

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ КАРБОНАТНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ ПРИАЗОВЬЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИХ ИЗ ПАШНИ В ЗАЛЕЖЬ¹

© 2020 г. А. М. Булышева^а*, О. С. Хохлова^б, Н. О. Бакунович^б,
А. В. Русаков^а, Т. Н. Мякшина^б, А. Г. Рюмин^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
16 линия В.О., 29, Санкт-Петербург, 199178 Россия

^бИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2, Пушкино, Московская обл., 142290 Россия

*e-mail: annie.bulysheva@gmail.com

Поступила в редакцию 20.11.2019 г.

После доработки 26.02.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Изучены свойства черноземов разновозрастных залежей по сравнению с пахотным аналогом, расположенным в Ростовской области. Основное внимание уделено карбонатному состоянию черноземов. Проанализированы данные полевого изучения морфологического строения профилей почв, мезо- и микроморфологического исследований, физико-химические свойства почв, проведено радиоуглеродное датирование карбонатов в карбонатно-аккумулятивных и переходных к породе горизонтах. Отмечено разуплотнение бывших пахотных и нижележащих горизонтов до глубины 50 см в залежных почвах. Происходит накопление углерода органических соединений и частичное вымывание карбонатов, уменьшение величины рН. Показано, что при переводе пашни в залежь твердые карбонатные новообразования в нижней части профиля растворяются и исчезают, наряду с этим вверху (в горизонтах АВс_а и ВСАпс (40–80 см)) появляются миграционные формы карбонатов. При нахождении изученных черноземов в залежи около 30 лет их карбонаты получают новое квазистабильное состояние по сравнению с пашней. Значительное влияние на трансформацию карбонатного состояния оказывает растительность, появляющаяся после забрасывания почв.

Ключевые слова: пашня, педогенные карбонаты, радиоуглеродное датирование, Chernozem

DOI: 10.31857/S0032180X2008002X

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное природопользование невозможно без познания последствий деятельности человека при взаимодействии с природными системами, в частности, с почвами. Механизмы изменения почв, в частности черноземов, под влиянием человеческой деятельности рассматриваются в теории антропогенной эволюции почв, которая еще очень далека от завершения [13]. При сельскохозяйственном использовании почвенные режимы меняются, что влияет на комплекс совокупных свойств почв. На данный момент можно перечислить несколько основных концепций изменений черноземов при сельскохозяйственном воздействии: 1) при распашке и замене природных растительных сообществ происходит изменение почвенного климата и замещение черноземов северных подтипов южными [1, 7, 19, 25]; 2) при длительной распаш-

ке происходят процессы дивергенции исходных природных подтипов черноземов и последующей агрогенной конвергенции в единый агроподтип [27, 29]; 3) анализ изменений черноземов за 100 лет, показывает ухудшение водно-физических свойств, структурного состояния, деградацию экологической буферности и доминирование тенденции дегумификации черноземов [28].

В настоящее время аккумулятивная функция педосферы в отношении углерода активно изучается почвоведомы, в том числе в агрогенно-преобразованных почвах. В агропочвах при распашке, забрасывании и смене землепользования наиболее часто изучается изменение гумусного состояния, содержания углерода органических соединений и его запасов [9, 11, 14, 18–21, 26, 31, 33]. По данным Глазковской [8], в почвах степной зоны запасы углерода карбонатов составляют 50–63% от общих запасов углерода, а в понятие “педогенный” углерод, помимо органического, необходимо включать и углерод карбонатов. Карбонатное состояние и его изменение в лесостепных почвах при агрогенном

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X2008002X для авторизованных пользователей.

воздействии и после прекращения распашки рассмотрено в ряде наших работ [4, 24, 34–36]. Имеются отдельные работы других авторов, которые исследуют постагрогенную трансформацию почв, где описаны формы карбонатов, получено содержание карбоната кальция в почвах залежных хронорядов [30, 33]. Но в целом, систематического изучения изменения карбонатного состояния почв при переводе пахотных почв в залежное состояние в степной зоне пока не проведено.

Цель работы – изучить изменение карбонатного состояния в разновозрастных залежных черноземах заказника “Степь Приазовская” в Ростовской области по сравнению с пахотным аналогом. Под карбонатным состоянием понимается совокупность всех форм карбонатного вещества, его содержание, строение и состав [22]. Для получения полной картины трансформации свойств почв при переводе из пашни в залежь, дополнительно к параметрам карбонатного состояния изучены основные свойства почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории учебно-опытного хозяйства Южного федерального университета и памятника природы регионального значения “Степь Приазовская”.

В соответствии с геоморфологическим районированием Ростовской области участок работ находится в пределах Приазовской наклонной равнины, постепено спускающейся к Таганрогскому заливу. Почвообразующими породами являются лёссовидные суглинки и глины [3].

Почвенный покров района исследований не отличается пестротой. Согласно почвенно-географическому районированию Северного Кавказа [3], данная территория расположена в Предкавказской провинции фации теплых кратковременно промерзающих почв. В составе почвенного покрова провинции доминируют черноземы обыкновенные малогумусные (ранее делимые на предкавказские и североприазовские черноземы [2]).

Участок исследования находится на водораздельной равнине, грунтовые воды расположены глубже 10 м. Микрорельеф обусловлен наличием плотнoderновинных злаков, которые образуют кочки. Материнские породы представлены лёссовидными суглинками и глинами, подстилаемыми глубже 10 м ракушечниковыми известняками [5]. В пределах памятника природы “Степь Приазовская” выделены четыре залежи разного возраста. Изучали хроноряд постагрогенных агрочерноземов сегрегационных, находящихся на разных стадиях самовосстановления: в течение 86, 30, 20 и 14 лет (работы проведены в сентябре 2016 г.) в указанном заказнике (рис. 1). В качестве фоновой почвы использовали агрочернозем сегре-

гационный на поле, которое продолжает распахиваться в учебно-опытном хозяйстве и вплотную примыкает к заказнику. Длительность пахоты на изучаемом поле – около 150 лет [14]. Согласно сведениям, полученным от руководства учебно-опытного хозяйства, на поле практикуется зернопашной севооборот, без участия пара. Удобрения под сельскохозяйственные культуры не вносят. На каждой залежи и на пашне закладывали по одному разрезу в сентябре 2016 г. на участках с одинаковыми литогеоморфологическими условиями. Характеристика объектов исследования представлена в табл. 1 и на рис. 2.

После прекращения распашки на изученных участках происходит самовосстановление растительного покрова, в настоящий момент происходящего на разных стадиях восстановительной сукцессии в зависимости от длительности залежного состояния участков. Почвообразующие породы – карбонатные лёссовидные суглинки.

Ботаническое описание залежного ряда проведено А.М. Ермолаевым в июне 2007 г. [14]. Также описание растительных сообществ, составленное по результатам полевых работ, проведенных за три года до наших исследований, указано в работе Мясниковой с соавт. [15]. Установлено, что наиболее давняя залежь достигла конечной стадии восстановления растительного покрова, на ней сформировался степной ценоз, характерный для юга Ростовской области: пырейно-типчакково-ковыльно-разнотравная степь. На остальных залежах пока продолжается сукцессионная смена растительности. Залежи 30- и 20-летняя находятся на корневишно-злаковой стадии сукцессии. В растительном покрове доминирует вейник наземный (*Calamagrostis epigeios*) (рис. 1, фото 30). На залежи 14 лет – астрагал белостебельный (*Astragalus albicaulis*) с мощной корневой системой и коротким одревесневшим стеблем.

