

Изменение карбонатного состояния и других свойств в хронологических рядах залежных почв на разных почвообразующих породах в заповеднике «Галичья Гора» в Липецкой области

А. М. Булышева¹, О. С. Хохлова², Н. О. Бакунович²,
А. В. Русаков¹, Т. Н. Мякшина²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Институт физико-химических и биологических
проблем почвоведения Российской академии наук,
Российская Федерация, 142290, Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2

Для цитирования: Булышева, А. М., Хохлова, О. С., Бакунович, Н. О., Русаков, А. В., Мякшина, Т. Н. (2021). Изменение карбонатного состояния и других свойств в хронологических рядах залежных почв на разных почвообразующих породах в заповеднике «Галичья Гора» в Липецкой области. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (3), 533–558. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.306>

В статье рассмотрено изменение свойств агрочерноземов миграционно-мицелярных на лёссовидных суглинках и агротемногумусовых на палеоген-неогеновых красноцветных песках с элювием известняка Липецкой области при переходе их из пашни в залежь. Основное внимание уделено изменению карбонатного состояния почв. По результатам исследования обнаружено, что трансформация обоих подтипов почв, образованных на разных породах, подчиняется единой тенденции. Карбонаты в черноземах за время нахождения в залежи вымываются вниз по профилю; стабильные формы карбонатных новообразований постепенно исчезают. Содержание и запасы углерода карбонатов в слое 0–200 см в агрочерноземах миграционно-мицелярных уменьшаются на 27.5 т/га к 25 годам залежного состояния. В агротемногумусовых почвах изменения в карбонатном состоянии менее выражены; тем не менее обнаружено, что в пахотной почве на обломках известняка поверх глинистых кутан формируются кутаны из вторичных карбонатов в форме игольчатого кальцита, что не отмечено в почвах залежей. При нахождении в залежи происходит улучшение физико-механических свойств почв: улучшение структуры пахотных горизонтов и их разуплотнение. Содержание углерода органических соединений снижается при нахождении почвы в залежи, что является нетипичным результатом постагрогенной трансформации агрочерноземов. В залежных почвах других областей степи и лесостепи нами был отмечен процесс накопления углерода органических соединений. Снижение $C_{\text{орг}}$ при нахождении в залежи связан с применением почвосберегающих технологий при сельскохозяйственном использовании. Радиоуглеродный возраст гумуса в подпахотных горизонтах увеличивается при нахождении в залежи, радиоуглеродный возраст карбонатов в почвах изменяется в зависимости от количества включения литогенного кальцита.

Ключевые слова: залежь, пашня, педогенные карбонаты, радиоуглеродное датирование, чернозем, серые почвы.

1. Введение

Длительное сельскохозяйственное воздействие на почвенный покров центральной части Европейской России обуславливает изменения состава и свойств самих почв. При развитии таких процессов, как дегумификация, уплотнение, подкисление, карбонатизация, ощелачивание, происходит изменение педогенного углерода как в составе гумуса, так и в составе карбонатных соединений (Козловский и Чаплин, 1994). Довольно хорошо изучена проблема трансформации органического углерода, гумусного состояния почв в лесостепной зоне при разных режимах землепользования на разных временных отрезках (Bruun et al., 2015; Francaviglia et al., 2014; Русанов и др., 2011; Саблина, 2016; Савин и Чендев, 1994; Шпедт и Вергейчик, 2014) в отличие от темы изменения карбонатного состояния почв при сельскохозяйственном воздействии разной длительности, разрабатываемой в последние годы в наших работах (Khokhlova et al., 2013; 2014; 2015, Kuznetsova et al., 2010). В работах других авторов, изучавших залежные почвы, рассматривались формы карбонатов в почвах разновозрастных залежей, проводилось определение содержания CaCO_3 (Arevalo et al., 2017, Kalinina et al., 2011). Ранее нами была опубликована работа об изменении карбонатного состояния в почвах заповедника «Белогорье», участок «Лес на Ворскле», где мы подробно рассмотрели данную проблему для серых и темно-серых почв центральной лесостепи (Булышева и др., 2018). Однако до сих пор не ясна цельная картина, характеризующая процессы трансформации карбонатов в разновозрастных залежах почв лесостепи, в частности влияние почвообразующих пород на эти процессы. К тому же изучение изменения карбонатного состояния в разновозрастных залежах приближает нас к ответу на вопрос о характерной скорости преобразования основных его параметров при снятии дополнительной антропогенной нагрузки, каковой является распашка.

Цель данного исследования — изучение форм, содержания, строения и состава карбонатов и других свойств разновозрастных залежных почв заповедника «Галичья Гора» и прилегающих территорий Липецкой области с учетом разнообразия почвообразующих пород, на которых формируются изучаемые почвы.

2. Объекты и методы

Объекты исследования располагаются в Липецкой области на участках государственного природного заповедника «Галичья Гора» и прилегающих территориях (рис. 1). Район исследования расположен в границах Придонского известняково-карстового лесостепного физико-географического района лесостепной провинции Среднерусской возвышенности (Мильков, 1966). Для исследуемой территории характерны относительно однородные климатические условия и единое геологическое и геоморфологическое строение, в котором значительную роль играют девонские известняки. Рельеф территории заповедника и окрестностей представлен пологоволнистой равниной, расчлененной долинно-балочной сетью (Нестеров, 2017). Территория находится на северо-восточном склоне Воронежской антеклизы Русской плиты древней Восточно-Европейской платформы. Осадочный чехол включает: девонские карбонатные и терригенные отложения (известняки, доломиты, мергели, песчаники, глины, алевролиты) с прослоями гипса, которые

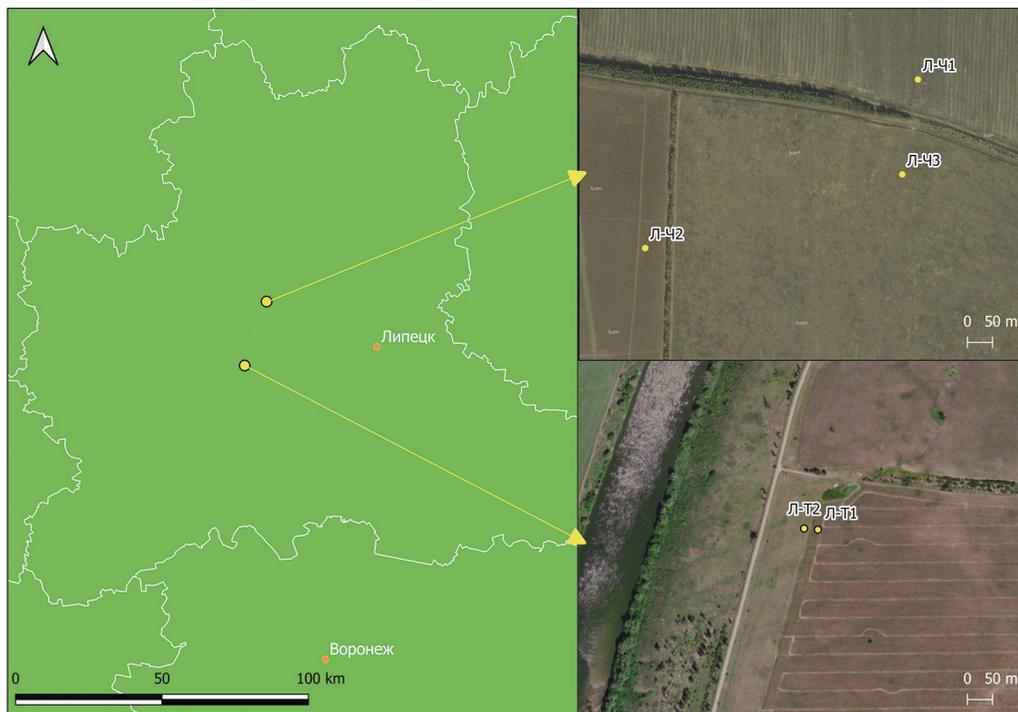


Рис. 1. Месторасположение участков исследования (спутниковый снимок: <https://yandex.ru/maps>)

вскрываются по долине р. Дон и его притоков. Четвертичные отложения на водоразделах представлены ледниковыми (валунные суглинки), водно-ледниковыми (пески, супеси, суглинки) отложениями, перекрытыми покровными лёссовидными суглинками, естественное залегание которых нарушено эрозионно-денудационными процессами (Природа... 1996; Барашкова и Красненков, 1998). Вдоль берегов рр. Дон и Сухой Лубны располагаются песчаные, суглинистые и глинистые плейстоценовые аллювиальные отложения (валдайский надгоризонт, мончаловский и осташковский горизонты, микулинский и калининский горизонты, московский горизонт, ильинский горизонт) (Барашкова и Красненков, 1998).

В геологическом строении территории Задонского района Липецкой области широкое участие принимают верхнедевонские известняки (Михно и Кучин, 2005). Почвообразующими породами выступают лёссовидные суглинки, естественное залегание которых нарушено эрозионно-денудационными процессами, и песчаные, супесчаные аллювиальные отложения надпойменных террас р. Дон (Барашкова и Красненков, 1998). Грунтовые воды находятся глубже 10 м.

Были изучены два хроноряда залежных почв. Они расположены на приводораздельных пологих склонах с уклоном 1–2°. Первый ряд был представлен агрочерноземами миграционно-мицелярными. Почвообразующими породами для почв изученного ряда послужили карбонатные лёссовидные суглинки. Первый почвенный разрез был заложен на пашне, распашка которой проводилась непрерывно в течение последних 100 лет; второй и третий — на залежах возрастом около 15 и 25 лет соответственно. К сожалению, на момент описания на залежи возрастом 15 лет был

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Номер разреза	Координаты WGS 84, высота над уровнем моря	Тип землепользования	Название почвы	
			КиДПР*	WRB**
Ч1	52.776222 N, 39.060056 E; 163 м	пашня	агрочернозем миграционно-мицелярный	Haplic Chernozem (Aric)
Ч2	52.773633 N, 39.051617 E; 168 м	залежь 15 лет	агрочернозем миграционно-мицелярный постагрогенный	Haplic Chernozem (Aric)
Ч3	52.774556 N, 39.059361 E; 163 м	залежь 25 лет	агрочернозем миграционно-мицелярный постагрогенный	Haplic Chernozem (Aric)
Т1	52.585280 N, 38.920342 E; 142 м	пашня	агротемногумусовая почва	Calcaric Phaeozem (Aric)
Т2	52.585321 N, 38.919943 E; 141 м	залежь 25 лет	агротемногумусовая постагрогенная почва	Calcaric Phaeozem (Aric)
Т3	52.766332 N, 39.053453 E; 153 м	залежь 40 (45) лет	агротемногумусовая постагрогенная почва	Calcaric Phaeozem (Aric)

* Классификация и диагностика почв России (Шишов и др., 2004).

