформенной равнины. В зональном ряду вся территория области относится к бореальной (таежной) зоне Евразии. По лесорастительному районированию она принадлежит к Балтийско-Белозерскому таежному району. Сельскохозяйственные угодья в Ленинградской области занимают 20,3% от общей территории, их площадь составляет 223 тыс. га. Однако по данным учёта службы картографии и кадастра более 30% земель сельскохозяйственного назначения заросли древесно-кустарниковой растительностью [Доклад о состоянии ..., 2020].

Объекты исследования располагаются на юго-западе Ленинградской области в Гатчинском районе [Данилов и др., 2023; Danilov et al., 2020]. Участки приурочены к постагрогенным землям на плакорных возвышенностях Оредежского плато, которые примыкают к бассейну реки Оредеж. Почвы на данных участках сформированы на двучленных отложениях и представляют собой супесчано-суглинистый нанос на красноцветном вулканом суглинке. Данные почвы характерны для района исследования и занимают свыше 40% территории земель сельскохозяйственного назначения и лесного фонда [Пестряков, 1973; Чертов, 1981].

Для создания хронологического ряда были подобраны участки с различным сроком залежи и стадией восстановительной сукцессии. Район исследования характеризуется давним сроком сельскохозяйственной освоенности. Срок сельскохозяйственного использования первых трех опытных участков составляет более 200 лет, что было установлено по картам Царскосельского уезда Петербургской губернии Российской империи конца XVIII века. Срок залежи первых двух участков составляет 25 лет. Первый участок представляет собой густое возобновление лиственных пород, а

второй участок разрежен из-за пирогенного воздействия и отличается присутствием возобновления хвойных пород (сосны и ели) (табл. 1). Третий участок имеет срок залежи 5 лет и представляет собой начальное, низкоствольное возобновление лиственных пород; последней выращиваемой сельскохозяйственной культурой на данном участке являлся райграс однолетний. Срок залежи четвертого участка составляет 10 лет, он представляет собой возобновление из лиственных пород; последней выращиваемой сельскохозяйственной культурой был картофель.

Таблица 1

Таксационные характеристики древесной растительности на бывших пахотных участках

Taxation characteristics of woody cover on previously arable sites

Срок залежности участка, лет	Порода	Коэффиц. состава	D _{ср.} , см	H _{ср.} , м	Возраст, лет	Численность, экз. на 1 га
5 лет	С*	0,6	—	0,6	3	242
	Е	0,3	—	0,6	3	121
	Б	5,8	—	0,7	3	2424
	Ив	3,3	—	0,7	3	1394
10 лет	Б	2,2	2,6	3,7	7	2125
	Ос	0,4	1,2	2,0	4	375
	Ив древ.	1,6	1,7	2,8	5	1500
	Ив куст.	5,8	2,2	3,2	5	5563
25 лет	Лиственный древостой	Б	3,2	6,0	7,7	2200
		Ос	0,4	3,9	5,6	275
		Ив древ.	3,6	4,2	6,4	2463
		Ив куст.	2,8	2,4	3,6	1950
	Древостой с наличием хвойных пород	С	0,2	2,4	2,7	32
		Е	0,2	0,6	0,8	36
		Б	1,3	4,7	6,8	268
		Ос	2,6	3,9	5,9	556
		Ив древ.	2,9	4,0	5,7	592
		Ив куст.	2,8	2,9	4,4	580

Примечание: *здесь и далее С – сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L.; Е – ель европейская, *Picea abies* (L.) Karst.; Б – береза, *Betula* sp.; Ос – осина обыкновенная, *Populus tremula* L.; Ив – ива, *Salix* sp.; Ив куст. – ива кустовидная; Ив древ. – ива древовидная.

На опытных участках постагрогенных земель в древесном возобновлении закладывались ходовые линии с расстоянием 17 метров между учетными площадками. На учетных площадках производилась таксация возобновления древесной растительности и отбор почвенных образцов для изучения агрохимических характеристик. Таксация возобновления проводилась на площадках постоянного радиуса (10 м^2) по общепринятым в лесоводстве методам при помощи мерной вилки Haglof и высотомера Suunto. Измерение диаметра у деревьев высотой более двух метров производилось на уровне 1,3 м от уровня почвы, а у деревьев ниже – на уровне корневой шейки.

Для описания почв и отбора почвенных образцов на опытных участках закладывались почвенные разрезы и прикопки [Апарин, 2012]. Морфологическое описание и название почв производились для постагрогенных участков с использованием Классификации и диагностики почв СССР [1977] и Классификации и диагностики почв России [2004].

Рассмотрение почвенных показателей проводилось по горизонтам – бывшему пахотному и бывшему подпахотному. Из агрохимических показателей почв определялись: содержание гумуса, нитратного азота, общего азота, подвижных форм фосфора и калия, гидролитическая кислотность, сумма обменных оснований, степень насыщенности основаниями, реакция среды рН. Все агрохимические анализы проводились в нескольких повторностях для получения достоверных результатов [Агрохимия, 2017].

Содержание гумуса определялось по методу И.В. Тюрина. Общий азот в почве определялся по методу Кельдаля. Подвижный фосфор (P_2O_5) определялся по методу А.Т. Кирсанова. Количественное содержание подвижного фосфора подсчитывали на электрофотоколориметре по интенсивности окраски фосфорно-молибденовой сини. Подвижный калий (K_2O) определялся по методу А.Т. Кирсанова с последующим определением содержания калия на пламенном фотометре. Гидролитическая кислотность (ГК) почв определялась по методу Г. Каппена. Величина рН почвы определялась потенциометрически в водной и солевой (KCl) супензии [Агрохимия, 2017].

В качестве основного показателя плодородия почв и скорости минерализации органического вещества использовалось соотношение С:N, которое рассчитывалось как процентное отношение углерода органического вещества почвы к содержанию общего азота. Оптимальным для почвы считается соотношение С:N, равное 12 [Тюрин, 1956].

На опытных участках, расположенных на постагрогенных территориях, помимо агрохимических характеристик почвы определялось почвен-

ное дыхание (скорость эмиссии CO_2) и микробиологическая активность. Оба данных показателя характеризуют активность почвенных микроорганизмов и являются показателями скорости минерализации органического вещества почвы. Для сравнения динамики данных показателей в сукцессионном ряду помимо основных четырех постагрогенных участков был заложен опыт на свежевспаханном поле со схожими почвенными условиями. Скорость эмиссии углекислого газа определялась на основе метода В.И. Штатнова. Данный метод основывается на способности щелочи (NaOH) поглощать углекислый газ. Количество углекислого газа, выделенного почвой в единицу времени, высчитывалось с учетом содержания CO_2 в воздухе герметичных сосудов по контрольному сосуду [Агрономия, 2017].

Биологическая активность почвенных микроорганизмов определялась по методу, предложенному академиком Е.Н. Мишустином. Данный метод характеризует скорость разложения целлюлозы почвенными микроорганизмами. Для определения биологической активности микроорганизмов брались полосы шириной 10 см неотбеленной грубой льняной ткани и пришивались на пластиковую сетку. Затем определялся вес абсолютно сухих льняных полос. Полосы ткани с известным весом закапывались в середину гумусового горизонта на объектах исследования. После 30 дней экспозиции льняные полосы выкапывались и в лабораторных условиях отмывались, сушились до абсолютно сухого состояния и взвешивались. По разнице массы определялась интенсивность разложения целлюлозы, которая характеризует биологическую активность почвенных микроорганизмов [Мишустин, Петрова, 1963].