Провели подробное морфологическое описание заложенных разрезов, определили их классификационное положение в соответствии с “Классификацией и диагностикой почв России” [10]. Измеряли плотность сложения и влажность почвы, пробы отобрали ручным буром и методом режущего кольца [17] в трехкратной повторности. В каждом изученном профиле отобрали образцы с интервалом 10 см для первого (верхнего) метра и 20 см – для второго. В лаборатории в образцах определяли гранулометрический состав методом пипетки с диспергацией суспензии пирофосфатом натрия [17], содержание общего углерода на анализаторе Leco CHN628 (Saint Joseph, USA) и углерода карбонатного ($C_{\text{карб}}$) – манометрически [6], углерод органических соединений ($C_{\text{орг}}$) рассчитывали по разности; провели расчет запасов $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{карб}}$. Определяли потери при прокаливании при 900°C

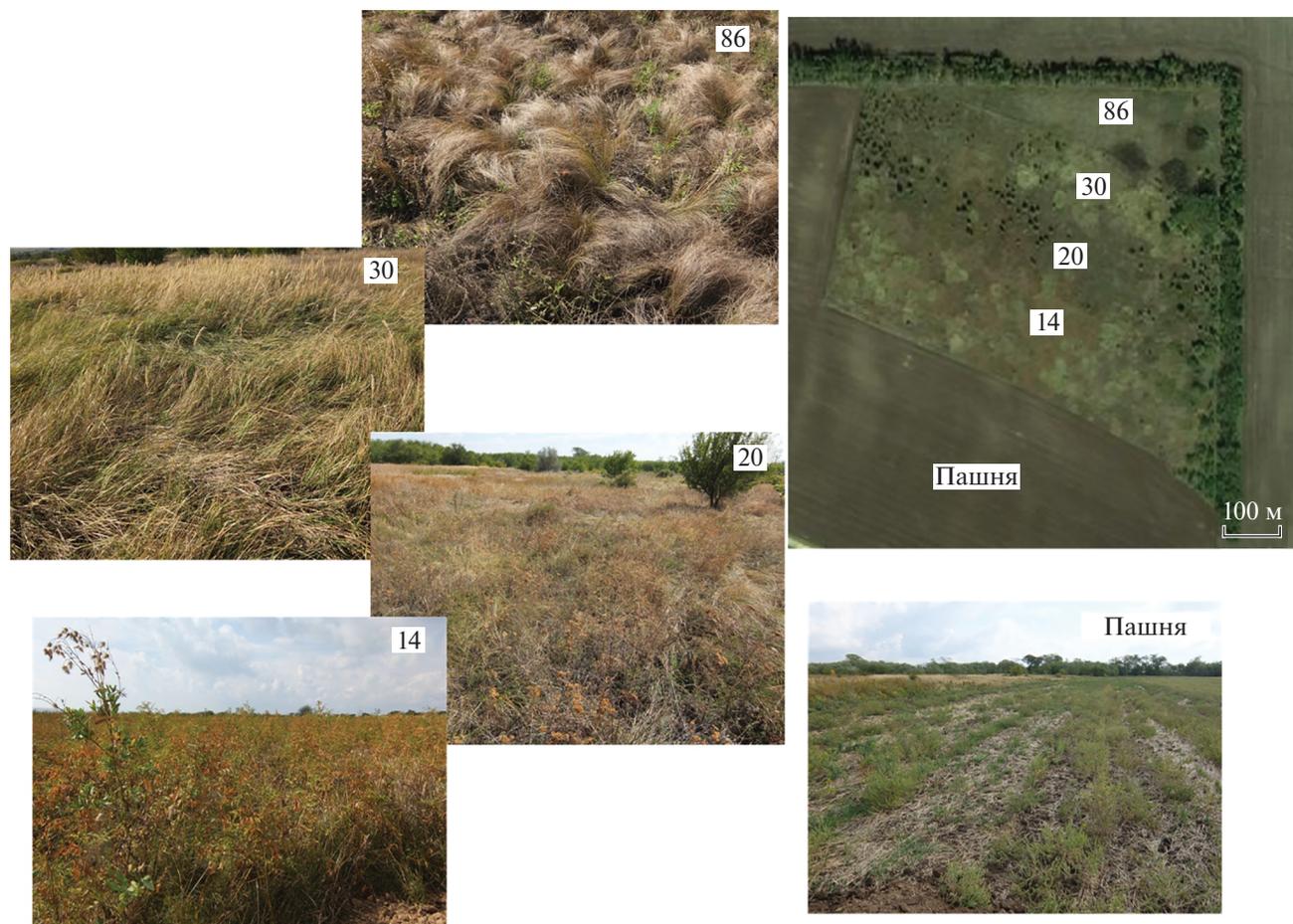


Рис. 1. Спутниковый снимок (<https://yandex.ru/maps>) и растительность участков исследования. Цифрами обозначена длительность нахождения того или иного участка в залежи.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Номер разреза	Координаты WGS 84	Тип землепользования	Название почвы	
			КиДПР* [10]	WRB [32]
НдГ1-16	47.27745 N, 39.32705 E	Залежь 86 лет	Чернозем сегрегационный постагро- генный среднemoshный тяжелосугли- нистый	Calcic Chernozem (Loamic, Pachic)
НдГ2-16	47.27682 N, 39.32745 E	Залежь 30 лет	Чернозем сегрегационный постагро- генный среднemoshный тяжелосугли- нистый	Calcic Chernozem (Loamic, Pachic)
НдГ3-16	47.27632 N, 39.32743 E	Залежь 20 лет	Чернозем сегрегационный постагро- генный среднemoshный тяжелосугли- нистый	Calcic Chernozem (Loamic, Pachic)
НдГ4-16	47.27536 N, 39.32737 E	Залежь 14 лет	Чернозем сегрегационный постагро- генный мощный тяжелосуглинистый	Calcic Chernozem (Loamic, Pachic)
НдГ5-16	47.27459 N, 39.32722 E	Пашня	Агрочернозем сегрегационный мало- мощный тяжелосуглинистый	Calcic Chernozem (Loamic, Aric)

* КиДПР – Классификация и диагностика почв России, 2004.

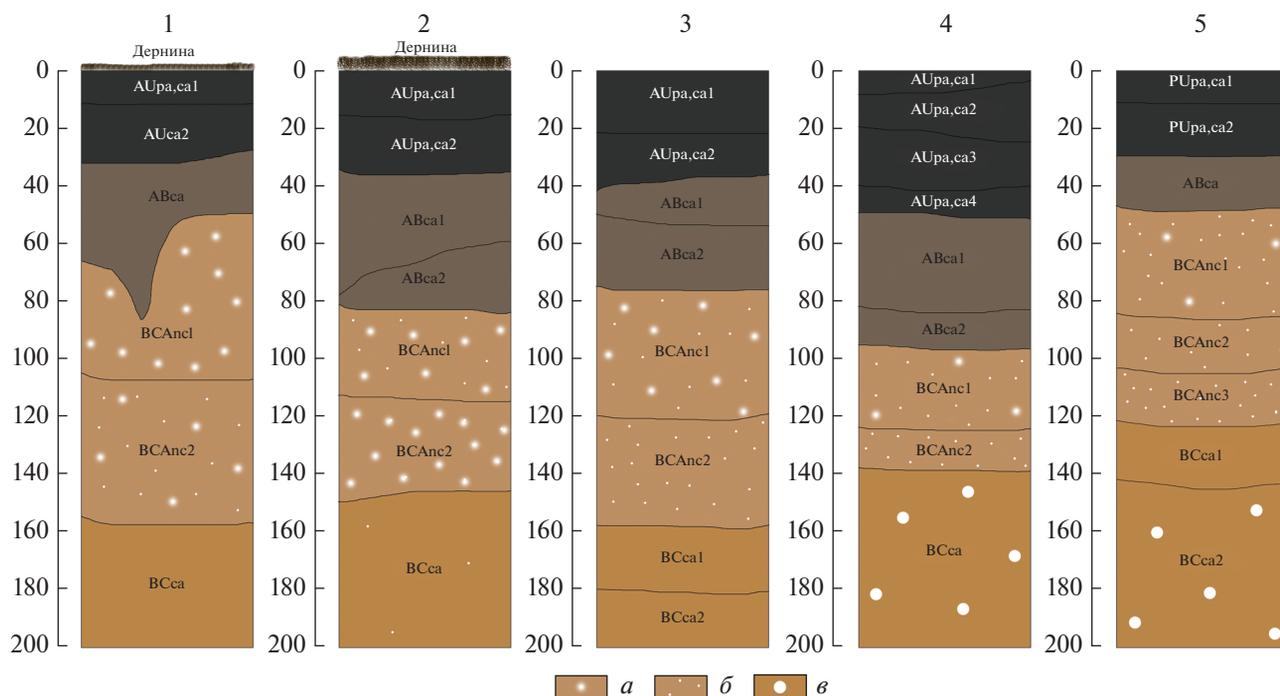


Рис. 2. Схематическое изображение почвенных профилей изученного хроноряда: 1 – разрез НдГ1-16, 2 – разрез НдГ2-16, 3 – разрез НдГ3-16, 4 – разрез НдГ4-16, 5 – разрез НдГ5-16; а – белоглазка с диффузными границами, б – белоглазка с четкими границами, в – белоглазка с четкими границами и твердым ядром.