** World reference base for soil resources (IUSS Working Group WRB, 2015).

произведен посев пшеницы (первый год), а залежь 25 лет была продискована, поэтому мы не смогли изучить залежи в полностью ненарушенном состоянии. До этого вмешательства залежь возрастом 15 лет находилась в первой стадии восстановления растительного покрова с обилием сорных видов, а на залежи возрастом 25 лет уже появились зональные степные виды травянистой растительности, включая ковыль, а также разреженные кустарники, характерные для лесостепи.

Второй хроноряд состоял из агротемногумусовых почв под пашней, также распаиваемой чуть более 100 лет, и находящихся в залежи возрастом около 25 и 40 (45) лет. Почвообразующей породой для второго ряда являются палеоген-неогеновые красноцветные аллювиальные суглинистые отложения, подстилаемые песками со включением верхнедевонских известняков. Растительность исследованных участков была представлена характерными для залежей сообществами: разнотравными и злаково-разнотравными лугами. Пахотное поле было засеяно рожью. Характеристика объектов исследования представлена в табл. 1 и на рис. 2.

Все почвенные разрезы были заложены на равнинных пологих участках с минимальными различиями высоты участков (табл. 1). Уровень грунтовых вод везде значительно ниже глубины почвенного профиля и не может значимо влиять на почвенный профиль.

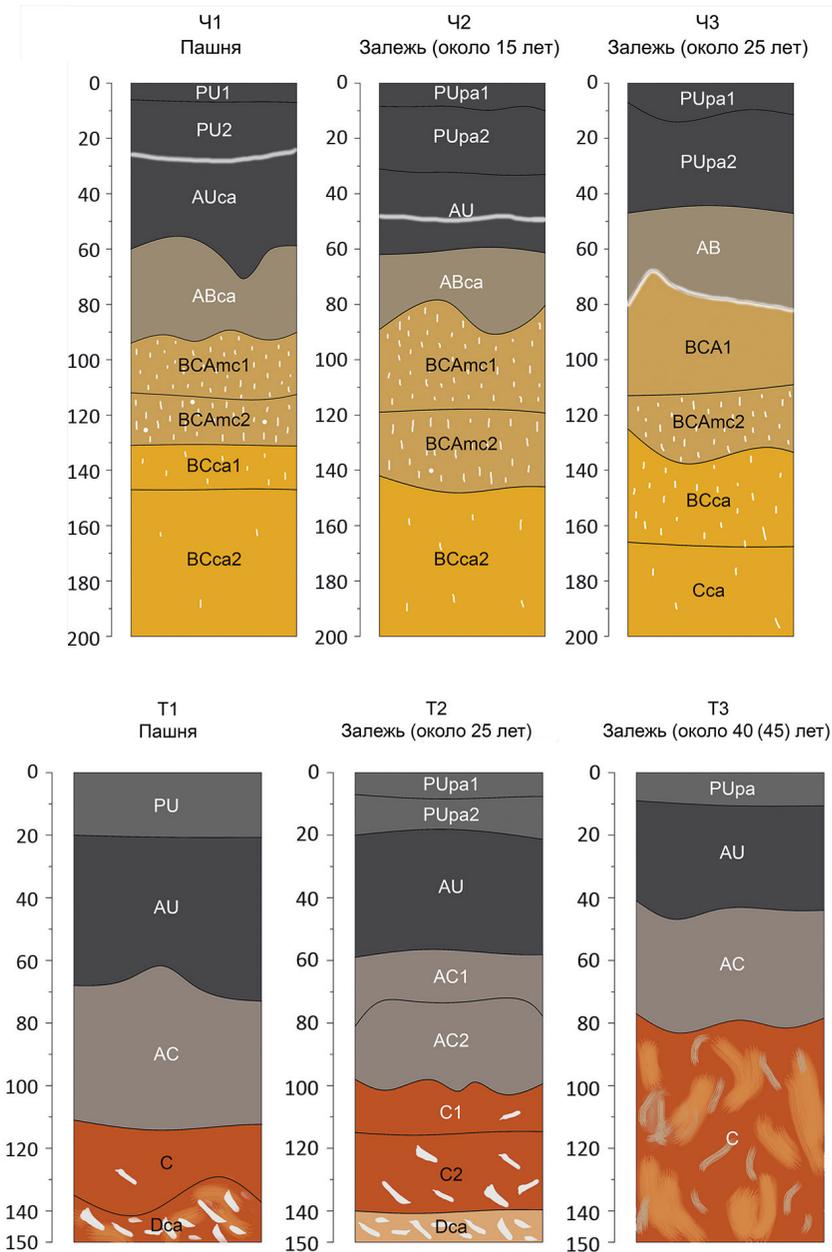


Рис. 2. Схематическое изображение почвенных профилей. Белыми крапинками указано местоположение карбонатного псевдомицелия в горизонтах агрочерноземов миграционно-мицелярных. Белыми полосами указана глубина вскипания от 10%-го раствора HCl. Мощность горизонтов указана в сантиметрах. В горизонтах С и Dca агротемногумусовых почв изображен элювий известняка. Составлено авторами

Было проведено подробное морфологическое описание заложенных разрезов, определено классификационное положение почв согласно (Шишов и др., 2004). В хроноряду черноземов миграционно-мицелярных на лёссовидных суглинках была измерена плотность сложения и влажность почвы, для чего были отобраны пробы методом режущего кольца (Растворова, 1983) в трехкратной повторности. В агротемногумусовых почвах плотность не измерялась, поскольку включение в нижней части изученных разрезов значительного количества обломков известняка не позволило бы корректно сравнить запасы углерода органических соединений и углерода карбонатов.

В каждом разрезе обоих хронорядов были отобраны образцы общей массы из каждых 10 см для первого верхнего метра профиля, и из каждых 20 см — для нижней части профиля (табл. 2). В этих образцах были выполнены следующие анализы: гранулометрический состав методом пипетки с диспергацией суспензии пирофосфатом натрия (Растворова, 1983); содержание общего углерода на CHNS-932-анализаторе (Лесо, США); содержание углерода карбонатов — манометрически (Воробьева, 1998). Углерод органических соединений рассчитан по разности между общим и карбонатным. В тех же образцах были определены значения pH потенциометрически в водной суспензии с соотношением почвы и воды 1:2.5. В образцах ненарушенного сложения, отобранных из карбонатных горизонтов агрочерноземов и горизонтов С агротемногумусовых почв, было проведено мезоморфологическое описание при помощи бинокулярного стереомикроскопа МБС-10. Образцы для последующего микроморфологического описания были отобраны из тех же горизонтов, что образцы для мезоморфологического анализа. Из них были изготовлены шлифы, описание проведено с помощью микроскопа Carl Zeiss AxioScore A1 в Центре коллективного пользования Института физико-химических и биологических проблем (ЦКП ИФХиБПП) РАН (г. Пущино, Россия). Радиоуглеродное датирование карбонатов и гумуса проведено в лаборатории изотопных исследований Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена под руководством М. А. Кульковой. Образцы на определение радиоуглеродного возраста карбонатов отбирались вместе с вмещающей почвенной массой ввиду невозможности отделения мелких карбонатных новообразований, глубины отбора конкретных образцов для датирования приведены в табл. 3.

3. Результаты исследования

3.1. Морфологическое строение профилей почв

Профиль пахотного чернозема состоит из двух пахотных темногумусовых горизонтов PU, различающихся по структуре, содержанию трещин, включению стерни, обилию корней. Так, в верхнем горизонте PU1 присутствует запаханная прошлогодняя стерня, он густо переплетен корнями пшеницы, имеет мелкокомковатую структуру. Тогда как нижележащий горизонт PU2 не содержит стерни; корней существенно меньше. Структура глыбисто-призматическая. Выражена трещинная сеть, трещины распространены только в этом горизонте, глубже не уходят. Под горизонтом PU2 сохранился горизонт AUca. Структура данного горизонта зернистокомковатая, т. е. разительно отличается от структуры вышележащего горизонта.

Таблица 2. Гранулометрический состав и рН водной вытяжки

Глубина, см	рН _{вод}	Содержание фракций в мм, %					
		1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	< 0.001
Ч1							
0-10	7.27	4	7	42	12	22	13
10-20	7.27	3	8	39	14	22	15
20-30	7.18	3	8	33	12	21	22
30-40	7.30	3	4	40	12	20	22
40-50	7.39	2	3	40	13	20	22
50-60	7.48	2	4	36	12	19	27
60-70	7.55	2	2	38	11	20	26
70-80	7.59	1	6	35	11	18	28
80-90	7.93	1	3	38	11	19	28
90-100	8.10	2	9	29	12	33	15
100-120	8.15	8	7	27	10	31	18
120-140	8.27	10	8	25	10	28	20
140-160	8.29	8	7	26	11	13	35
160-180	8.30	10	5	26	11	7	41
180-200	8.25	15	10	21	12	37	5
Ч2							
0-10	7.10	5	5	40	14	21	14
10-20	7.16	6	3	38	15	20	19
20-30	6.97	7	3	40	16	20	14
30-40	7.13	4	3	37	13	19	24
40-50	7.24	4	2	38	14	20	23
50-60	7.34	3	3	37	14	21	23
60-70	7.39	4	2	35	15	20	24
70-80	7.40	3	1	37	12	19	28
80-90	7.80	1	1	38	14	19	28
90-100	8.09	2	3	34	13	21	27
100-120	8.14	3	4	34	12	22	25
120-140	8.17	6	4	30	14	20	26
160-180	8.28	9	8	25	9	21	28
180-200	8.24	11	7	24	9	22	27