Общее микробное число (ОМЧ) показывает общее количество микроорганизмов в 1 г почвы. Единицей измерения ОМЧ является колониеобразующая единица (КОЕ). Для определения ОМЧ делается серия посевов из заранее приготовленных разведений. В каждую чашку Петри на питательную среду равномерно наносится 1 мл раствора стерильной пипеткой. Затем чашки выдерживаются в термостате 24 часа при температуре 37°C. Спустя сутки чашки вынимаются из термостата, и производится подсчет всех колоний микроорганизмов в наиболее пригодной для этого чашке. Затем производится перерасчет количества колоний на 1 г почвы согласно концентрации разведения, по посеву которого определялся показатель.

Для определения почвенных микромицетов производится посев в чашки Петри на специализированные среды из тех же разведений, что и для ОМЧ. Время экспозиции может составлять до 72 часов. Затем полу-

ченный материал микроскопируется для определения родовой или видовой принадлежности почвенных грибов.

Определение общего микробного числа и почвенных микромицетов производилось с помощью экспресс-тестов «Петритест». Также необходимо указать, что к моменту отбора почвенных проб для определения показателей биологической активности почв опытный участок со сроком залежи 5 лет был распахан и засеян овсом.

Для установления и оценки влияния различных абиотических и биотических факторов на компоненты биогеоценоза и влияния его частей друг на друга было рассчитано значение корреляции по Пирсону. Оценка тесноты корреляционной связи производилась с использованием таблицы Чеддока. Для установления наличия связи между различными факторами и признаками применялся однофакторный дисперсионный анализ. Определение значимости F -критерия производилось по стандартным таблицам. Влияние фактора является статистически достоверным, когда расчетное значение F -критерия превышает табличное. Для исследования взаимодействий в почве дисперсионный анализ проводился на 10% доверительном интервале.

Описание совокупности полевых и лабораторных данных проводилось с использованием инструментов описательной статистики. Для характеристики разброса выборки рассчитывались: среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации, коэффициенты ассимметрии и эксцесса. Для всех расчетов использовались программа Microsoft Excel 2007 и статистический пакет Statgraphics Centurion 18.

Результаты исследования. Почвенный покров территории исследуемого массива, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, сложен почвами, относящимися к постлитогенным почвам, к отделам альфегумусовых почв и агроземов. Преобладающими почвами на исследуемых участках, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, являлись: постагогенные средне- и глубокопахотные агроземы иллювиально-железистые, супесчано-суглинистые контактно-глеевые на двучленном наносе; постагогенные среднепахотные неглубокоосветленные агродерново-подзолы альфегумусовые, супесчано-суглинистые контактно-глеевые на двучленном наносе [Классификация..., 2004] (или сильноокультуренные дерново-подзолистые иллювиально-железистые, супесчано-суглинистые контактно-глеевые на двучленном наносе; сильноокультуренные слабо-подзолистые иллювиально-железистые, супесчано-суглинистые контактно-глеевые на двучленном наносе [Классификация..., 1977]).

Средняя глубина бывшего пахотного горизонта почв исследуемых участков составляет 30 см. На всей площади исследуемых постагрогенных участков разного срока залежи в окультуренном горизонте полностью отсутствует плужная подошва или ее следы. Структура данного горизонта на всех участках представлена структурными отдельностями кубовидного типа; среди них преимущественно преобладают комковатые и зернистые отдельности. На участках с густым возобновлением древесных пород начинает формироваться и накапливаться подстилочный горизонт.

В срединных иллювиальных горизонтах наблюдается большое количество железистых новообразований в виде железистых дробовинок, представляющих собой гидрооксиды железа. Сам двучленный нанос можно отнести к малоконтрастному по гранулометрическому составу, так как разница между кроющим и подстилающим слоями составляет одну ступень классификации (супесь подстилает суглинок). По мощности поверхностных отложений на исследуемых участках преобладают маломощные (глубина зоны контакта до 50 см) и среднемощные (глубина зоны контакта 50-80 см) двучленные наносы. Кроющий супесчаный нанос значительно изменен почвообразовательными процессами. Подстилающий суглинистый слой затронут процессом оглеения. Смена пород совпадает с нижней границей иллювиальных горизонтов.

Бывший пахотный горизонт постагрогенных почв исследуемых участков в целом характеризуется среднекислой реакцией среды (pH_{KCl} находится в пределах 4,6–5,0), кроме участка со сроком залежи 25 лет с густым лиственным возобновлением: на нем почва имеет сильнокислую реакцию среды (pH_{KCl} находится в пределах 4,1–4,5) (табл. 2.). По содержанию гумуса участки с залежью 5 и 25 лет с наличием хвойного подроста являются среднеобеспеченными (содержание гумуса 3–4%). Наибольшим содержанием гумуса обладает участок с залежью 25 лет с густым лиственным возобновлением (является хорошо обеспеченным), а наименьшее содержание органического вещества наблюдается на поле с залежью 10 лет (по степени обеспеченности гумусом является бедным). По содержанию подвижного фосфора участки с залежью 5 и 10 лет являются высокообеспеченными, а участки со сроком залежи 25 лет – низкообеспеченными. Все постагрогенные участки, кроме участка со сроком залежи 10 лет, по содержанию подвижного калия являются низкообеспеченными, а 10-летний участок является среднеобеспеченным. Наибольшее содержание общего азота наблюдается у участка со сроком залежи 10 лет, а наименьшее – у поля залежью 25 лет с разреженным возобновлением с наличием хвойных пород.

Соотношение С:N характеризует скорость минерализации гумуса. Наименьшее значение наблюдается на участке с залежью 10 лет. Это свидетельствует о том, что в данных почвах скорость минерализации органического вещества значительно превышает скорость его накопления. Также довольно низкое значение данного показателя у поля со сроком залежи 5 лет, что, возможно, является характерным для бывших пахотных земель с небольшим сроком залежи. На участках с залежью 25 лет соотношение С:N имеет более высокие значения, что свидетельствует об ускорении процесса накопления гумуса или о снижении скорости его минерализации. Данная разница показателей соотношения С:N у постагрогенных территорий с небольшим сроком залежи и участков с более давней залежью, вероятно, связана с изменениями в почвенном комплексе, а именно в процессах накопления и минерализации гумуса. Данные изменения, скорее всего, обусловлены сменами растительных сообществ и увеличением доли влияния древесных пород.