и рН водной вытяжки потенциметрически в суспензии с соотношением почвы и воды 1 : 2.5.

Для ненарушенных образцов, отобранных из карбонатных горизонтов, проводили мезоморфологическое описание с помощью бинокулярного стереомикроскопа МБС-10, объекты фотографировали с помощью камеры Nikon D5500 с макрообъективом NIKKOR. Из микромонолитов, отобранных из карбонатно-аккумулятивных и переходных к породе почвенных горизонтов, готовили шлифы и проводили их микроморфологический анализ на микроскопе CarlZeiss AxioScopeA1 в скрещенных (cross-polarized light (XPL)) и параллельных николях (plane polarized light (PPL)) в ЦКП ИФХиБППРАН (г. Пушкино, Россия).

Радиоуглеродное датирование карбонатов проводили в Киевской радиоуглеродной лаборатории НАН Украины. В профилях изученных почв белоглазка залегает двумя слоями, где ее накопление максимально. Верхний слой с белоглазкой располагается в горизонтах BCanc1, нижний – в горизонтах BCanc2. Образцы на ^{14}C -датирование отобрали из середины скопления белоглазки в двух этих горизонтах в каждом профиле. Датировали образцы общей почвенной массы с указанных глубин, в которой встречалась белоглазка. Датировку центра новообразований отдельно не проводили. Для белоглазки с твердым ядром получали две ^{14}C -даты, для этого отбирали карбонатные

аккумуляции отдельно от вмещающей почвенной массы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные залежные почвы состоят из одного или двух гумусовых постагрогенных горизонтов (AUra,ca), располагающихся у поверхности почвы. На залежах 30 и 86 лет на поверхности почвы образуется слой дернины. Под гумусовым горизонтом залегают один или два горизонта ABca. Глубже располагаются карбонатно-аккумулятивные горизонты с белоглазкой (BCanc1, BCanc2). Самые нижние изученные слои – это переходные к породе горизонты BCca. Пахотный чернозем по строению профиля отличается от залежных почв наличием пахотного горизонта. Схематическое изображение изученных профилей почв представлено на рис. 2.

По результатам морфологического описания черноземы 30- и 86-летней залежи имеют слабые миграционные (диффузные) формы карбонатных новообразований – выпоты по граням педов и корнеходам в горизонте ABca и BCanc, тогда как в остальных почвах они отсутствуют. Согласно [16], миграционные формы образуются в толще активного влагооборота, где расход влаги происходит постепенно, что обеспечивает возможность миграции карбонатов в слое значительной мощности. Наличие миграционных карбонатных новооб-

разований в “старых” залежных почвах свидетельствует о меньшем иссушении данных горизонтов в течение сезона по сравнению с “молодыми” залежами и пашней.

Аккумулятивно-карбонатный горизонт (BCA) во всех изученных почвах содержит сегрегационные формы карбонатов — белоглазку. По результатам полевого морфологического описания почвенных профилей и мезоморфологического анализа видно, что в исследованных почвах встречается белоглазка двух видов по характеру границы с вмещающей почвенной массой: с диффузными (рис. S1A) и четкими границами (рис. S1B). В 14-летней залежи и пахотной почве, как внутри педов, так и в межпедном пространстве, располагается белоглазка с четкими границами. Также в межпедном пространстве есть белоглазка с диффузным ореолом вокруг, но ее мало. Здесь в нижней части профиля белоглазка располагается в виде скоплений, а в самой нижней части профиля часть этих новообразований имеет твердое ядро. Такие же формы выявлены Хохловой с соавт. [23] и названы белоглазка с твердым ядром. При этом в почве пашни белоглазка с твердым ядром встречалась гораздо чаще, чем в почве 14-летней залежи. В 20-летней залежи — в верхнем аккумулятивно-карбонатном горизонте BCAnс1 — преобладает белоглазка с диффузными границами между структурными отдельностями; белоглазки с четкими границами, располагающейся внутри педов, мало. В нижнем аккумулятивно-карбонатном горизонте BCAnс2, наоборот, внутри педов преобладает белоглазка с четкими границами, а в межпедном пространстве белоглазки с диффузными границами мало. В “старых” залежах (86 и 30 лет) преобладает белоглазка с диффузными границами, которая располагается между структурными отдельностями. Белоглазка с четкими границами обнаруживается внутри структурных отдельностей в небольшом количестве. Таким образом, при переходе от пашни к залежи почвенная белоглазка подвергается процессам растворения и перекристаллизации, за счет меньшего высушивания аккумулятивно-карбонатного горизонта, уменьшения восходящих потоков влаги. В первую очередь растворяется белоглазка, расположенная в межпедном пространстве, затем внутри педов.

Примечательно, что белоглазка с твердым ядром отмечена только в нижних горизонтах (глубже 160 см) почвы пашни и почвы 14-летней залежи. По данным [12], в степных почвах с добавочным увлажнением появляются мелкие журавчики и переходная к ним форма — белоглазка с твердыми ядрами. Поэтому предположили, что формирование твердых карбонатных новообразований в пахотной почве — это результат избыточного увлажнения ее нижних горизонтов весной, ранним летом и осенью. В это время выпадает значительное количество осадков, пашня стоит без растительного

покрова, и влага, поступающая в почву, не расходуется на транспирацию и может некоторое время застаиваться в глубоких горизонтах. В залежных почвах с постоянным растительным покровом, как мы полагаем, периодов переувлажнения нижних горизонтов профиля в годовом цикле нет, поэтому твердые карбонатные новообразования начинают постепенно растворяться и исчезать. Белоглазка с твердым ядром в нижних горизонтах чернозема 14-летней залежи является остаточной, поскольку не успела трансформироваться в новых условиях. Это подтверждается заметным уменьшением ее количества в почве 14-летней залежи и отсутствием в черноземах с большей длительностью нахождения в залежи (20, 30, 86 лет).

Микроморфологические наблюдения показывают, что в черноземах на залежах 86 и 30 лет в средней части профиля в горизонте BCAnс1 карбонатные аккумуляции демонстрируют признаки дробления мезофауной (рис. 3А), среди осколков карбонатных аккумуляций, сложенных микрокристаллическим (микроспарит) кальцитом, при больших увеличениях видны игольчатые кристаллы (рис. 4В). В нижнем карбонатном горизонте BCAnс2 значительные по размеру (несколько миллиметров в шлифе) карбонатные аккумуляции располагаются в тонкодисперсной массе и имеют четкие границы с ней (рис. 3, Б, Г).

В почвах пашни и 14-летней залежи в горизонте АВса видны обособленные пятна карбонатной пропитки (carbonate pedofeatures в соответствии с терминологией Stoops [37]), которые имеют диффузные границы с окарбонированной тонкодисперсной массой. Часто пропиточные пятна пересекаются трещинами, как мы полагаем, возникающими в результате неравномерного просыхания (рис. 3, Д, Ж). Здесь имеются микроучастки с неоднородной окраской — признаки процесса временного застоя влаги в этом горизонте. В горизонте BCAnс1 признаки переувлажнения более четкие, пятна светлой и более темной, бурой окраски чередуются, карбонатные аккумуляции представлены в виде равномерной пропитки тонкодисперсного материала горизонта (рис. 3, Е, З).