Глубина, см	рН _{вод}	Содержание фракций в мм, %					
		1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	< 0.001
ЧЗ							
0-10	7.48	4	4	36	12	21	23
10-20	7.26	4	5	34	12	23	23
20-30	7.10	5	14	24	9	19	27
30-40	6.92	46	15	13	6	11	8
40-50	6.93	56	5	12	6	10	10
50-60	7.03	54	5	11	5	10	15
60-70	7.03	56	3	11	4	11	14
70-80	7.05	59	3	12	4	10	13
80-90	7.03	50	5	14	4	11	16
90-100	7.13	53	5	13	5	8	16
100-120	7.24	64	7	9	2	5	13
120-140	7.38	75	6	4	0	5	10
140-160	8.02	55	8	5	1	9	22
Т2							
0-10	7.29	54	5	12	5	19	4
10-20	7.18	59	5	9	5	13	9
20-30	7.14	57	4	11	8	11	9
30-40	7.13	46	7	14	8	17	8
40-50	7.07	44	8	15	7	18	8
50-60	7.24	54	4	13	7	11	10
60-70	7.24	52	7	11	4	12	14
70-80	7.24	49	10	10	3	10	18
80-90	7.27	42	20	7	3	8	20
90-100	7.28	24	24	4	1	11	35
100-120	7.73	13	23	7	3	12	41
120-140	8.04	83	3	2	1	6	5
0-10	7.63	46	14	10	5	13	12
10-20	7.74	43	16	12	5	12	13
20-30	7.76	41	17	10	6	11	15
30-40	7.58	40	15	12	3	12	18
40-50	7.26	43	12	9	5	10	21

Глубина, см	pH _{вод}	Содержание фракций в мм, %					
		1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	< 0.001
Т3							
50-60	7.24	43	15	10	4	9	19
60-70	7.22	48	13	9	4	8	17
70-80	7.15	55	12	6	3	8	16
80-90	7.20	62	18	2	0	3	14
90-100	7.20	64	16	3	0	4	13
100-120	7.24	76	12	2	0	3	7
120-140	8.42	78	13	1	0	3	5

Таблица 3. Радиоуглеродный возраст гумуса вторых пахотных горизонтов и карбонатов карбонатно-аккумулятивных горизонтов агрочерноземов миграционно-мицелярных и карбонатов горизонтов С агротемногумусовых почв

Номер разреза	Тип землепользования	Глубина отбора образца, см	Материал, в котором определялся возраст	Лабораторный номер	¹⁴ C-возраст, лет
Ч1	пашня	10-24	гумус	SPb_2499	3232 ± 60
		98-110	карбонаты	SPb_2458	8116 ± 100
		145-160	гумус	SPb_2459	11620 ± 130
Ч2	залежь 15 лет	107-112	карбонаты	SPb_2463	11718 ± 150
		128-133	карбонаты	SPb_2494	10924 ± 150
Ч3	залежь 25 лет	27-32	гумус	SPb_2497	4573 ± 70
		109-120	карбонаты	SPb_2461	16817 ± 150
		147-152	карбонаты	SPb_2462	17314 ± 180
Т1	пашня	10-20	гумус	SPb_2496	1280 ± 25
		140-150	карбонаты	SPb_2456	14070 ± 160
Т2	залежь 25 лет	10-20	гумус	SPb_2495	1072 ± 25
		120-130	карбонаты	SPb_2457	14058 ± 160
Т3	залежь 40 (45) лет	15-25	гумус	SPb_2493	1670 ± 30
		120-130	карбонаты (из линз песка)	SPb_2460	15265 ± 150

Здесь гораздо больше ходов мезофауны, чем в предыдущем горизонте. Выражены обратные кротовины с карбонатным псевдомицелием. Далее располагается горизонт АВса, неоднородно окрашенный, с комковатой структурой с тенденцией к призматичности. Здесь также отчетливо выражены ходы мезофауны и кротовины как прямые, так и обратные. Все кротовины содержат карбонатный псевдомицелий. Ниже залегают карбонатно-аккумулятивные горизонты ВСАмс1 и ВСАмс2, различающиеся по цвету и характеру карбонатного псевдомицелия. Нижний горизонт ВСАмс2 содержит более длинные и выраженные «нити» псевдомицелия. Структура карбонатно-аккумулятивных горизонтов призматическая, следов мезофауны заметно меньше, чем в вышележащем горизонте АВса. Оба горизонта имеют прямые кротовины с зоогенным псевдомицелием. В горизонте ВСАмс2 по граням структурных отдельностей встречается мелкая белоглазка с твердым ядром. Нижний горизонт ВСАмс2 постепенно сменяется переходной к породе толщей, которая делится на два горизонта, ВСса1 и ВСса2, различающиеся по содержанию карбонатного псевдомицелия: в нижнем горизонте он встречается редко. Особенности местных лёссовидных суглинков состоит в том, что они содержат обломки известняка. Мелкозем в пахотном черноземе начинает вскипать с верхней границы горизонта АУса.

Морфологическое строение залежных черноземов, исходно похожее на строение пахотной почвы, за период нахождения в залежи успело видоизмениться. К сожалению, залежные черноземы были подвержены сельскохозяйственной обработке в год проведения исследований, и верхние пахотные горизонты (РУра1) были нарушены. Но нижние пахотные горизонты (РУра2) не были ею затронуты. Агрочернозем на пашне имеет характерную для пахотных почв структуру горизонта РУ2 — глыбистую с трещинной сетью и переуплотнением. В отличие от него, залежные почвы имеют горизонты РУра2, в которых следы бывлой распашки уже менее заметны, они обрели комковато-зернистую структуру. Если в почве, расположенной на залежи возрастом 15 лет, все еще наблюдается переуплотнение (плужная подошва), как и в пахотной почве, то в агрочерноземе на 25-летней залежи в ходе самовосстановления плужная подошва практически исчезла. Горизонты АВса и АВ залежных почв не имеют карбонатного псевдомицелия в кротовинах в отличие от аналогичного горизонта пахотной почвы. Линия вскипания от 10%-го раствора HCl в залежных почвах смещается вниз по профилю. Если мелкозем пахотного агрочернозема реагировал с HCl с верхней границы горизонта АУса (24 (28) см), то в 15-летней залежи слабое вскипание от 10%-го раствора HCl проявляется только в горизонте АУ на глубине 49 см. В почве 25-летней залежи линия вскипания от 10%-го раствора HCl смещается еще ниже — на верхнюю границу горизонта ВСА1 (67 (82) см). Горизонт ВСА1 в черноземе 25-летней залежи не имеет карбонатного псевдомицелия в отличие от почв пашни и залежи возрастом 15 лет. В агрочерноземе 15-летней залежи найдена небольшая белоглазка с твердым ядром. В отличие от пахотной почвы, здесь она встретилась единожды.

Агротемногумусовые почвы на пашне и 25-летней залежи образованы на двухчленных отложениях, сверху располагаются суглинистые отложения, а на глубине 130–140 см залегают слои палеоген-неогенового красноцветного песка с элювием известняка. Почва на залежи 40 (45) лет сформирована в несколько других условиях. В ее профиле повсеместно распространена мелкая известняковая щебенка,

которая появляется с глубины 10 см. Слой песка с обилием элювия известняка здесь выражен менее явно. Гранулометрический состав почвы постепенно переходит из суглинка в песок.

Агротемногумусовая почва на пашне имеет пахотный горизонт PU темно-серого цвета легкосуглинистого гранулометрического состава с неясно комковатой структурой, слегка порошистой. Горизонт очень плотный, почти слитизированный. Имеет отмытые зерна кварца. Нижележащий горизонт AU темнее предыдущего, крупнокомковатый. Имеет включения камней с железистыми пленками. Горизонт AC, переходный к породе, неоднородно окрашен, на буро-охристом фоне находятся размазанные темно-серые неясно оформленные пятна. Данный горизонт содержит старые прямые кротовины, камни с железистой пленкой, поверх которой находятся карбонатные кутаны. Вокруг некоторых камней встречаются ореолы из карбонатного мучнистого материала диаметром около 3 см. Горизонт C охристого цвета, супесчаный, имеет известняковый щебень и другие камни с карбонатной мучнистой массой вокруг. На одном из камней фрагментарно присутствует псевдомицелий. Есть прямые кротовины. Ниже расположен горизонт Dca, наполовину состоящий из карбонатных валунов и щебня с карбонатной мучнистой массой вокруг. Остальную часть горизонта занимает охристая супесь.

Почва 25-летней залежи слабо отличается от пахотной почвы по морфологическим признакам. Она все еще имеет хорошо выраженный горизонт плужной подошвы. А в почве 40 (45)-летней залежи переуплотненный горизонт исчезает.

3.2. Мезоморфологический анализ почв

Агрочерноземы миграционно-мицелярные. Во всех образцах аккумулятивно-карбонатных горизонтов в крупных порах и трещинах стенки ожелезнены, что может являться свидетельством периодов грунтового увлажнения почв. Поверх ожелезненного мелкозема располагается буровато-серый материал из более мелких частиц. Вероятно, происходило перераспределение глинистого и гумусового материалов. Поверх буровато-серого материала часто отмечается карбонат кальция.

Во всех трех почвах вторичный карбонат кальция в верхнем аккумулятивно-карбонатном горизонте (BCAmc1, BCA1) менее выражен, нежели в нижнем — BCAmc2. Он располагается по стенкам пор в форме волокон. Только в кротовинах поры полностью или почти полностью заполнены кристаллами карбоната кальция в виде тетрагональных призм. Горизонты BCAmc2 в одних порах содержат кристаллы игольчатого кальцита, в других — кристаллы в виде тетрагональных призм. В отличие от пахотной почвы в залежных черноземах, в нижних карбонатных горизонтах появляется волокнистый карбонат кальция по граням структурных отдельностей.

Агротемногумусовые почвы. В исследованных образцах горизонтов C агро-серогумусовых почв по граням структурных отдельностей и в крупных порах находятся пленки из буровато-серого тонкодисперсного материала — вероятно, это следы лессиважа. В некоторых порах обнаружены вторичные карбонаты, в основном это игольчатый кальцит. Карбонатная масса имеет губчатое сложение, внутри содержит песчаные зерна. Поверхность обломков известняка, которые были обнаружены в агротемногумусовых почвах, имеет следы выветрелости: творожистое строение, наличие железистых пленок, а поверх них — глинистых кутан. В образце

горизонта С пахотной почвы поверх глинистых кутан располагаются вторичные карбонаты, в основном игольчатый кальцит. В залежных почвах обломки известняка не имеют вторичных карбонатов на поверхности.