Таблица 2

**Агрохимическая характеристика постагрогенных почв
на объектах исследования**

Agro-chemical characterization of postagricultural soils at the study sites

Срок залежи		Гумус, %	N, %	C:N	P ₂ O ₅ , мг/100 г	K ₂ O, мг/100 г	pH _{KCl}
5 лет		3,47 ±0,08	0,36 ±0,001	5,56 ±0,10	22,36 ±0,28	5,39 ±0,10	4,83 ±0,04
10 лет		1,03 ±0,06	0,42 ±0,003	2,63 ±0,08	27,50 ±0,06	10,94 ±0,41	4,61 ±0,03
25 лет	Лиственный древостой	4,42 ±0,07	0,30 ±0,002	8,53 ±0,11	3,80 ±0,38	5,10 ±0,40	4,12 ±0,03
	Древостой с наличием хвойных пород	3,92 ±0,09	0,27 ±0,003	8,41 ±0,09	5,65 ±0,45	4,88 ±0,36	4,60 ±0,02

Для поля со сроком залежи 5 лет наибольшим рассеиванием выборки обладает содержание фосфора в бывшем пахотном (далее – пахотный) и бывшем подпахотном (далее – подпахотный) горизонтах, а наименьшим – содержание азота. Самая большая вариация у соотношения С:N – в подпахотном горизонте, а самая маленькая – у величины pH. Наибольшим раз-

махом выборки обладает содержание подвижного фосфора в подпахотном горизонте, а наименьшим – содержание общего азота в пахотном горизонте. На данном объекте значительные отклонения от нормального распределения наблюдаются у содержания гумуса в пахотном и подпахотном горизонте и у соотношения С:N только в пахотном горизонте.

Наибольшей взаимосвязью в почвенном комплексе на участке со сроком залежи пять лет обладают содержание гумуса и соотношение С:N. Значение индекса корреляции между этими показателями составляет 0,9, связь является высокой и положительной (табл. 3). Также высокая положительная связь наблюдается между содержанием гумуса и величиной pH в пахотном горизонте и между содержанием общего азота в пахотном горизонте и содержанием подвижного калия в подпахотном. Заметная положительная связь наблюдается между содержанием гумуса и общего азота в пахотном горизонте, содержанием гумуса и подвижным калием в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание общего азота в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с содержанием подвижного калия и величиной pH в пахотном горизонте, а также заметную отрицательную связь с содержанием подвижного фосфора в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание общего азота в подпахотном горизонте имеет заметную положительную связь с величиной pH пахотного и подпахотного горизонтов, а также высокую отрицательную связь с соотношением С:N в подпахотном горизонте. Соотношение С:N в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с величиной pH пахотного и подпахотного горизонтов и заметную отрицательную с содержанием подвижного фосфора в подпахотном горизонте. Соотношение С:N в подпахотном горизонте имеет заметную отрицательную связь с величиной pH в том же горизонте. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте имеет заметную отрицательную связь с содержанием подвижного калия в подпахотном горизонте, а подвижный фосфор в подпахотном имеет умеренную отрицательную связь с подвижным калием в пахотном горизонте. Подвижный калий пахотного горизонта имеет заметную положительную связь с аналогичным показателем подпахотного горизонта. Содержание подвижного калия в подпахотном горизонте имеет заметную положительную связь с величиной pH пахотного горизонта, такая же связь наблюдается и между pH двух горизонтов.

В целом на бывшем пахотном поле со сроком залежи 5 лет наблюдается зависимость содержания элементов минерального питания растений от содержания гумуса и от величины pH.

Таблица 3

**Значения индексов корреляции по Пирсону
для агрохимических показателей почв поля со сроком залежи 5 лет**

**The values of Pearson correlation indices for agrochemical indices
of soils with a fallow period of 5 years**

Показатели	Гумус пах.	Гумус п-пах.	N пах.	N п-пах.	C:N пах.	C:N п-пах.	P ₂ O ₅ пах.	P ₂ O ₅ п-пах.	K ₂ O пах.	K ₂ O п-пах.	pH _{KCl} пах.
Гумус п-пах.	-0,05	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N пах.	0,51	0,18	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
N п-пах.	0,35	0,38	0,22	1,00	-	-	-	-	-	-	-
C:N пах.	0,90	-0,14	0,09	0,31	1,00	-	-	-	-	-	-
C:N п-пах.	-0,41	0,21	-0,04	-0,79	-0,48	1,00	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅ пах.	0,03	-0,43	-0,62	-0,49	0,33	0,22	1,00	-	-	-	-
P ₂ O ₅ п-пах.	-0,69	0,04	-0,50	-0,16	-0,58	0,30	0,21	1,00	-	-	-
K ₂ O пах.	0,53	0,02	0,52	0,37	0,39	-0,34	-0,12	-0,59	1,00	-	-
K ₂ O п-пах.	0,39	0,58	0,83	0,37	0,05	0,05	-0,57	-0,36	0,65	1,00	-
pH _{KCl} пах.	0,83	0,15	0,63	0,53	0,64	-0,37	-0,29	-0,41	0,43	0,58	1,00
pH _{KCl} п-пах.	0,56	0,16	0,13	0,65	0,57	-0,55	0,04	0,03	0,06	0,10	0,57

Примечание. Здесь и далее: п-пах. – бывший подпахотный горизонт, пах. – бывший пахотный горизонт. Жирным шрифтом выделены показатели, связь между которыми статистически достоверна по результатам проведенного дисперсионного анализа ($F_{расч} > F_{табл}$)

Рассматривая показатели залежи 10 лет, стоит отметить, что наибольшее рассеивание выборки, в отличие от поля со сроком залежи 5 лет, наблюдается у содержания подвижного калия в подпахотном горизонте, а наименьшее – также у содержания общего азота в пахотном горизонте. Наибольшая вариация, в отличие от 5-летнего залежного поля, наблюдается у содержания подвижного калия в подпахотном горизонте, а наименьшая – у количества подвижного фосфора в пахотном. В целом следует отметить более высокие показатели коэффициента вариации для

агрохимических характеристик почв на данном объекте по сравнению с бывшим пахотным полем со сроком залежи 5 лет. Максимальный размах выборки также отличается от предыдущего объекта: наибольший наблюдается у подвижного калия в подпахотном горизонте, а наименьший – также у содержания общего азота в пахотном горизонте. Распределение в выборке всех агрохимических показателей близко к нормальному. Отличие рассматриваемых статистических показателей на данном участке от участка со сроком залежи 5 лет также может свидетельствовать о влиянии сукцессионных изменений на процессы, происходящие в почвенном комплексе.

Наибольшая корреляционная связь на бывшем пахотном поле со сроком залежи 10 лет наблюдается у содержания общего азота и соотношения С:N в подпахотном горизонте (коэффициент корреляции 0,99) (табл. 4). У содержания гумуса в пахотном горизонте наблюдается заметная положительная связь с величиной pH пахотного горизонта. Содержание гумуса в подпахотном горизонте показывает заметную положительную связь с соотношением С:N в подпахотном горизонте и высокую положительную с содержанием подвижного фосфора в пахотном. У содержания общего азота в пахотном горизонте наблюдается заметная положительная связь с содержанием подвижного калия и величиной pH подпахотного горизонта. Содержание общего азота в подпахотном горизонте в свою очередь показывает высокую положительную связь с подвижным калием в пахотном горизонте, весьма высокую отрицательную с соотношением С:N пахотного и заметную отрицательную с подвижным калием в подпахотном. Соотношение С:N пахотного горизонта имеет заметную положительную связь с содержанием подвижного калия в подпахотном горизонте, весьма высокую отрицательную связь с соотношением С:N подпахотного горизонта и высокую отрицательную с подвижным калием пахотного горизонта. Соотношение С:N подпахотного горизонта показывает высокую положительную связь с содержанием подвижного калия в пахотном горизонте и заметную отрицательную с его содержанием в подпахотном. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте имеет высокую положительную связь с содержанием подвижного калия и величиной pH в подпахотном горизонте и заметную положительную с фосфором в подпахотном. Подвижный фосфор в подпахотном горизонте имеет положительную связь с содержанием подвижного калия и величиной pH в подпахотном горизонте. Содержание подвижного калия в подпахотном горизонте имеет весьма высокую связь с величиной pH в том же горизонте.