Микроморфологические особенности карбонатных горизонтов почвы 20-летней залежи состоят в том, что можно наблюдать как признаки, свойственные почвам 86- и 30-летней залежей, так и 14-летней залежи и пашни, т.е. микростроение изученных горизонтов 20-летней залежи демонстрирует переходные черты от пахотной к сравнительно длительной залежной стадии развития.

В почве пашни карбонатные аккумуляции, состоящие из скрытокристаллического кальцита, в нижнем горизонте ВСса2 сплошь покрыты пленками и новообразованиями оксидов железа (рис. S2A), тогда как в почве 14-летней залежи в том же горизонте эти пятна на аналогичных кар-

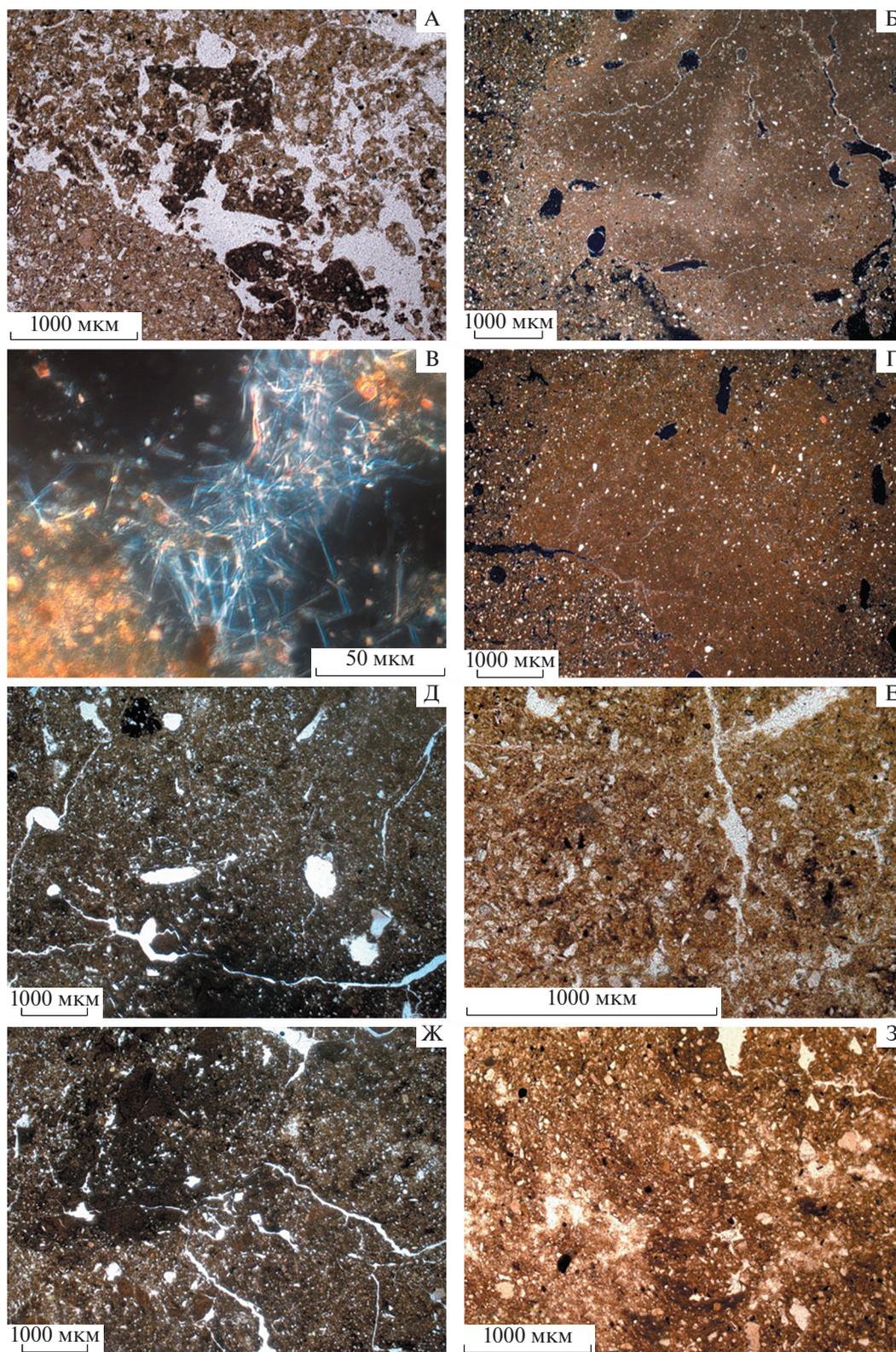


Рис. 3. Микростроение карбонатных горизонтов в почвах изучаемого хроноряда: залежь 86 лет: А – горизонт ВСAnc1, 95–100 см, Б – горизонт ВСAnc2, 131–136 см; залежь 30 лет: В – горизонт ВСAnc1, 92–98 см, Г – горизонт ВСAnc2, 130–135 см; залежь 14 лет: Д – горизонт АВса1, 50–55 см, Е – горизонт ВСAnc1, 110–116 см; пашня: Ж – горизонт АВса, 48–52 см, З – горизонт ВСAnc1, 107–115 см. Фото Б, В, Г сняты с анализатором (режим ХРЛ), остальные – без анализатора (режим РРЛ).

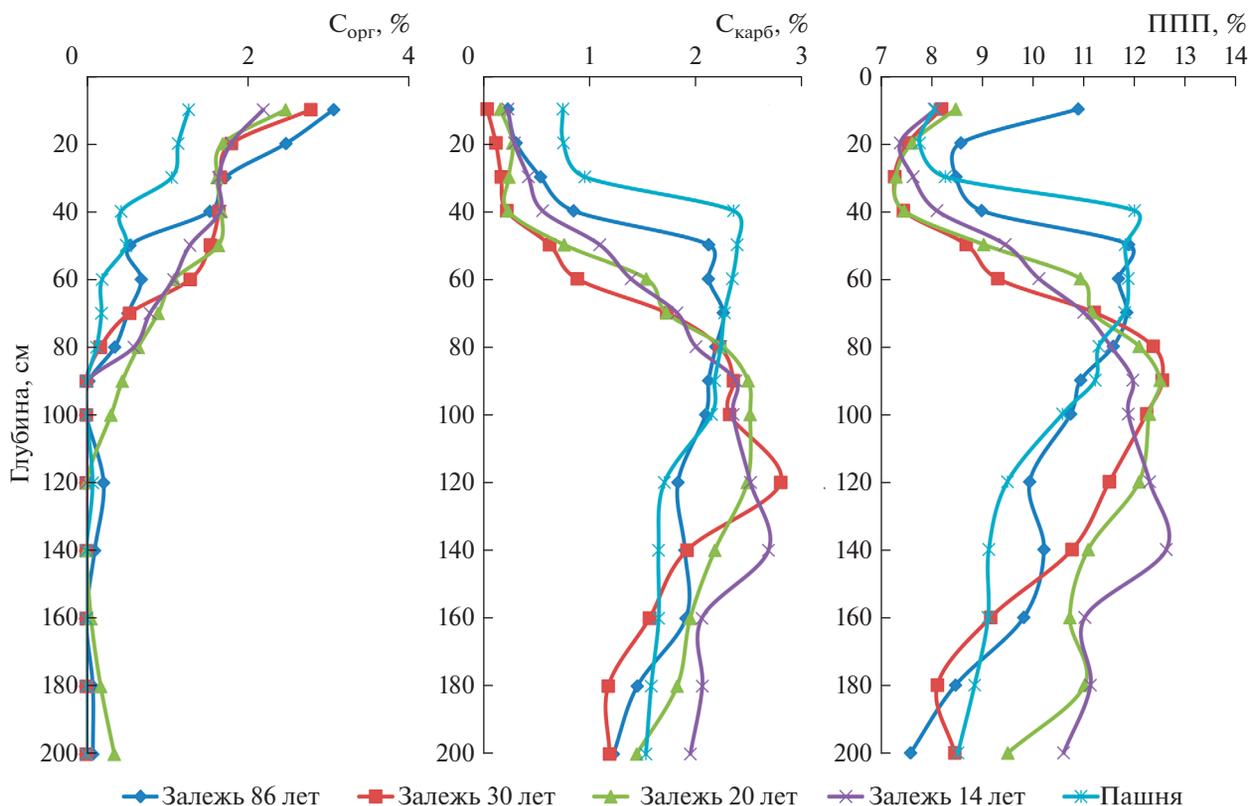


Рис. 4. Содержание углерода органических соединений (А), углерода карбонатов (Б) и ППП (В) в изученных почвах.