3.3. Микроморфологический анализ почв

На микроуровне карбонатные аккумуляции в горизонте ВСА агрочерноземов как пашни, так и залежей представлены окарбоначенными корневыми клетками (ОКК), располагающимися как в пустотах более или менее упорядоченно, так и в виде разрозненных спаритовых зерен, разбросанных в тонкодисперсном материале (рис. 3, а, в, д). Тонкодисперсный материал в той или иной степени пропитан карбонатами, а также в нем обнаруживается множество мелких (не более 50 микрон) зерен литогенного кальцита, имеющих удлиненную либо округлую форму. Эти зерна в значительной степени замаскированы тонкодисперсным железисто-глинистым веществом, поэтому на представленных фото не видны. В горизонте ВСА_{мс} почв пашни и 15-летней залежи ОКК довольно сильно дезинтегрированы деятельностью мезофауны, а тонкодисперсная масса имеет следы переувлажнения в виде железисто-марганцевых пятен (рис. 3, а, в). А в почве залежи возрастом 25 лет таких пятен существенно меньше, а ОКК имеют довольно упорядоченный вид и приурочены в основном к порам (рис. 3, д).

Горизонты С_{са} почв пашни и 15-летней залежи характеризуются высокой степенью окарбоначивания тонкодисперсной массы (рис. 3, б, г), а также в ней наблюдаются разноокрашенные оксидами железа микрзоны (признаки процессов оглеения), особенно хорошо заметные в почве пашни (рис. 3, б). В почве 25-летней залежи в горизонте С_{са} еще хорошо выражены ОКК в порах (рис. 3, е). Почва 25-летней залежи в тонкодисперсной массе как горизонта ВСА_{мс}, так и в горизонте С_{са} содержит наиболее заметное количество зерен литогенного кальцита по сравнению с двумя другими почвами.

В изученных аккумулятивно-карбонатных горизонтах по микроморфологическим наблюдениям карбонатные аккумуляции, представленные на микроуровне ОКК, в почве пашни и залежи возрастом 15 лет имеют признаки ожелезнения, сильно разрознены деятельностью землероев, тогда как в 25-летней залежи они упорядочены, расположены преимущественно в порах и не имеют пятен оксидов железа.

В агротемногумусовых почвах пашни и залежи возрастом 25 лет в горизонте С_{са} карбонатные аккумуляции представлены скоплениями мелкого игольчатого кальцита (рис. 3, ж, стрелки), а также в виде ОКК (рис. 3, з) и карбонатной пропитки тонкодисперсной массы. Игольчатый кальцит особенно обилен в почвах пашни, тогда как ОКК — в залежных почвах. Вместе с тем в этих горизонтах очень хорошо заметно наличие ожелезненного тонкодисперсного материала исходной породы. То же можно сказать и о микростроении горизонта С_{са} почвы 45-летней залежи. Но если в почвах залежей возрастом 25 (рис. 3, з) и (40) 45 лет ожелезненный тонкодисперсный материал и карбонатные аккумуляции занимают разные микрзоны в изучаемом горизонте, т. е. разнесены в пространстве, то в почве пашни игольчатый кальцит залегает поверх ожелезненного тонкодисперсного материала, что четко зафиксировано при сравнительно большом увеличении (рис. 3, ж).

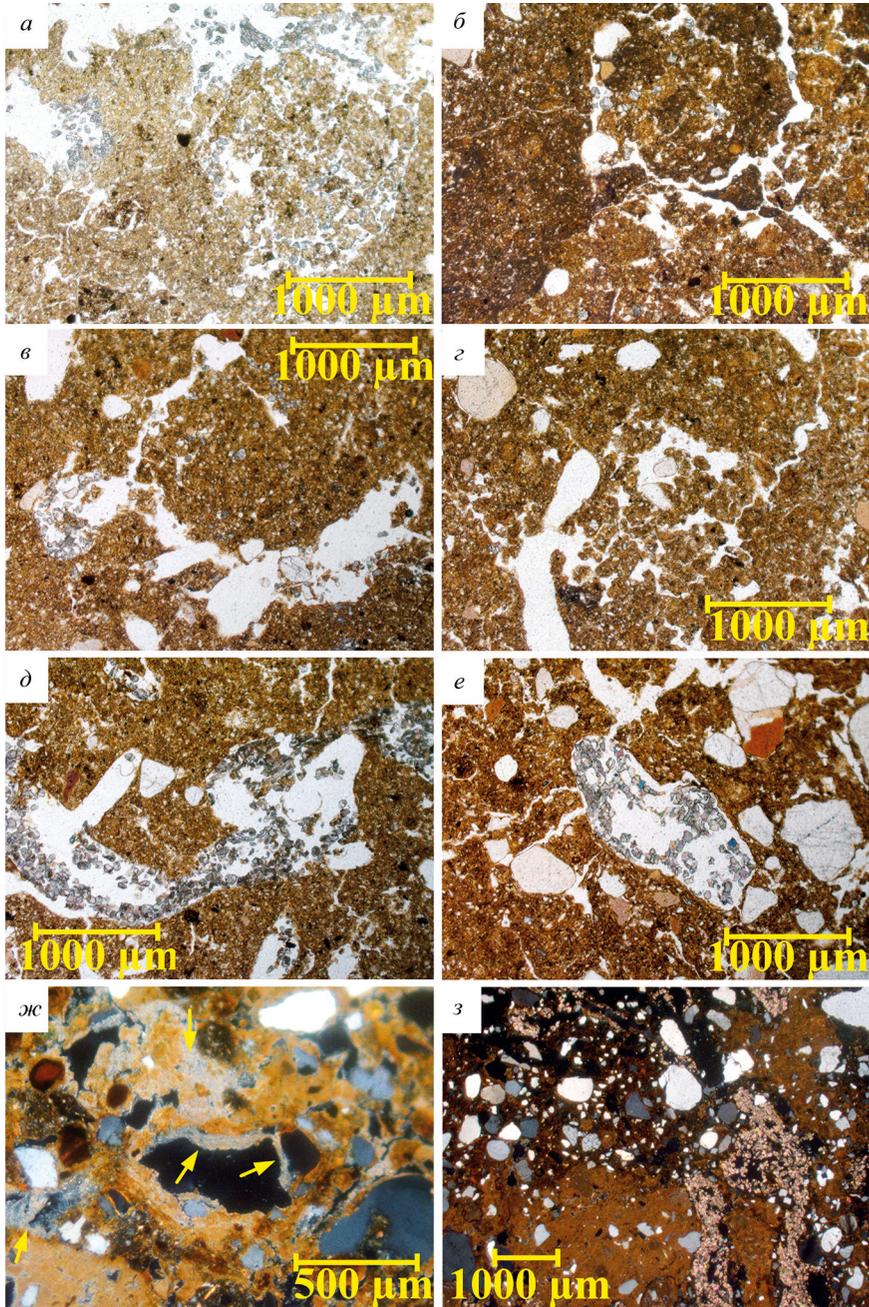


Рис. 3. Микростроение горизонтов агрочерноземов миграционно-мицелярных и агротемногумусовых почв.

Аккумулятивно-карбонатные горизонты агрочерноземов: а — пашня, в — 15-летняя залежь, д — 25-летняя залежь. Горизонты Сса: б — пашня, г — 15-летняя залежь, е — 25-летняя залежь. Горизонты Сса агротемногумусовых почв: ж — пашня (стрелками показаны скопления мелкого игольчатого кальцита), з — 25-летняя залежь. Составлено авторами. Пояснения в тексте

По микроморфологическим наблюдениям в агротемногумусовых почвах пашни в горизонте С обильны признаки переувлажнения почвенной массы: заметно преобладающий среди форм карбонатных аккумуляций игольчатый кальцит залегает поверх ожеженного материала. Тогда как в почвах залежей на первое место среди карбонатных аккумуляций выходят ОКК, их расположение в изучаемом горизонте не связано с зонами ожежения почвенного материала, которых существенно меньше в залежах по сравнению с пашней.

Усиление признаков переувлажнения почвенной массы в горизонтах С и С_{са} в почвах на пашне связано с застаиванием влаги в этих горизонтах из-за особенностей водного режима почв при распашке. Влага, поступающая в почву в периоды весенне-раннелетней и осенней влагозарядки, когда пашня не покрыта растительностью, просачивается в глубинные горизонты по крупным порам и трещинам и там застаивается. Подобные наблюдения были сделаны нами на других объектах (Булышева и др., 2020).

3.4. Плотность, влажность, гранулометрический состав, значения рН водной вытяжки

Агрочерноземы миграционно-мицелярные. В пахотной почве и почве 15-летней залежи отчетливо выражено уплотнение на глубине 15–20 см, что связано с сельскохозяйственной обработкой почв. Глубже плотность сначала снижается, а затем увеличивается при переходе в карбонатно-аккумулятивный горизонт (рис. 4). В залежном черноземе возрастом 25 лет плотность возрастает постепенно с глубиной до аккумулятивно-карбонатного горизонта и затем изменяется незначительно. При этом плотность постагrogenных пахотных горизонтов значимо ниже плотности этих горизонтов почвы пашни и 15-летней залежи.

Полевая влажность верхних горизонтов почв рассматриваемого залежного ряда значимо не различается. Но начиная с глубины 30–40 см влажность чернозема на залежи возрастом 25 лет начинает превышать влажность почв пашни и 15-летней залежи.

По результатам анализа гранулометрического состава (табл. 2) для исследованных агрочерноземов установлено преобладание фракции крупной пыли, что связано с особенностью почвообразующей породы — лёссовидных суглинков. Характер распределения илистой фракции в изученных почвах неравномерный, но в целом наблюдается очень слабо выраженное накопление частиц < 0.001 мм в срединной части профилей почв (горизонты ВСА), что связано с неоднородным гранулометрическим составом исходной почвообразующей породы.