Таблица 4

**Значения индексов корреляции по Пирсону
для агрохимических показателей почв поля со сроком залежи 10 лет**

**The values of Pearson correlation indices for agrochemical indices
of soils with a fallow period of 10 years**

Показатели	Гумус пах.	Гумус п-пах.	N пах.	N п-пах.	C:N пах.	C:N п-пах.	P ₂ O ₅ пах.	P ₂ O ₅ п-пах.	K ₂ O пах.	K ₂ O п-пах.	pH _{KCl} пах.
Гумус п-пах.	0,33	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N пах.	0,16	-0,19	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—
N п-пах.	-0,11	0,45	-0,35	1,00	—	—	—	—	—	—	—
C:N пах.	0,17	-0,33	0,46	-0,97	1,00	—	—	—	—	—	—
C:N п-пах.	-0,12	0,53	-0,43	0,99	-0,95	1,00	—	—	—	—	—
P ₂ O ₅ пах.	0,23	0,78	0,36	0,19	-0,06	0,20	1,00	—	—	—	—
P ₂ O ₅ п-пах.	-0,36	0,34	0,34	-0,22	0,33	-0,17	0,63	1,00	—	—	—
K ₂ O пах.	0,03	0,44	-0,04	0,86	-0,84	0,79	0,46	-0,14	1,00	—	—
K ₂ O п-пах.	0,17	0,29	0,52	-0,50	0,57	-0,50	0,71	0,72	-0,13	1,00	—
pH _{KCl} пах.	0,52	0,02	-0,16	-0,09	0,07	-0,07	-0,19	-0,23	-0,20	-0,15	1,00
pH _{KCl} п-пах.	-0,01	0,40	0,55	-0,21	0,30	-0,22	0,84	0,83	0,13	0,92	-0,21

Примечание: сокращения те же, что и в табл. 3. Жирным шрифтом выделены показатели, связь между которыми статистически достоверна по результатам проведенного дисперсионного анализа ($F_{расч} > F_{табл}$)

В целом на бывшем пахотном поле со сроком залежи 10 лет наблюдается отрицательная зависимость содержания подвижного калия от общего азота и положительная – от количества органического вещества в бывшем пахотном горизонте и от величины pH. Наибольшее и наименьшее рассеивания выборки наблюдаются у тех же агрохимических показателей, что и у поля со сроком залежи пять лет – у содержания подвижного фосфора в пахотном и подпахотном горизонтах и общего азота в пахотном. Максимальное и минимальное значения коэффициентов вариации также совпадают с участком 5-летней залежи. Наибольшее значение у соотношения C:N в подпахотном горизонте, а наименьшее – у величины pH в том же горизонте. Наибольшее и наименьшее значение размаха выборки у основных агрохимических показателей также совпадает с первым рассматриваемым

участком: наибольшее наблюдается у содержания подвижного фосфора в подпахотном горизонте, а наименьшее – у количества общего азота в пахотном. Значительное отклонение от нормального распределения выборки наблюдается у соотношения С:N в пахотном и подпахотном горизонтах, содержания подвижного фосфора и величины рН в тех же горизонтах.

Значительное отличие основных показателей описательной статистики агрохимических характеристик почв участка залежью 10 лет от участков с залежью 5 и 25 лет свидетельствует о довольно существенных различиях в почвенных комплексах между данными участками. Данные отличия могут быть вызваны сукцессионными изменениями. Наибольшая корреляционная связь на бывшем пахотном поле со сроком залежи 25 лет наблюдается у содержания общего азота и соотношения С:N в подпахотном горизонте (значение индекса корреляции 0,94) с весьма сильной положительной связью (табл. 5). Содержание гумуса в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с таким же показателем в подпахотном горизонте и заметную отрицательную связь с величиной рН в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание общего азота в подпахотном горизонте показывает высокую отрицательную связь с соотношением С:N в пахотном горизонте. Также наблюдается высокая отрицательная связь между соотношением С:N в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с содержанием фосфора в подпахотном горизонте и величиной рН в пахотном и подпахотном горизонтах. Величина рН в пахотном горизонте имеет высокую положительную связь с такой же величиной в подпахотном горизонте.

Стоит отметить, что с увеличением срока залежи бывших пахотных земель наблюдается снижение количества значимых корреляционных связей между агрохимическими показателями почвы. Данная тенденция также может быть связана с временными изменениями в почвенном комплексе, которые происходят в результате прекращения сельскохозяйственного пользования и восстановления естественной растительности.

Необходимо отметить, что с уменьшением количества корреляционных связей среди агрохимических показателей почв с увеличением срока залежи наблюдается увеличение доли статистически достоверных взаимодействий. Данная тенденция также подтверждает наличие сукцессионных изменений в почвенном комплексе и указывает на постепенную стабилизацию протекающих в нем процессов, нарушенных с изменением такого фактора почвообразования, как растительность, и прекращением регулярного антропогенного воздействия (вспашки).

Таблица 5

**Значения индексов корреляции по Пирсону
для агрохимических показателей почв поля со сроком залежи 25 лет**

**The values of Pearson correlation indices for agrochemical indices
of soils with a fallow period of 25 years**

Показатели	Гумус пах.	Гумус п-пах.	N пах.	N п-пах.	C:N пах.	C:N п-пах.	P ₂ O ₅ пах.	P ₂ O ₅ п-пах.	K ₂ O пах.	K ₂ O п-пах.	pH _{KCl} пах.
Гумус п-пах.	0,54	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
N пах.	–0,18	–0,37	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
N п-пах.	0,32	0,29	–0,07	1,00	–	–	–	–	–	–	–
C:N пах.	–0,24	–0,29	0,29	–0,88	1,00	–	–	–	–	–	–
C:N п-пах.	0,35	0,38	–0,25	0,94	–0,76	1,00	–	–	–	–	–
P ₂ O ₅ пах.	–0,24	0,005	0,06	–0,05	–0,08	–0,11	1,00	–	–	–	–
P ₂ O ₅ п-пах.	–0,04	–0,07	0,08	0,12	–0,13	0,12	0,54	1,00	–	–	–
K ₂ O пах.	0,21	0,18	–0,13	–0,03	–0,02	0,002	0,08	–0,01	1,00	–	–
K ₂ O п-пах.	0,07	0,37	–0,12	0,20	–0,31	0,16	0,17	–0,07	0,21	1,00	–
pH _{KCl} пах.	–0,53	–0,28	0,19	–0,27	0,18	–0,32	0,60	0,12	–0,03	0,21	1,00
pH _{KCl} п-пах.	–0,54	–0,39	0,20	–0,27	0,16	–0,34	0,60	0,32	0,002	–0,05	0,80

Примечание: сокращения те же, что и в табл. 3. Жирным шрифтом выделены показатели, связь между которыми статистически достоверна по результатам проведенного дисперсионного анализа ($F_{расч} > F_{мабл}$)

В результате восстановительной сукцессии естественной лесной растительности на бывших сельскохозяйственных территориях в их почвенном комплексе происходят значительные изменения. Наиболее сильные изменения, происходящие в почве на участках разной залежки, видны на примере взаимосвязи величины pH и содержания гумуса. Так, на бывшем пахотном поле залежью 5 лет наблюдается тенденция к увеличению содержания гумуса со снижением кислотности (рис. 1). На данном возрастном этапе восстановительной сукцессии на участках с более низкой кислотностью происходит более активный процесс накопления органического вещества.