бонатных аккумуляциях единичны (рис. S2, В). Очевидно, в пашне белоглазка с твердым ядром формируется в условиях большего переувлажнения, чем в почве 14-летней залежи. Полагаем, что это связано с растительностью (астроголом), которая имеет мощную корневую систему в залежной почве. Эта растительность потребляет воду из глубоких горизонтов, периоды переувлажнения здесь отсутствуют или сведены к минимуму.

Необходимо подчеркнуть, что во всех без исключения изученных шлифах видны удлинённые и округлые зерна литогенного кальцита совсем малого размера и немного большего, но не превышающего нескольких микрон, глубоко внедрённые в силикатную основу. Это указывает на исходную карбонатность лёссовидных суглинков, на которых сформированы изучаемые почвы.

По данным **гранулометрического анализа** все почвы изученного ряда имеют тяжелосуглинистый иловато-крупнопылеватый состав (табл. 2). Ясно выражена тенденция к облегчению гранулометрического состава при переходе от пашни к залежи, главным образом, за счет фракций ила и физической глины, в целом. Вероятно, это связано с длительностью пахотной стадии развития почв. Ранее при изучении агрогенной эволюции черноземов в лесостепной зоне [25] показано, что при уве-

личении срока распашки происходит оглинение верхних горизонтов пахотных почв в результате физического дробления (механическое воздействие обрабатывающей техники) и усиливающего этот процесс оглеения.

Плотность пахотной почвы достоверно больше, чем в почвах залежей до глубины 50 см (рис. S3, А). Почвы залежей достоверно не отличались друг от друга по распределению величин плотности по профилю в целом. Лишь в самом верхнем слое 0–5 см можно отметить выраженные, но недостоверные отличия: плотность самой давней залежи 86 лет составила 0.86 г/см³, тогда как остальные залежи в этом слое имели плотность около 1.0 г/см³, а пахотная почва — 1.1 г/см³. С глубины около 150 см чернозем 86-летней залежи отличается меньшей плотностью от остальных изученных почв.

Полевая влажность различалась в почвах залежей и пашни закономерно в связи с наличием или отсутствием растительного покрова на момент отбора образцов, а также его особенностями. В слое 0–5 см пахотной почвы влажность была наименьшей среди изучаемых почв в связи с быстрым высыханием верхнего слоя пашни, практически непокрытого растительным покровом, поскольку отбор образцов осуществлялся в сентябре после

Таблица 2. Значения рН водной вытяжки и гранулометрический состав почв изученного хроноряд

Глубина, см	рН _{Н₂О}	Содержание фракций (мм), %					
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001
Разрез НдГ1-16							
0–10	7.6	1	13	43	9	16	19
10–20	7.7	1	10	49	7	13	20
20–30	7.8	1	8	52	7	13	20
30–40	7.7	1	9	45	7	15	22
40–50	7.8	1	8	47	7	16	21
50–60	7.8	1	12	38	8	18	23
60–70	7.8	1	8	45	8	18	20
70–80	7.8	1	8	41	8	19	23
80–90	7.8	0	9	39	9	18	25
90–100	7.8	1	10	37	8	18	27
100–120	7.9	0	10	39	7	17	26
120–140	7.9	0	8	40	7	17	27
140–160	7.9	1	22	29	6	17	26
160–180	7.9	0	29	24	6	15	26
180–200	7.5	0	28	32	6	14	20
Разрез НдГ2-16							
0–10	7.6	1	30	22	8	15	24
10–20	7.6	1	27	23	7	17	25
20–30	7.7	1	22	29	8	14	26
30–40	7.7	1	25	26	7	15	26
40–50	7.7	2	17	30	8	17	27
50–60	7.8	1	14	34	7	17	27
60–70	7.8	1	18	28	8	19	26
70–80	7.8	1	11	36	7	22	25
80–90	7.8	0	13	33	7	21	25
90–100	7.8	0	14	33	9	17	26
100–120	7.8	0	10	33	8	18	31
120–140	7.8	0	13	33	8	16	30
140–160	7.9	0	8	43	7	15	25
160–180	7.8	0	13	38	9	16	23
180–200	7.8	0	9	33	11	19	28
Разрез НдГ3-16							
0–10	7.7	1	13	38	7	15	25
10–20	7.7	0	13	36	8	15	28
20–30	7.7	1	13	34	9	14	28
30–40	7.7	1	10	38	8	15	29
40–50	7.8	1	10	37	8	16	28
50–60	7.8	1	10	37	8	16	28
60–70	7.9	1	13	34	7	17	29
70–80	7.9	1	12	33	8	19	28
80–90	7.8	1	18	28	7	19	28
90–100	8.4	1	13	34	7	18	28
100–120	8.4	0	9	35	7	19	29

Таблица 2. Окончание

Глубина, см	рН _{Н₂О}	Содержание фракций (мм), %					
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001
120–140	8.4	0	21	24	3	19	32
140–160	8.3	0	26	16	4	17	36
160–180	8.3	1	29	13	3	19	35
180–200	7.9	0	20	22	6	18	34
Разрез НдГ4-16							
0–10	8.1	1	17	32	7	15	28
10–20	8.2	1	30	21	4	15	29
20–30	8.2	1	17	31	5	16	29
30–40	8.1	1	15	32	8	17	27
40–50	8.2	1	11	34	7	17	29
50–60	8.2	1	17	31	7	16	28
60–70	8.3	1	13	31	8	18	30
70–80	8.3	1	12	35	8	18	28
80–90	8.3	1	10	34	7	22	27
90–100	8.3	1	12	32	7	20	28
100–120	8.4	0	23	18	7	19	32
120–140	8.3	0	18	19	7	19	36
140–160	8,3	0	18	19	8	20	34
160–180	8.3	0	7	29	10	21	33
180–200	8.3	0	2	34	12	21	32
Разрез НдГ5-16							
0–10	8.1	1	15	35	9	17	23
10–20	8.2	1	14	32	10	17	26
20–30	8.3	1	11	37	9	16	26
30–40	8.4	1	10	32	9	20	28
40–50	8.4	0	7	34	10	19	29
50–60	8.4	0	6	33	10	20	30
60–70	8.5	0	8	31	10	20	30
70–80	8.5	0	6	32	10	20	32
80–90	8.5	0	9	28	9	20	33
90–100	8.5	0	5	34	10	20	31
100–120	8.7	0	6	33	10	17	33
120–140	8.8	0	1	35	11	19	33
140–160	9.0	0	10	30	11	18	31
160–180	9.2	0	3	34	9	22	32
180–200	9.3	0	1	37	11	19	32

уборки урожая. С глубины 25–30 см влажность пахотной почвы была достоверно выше, чем в залежах, поскольку корни растений не забирали влагу с этой глубины на убранной пашне. Начиная с глубины 130 см, по влажности с пашней сравнивалась и 20-летняя залежь, поскольку на этой залежи в поле отмечалась самая маломощная сорная травяни-

стая растительность. На глубине 45–70 см достоверно наименьшей влажностью характеризовалась почва под 14-летней залежью (рис. S3, B). Только на этой залежи присутствовала самая высокая и имевшая отчасти одревесневший стебель кустарничковая растительность (*Astragalus albicaulis*), у которой была мощная корневая система,

что привело к самому значительному потреблению воды из описываемого слоя в профиле почвы на 14-летней залежи. При полевом описании почвы 14-летней залежи также было хорошо видно, что профиль наиболее сухой.