По значениям $pH_{вод}$ исследованные почвы слабо различаются (табл. 2). Слабощелочные значения гумусированной толщи черноземов плавно сменяют щелочные в нижней части профиля. Переход от слабощелочных значений к щелочным на пашне расположен на верхней границе горизонта АВ_{са}, в агрочерноземе 15-летней залежи — на верхней границе горизонта ВСА_{мс1}, в агрочерноземе 25-летней залежи — около середины горизонта ВСА1. Ниже происходит резкое увеличение значений $pH_{вод}$, связанное с появлением карбонатного псевдомицелия и исходного обогащения лёссовидных суглинков карбонатной щебенкой — осколками верхнедевонских известняков. Глубже всего карбонатный псевдомицелий появляется в почве

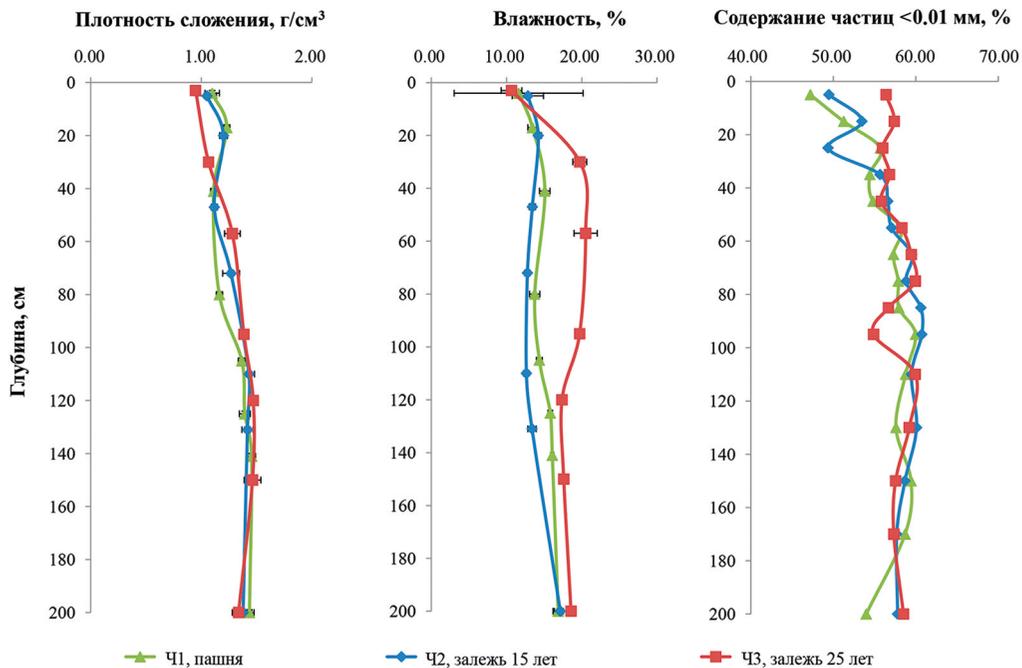


Рис. 4. Плотность слоения, влажность и содержание частиц <0.01 мм в агрочерноземах миграционно-мицелярных. Составлено авторами

25-летней залежи (на верхней границе ВСАмс2 — 107 (113) см), там наблюдается скачок значений $pH_{\text{вод}}$: в интервале между 100 и 120 см, где $pH_{\text{вод}}$ увеличивается на 0.7 единиц.

Агротемногумусовые почвы. В гранулометрическом составе всех почв доминируют частицы размером 1–0.25 мм (табл. 2). Распределение фракций физической глины и почвенного ила неоднородное за счет варьирования содержания этих частиц в исходной почвообразующей породе (рис. 5, табл. 2). Значения $pH_{\text{вод}}$ находятся в зоне нейтральных и щелочных значений (табл. 2). В залежных почвах значения $pH_{\text{вод}}$ выше, чем в пахотной почве. Высокие значения $pH_{\text{вод}}$ связаны, в первую очередь, с наличием литогенного кальцита в почвах. Появление вторичных карбонатов не играет значительной роли.

3.5. Содержание и запасы углерода органических соединений и углерода карбонатов

Агрочерноземы миграционно-мицелярные. Распределение содержания углерода органических соединений ($C_{\text{орг}}$) в изучаемых почвах имеет аккумулятивный характер (рис. 4). У агрочернозема, расположенного на пашне, наибольшее содержание углерода органических соединений в слое 0–10 см, равное 4.6 %. Наименьшим содержанием $C_{\text{орг}}$ в слое 0–10 см обладает почва 15-летней залежи (3.8 %). До глубины 30 см значения $C_{\text{орг}}$ различаются слабо у почвы пашни и 25-летней залежи, при этом почва 15-летней залежи все также имеет значения ниже (рис. 6). С глу-

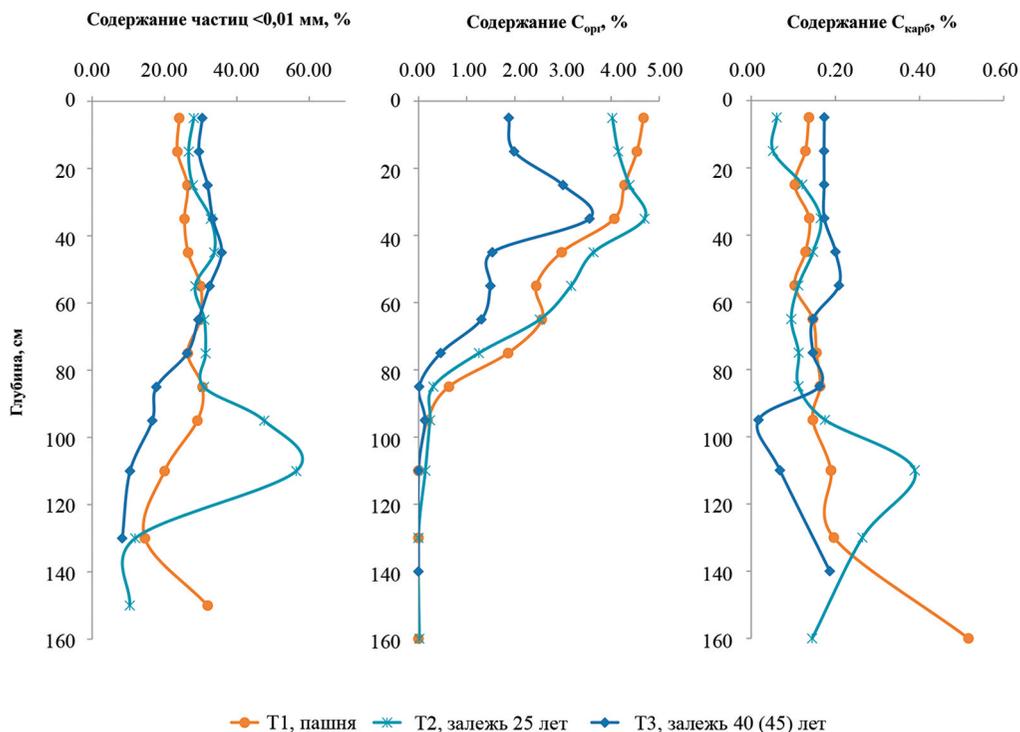


Рис. 5. Содержание частиц <math><0.01\text{ мм}</math>, $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{карб}}$ в агроземногумусовых почвах. Составлено авторами

бины 50 см содержание $C_{\text{орг}}$ у почвы 25-летней залежи резко падает и становится ниже, чем у почв пашни и 15-летней залежи, что и сохраняется до глубины 130 см, где содержание $C_{\text{орг}}$ у всех почв сравниваются. Наибольшие запасы $C_{\text{орг}}$ в слоях 0–100 и 0–200 см обнаружены в почве пашни и уменьшаются в ряду от пахотной почвы к почве 25-летней залежи. Запасы $C_{\text{орг}}$ в слое 0–50 см выше всего в почве пашни и приблизительно одинаковые в почвах залежей; в слоях 50–100 и 100–150 см в залежной почве (25 лет) запасы значительно ниже, чем в остальных двух почвах. А в нижнем слое 150–200 см, напротив, наибольшие значения у почвы 25-летней залежи (рис. 6).

Содержание углерода карбонатов ($C_{\text{карб}}$) во всех почвах одинаково низкое (0.1–0.2 %) до глубины 80–90 см. Затем следует резкий скачок содержания $C_{\text{карб}}$ до 1.6–1.8 % (у почв пашни и 15-летней залежи) и до 1.5 % (у почвы 25-летней залежи). При этом данный скачок расположен выше всего по профилю у почвы 15-летней залежи, затем у почвы пашни и глубже всего у почвы 25-летней залежи. У почвы 15-летней залежи имеется второй максимум содержания $C_{\text{карб}}$ на глубине 140–160 см, равный 2.3 %. Максимальные значения $C_{\text{карб}}$ приурочены к карбонатно-аккумулятивным горизонтам (рис. 6). Наибольшие запасы $C_{\text{карб}}$ в верхней метровой толще обнаружены в агрочерноземе пашни, а в слое 0–200 см — в почве 15-летней залежи. Во всех слоях (0–50, 50–100, 100–150 и 150–200 см) в почве залежи возрастом 25 лет запасы $C_{\text{карб}}$ ниже, чем в двух других почвах (рис. 6).