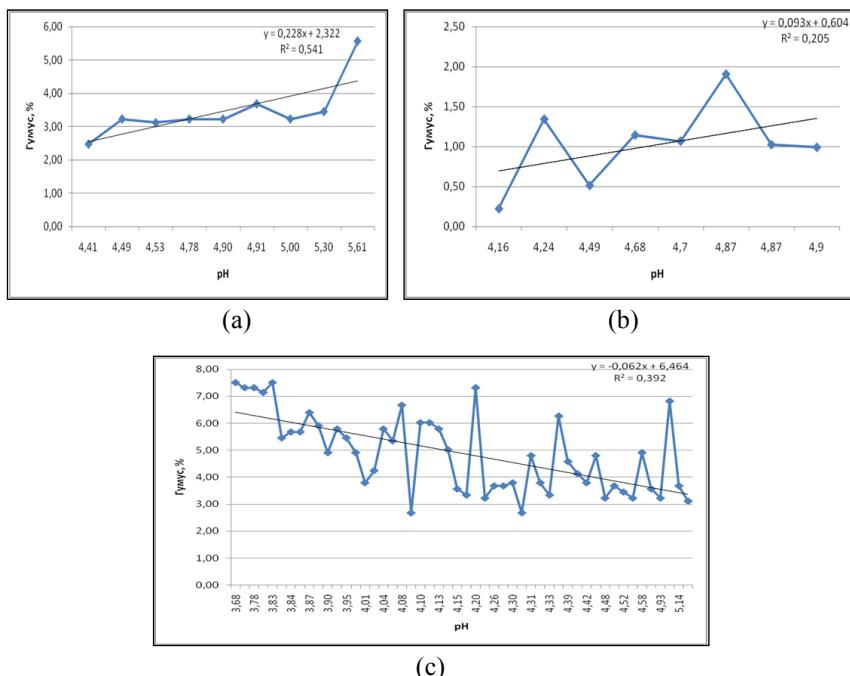


Рис. 1. Взаимосвязь величины pH и содержания гумуса на участках разных сроков залежности: (а) залежь 5 лет; (б) залежь 10 лет; (с) залежь 25 лет

Fig. 1. Relationship between pH value and humus content at sites of different fallow periods: (a) fallow 5 years; (b) fallow 10 years; (c) fallow 25 years

На участке со сроком залежки 10 лет уже не будет такой устойчивой тенденции к увеличению содержания гумуса с увеличением показателя pH (рис. 1b). На сроке залежки 10 лет растительный покров постагротических территорий становится более неоднородным и появляется густое лиственное возобновление, что в свою очередь оказывает влияние на почвенный комплекс и также увеличивает его неоднородность.

На поле сроком залежки 25 лет уже будет наблюдаться обратная зависимость. Так, на данном возрастном этапе восстановительной сукцессии будет наблюдаться увеличение содержания в почве гумуса с увеличением кислотности почвенной среды. Наиболее активная минерализация органического вещества почвы будет происходить на участках с более высокими значениями величины pH, так как кислая реакция почвенной среды пре-

пятствует жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, которые способствуют процессу разложения органики.

Данная закономерность изменения во взаимосвязи содержания гумуса с величиной рН, возможно, связана с изменениями в процессе поступления и накопления органического вещества в почве. Активно развивающаяся древесная растительность поглощает большое количество питательных элементов и затрудняет развитие живого напочвенного покрова, образуя мертвопокровные участки в местах с густым лиственным возобновлением. Вместе с этим в почву начинает поступать значительно меньшее количество органических веществ из быстроразлагающихся травянистых растений, а древесный опад имеет более низкую скорость разложения и накапливается под пологом в виде лесной подстилки. Таким образом, в ходе восстановительной сукцессии на бывших сельскохозяйственных землях помимо смены растительных сообществ происходят смены почвенных режимов и, как следствие, изменения в интенсивности и направленности почвообразующих процессов.

Вышеприведенный вывод подтверждают и результаты корреляционного анализа. Значение индекса корреляции Пирсона между содержанием гумуса в почве и величиной рН для поля сроком залежи 5 лет свидетельствует о наличии высокой положительной связи и составляет 0,83. Для поля залежью 10 лет данный коэффициент уже составляет 0,52, что свидетельствует об ослаблении связи между двумя этими показателями, но она остается заметной и положительной. На участке со сроком залежи 25 лет взаимосвязь между содержанием гумуса в почве и величиной рН меняется на заметную отрицательную; значение коэффициента Пирсона будет составлять -0,53.

Помимо изменений в процессе накопления органического вещества почвы в ходе восстановительной сукцессии на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, происходят изменения и в активности почвенных микроорганизмов. В табл. 6 приведены результаты исследования биологической активности постагротенных почв на объектах исследования. Заметно, что на изучаемых участках нет четкой закономерности между почвенным плодородием и биологической активностью почвы. Однако стоит отметить, что биологическая активность почвы с увеличением срока залежи в целом увеличивается, но изменяются доминирующие показатели. Скорость эмиссии углекислого газа на всех опытных участках практически одинаковая, что свидетельствует о равной скорости минерализации органического вещества почвы на всех изучаемых сроках залежи, однако наименьшее значение этого показателя наблюдается на пахотном участке (бывшая залежь 5 лет), а наибольшее – на

участке с залежью 10 лет. Также стоит отметить, что данный показатель не имеет закономерного изменения с изменением соотношения С:N, хотя оба этих показателя характеризуют скорость минерализации органического вещества почвы. Активность микроорганизмов определялась по скорости разложения льняного полотна в почве. На данный показатель большое влияние оказывают почвенные микромицеты и представители почвенной фауны, и именно с этим связано расхождение в показателях для участка со сроком залежи 25 лет с густым лиственным возобновлением, где льняное полотно со сроком экспозиции 2 месяца имеет потерю по массе меньше, чем со сроком экспозиции 1 месяц. Это происходит из-за неоднородности почвенных условий на данном участке, так как на наиболее сильно разложившихся образцах льняного полотна наблюдалось большое количество грибного мицелия, повреждения насекомыми или дождевые черви. В целом активность почвенных микромицетов и фауны уменьшается с увеличением срока залежи, однако на участке со сроком залежи 25 лет с густым лиственным возобновлением наблюдается самое большое значение данного показателя при сроке экспозиции один месяц. Общее микробное число (ОМЧ) характеризует активность почвенных бактерий. Данный показатель демонстрирует противоположные результаты. Он возрастает с увеличением срока залежи и имеет самое низкое значение на участке залежью 25 лет с густым лиственным возобновлением. Данная особенность может быть связана с тем, что на этом участке преобладает возобновление древовидной и кустовой ивы. Ивовый опад имеет кислую реакцию среды и, следовательно, медленно разлагается; такие условия наиболее подходящие для развития почвенных микромицетов.