По величинам pH_{H_2O} исследованные почвы имеют щелочную реакцию среды (табл. 2). Почвы залежей 86 и 30 лет не выходят за пределы слабощелочной реакции (pH_{H_2O} 7.5–8.0) и отличаются от почвы пашни, в которой отмечаются средне- и сильнощелочные величины pH_{H_2O} (8.0–8.5 и >8.5) по всему профилю. Величины pH_{H_2O} в почве на залежи 14 лет в пределах бывшего пахотного горизонта не отличаются от пашни, а ниже постепенно уменьшаются, но не достигают слабощелочной реакции среды, как в почвах давних залежей. Почва на залежи 20 лет демонстрирует отчетливо переходный характер по распределению величины pH_{H_2O} по профилю: до глубины 90 см эти значения совпадают с таковыми в почвах более давних залежей, а глубже – с величинами pH почвы на залежи 14 лет.

Содержание углерода органических соединений ($C_{орг}$) в слое 0–10 см последовательно уменьшается в ряду от самой древней залежи (3.07%) к пахотной почве (1.27%) (рис. 4, А). Для верхних 100 см содержание $C_{орг}$ в пахотном черноземе значительно ниже, чем во всех изученных залежах. На глубине 40 см значения $C_{орг}$ у всех залежных почв сравниваются, а ниже залежные почвы имеют несколько более высокие значения $C_{орг}$, чем залежь 86 лет. На глубине 50 см у чернозема на залежи 86 лет содержание $C_{орг}$ приравнивается к таковому в пахотной почве, что связано с языковатостью нижней границы гумусового горизонта этой залежной почвы. Наиболее плавно уменьшение содержания $C_{орг}$ в верхних 100–120 см наблюдается у почвы 20-летней залежи. Таким образом, прослеживается накопление органического углерода при нахождении пахотных черноземов в залежном состоянии. На всем протяжении гумусового профиля в залежных почвах $C_{орг}$ выше, чем в пахотной. Тем не менее, прямая связь содержания $C_{орг}$ и возраста залежи уверенно фиксируется лишь в верхних 10-ти см.

Содержание углерода карбонатов ($C_{карб}$) в верхних 80 см выше всего в пахотной почве, затем следует почва 86-летней залежи, а затем остальные залежные почвы (рис. 4, Б). На глубине 80–90 см содержание карбонатов у всех почв хронорядя становится приблизительно равным. Примечательно, что максимум накопления карбонатов в пахотной и в залежной почве 86 лет располагается в промежутке 40–70 см (2.27 и 2.40% соответственно), а у остальных залежных почв ниже: 30-летней – на глубине 120 см (2.81%), 20-летней –

80–120 см (2.53%), 14-летней – 140 см (2.70%). В самом низу профиля (180–200 см) содержание $C_{карб}$ больше в пахотном черноземе и черноземе молодых залежей, и меньше – в более давних залежах.

Распределение величины **потери при прокаливании (ППП)** практически повторяет распределение $C_{карб}$ по профилям изученных почв (рис. 4, В), отклоняясь от этой закономерности лишь в самом верхнем горизонте почвы на залежи 86, что может быть связано с зафиксированным самым большим содержанием $C_{орг}$.

Запасы $C_{орг}$ в слое 0–50 см во всех залежных почвах показали значения выше 100 т/га и отличались друг от друга незначительно (рис. 5, А). В пахотной почве в этом слое запасы $C_{орг}$ меньше в 1.8 раз, чем в залежных почвах, и то же в слое 50–100 см, где запасы $C_{орг}$ также намного меньше. В целом, запасы $C_{орг}$ в двухметровом профиле залежных почв выше, чем в пахотной почве за счет его накопления в метровой толще, поскольку в слоях 100–150 и 150–200 см все почвы хоть и различаются, но в силу того, что на этих глубинах величины небольшие, то не оказывают большого влияния на различия в запасах по всему профилю. Наименьшие запасы среди залежных почв в метровой и двухметровой толщах имеет почва на залежи 86 лет.

Запасы углерода карбонатов в двухметровой толще профилей показывают наибольшие значения в почвах пашни и 14-летней залежи – около 500 т/га, тогда как в почвах 30- и 86-летней залежи отмечены близкие (около 400 т/га) и при этом наименьшие запасы карбонатов (рис. 5, Б). Почвы пашни и 14-летней залежи выходят вперед по запасам карбонатного углерода за счет самой верхней (0–50 см) и самой нижней (150–200 см) проанализированных толщ. В слое 50–100 см запасы карбонатов также наибольшие в пахотной почве. Почвы всех залежей демонстрируют близкие и при этом наибольшие запасы в толщах 50–100 и 100–150 см.

Примечательно, что в самом глубоком слое 150–200 см наименьшие запасы обнаружены у почв с наибольшим возрастом залежи (30 и 86 лет). Таким образом, по запасам карбонатов и распределению этих запасов в рассчитанных полуметровых толщах в профиле близки черноземы на 86- и 30-летней залежах, с одной стороны, и на 14-летней залежи и пашне, с другой.

Во всех залежных почвах запасы $C_{карб}$ в три раза и более превышают запасы $C_{орг}$ в слоях 50–100, 100–150 и 150–200 см. Лишь в слое 0–50 см запасы $C_{орг}$ превышают таковые для $C_{карб}$ и варьируют от 70 до 90% от суммы $C_{орг}$ и $C_{карб}$. В пахотной почве запасы $C_{карб}$ значительно преобладают над запасами $C_{орг}$ во всех слоях, включая верхний 0–50 см. Таким образом, мысль, высказанная Глазовской [8]