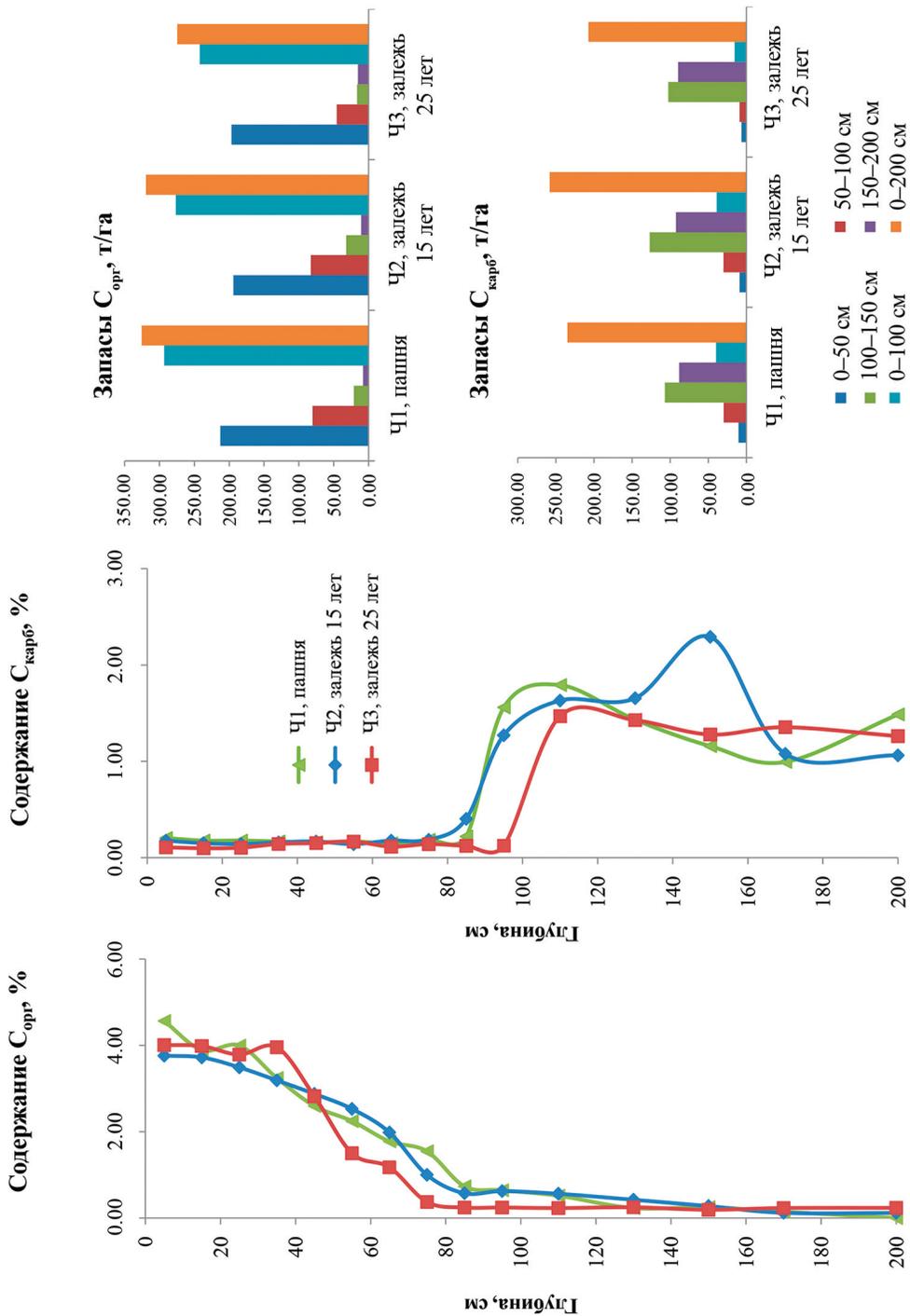


Рис. 6. Содержание и запасы $C_{\text{орп}}$ и $C_{\text{карб}}$ в агроценозах миграционно-мицелиарных. Составлено авторами

Агротемногумусовые почвы. Наибольшее содержание $C_{орг}$ в пахотном горизонте имеет почва пашни, чуть меньше — в почве 25-летней залежи и в два раза ниже в почве 40 (45)-летней залежи. Горизонт AU (18 (21)–57 (59) см) почвы 25-летней залежи имеет самые высокие содержания $C_{орг}$ (рис. 5). На глубине 30–40 см (горизонт AU) залежные почвы имеют максимальное накопление $C_{орг}$, тогда как в пахотной почве снижение содержания $C_{орг}$ происходит постепенно с глубиной.

Содержание углерода карбонатов до глубины 70 см наибольшее в почве залежи возрастом 40 (45) лет, что связано со включением большого количества мелкой литогенной карбонатной щебенки. Зато в нижней части профиля этой почвы имеется наименьшее содержание $C_{карб}$. В паре почв «пашня — 25-летняя залежь» в верхнем горизонте почвы пашни содержание $C_{карб}$ выше, чем в почве 25-летней залежи, также более высокие значения отмечаются и в средней части профиля почвы пашни. В нижних горизонтах содержание $C_{карб}$ повышается на тех участках, где расположена карбонатная мучнистая масса — мелкие осколки известняков, поэтому распределение этого показателя неоднородно во всех трех почвах.

3.6. Радиоуглеродное датирование гумуса и карбонатов почв

Агрочерноземы миграционно-мицелярные. Радиоуглеродное датирование было проведено во вторых пахотных горизонтах залежных и пахотной почв, а также с двух глубин из карбонатно-аккумулятивных толщ. ^{14}C -возраст гумуса выше в черноземе 25-летней залежи (табл. 3). При распашке черноземов увеличивается доля фульвокислот; таким образом, гумус «молодеет» (Саблина, 2016; Русанов и др., 2011). В залежных почвах, где появляются зональные степные виды травянистой растительности (включая ковыль), соотношение углерода гуминовых кислот к фульвокислотам возрастает, скорость биологического круговорота снижается (Герасимов, 1969), гумус «старее».

^{14}C -возраст карбонатов во всех профилях выше в нижней части аккумулятивно-карбонатной толщи по сравнению с верхней. В почве 15-летней залежи и почве пашни C^{14} -возраст карбонатов одинаковый. Наибольшие даты обнаружены в почве на залежи возрастом 25 лет, где находится наибольшее количество зерен литогенного кальцита, что и могло повлиять на увеличение C^{14} -возраста.

Агротемногумусовые почвы. В отличие от черноземов радиоуглеродный возраст гумуса второго пахотного горизонта агротемногумусовых почв снижается при переходе от пашни к залежи возрастом 25 лет. А затем возрастает и начинает превышать возраст подпахотного горизонта агротемногумусовой почвы на пашне. ^{14}C -возраст карбонатной массы получился очень близким для всех трех образцов из разрезов из этого хронорядя, поскольку высока исходная окарбончатенность массы нижних горизонтов из-за подстилания известняками; процессы перекристаллизации и появление вторичных карбонатов не смогли существенно изменить картину (табл. 3).

4. Обсуждение результатов

Агрочерноземы миграционно-мицелярные. Пахотный горизонт, у которого в процессе сельскохозяйственного использования произошли деградация структуры и переуплотнение, уже за 15 лет нахождения в залежи приобрел комковато-зернистую структуру, а за 25 лет переуплотнение практически исчезло.

На исследованных нами ранее объектах в Ростовской области (Булышева и др., 2020) было обнаружено накопление $C_{орг}$ при нахождении почвы в залежи. В данном ряду такая закономерность не выявлена. В верхнем горизонте пахотной почвы содержание $C_{орг}$ выше, нежели в залежных почвах. Также и запасы в слоях 0–50 и 0–200 см в пахотной почве выше. По нашему мнению, это может быть связано с использованием иной (по сравнению с изученными ранее объектами) агротехники в пахотных почвах и почвосберегающих технологий: рыхление почвы сразу после уборки урожая, сохранение стерни, что предохраняет профиль от сильного пересыхания в позднелетнее, раннеосеннее и весеннее время и предотвращает ветровую и водную эрозию. Радиоуглеродный возраст гумуса в пахотном горизонте возрастает с увеличением возраста залежи, что, вероятно, связано с изменением баланса процессов минерализации и гумификации в сторону последних после забрасывания пашни.

Радиоуглеродное датирование было проведено во вторых пахотных горизонтах залежных и пахотной почв, а также с двух глубин карбонатно-аккумулятивных толщ. ^{14}C -возраст гумуса выше в черноземе 25-летней залежи (табл. 3). Возраст гумуса растет за счет снижения скорости биологического круговорота, увеличения доли стабильного гумуса.

Исследованные почвы различаются и по расположению линии вскипания от 10%-го раствора HCl в профиле. Выше всего она располагается в почве на пашне, затем в почве 15-летней залежи, и глубже всего — в почве 25-летней залежи, т. е. линия вскипания постепенно опускается с возрастом распашки, так как в залежном состоянии исчезает контрастность сезонного водного режима, свойственная пашне. В почве пашни и 15-летней залежи карбонатный псевдомицелий более выражен в нижнем карбонатно-аккумулятивном горизонте ($BCAmc2$), чем в горизонте $BCAmc1$. Также горизонт $BCAmc2$ в этих почвах имеет редкую мелкую белоглазку. При этом в пахотной почве было обнаружено наибольшее количество белоглазки. В почве 25-летней залежи в горизонте $BCA1$ карбонатный псевдомицелий невооруженным взглядом был не виден и обнаружился только под бинокулярным микроскопом. Зато нижний горизонт $BCAmc2$ имеет вторичные карбонаты не только в форме псевдомицелия, но и карбонатные налеты по граням структурных отдельностей, которые под бинокулярным микроскопом видны как «волоконистый» вторичный карбонат. В этой почве сегрегационных форм вторичного карбоната кальция не обнаружено. Можно предположить, что при нахождении в залежи белоглазка постепенно растворяется, а на ее месте появляются мобильные формы карбонатных новообразований за счет изменения водного режима.

При распашке меняется водный режим, интенсифицируются восходящие потоки влаги. Вместе с влагой и карбонаты подтягиваются ближе к поверхности почвы. При нахождении почвы в залежном состоянии начинают превалировать нисходящие потоки влаги, карбонаты вымываются в более глубокие слои. Это было нами обнаружено ранее на примере хронорядов залежных и пахотных почв Белгородской (Булышева и др., 2018) и Ростовской областей (Булышева и др., 2020). Содержание и запасы $C_{карб}$ в черноземах заметно снижаются за 25 лет нахождения в залежи.

При распашке деятельность землероев смещается вниз по профилю (Булышева и др., 2018), именно поэтому мы видим следы почвенной фауны в аккумулятивно-

карбонатных горизонтах и не видим их в почве 25-летней залежи. Карбонатные аккумуляции в почве пашни и 15-летней залежи, представленные на микроуровне ОКК, имеют пятна оксидов железа, вероятно полученные в ходе изменения окислительно-восстановительных условий при периодическом застое влаги и последующем иссушении. В ходе восстановительной сукцессии водный режим почвы стабилизируется, исчезают зоны периодического переувлажнения. Поэтому в почве 25-летней залежи карбонаты не имеют пятен оксидов железа.

Главная особенность *агротемногумусовых* почв — это формирование на породах со включением элювия известняка. В почве пашни и 25-летней залежи хорошо выражена карбонатная мучнистая масса, которая располагается либо вокруг известняковых валунов и камней, либо рядом. В почве, которая находилась 40 (45) лет в залежи, участков, содержащих такую карбонатную массу, гораздо меньше, чем в остальных двух почвах. Но, скорее всего, это связано с тем, что данная почва сформирована на породах, залегание которых отлично от залегания почвообразующих пород почв пашни и 15-летней залежи.

В агротемногумусовой почве пашни явно выражен горизонт плужной подошвы, он почти слитизированный. За 25 лет нахождения в залежи такой горизонт практически не изменился и все еще сильно выражен, но при нахождении в залежи 40 (45) лет он практически исчезает. За счет периодического переувлажнения отдельных зон нижних горизонтов С пахотной агротемногумусовой почвы мелкозем ожелезнен, а литогенный карбонат кальция растворяется, затем в этих зонах образуется вторичный игольчатый кальцит. В залежных почвах карбонатные аккумуляции представлены более стабильной формой карбонатов — ОКК.