Таблица 6

Показатели биологической активности почв на объектах исследования

Indicators of biological activity of soils at the study sites

Возраст залежи	pH _{KCl}	C:N	Эмиссия CO ₂ , мг CO ₂ /кг*ч	Акт. микр. за 1 мес., %	Акт. микр. за 2 мес., %	ОМЧ, КОЕ
Пашня (залежь 5 лет)	4,83	5,56	0,81	14,63	49,17	180
10 лет	4,61	1,42	1,32	10,16	28,99	690
25 лет	Листв. др.	4,12	8,53	1,14	27,04	22,67
	Хв. др.	4,60	8,41	1,21	6,14	19,80
						1730

Примечание: Листв. др. – лиственный древостой; Хв. др. – древостой с наличием хвойных пород; Акт. микр. – активность микроорганизмов.

На исследуемых участках бывших пахотных земель с различным сроком залежи наблюдается различие в составе почвенных микромицетов. Так, на пахотном поле (бывшее поле со сроком залежи 5 лет) встречаются 3 рода микромицетов: *Rhizopus*, *Cladosporium* и *Penicillium*. На бывшем пахотном поле со сроком залежи 10 лет встречаются почвенные микромицеты 4 родов: *Rhizopus*, *Cladosporium*, *Penicillium* и *Botrytis*. На участке бывшей пашни со сроком залежи 25 лет, пройденном пожаром, с наличием хвойного возобновления встречаются представители 2 родов микромицетов: *Rhizopus* и *Mucor*. На участке с залежью 25 лет с густым лиственным возобновлением встречаются представители 3 родов почвенных микромицетов: *Rhizopus*, *Penicillium* и *Trichoderma*. Все обнаруженные роды почвенных микромицетов являются распространенными сапрофитами и активно участвуют в процессе разложения растительного опада (разрушают клетчатку) и гумификации органических остатков [Омелянский, 2023]. Из представленных данных нельзя достоверно сделать вывод о коренных изменениях в составе почвенных микромицетов в ходе восстановительной сукцессии. Однако можно предположить, что пирогенное воздействие отрицательно сказывается на почвенном грибном сообществе, так как на участке, пройденном пожаром, встречаются только 2 рода. Также следует отметить, что на всех остальных участках встречаются представители родов *Rhizopus* и *Penicillium*, но остальные роды отличаются, однако нельзя утверждать, что эти различия в составе почвенных микромицетов являются результатом изменений, происходящих в ходе восстановительной сукцессии, а не каких-либо других факторов.

Заключение. Проведенное исследование показало различия в почвенном комплексе в процессе восстановительной сукцессии на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования:

- исследуемые почвы вне зависимости от срока залежности характеризуются кислой реакцией среды (средне- и сильнокислая);
- с увеличением срока залежи на исследуемых участках наблюдается уменьшение содержания подвижного фосфора (на участках со сроком залежи 5 и 10 лет высокое содержание, а на участках 25 лет – низкое);
- с увеличением срока залежи наблюдается уменьшение числа корреляционных связей между агрохимическими показателями почв, но увеличивается доля статистически достоверных связей, что указывает на стабилизацию естественных процессов, протекающих в почвенном комплексе, которые были нарушены регулярной вспашкой;

- в процессе восстановительной сукцессии на постагрогенных территориях происходят изменения в процессе гумусонакопления: направление процесса меняется от увеличения гумуса с увеличением величины pH на участке с залежью 5 лет к уменьшению гумуса с увеличением величины pH на участке с залежью 25 лет;
- с увеличением срока залежи уменьшается активность почвенных микромицетов и увеличивается влияние почвенных бактерий.

Процессы, протекающие в почвенном комплексе на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, требуют дальнейшего пристального изучения для разработки рекомендаций по их использованию.

Вклад авторов. Все авторы внесли равный вклад на всех этапах исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агрохимия / под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.

Апарин Б.Ф. Географические основы рационального использования почв (на двучленных породах). СПб: Наука, 1992. 190 с.

Апарин Б.Ф. Почвоведение: учеб. для образоват. учреждений сред. проф. образования. М.: Изд. центр «Академия», 2012. 256 с.

Бурдуковский М.Л., Перепелкина П.А. Агроэкологическое состояние почв и восстановление растительности в залежных экосистемах // Биота и среда природных территорий. 2022. Т. 10. № 2. С. 28–36. DOI: 10.37102/2782-1978_2022_2_3

Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2019 году. М.: Росреестр, 2020. 206 с.

Данилов Д.А., Шестаков В.А., Шестакова Т.А., Эндерс О.О. Сукцессионные стадии восстановления древесной растительности на постагрогенных землях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 60–80.

Данилов Д., Яковлев А., Суворов С., Крылов И., Корчагов С., Хамитов Р. Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагрогенных землях // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. Вып. 1. С. 65–76. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-65-76

Доклад о состоянии и использовании земель в Ленинградской области в 2020 г. Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Ленинградской области. 150 с.

Захарченко А., Пасько О., Сорокин И. Динамика сокращения площадей паштных земель по данным их долгосрочного мониторинга в Томской области // Экология и промышленность России. 2021. Вып. 25 (7). С. 54–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-54-59

Карпин В.А., Петров Н.В., Тулюнен А.В. Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднетаежной подзоны // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 120–129. DOI: 10.15372/SJFS20170610

Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.

Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мостовая А.С., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Личко В.И., Баева Ю.И. Влияние процессов естественного лесовосстановления на микробиологическую активность постагрогенных почв европейской части России // Лесоведение. 2018. № 1. С. 3–23.

Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Изучение показателей почвенного плодородия окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы на разных стадиях формирования природных экосистем // Агрохимия. 2022. № 6. С. 14–27. DOI: 10.31857/S0002188122060084

Люри Д.И., Горячkin С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагrogenное восстановление растительности и почв. М., 2010. 416 с.

Мишиустин Е.Н., Петрова А.Н. Определение биологической активности почвы // Микробиология. 1963. № 3. Т. 32. С. 479–483.

Омелянский В.Л. Краткий курс общей и почвенной микробиологии. М.: Юрайт, 2023. 173 с.

Пестряков В.К. Почвы Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1973. 342 с.

Тюрин И.В. Почвообразовательный процесс, плодородие почв и проблема азота в почвоведении и земледелии // Почвоведение. 1956. №3. С. 1–17.

Чертов О.Г. Экология лесных земель: почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний. Л.: Наука, 1981. 169 с.

Шафран С.А., Ермаков А.А., Виноградова С.Б., Семенова А.И. Изменение плодородия почв Нечерноземной зоны за 50-летний период // Агрохимический вестник. 2021. № 5. С. 3–7. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-001

Anpilogova D., Pakina A. Assessing ecosystem services of abandoned agricultural lands: a case study in the forested zone of European Russia // One Ecosystem. 2022. Vol. 7. Art. e77969.