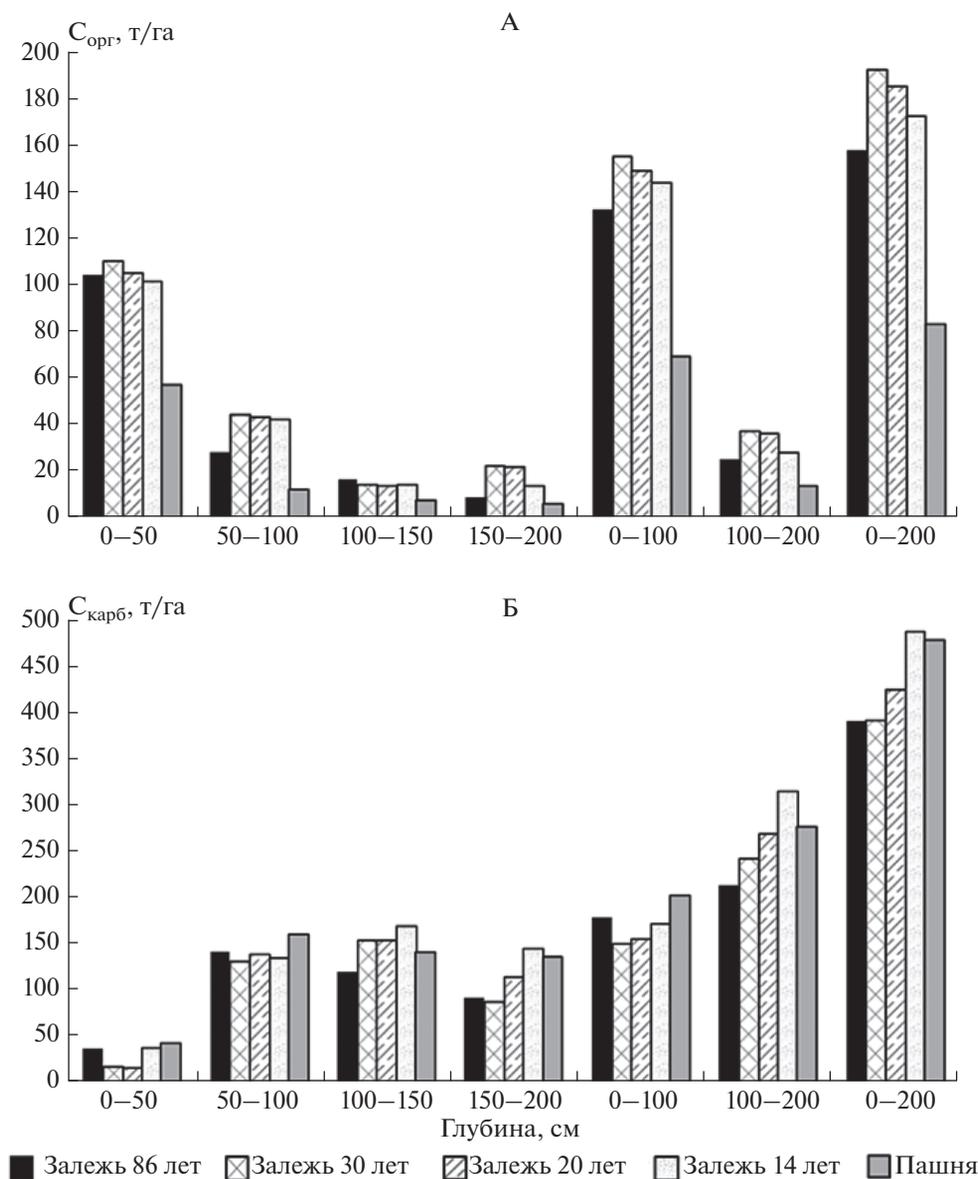


Рис. 5. Запасы C_{орг} (А) и C_{карб} (Б) в исследованных почвах.

о сопоставимости аккумуляции углерода карбонатов и гумуса в степных почвах, подтверждается даже с учетом того факта, что часть измеренных карбонатов – литогенные, унаследованные от почвообразующей породы, о чем свидетельствуют микроморфологические наблюдения. Полученные данные позволяют заключить, что перевод черноземов из пахотного в залежное состояние позволяет преодолеть перекокс в сторону резкого усиления именно аккумуляции карбонатного углерода в изучаемых почвах.

Можно сделать вывод, что прослеживается накопление органического углерода при нахождении пахотных черноземов в залежном состоянии. Низкое содержание и запасы C_{орг}, а также наи-

меньшая мощность гумусированной толщи в пахотном черноземе, скорее всего, связаны с выносом гумусированного материала с открытой поверхности пашни ветром и с урожаем, а также уплотнением пахотного чернозема за счет воздействия тяжелой техники. При переходе почвы в состояние залежи и ее зарастании ветровая эрозия и вынос органического вещества почвы с урожаем прекращаются, начинается процесс накопления органического материала. Углерод карбонатов, напротив, максимально накоплен в пахотной почве, распаиваемой около 150 лет. Второе место по накоплению карбонатов занимает почва 14-летней залежи, в которой процессы трансформации в связи со сменой землепользования находятся в началь-

Таблица 3. Радиоуглеродный возраст карбонатов в изученных почвах

Номер разреза	Тип землепользования	Глубина отбора образца, см	Лабораторный номер	¹⁴ C-возраст, лет
НдГ1-16	Залежь 86 лет	89–99	Ki-19282	7360 ± 150
		138–148	Ki-19283	10870 ± 260
НдГ2-16	Залежь 30 лет	91–105	Ki-19285	7180 ± 120
		129–141	Ki-19284	11940 ± 190
НдГ3-16	Залежь 20 лет	98–112	Ki-19286	8850 ± 150
		119–150	Ki-19287	9440 ± 180
НдГ4-16	Залежь 14 лет	97–124	Ki-19288	11700 ± 220
		139–165	Ki-19289	15200 ± 210
НдГ5пах-16	Пашня	165–190	Ki-19293	18100 ± 280
		45–55	Ki-19290	9010 ± 160
		107–117	Ki-19291	11700 ± 210
		180–190	Ki-19292	9540 ± 190

ной стадии. Как показано ранее, при распашке целинных черноземов происходит быстрое подтягивание карбонатов к поверхности, которое хорошо заметно в черноземах, распахиваемых 100–150 лет, а при увеличении длительности распашки начинается обратный процесс вымывания и опускания карбонатов [25]. На основании данных, приведенных в указанной работе, можно заключить, что при переходе черноземов из пахотного в залежное состояние карбонаты быстро (за время около 30 лет или немногим больше) мигрируют вниз по профилю и частично вымываются за его пределы.

По данным радиоуглеродного анализа, во всех профилях залежных почв радиоуглеродный возраст карбонатов больше в нижней части аккумулятивно-карбонатной толщи по сравнению с верхней. Наибольшие ¹⁴C-даты карбонатов получены для почвы залежи 14 лет. Предположительно, это связано с произрастающей здесь растительностью, которая имеет мощную корневую систему. Растительность потребляет воду из суспензии, содержащей карбонаты в виде коллоидов из нижних слоев почвы и материнских пород. Таким образом, эти карбонаты поднимаются ближе к дневной поверхности. Подтверждением этому предположению является возраст твердых карбонатных новообразований, встречающихся только в нижних горизонтах почв 14-летней залежи и пахоты: в залежной почве этот возраст в два раза превышает таковой в пахотной (табл. 3). Черноземы 86- и 30-летних бывших пахотных земель имеют одинаковые значения ¹⁴C-даты для карбонатов. По нашему мнению, это указывает на то, что карбонаты в “давних” залежах успели перестроиться и получили новое квазистабильное состояние по сравнению с пахотной почвой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе восстановительной сукцессии после выведения почвы из сельскохозяйственного оборота происходит накопление органического вещества, карбонаты, напротив, вымываются в нижележащие слои, за счет чего их содержание и запасы уменьшаются, реакция среды становится менее щелочной, происходит разуплотнение бывших пахотных и нижележащих горизонтов до глубины 50 см. Выявлено, что запасы карбонатного углерода как в пахотной почве, так и в почвах залежи превышают запасы углерода органических соединений, однако в залежных почвах эта разница уменьшается.

При смене землепользования в ряду пашня–многолетняя залежь происходит трансформация карбонатных новообразований по направлению от более стабильных форм к менее стабильным. Белоглазка теряет четкую форму, ее края становятся расплывчатыми, диффузными. В горизонтах АВса и ВСА почв самых давних залежей появляются слабые карбонатные выпоты. Предположительно это связано со стабилизацией водного режима в залежных черноземах за счет зарастания растениями поверхности почвы. Белоглазка с твердым ядром формируется в условиях дополнительного увлажнения в нижних горизонтах пахотной почвы. При забрасывании пашни твердые карбонатные новообразования постепенно растворяются и в итоге исчезают. Наиболее “древние” карбонаты выявлены в почве залежи 14 лет, где растения имеют мощную корневую систему, вытягивающую воду с карбонатами из материнских пород. После нахождения черноземов в залежи 30 лет и более педогенные карбонаты полностью перестраиваются и получают новое квазистабильное состояние. Значительное влияние на трансформацию карбонатного

состояния залежных почв оказывает поселяющаяся после забрасывания почв растительность.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевые исследования и радиоуглеродное датирование карбонатов выполнены при поддержке РФФИ, грант № 16-05-00669а, химические анализы, микроморфологический анализ и написание статьи – по теме государственного задания № 0191-2019-0046.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Белоглазка с диффузными границами в горизонте ВСAnc1 (85–100 см) в разрезе НдГ1-16 и четкими границами в горизонте ВСAnc2 (130–149 см) в разрезе НдГ3-16.

Рис. S2. Микростроение нижних карбонатных горизонтов, 180–190 см, в почве пашни и 14-летней залежи. Фото сняты с анализатором (XPL).