Как и в ряду агрочерноземов, здесь наибольшее содержание $C_{орг}$ отмечено в пахотной почве в верхнем горизонте. Глубже, на глубине 30–40 см, в залежных почвах обнаружено резкое увеличение содержания $C_{орг}$. С одной стороны, увеличение содержания при переходе от пахотных постагрогенных горизонтов к сохранившейся части горизонта АU может быть связано с тем, что в целинном горизонте сохранилось присущее естественным почвам высокое содержание $C_{орг}$, которое было утрачено в верхних горизонтах при распашке.

В отличие от агрочерноземов, в агротемногумусовых почвах при нахождении в залежи не обнаружено явных изменений в карбонатном состоянии за счет исходной высокой окарбоначенности породы. Тем не менее в нижней части профиля при распашке все же происходит подтягивание карбонатов, что видно по результатам определения содержания $C_{карб}$ в почве на пашне. При нахождении в залежи вторичные или педогенные карбонаты вновь вымываются ниже, за пределы профиля.

Исследование радиоуглеродного возраста карбонатов вместе с морфологическим анализом на разных уровнях организации почв показало высокое влияние литогенного кальцита на карбонатное состояние.

Итак, в обоих исследованных залежных рядах прослеживается одинаковая тенденция трансформации почв при переходе от пашни к залежи. В гумусовом горизонте улучшается структура, происходит разуплотнение. При этом в агрочерноземах эти изменения проявляются быстрее: оструктуривание происходит уже к 15 годам нахождения в залежи, а разуплотнение плужной подошвы — к 25 годам. В агротемногумусовых почвах за 25 лет постагрогенной стадии структура

изменилась лишь частично, а плужная подошва исчезает только к 40 (45) годам. В изученных нами ранее агротемносерых постагрогенных почвах Белгородской области (Булышева и др., 2018) переуплотнение в пахотных горизонтах не исчезает и за 40 лет нахождения в постагрогенной стадии, даже в случае зарастания залежи древесной растительностью. Главную роль в разуплотнении почв играют корни растений и почвенная макро- и мезофауна. Различия в скорости исчезновения плужной подошвы в разных почвах, скорее всего, связаны с разными условиями для жизнедеятельности почвенных животных. В черноземах лесостепи устанавливаются наилучшие условия для них (Стриганова, 2005) за счет баланса тепла, влаги и большого корневого отпада. В агротемногумусовых почвах разуплотнение происходит быстрее, чем в темно-серых почвах, как мы полагаем, за счет более легкого гранулометрического состава. Как в агрочерноземах, так и в агротемногумусовых почвах не выражены следы дегумификации в процессе распашки. Соответственно, и в залежной стадии содержание $C_{\text{орг}}$ не возрастает. Содержание и запасы $C_{\text{карб}}$ в агрочерноземах снижаются к 25 годам залежного состояния, в почвах агротемногумусовых также заметна тенденция вымывания карбонатов вниз по профилю в залежной стадии и подтягивания карбонатов при распашке, но только в нижней части профиля.

При изучении залежных рядов лесостепной и степной зон (в Липецкой (рассматриваемых в данной статье), в Белгородской (Булышева и др., 2018) и Ростовской (Булышева и др., 2020) областях) был сделан следующий вывод: изменение карбонатного состояния в целом и изменение форм карбонатных новообразований в частности зависит главным образом от изменений в водном режиме почв. С одной стороны, при переходе от пашни к залежи в верхних горизонтах аккумуляции карбонатов они растворяются, и карбонаты вымываются вниз по профилю за счет интенсификации нисходящих потоков воды. Содержание и запасы карбонатов снижаются в почвах с переходом из пашни в залежь. С другой стороны, в нижних горизонтах, куда при распашке поступает избыток влаги весной, ранним летом и осенью, когда пашня стоит без растений и влага не расходуется ими и может застаиваться в глубоких горизонтах, образуются такие формы карбонатных новообразований, как белоглазка с твердым ядром. На залежах в агрочерноземах миграционно-мицелярных липецкого ряда и в агрочерноземах сегрегационных ростовского ряда за 20–25 лет белоглазка с твердым ядром исчезает.

5. Заключение

В исследованных агрочерноземах миграционно-мицелярных и агротемногумусовых почвах в процессе восстановительной сукцессии после выведения почвы из сельскохозяйственного оборота выявлены единые тенденции трансформации почвы, которые также были характерны для залежных почв лесостепной и степной зон, изученных нами ранее. Характерно постепенное приобретение ими естественных черт, свойственных почвам до распашки, за счет восстановления целинной растительности и смены водного режима. При нахождении в залежи содержание углерода органических соединений снижается как в агрочерноземах, так и в агротемногумусовых почвах, что связано с высокой культурой агротехники на исследованных пашнях. При этом радиоуглеродный возраст гумуса подпахотных горизон-

тов увеличивается при нахождении в залежи, что говорит о замедлении скорости биологического круговорота, увеличении доли стабильного гумуса. В черноземах исчезают сегрегационные формы карбонатных новообразований, что возвращает их к зональному облику. Происходит трансформация вторичных педогенных карбонатов по направлению от более стабильных форм к менее стабильным. Как у агрочерноземов, так и у агротемногумусовых почв выявлено вымывание карбонатов вниз по профилю, снижение их содержания и запасов при нахождении их в залежи по сравнению с пахотными аналогами.

По результатам исследований почв разных типов и подтипов (агрочерноземы миграционно-мицелярные, агрочерноземы сегрегационные, агротемносерые и агротемногумусовые почвы) лесостепной и степной зон можно отметить единую тенденцию трансформации как карбонатного состояния почв, так и остальных рассмотренных свойств при восстановлении почв в залежи. Почва постепенно восстанавливает свой природный целинный облик на всех уровнях организации. Но в разных почвенных типах и подтипах эти изменения имеют разную степень выраженности и разную длительность трансформационных процессов.

Авторы статьи благодарят В. С. Сарычева, кандидата биологических наук, заместителя директора по научной работе государственного природного заповедника «Галичья Гора» за содействие и помощь при выборе объектов исследования и при проведении полевых работ. Работа О. С. Хохловой и Т. Н. Мякшиной велась в рамках выполнения темы государственного задания № 0191-2019-0046.

Литература

- Барашкова, З. К., Красенков, Р. В. (сост.) (1998). *Геологическая карта четвертичных отложений Липецкой области. М. 1:500 000*. С. М. Шик, ред., МПР РФ. Центральный региональный геологический центр.
- Булышева, А. М., Хохлова, О. С., Бакунович, Н. О., Русаков, А. В., Мякшина, Т. Н., Рюмин, А. Г. (2020). Изменение карбонатного состояния черноземов Приазовья при переходе их из пашни в залежь. *Почвоведение*, (8), 1025–1038. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2008002X>
- Булышева, А. М., Хохлова, О. С., Русаков, А. В., Мякшина, Т. Н. (2018). Изменение карбонатного состояния пахотных и залежных почв юга лесостепной зоны Среднерусской возвышенности (заповедный участок «Лес-на-Ворскле»). *Вестник Томского государственного университета. Биология*, 41, 6–26. <https://doi.org/10.17223/19988591/41/1>
- Воробьева, Л. А. (1998). *Химический анализ почв*. Москва: Изд-во Московского ун-та.
- Герасимов, И. П. (1969). Абсолютный и относительный возраст почв. *Почвоведение*, (5), 27–32.
- Козловский, Ф. И., Чаплин, В. А. (1994). Агродеградация черноземов. В: *Степи Русской равнины: состояние, рационализация аграрного освоения*. Москва: Наука, 174–191.
- Мильков, Ф. Н. (1966). *Ландшафтная география и вопросы практики*. Москва: Мысль.
- Михно, В. Б., Кучин, А. В. (2005). К вопросу создания ландшафтно-экологического каркаса Задонского района Липецкой области. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, (2), 19–28.
- Нестеров, Ю. А. (2017). Ландшафтные особенности. В: В. С. Сарычев, под ред., *Природа долины реки Сухая Лубна. Уникальные природные территории Липецкой области*. Воронеж: Научная книга, 6–23.
- Природа Липецкой области и ее охрана*. (1996). Сборник статей. Вып. 8. Липецк.
- Растворова, О. Г. (1983). *Физика почв (практическое руководство)*. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та.
- Русанов, А. М., Тесля, А. В., Саятфарова, А. М. (2011). Восстановление гумусного состояния степных черноземов под многолетней залежью. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 12 (131), 132–134.

- Саблина, О. А. (2016). Гумусное состояние черноземов сельскохозяйственных угодий Южного Зауралья. *Международный научно-исследовательский журнал*, 11 (53), часть 2, 138–140. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.53.228>
- Савин, И. Ю., Чендев, Ю. Г. (1994). Изменение во времени содержания гумуса в пахотных лесостепных почвах. *Почвоведение*, (5), 88–92.
- Стриганова, Б. Р. (2005) Пространственные вариации функциональной структуры сообществ животного населения степных почв Европейской России. *Поволжский экологический журнал*, (3), 268–276.
- Шишов, Л. Л., Тонконогов, В. Д., Лебедева, И. И., Герасимова, М. И. (2004). *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Ойкумена.
- Шпедт, А. А., Вергейчик, П. В. (2014). Оценка скорости восстановления гумусного состояния почв Красноярского края в условиях залежи. *Вестник АГАУ*, 6 (116), 48–52.
- Arevalo, J. R., Fernandez-Lugo, S., Reyes-Betancort, J. A., Tejedor, M., Jimenez, C. and Diaz, F. J. (2017). Relationships between soil parameters and vegetation in abandoned terrace fields vs. nonterraced fields in arid lands (Lanzarote, Spain): An opportunity for restoration. *Acta Oecologica*, 85, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2017.09.014>
- Bruun, T. B., Elberling, B., de Neergaard, A. and Magid, J. (2015). Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. *Land Degradation & Development*, 26 (3), 272–283. <https://doi.org/10.1002/ldr.2205>
- Francaviglia, R., Benedetti, A., Doro, L., Madrau, S. and Ledda, L. (2014). Influence of land use on soil quality and stratification ratios under agro-silvo-pastoral Mediterranean management systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.026>
- IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In: *World Soil Resources Reports, no. 106*. Rome: FAO.
- Kalinina, O., Krause, S. E., Goryachkin, S. V., Karavaeva, N. A., Lyuri, D. I. and Giani, L. (2011). Selfrestoration of post-agrogenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools. *Geoderma*, 162 (1–2), 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.005>
- Khokhlova, O. S., Chendev, Yu. G. and Myakshina, T. N. (2014). Change in pedogenic carbon stocks under different types and duration of agricultural management practices in the central Russian forest steppe. In: M. Oelbermann, ed., *Sustainable Agroecosystems in Climate Change Mitigation*. Wageningen Academic Publishers, 33–52. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-788-2_2
- Khokhlova, O. S., Chendev, Yu. G., Myakshina, T. N., Alexandrovskiy, A. L. and Khokhlov, A. A. (2015). Evolution of Chernozems in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland under long-term cultivation examined in the agro-chronosequences. *Quaternary International*, 365, 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.10.012>
- Khokhlova, O. S., Myakshina, T. N., Chendev, Y. G. and Shishkov, V. A. (2013). The pool of pedogenic carbon in the soils of different types and durations of use as croplands in the forest-steppe of the Central Russian Upland. *Eurasian Soil Science*, 46, 530–540. <https://doi.org/10.1134/S1064229313050062>
- Kuznetsova, A. M., Khokhlova, O. S., Chendev, Yu. G. and Aleksandrovskii, A. L. (2010). Evolution of the Carbonate State of Agrogenically Transformed Dark Gray Forest Soils in the Central Forest-Steppe. *Eurasian Soil Science*, 43, 1527–1534. <https://doi.org/10.1134/S1064229310130119>

Статья поступила в редакцию 1 июля 2020 г.
Статья рекомендована в печать 18 июня 2021 г.