Danilov D.A., Shestakova T.A., Shestakova V.I., Anders O.O., Ivanov A.A. The Effect of Living Ground Cover on the Development of the Young Generation of Tree Species on Post-Agrogenic Lands of the Boreal Zone // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. No. 574. Art. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012015

Gunina A., Ryzhova I., Dorodnikov M., Kuzyakov Y. Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilisation in young soils // Plant Soil. 2015. Vol. 387. P. 265–275.

Kalinina O., Cherkinsky A., Chertov O., Goryachkin S., Kurganova I., Lopes de Gerenuy V., Lyuri D., Kuzyakov Ya., Giani L. Post-agricultural restoration: Implica-

tions for dynamics of soil organic matter pools // *Catena*. 2019. Vol. 181. Art. 104096. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104096

Kukuls I., Kļaviņš M., Nikodemus O., Kasparinskis R., Brūmelis G. Changes in Soil Organic Matter and Soil Humic Substances Following the Afforestation of Former Agricultural Lands in the Boreal-Nemoral Ecotone (Latvia) // *Geoderma Regional*. 2019. Vol. 16, art. e00213. DOI: 10.1016/j.geodrs.2019.e00213

Lopes de Gerenyu V., Mostovaya A., Ovsepyan L., Telesnina V., Lichko V., Baeva Y.I., Kyrganova I.N. Effect of Reforestation on Microbiological Activity of Postagrogenic Soils in European Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11. P. 704–718.

Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Recovery of Organic Matter and Microbial Biomass After Abandonment of Degraded Agricultural Soils: The Influence of Climate // *Land Degradation & Development*. 2019. Vol. 30, iss. 15. P. 1861–1874. DOI: 10.1002/ldr.3387

Segura C., Navarro F.B., Jiménez M.N., Fernández-Ondoño E. Implications of Afforestation vs. Secondary Succession for Soil Properties Under a Semiarid Climate // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 704. Art. 135393. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135393

Spohn M., Tibor N., Incze J., Giani L. Dynamics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in calcareous soils after land-use abandonment – A chronosequence study // *Plant Soil*. 2015. Vol. 401. P. 185–196.

Susyan E., Wirth S., Ananyeva N., Stolnikova E. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity // *The European Journal of Soil Biology*. 2011. Vol. 47. P. 169–174.

References

Agrochemistry / ed. by V. G. Mineev. M.: Pryanishnikov Institute of Agrochemistry Publishing House, 2017. 854 p. (In Russ.)

Anpilogova D., Pakina A. Assessing ecosystem services of abandoned agricultural lands: a case study in the forested zone of European Russia. *One Ecosystem*, 2022, vol. 7, art. e77969.

Aparin B.F. Geographic bases of soil management (on bipartite rocks). St. Petersburg: Nauka, 1992. 190 p. (In Russ.)

Aparin B.F. Soil Science: textbook for educational institutions of secondary vocational education. M.: Publishing Center «Academy», 2012. 256 p. (In Russ.)

Burdukovskij M.L., Perepelkina P.A. Agroecological condition of soils and vegetation restoration in fallow ecosystems. *Biodiversity and environment of protected areas*, 2022, no. 10(2), pp. 28–36. DOI: 10.37102/2782-1978_2022_2_3 (In Russ.)

Chertov O.G. Ecology of forest lands: soil-ecological study of forest habitats. L.: Nauka, 1981. 169 p. (In Russ.)

Classification and diagnostics of soils of Russia. Smolensk: Oikumena, 2004. 343 p. (In Russ.)

Classification and diagnostics of soils of the USSR. M.: Kolos, 1977. 225 p.
(In Russ.)

Danilov D.A., Shestakov V.I., Shestakova T.A., Enders O.O. Successional Stages of Restoration of Woody Vegetation on Postagrogenic Lands of the Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2020, iss. 233, pp. 60–80. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.60-80. (In Russ.)

Danilov D.A., Shestakova T.A., Shestakova V.I., Anders O.O., Ivanov A.A. The Effect of Living Ground Cover on the Development of the Young Generation of Tree Species on Post-Agrogenic Lands of the Boreal Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 574, art. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012015

Danilov D., Yakovlev A., Suvorov C., Krylov I., Korchagov C., Khamitov P. Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Post-Agrogenic Lands. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2023, no. 1, pp. 65–76. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-65-76. (In Russ.)

Gunina A., Ryzhova I., Dorodnikov M., Kuzyakov Y. Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilisation in young soils. *Plant Soil*, 2015, vol. 387, pp. 265–275.

Kalinina O., Cherkinsky A., Chertov O., Goryachkin S., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Lyuri D., Kuzyakov Ya., Giani L. Post-agricultural restoration: Implications for dynamics of soil organic matter pools. *Catena*, 2019, vol. 181, art. 104096. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104096

Karpin V.A., Petrov N.V., Tuyunen A.V. Regeneration of Forest Phytocoenoses After Various Agricultural Land Use Practices in the Conditions of Middle Taiga Subzone. *Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 120–129. DOI: 10.15372/SJFS20170610. (In Russ.)

Kukuļs I., Kļaviņš M., Nikodemus O., Kasparinskis R., Brūmelis G. Changes in Soil Organic Matter and Soil Humic Substances Following the Afforestation of Former Agricultural Lands in the Boreal-Nemoral Ecotone (Latvia). *Geoderma Regional*, 2019, vol. 16, art. e00213. DOI: 10.1016/j.geodrs.2019.e00213

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Yu.I. Influence of natural reforestation processes on microbiological activity of post-agrogenic soils of the European part of Russia. *Russian Journal of Forest Science*, 2018, no. 1, pp. 3–23. (In Russ.)

Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M. Study of soil fertility indicators of cultivated sod-podzolic sandy soil at different stages of formation of natural ecosystems. *Agrochemistry*, 2022, no. 6, pp. 14–27. DOI: 10.31857/S0002188122060084. (In Russ.)

Lopes de Gerenyu V., Mostovaya A., Ovsepyan L., Telesnina V., Lichko V., Baeva Yu.I., Kurganova I.N. Effect of Reforestation on Microbiological Activity of Postagrogenic Soils in European Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, pp. 704–718.

Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G.
Dynamics of Russian agricultural land in the twentieth century and post-agro-genic
restoration of vegetation and soils. M., 2010. 416 p. (In Russ.)

Mishustin E.N., Petrova A.N. Determination of biological activity of soil.
Microbiology, 1963, no. 3, vol. 32, pp. 479–483. (In Russ.)

Omelyansky V.L. Short course of general and soil microbiology. M.: Yurait, 2023.
173 p. (In Russ.)

Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Recovery of
Organic Matter and Microbial Biomass After Abandonment of Degraded Agricultural
Soils: The Influence of Climate. *Land Degradation & Development*, 2019, vol. 30,
iss. 15, pp. 1861–1874. DOI: 10.1002/ldr.3387

Pestryakov V.K. Soils of the Leningrad Region. L.: Lenizdat, 1973. 342 p. (In Russ.)

Report on the state and use of land in the Leningrad Region in 2020. Department
of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography in the
Leningrad Region. 150 p. (In Russ.)