Рис. S3. Плотность сложения и полевая влажность по профилям изученных почв.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адерихин П.Г.* Почвы Воронежской области, их генезис, свойства и краткая агропроизводственная характеристика. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1963. 264 с.
2. Атлас Ростовской области. М., 1973.
3. *Безуглова О.С., Хырхырова М.М.* Почвы Ростовской области. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2008. 352 с.
4. *Бульшева А.М., Хохлова О.С., Русаков А.В., Мякишина Т.Н.* Изменение карбонатного состояния пахотных и залежных почв юга лесостепной зоны Среднерусской возвышенности (заповедный участок “Лес-на-Ворскле”) // Вестник Томск. гос. ун-та. Биология. 2018. № 41. С. 6–26. <https://doi.org/10.17223/19988591/41/1>
5. *Веденева Л.С., Казадаев А.А., Симонович Е.И., Креница А.М., Гончарова Л.Ю.* Вертикальное распределение численности микроартропод по генетическим горизонтам чернозема обыкновенного Нижнего Дона // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2007. № 3. С. 55–60.
6. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
7. *Герасимова М.И., Караваяева Н.А., Лебедева И.И.* Об агрогенных изменениях термических границ почвенных зон и подзон на восточно-европейской равнине // Генезис, география и картография почв. Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 2000. С. 107–118.
8. *Глазковская М.А.* Педолитогенез и континентальные циклы углерода. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. 336 с.
9. *Ерёмин Д.И.* Залежь как средство восстановления содержания и запасов гумуса старопашотных черноземов лесостепной зоны Зауралья // Плодородие. 2014. № 1(76). С. 24–26.
10. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 235 с.
11. *Козловский Ф.И., Чаплин В.А.* Агродеградация черноземов // Степи Русской равнины: состояние, рационализация аграрного освоения. М.: Наука, 1994. С. 174–191.
12. *Лебедева И.И., Овечкин С.В.* Карбонатные новообразования в черноземах Левобережной Украины // Почвоведение. 1975. № 11. С. 14–30.
13. *Лебедева И.И., Королёва И.Е., Гребенников А.М.* Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 16–26.
14. *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Кузяков Я.В.* Изменение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов // Агрохимия. 2009. № 5. С. 5–12.
15. *Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Ермолаева О.Ю., Черникова М.П., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Козунь Ю.С.* Биологические свойства разнотравных постагрогенных черноземов Ростовской области // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2(2). С. 452–456.
16. Память почв: Почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий / Отв. ред. Таргульян В.О., Горячкин С.В. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.
17. *Растворова О.Г.* Физика почв (практическое руководство). Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 196 с.
18. *Романовская А.А.* Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
19. *Русанов А.М., Тесля А.В., Саягфарова А.М.* Восстановление гумусного состояния степных черноземов под многолетней залежью // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2011. № 12(131). С. 132–134.
20. *Саблина О.А.* Гумусное состояние черноземов сельскохозяйственных угодий Южного Зауралья // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 11(53). Ч. 2. С. 138–140. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.53.228>
21. *Савин И.Ю., Чендев Ю.Г.* Изменение во времени содержания гумуса в пахотных лесостепных почвах // Почвоведение. 1994. № 5. С. 88–92.
22. *Хохлова О.С.* Карбонатное состояние степных почв как индикатор и память их пространственно-временной изменчивости. Дис. ... докт. геогр. наук. М., 2008. 329 с.
23. *Хохлова О.С., Кузнецова А.М., Хохлов А.А., Олейник С.А., Седов С.Н.* О происхождении белоглазки и журавчиков на примере мезокатены черноземных почв в Южном Приуралье // Почвоведение. 2004. № 7. С. 773–780.
24. *Хохлова О.С., Чендев Ю.Г., Мякишина Т.Н., Шишкова В.А.* Карбонатный пул педогенного углерода при разных типах и длительности использования пашни в Среднерусской лесостепи // Почвоведение.

- ние. 2013. № 5. С. 583–594.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X13050079>
25. Чендев Ю.Г., Хохлова О.С., Александровский А.Л. Агрогенная эволюция автоморфных черноземов лесостепи (Белгородская область) // Почвоведение. 2017. № 5. С. 515–531.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17050045>
 26. Шпедт А.А., Вергейчик П.В. Оценка скорости восстановления гумусного состояния почв Красноярского края в условиях залежи // Вестник АГАУ. 2014. № 6(116). С. 48–52.
 27. Щеглов Д.И. Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. М.: Наука, 1999. 211 с.
 28. Щербаков А.П., Абрикова В.В., Букреев Д.А. Агроэкологическое состояние черноземов ЦЧО. Курск, 1996. 327 с.
 29. Щербаков А.П., Васенев И.И. Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж: ВГУ, 2000. С. 32–67.
 30. Arevalo J.R., Fernandez-Lugo S., Reyes-Betancort J.A., Tejedor M., Jimenez C., Diaz F.J. Relationships between soil parameters and vegetation in abandoned terrace fields vs. nonterraced fields in arid lands (Lanzarote, Spain): An opportunity for restoration // Acta Oecologica. 2017. V. 85. P. 77–84.
<https://doi.org/10.1016/j.actao.2017.09.014>
 31. Bruun T.B., Elberling B., de Neergaard A., Magid J. Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture // Land Degradation Development. 2015. V. 26(3). P. 272–283.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2205>
 32. 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. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
 33. Kalinina O., Krause S.E., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Selfrestoration of post-agrogenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2011. V. 162. № 1. P. 196–206.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.005>
 34. Khokhlova O.S., Chendev Yu.G., Myakshina T.N., Alexandrovskiy A.L., Khokhlov A.A. Evolution of Chernozems in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland under long-term cultivation examined in the agrochronosequences // Quarter. Int. 2015. V. 365. P. 175–189.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.10.012>
 35. Khokhlova O.S., Chendev Yu.G., Myakshina T.N. Change in pedogenic carbon stocks under different types and duration of agricultural management practices in the central Russian forest steppe // Sustainable Agroecosystems in Climate Change Mitigation / Ed. Oelbermann M. Wageningen Academic Publishers, 2014. P. 33–52.
https://doi.org/10.3920/978-90-8686-788-2_2
 36. Kuznetsova A.M., Khokhlova O.S., Chendev Yu.G., Aleksandrovskii A.L. Evolution of the carbonate state of agrogenically transformed dark gray forest soils in the central forest-steppe // Eurasian Soil Science. 2010. V. 43. № 13. P. 1527–1534.
<https://doi.org/10.1134/S1064229310130119>
 37. Stoops G. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith thin Sections. Madison: Soil Science Society of America, 2003.

Changes in the Carbonate State of Chernozems of Azov Region upon Their Conversion from Arable Land to Fallow

A. M. Bulysheva^{1,*}, O. S. Khokhlova², N. O. Bakunovich², A. V. Rusakov¹,
T. N. Myakshina², and A. G. Ryumin¹

¹*Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg, 199178 Russia*

²*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

*e-mail: annie.bulysheva@gmail.com

The properties of chernozems (Rostov region) located on abandoned lands of different ages in comparison with their arable analogues have been studied. The main attention is paid to the carbonate status of the studied chernozems. Data on the morphology of soil profiles obtained during the field survey, meso- and micromorphological descriptions, and the physicochemical properties of the soils were analyzed. Radiocarbon dating of carbonates in the carbonate-accumulative and transitional to the parent material horizons has been performed. Decompaction of the former plow and lower horizons to a depth of 50 cm is clearly manifested in the abandoned soils. Accumulation of organic carbon, partial leaching of carbonates, and a decrease in pH take place in them. The hard carbonate pedofeatures in the lower part of the profile are subjected to dissolution and gradually disappear. At the same time, migrational forms of carbonates appear in the upper part of the profile. In chernozems abandoned from cultivation for 30 years and more, their carbonates acquire a new quasi-stable state differing from that in the arable soil. The vegetation that settles on abandoned land has a significant effect on the transformation of the soil carbonate status.

Keywords: abandoned land, arable land, pedogenic carbonates, radiocarbon dating, Chernozem