Контактная информация:

Бульшева Анна Михайловна — annie.bulysheva@gmail.com
Хохлова Ольга Сергеевна — olga_004@rambler.ru
Бакунович Никита Олегович — nbakunovich86@gmail.com
Русakov Алексей Валентинович — a.rusakov@spbu.ru
Мякшина Татьяна Николаевна — mtn59@mail.ru

The change in carbonate state and other properties in chronosequences of abandoned soils in different parent rocks in the reserve “Galich’ia Gora” in the Lipetsk oblast

A. M. Bulysheva¹, O. S. Khokhlova², N. O. Bakunovich²,
A. V. Rusakov¹, T. N. Myakshina²

¹ St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Institute of Physicochemical and Biological Problems
of Soil Science of the Russian Academy of Sciences,
2, Institutskaya ul., Pushchino, Moscow Region, 142290, Russian Federation

For citation: Bulysheva, A. M., Khokhlova, O. S., Bakunovich, N. O., Rusakov, A. V., Myakshina, T. N. (2021). The change in carbonate state and other properties in chronosequences of abandoned soils in different parent rocks in the reserve “Galich’ia Gora” in the Lipetsk oblast. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (3), 533–558. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.306> (In Russian)

The article considers the change in the properties of Haplic Chernozems (Aric) on loess-like loams and Calcaric Phaeozems (Aric) on Paleogene, Neogene red-colored sands with limestone eluvium of the Lipetsk region when they are transferred from cropland to fallow. Attention is paid primarily to the change in the carbonate status of soils. According to the results of the study, it was found that the transformation of both types of soils formed on different rocks obeys a single trend. Carbonates in Chernozems during their time in fallow are washed down the profile; stable forms of carbonate pedofeatures gradually disappear. The content and stocks of carbonate carbon in the 0–200 cm layer in Haplic Chernozems (Aric) decrease by 27.5 t/ha by 25 years of fallow state. In Calcaric Phaeozems (Aric), changes in the carbonate status are less pronounced; nevertheless, it was found that in the arable soil on the fragments of limestone, secondary carbonate films in the form of acicular calcite are formed on top of clay films, which was not observed in the abandoned soils. When the soil is in the fallow, the physical and mechanical properties of the soil improve: the structure of the arable horizons improves and density decreases. Also, the organic carbon content is reduced. This is an atypical result of postagrogenic transformation of Haplic Chernozems (Aric). In the fallow soils of other regions of the steppe and forest-steppe, we observed the process of accumulation of organic carbon. The decrease in soil organic carbon while in the fallow is associated with the use of soil-saving technologies for agricultural use. The radiocarbon age of humus in subsurface horizons increases when soil is in the fallow. The radiocarbon age of carbonates in soils varies depending on the amount of lithogenic calcite inclusion.

Keywords: fallow, cropland, pedogenic carbonates, radiocarbon dating, Chernozem, Phaeozem.

References

- Arevalo, J. R., Fernandez-Lugo, S., Reyes-Betancort, J. A., Tejedor, M., Jimenez, C. and Diaz, F. J. (2017). Relationships between soil parameters and vegetation in abandoned terrace fields vs. nonterraced fields in arid lands (Lanzarote, Spain): An opportunity for restoration. *Acta Oecologica*, 85, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2017.09.014>
- Barashkova, Z. K. and Krasnenkov, R. V. (comp.) (1998). *Geological Map of the Quaternary Sediments of the Lipetsk Region, Scale 1:500 000*, S. M. Shik, ed., MPR RF. Tsentral’nyi regional’nyi geologicheskii tsentr. (In Russian)
- Bruun, T. B., Elberling, B., de Neergaard, A. and Magid, J. (2015). Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. *Land Degradation & Development*, 26 (3), 272–283. <https://doi.org/10.1002/ldr.2205>

- Bulysheva, A. M., Khokhlova, O. S., Bakunovich, N. O., Rusakov, A. V., Myakshina, T. N. and Ryumin, A. G. (2020). Changes in the carbonate status of Chernozems of Azov region upon their conversion from cropland to Long-term fallow. *Eurasian Soil Science*, 53, 1182–1194. <https://doi.org/10.1134/S1064229320080025>
- Bulysheva, A. M., Khokhlova, O. S., Rusakov, A. V. and Myakshina, T. N. (2018). The Change in Carbonate State of Arable and Abandoned Soils in the South of the Forest-Steppe Zone of the Central Russian Upland (Nature Reserve “Les-na-Vorskla”). *Tomsk State University Journal of Biology*, 41, 6–26. <https://doi.org/10.17223/19988591/41/1> (In Russian)
- Francaviglia, R., Benedetti, A., Doro, L., Madrau, S. and Ledda, L. (2014). Influence of land use on soil quality and stratification ratios under agro-silvo-pastoral Mediterranean management systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.026>
- Gerasimov, I. P. (1969). Absolute and relative age of soils. *Pochvovedeniye*, (5), 27–32. (In Russian)
- IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In: *World Soil Resources Reports, no. 106*. Rome: FAO.
- Kalinina, O., Krause, S. E., Goryachkin, S. V., Karavaeva, N. A., Lyuri, D. I. and Giani, L. (2011). Selfrestoration of post-agrogenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools. *Geoderma*, 162 (1–2), 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.005>
- Khokhlova, O. S., Chende, Yu. G. and Myakshina, T. N. (2014). Change in pedogenic carbon stocks under different types and duration of agricultural management practices in the central Russian forest steppe. In: M. Oelbermann, ed., *Sustainable Agroecosystems in Climate Change Mitigation*. Wageningen Academic Publishers, 33–52. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-788-2_2
- Khokhlova, O. S., Chende, Yu. G., Myakshina, T. N., Alexandrovskiy, A. L. and Khokhlov, A. A. (2015). Evolution of Chernozems in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland under long-term cultivation examined in the agro-chronosequences. *Quaternary International*, 365, 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.10.012>
- Khokhlova, O. S., Myakshina, T. N., Chende, Y. G. and Shishkov, V. A. (2013). The pool of pedogenic carbon in the soils of different types and durations of use as croplands in the forest-steppe of the Central Russian Upland. *Eurasian Soil Science*, 46, 530–540. <https://doi.org/10.1134/S1064229313050062>
- Kozlovskii, F. I. and Chaplin, V. A. (1994). Agrodegradation of chernozems. In: *Steppes of the Russian plain: state, rationalization of agricultural development*. Moscow: Nauka Publ., 174–191. (In Russian)
- Kuznetsova, A. M., Khokhlova, O. S., Chende, Yu. G. and Aleksandrovskii, A. L. (2010). Evolution of the Carbonate State of Agrogenically Transformed Dark Gray Forest Soils in the Central Forest-Steppe. *Eurasian Soil Science*, 43, 1527–1534. <https://doi.org/10.1134/S1064229310130119>
- Mikhno, V. B. and Kuchin, A. V. (2005). On the issue of creating a landscape-ecological framework of the Zadonsky district of the Lipetsk region. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geocology*, (2), 19–28. (In Russian)
- Mil'kov, F. N. (1966). *Landscape geography and practical issues*. Moscow: Mysl' Publ. (In Russian)
- Nesterov, Iu. A. (2017). Landscape features. In V. S. Sarychev, ed., *The nature of the valley of the Sukhaya Lubna River. Unique natural territories of the Lipetsk region*. Voronezh: Nauchnaia kniga Publ., 6–23. (In Russian)
- Rastvorova, O. G. (1983). *Soil Physics (practical guide)*. Leningrad: Leningrad University Press. (In Russian)
- Rusanov, A. M., Teslia, A. V. and Saiagarova, A. M. (2011). Recovery of the humus status of steppe chernozems under a long-term fallow. *Vestnik of the Orenburg State University*, 12 (131), 132–134. (In Russian)
- Sablina, O. A. (2016). Humus state of soil in farmland of South Zauralye. *International research journal*, 11 (53), part 2, 138–140. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.53.228> (In Russian)
- Savin, I. Iu. and Chende, Yu. G. (1994). The change in time of the humus content in arable forest-steppe soils. *Pochvovedenie*, (5), 88–92. (In Russian)
- Shishov, L. L., Tonkonogov, V. D., Lebedeva, I. I. and Gerasimova, M. I. (2004). *Classification and Diagnostics of soils of Russia*. Smolensk: Oikumena Publ. (In Russian)
- Spedt, A. A. and Vergeyichik, P. V. (2014). Evaluation of restoration rate of humus status of soils of the idle lands in the Krasnoyarsk region. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 6 (116), 48–52. (In Russian)

- Striganova, B. R. (2005). Spatial variations in the functional structure of animal communities in the steppe soils of European Russia. *Povolzhsky ecological journal*, (3), 268–276.
- The nature of the Lipetsk region and its protection*. (1996). Collected works. Iss. 8. Lipetsk. (In Russian)
- Vorobèva, L. A. (1998). *Chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)

Received: October 3, 2020

Accepted: June 18, 2021

Contact information:

Anna M. Bulysheva — annie.bulysheva@gmail.com
Olga S. Khokhlova — olga_004@rambler.ru
Nikita O. Bakunovich — nbakunovich86@gmail.com
Aleksy V. Rusakov — a.rusakov@spbu.ru
Tatyana N. Myakshina — mtn59@mail.ru