Segura C., Navarro F.B., Jiménez M.N., Fernández-Ondoño E. Implications of
Afforestation vs. Secondary Succession for Soil Properties Under a Semiarid Climate.
Science of the Total Environment, 2020, vol. 704, art. 135393. DOI:
10.1016/j.scitotenv.2019.135393

Shafran S.A., Ermakov A.A., Vinogradova S.B., Semenova A.I. Changes in soil
fertility in the Non-Chernozem zone over a 50-year period. *Agrochemical Herald*,
2021, no. 5, pp. 3–7. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-001. (In Russ.)

Spohn M., Tibor N., Incze J., Giani L. Dynamics of soil carbon, nitrogen, and
phosphorus in calcareous soils after land-use abandonment – A chronosequence study.
Plant Soil, 2015, vol. 401, pp. 185–196.

State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in
2019. M.: Rosreestr, 2020. 206 p. (In Russ.)

Susyan E., Wirth S., Ananyeva N., Stolnikova E. Forest succession on abandoned arable
soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal
CO₂ respiration activity. *The European Journal of Soil Biology*, 2011, vol. 47, pp. 169–174.

Tyurin I.V. Soil formation process, soil fertility and the problem of nitrogen in
soil science and agriculture. *Soil Science*, 1956, no. 3, pp. 1–17. (In Russ.)

Zaharchenko A., Pas'ko O., Sorokin I. Dynamics of reduction of arable land areas
according to their long-term monitoring in Tomsk Oblast. *Ecology and Industry of
Russia*, 2021, no. 25(7), pp. 54–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-54-59. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 22.01.2024

Данилов Д.А., Яковлев А.А., Зайцев Д.А., Иванов А.А. Изменения в
постагренических почвах в ходе восстановления древесной растительности в
условиях юго-запада Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской
лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 97–122. DOI: 10.21266/2079-
4304.2024.251.97-122

Вследствие процесса восстановления естественного растительного покрова на постагрогенных территориях происходят изменения в экологических функциях почвы и в почвообразовательном процессе, которые в свою очередь ведут к эволюционным изменениям во всем почвенном комплексе. В работе рассмотрена связь ранних стадий возобновления древесно-кустарниковой растительности на залежных землях и агрохимическое состояние почвенного комплекса под ними. Объекты объединены сходными почвенно-грунтовыми условиями, расположены в Ленинградской области, Россия. Серия опытов имела сроки прекращения использования под пашню в 5, 10 и 25 лет. Была проведена таксация растительности и отбор почвенных образцов с последующим проведением агрохимических анализов. На опытных участках также были заложены опыты по выявлению микробиологической активности и почвенному дыханию. Результаты исследования показали, что на опытных объектах почвы вне зависимости от срока залежности характеризуются кислой реакцией среды (средне- и сильнокислая). С увеличением срока залежи на исследуемых участках наблюдается уменьшение содержания подвижного фосфора (на участках со сроком залежи 5 и 10 лет высокое содержание, а на участках 25 лет – низкое). С увеличением срока залежи наблюдается уменьшение числа корреляционных связей между агрохимическими показателями почв, но увеличивается доля статистически достоверных связей, что указывает на стабилизацию естественных процессов, протекающих в почвенном комплексе, которые были нарушены регулярной вспашкой. В процессе восстановительной сукцессии на постагрогенных территориях происходят изменения в процессе гумусонакопления: направление процесса меняется от увеличения гумуса с увеличением величины рН на участке с залежью 5 лет, к уменьшению гумуса с увеличением величины рН на участке с залежью 25 лет. С увеличением срока залежи уменьшается активность почвенных микромицетов и увеличивается влияние почвенных бактерий. Процессы, протекающие в почвенном комплексе на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, требуют дальнейшего пристального изучения для разработки рекомендаций по их использованию.

Ключевые слова: залежные земли, агрохимические показатели, сукцессионные стадии, содержание гумуса, микробиологическая активность.

Danilov D.A., Yakovlev A.A., Zaitsev D.A., Ivanov A.A. Changes in post-agricultural soils during the restoration of woody vegetation in the conditions of the south-west of the Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 97–122 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.97-122

Due to the process of restoration of natural vegetation cover on post-agrogenic territories, changes occur in the ecological functions of soil and in the soil formation process, which in turn lead to evolutionary changes in the entire soil complex. The paper considers the relationship between the early stages of tree and shrub vegetation

regeneration on fallow lands and the agrochemical state of the soil complex under them. The objects are united by similar soil and ground conditions, located in Leningrad region, Russia. The series of experiments had time periods of stopping use under arable land at 5, 10 and 25 years. Vegetation taxation was carried out and soil samples were collected with following agrochemical analyses. Experimental plots were also plotted to detect microbiological activity and soil respiration. The results of the study showed that on the experimental sites soils regardless of the fallow period are characterized by acidic reaction of the environment (medium and strongly acidic). With the increase of fallow period on the studied plots there is a decrease in the content of mobile phosphorus (on plots with fallow period of 5 and 10 years the content is high, and on plots with fallow period of 25 years it is low). With the increase of fallow period there is a decrease in the number of correlations between agrochemical soil indicators, but the share of statistically reliable relationships increases, indicating stabilization of natural processes occurring in the soil complex, which were disturbed by regular plowing. In the process of restoration succession on post-agrogenic territories changes in the process of humus accumulation occur – the direction of the process changes from increase of humus with increase of pH value on the plot with fallow land of 5 years, to decrease of humus with increase of pH value on the plot with fallow land of 25 years. The activity of soil micro-mycetes decreases with increasing fallow period and the influence of soil bacteria increases. The processes occurring in the soil complex on lands withdrawn from active agricultural use require additional close study in order to develop further recommendations for their management.

К e y w o r d s : fallow lands, agrochemical indicators, succession stages, humus content, microbiological activity.

ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович – заведующий кафедрой почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук; главный научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорх». SPIN-код: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия; 188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: stown200@mail.ru

DANILOV Dmitry A. – DSc (Agriculture), Head of Soil Science Department of St.Petersburg State Forest Technical University; head researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. SPIN-code: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia; 188338. Institutskaya str. 1. Belogorka. Leningrad Region. Russia. E-mail: stown200@mail.ru

ЯКОВЛЕВ Артём Антонович – ассистент кафедры почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID:0000-0001-8450-2806.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: artem95692@gmail.com

YAKOVLEV Artem A. – Assistant of Soil Department at St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-8450-2806.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: artem95692@gmail.com

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Андреевич – старший научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: disoks@gmail.com

ZAYTSEV Dmitriy A. – PhD (Agriculture), Senior Researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. SPIN-code: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

188338. Institutskaya str. 1. Belogorka. Leningrad Region. Russia. E-mail: disoks@gmail.com

ИВАНОВ Алексей Алексеевич – научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха». SPIN-код: 3722-0709. ORCID: 0000-0002-0379-9191.

188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: iwanov.le2011@yandex.ru

IVANOV Aleksey A. – Researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. SPIN-code: 3722-0709. ORCID: 0000-0002-0379-9191.

188338. Institutskaya str. 1. Belogorka. Leningrad Region. Russia. E-mail: iwanov.le2011@yandex.ru