

УДК 631.425

## ДИНАМИКА РЕАКЦИИ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ, СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ И ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА АГРОТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОДБЕЛОВ В ХОДЕ ПОСТАГРОГЕННОГО РАЗВИТИЯ

© 2022 г. М. Л. Бурдуковский<sup>а</sup>, \*, Я. О. Тимофеева<sup>а</sup>, В. И. Голов<sup>а</sup>,  
И. В. Киселева<sup>а</sup>, Р. В. Тимошинов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Федеральный научный центр Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,  
пр-т 100 лет Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

<sup>б</sup>Федеральный научный центр агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки,  
ул. Воложенина, 30, п. Тимирязевский, Уссурийск, 692539 Россия

\*e-mail: mburdukovskii@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2022 г.

После доработки 10.06.2022 г.

Принята к публикации 29.06.2022 г.

Представлены результаты изучения агротемногумусовых подбелов (Luvic Albic Mollic Planosols (Epi-loamic, Endoclaeic, Aric)) в течение их постагрогенного развития в Приморском крае. Исследованы изменения структурно-агрегатных характеристик почвы, реакции почвенной среды, содержания и запасов углерода. Установлено, что после вывода почвы из сельскохозяйственного оборота ее структурно-агрегатные характеристики восстанавливаются. В бывшем пахотном горизонте залежей наблюдается увеличение доли агрономически ценных агрегатов, их средневзвешенный диаметр уменьшается. По мере постагрогенного восстановления растительности происходит подкисление почв. В 20-летней залежи, при появлении древесных пород, наблюдалось некоторое увеличение уровня кислотности. Содержание углерода и его запасов в почвах имеет устойчивую тенденцию к увеличению в течение всего исследованного периода постагрогенеза. Запасы углерода в слое (0–25 см) увеличиваются после прекращения распашки, достигая максимального значения к 85 годам. Запасы углерода в толще 0–50 см залежей 20- и 85-летнего возраста статистически значимо не различались. Плотность пахотного слоя на пашне составляла 0.88 г/см<sup>3</sup>. В залежных вариантах плотность верхнего горизонта почвы варьировала в пределах 0.67–0.79 г/см<sup>3</sup>.

*Ключевые слова:* залежи, постагрогенные почвы, структура почвы, Mollic Planosols

**DOI:** 10.31857/S0032180X22600664

### ВВЕДЕНИЕ

Выведение из оборота части земель под залежь – естественный процесс развития сельскохозяйственной отрасли. На территории стран с развитым сельским хозяйством есть земли, использование которых становится неэффективным при постоянно меняющемся ценообразовании и по другим экономическим причинам. В глобальном масштабе с 1700 до 1990 гг. примерно  $1.5 \times 10^6$  км<sup>2</sup> пахотных земель было заброшено [41]. Наибольшее сокращение посевных площадей отмечено в экономически развитых странах и имеющих в территориальном составе горные районы, в том числе в Восточной Европе [24, 27], Юго-Восточной Азии [35] и на территории бывшего СССР [13, 19, 32, 34].

Экономический кризис, начавшийся в начале 90-х годов прошлого века в России, способство-

вал резкому сокращению площади пахотных почв в стране. Согласно сельскохозяйственной переписи 2016 г. (последней на данный момент), общая площадь неиспользуемых угодий в России составляет 97.2 млн га, что соответствует 44% от общей площади пахотного фонда [7].

При зарастании заброшенных сельскохозяйственных угодий, особенно после долгого использования, в значительной степени изменяются основные физические, химические и биологические свойства верхних горизонтов почвы [18, 19, 27, 28]. Большой интерес у исследователей вызывает изменение содержания органического вещества в почве в процессе постагрогенеза. Этому посвящено большое количество работ в отечественной и иностранной литературе [1, 16, 17, 19, 28, 30, 32–34, 36, 39, 40, 44, 46]. По мнению многих исследователей при увеличении срока отсутствия сельскохозяйственной нагрузки, содержа-

**Таблица 1.** Характеристика объектов исследований

Угодье, возраст	Почва	Тип доминирующей синузии	Географические координаты	
			широта N	долгота E
Пашня, 0 лет	Агротемногумусовый подбел глеевый	Посевы сои	43°51'33.4"	131°56'41.4"
Залежь, 2 года	Агротемногумусовый подбел реградированный	Злаковая	43°51'23.4"	131°56'33.3"
Залежь, 5 лет	Агротемногумусовый подбел реградированный	Злаковая	43°51'26.3"	131°56'29.2"
Залежь, 20 лет	Агротемногумусовый подбел реградированный глееватый	Злаково-разнотравная	43°51'36.5"	131°56'15.5"
Залежь, 85 лет	Темногумусовый подбел постагрогенный	Злаково-разнотравно-попынная	43°51'32.6"	131°56'38.2"

ние углерода в почве увеличивается, степень гумусированности пахотных горизонтов повышается. Установлены определенные закономерности между возрастом залежей и скоростью накопления углерода в почве [19, 32, 34, 40]. Скорость накопления широко варьирует, составляя в среднем 10–30 г С/м<sup>2</sup> в год [36, 39, 40]. Скорость накопления углерода в залежных почвах России, спустя 20 лет после снятия антропогенной нагрузки, составляет 105 г С/м<sup>2</sup> в год [33].

Несмотря на большое количество работ, посвященных данной проблеме, нет однозначного мнения о направлении и характере динамики содержания и запасов углерода в постагрогенных почвах. В некоторых работах показано, что содержание углерода в залежах может меняться незначительно [30] или даже уменьшаться [13, 46]. На скорость изменения запасов углерода может влиять множество факторов, таких как биоклиматические условия, тип и свойства почвы, а также характер сельскохозяйственного использования в прошлом.

От содержания в почве органического вещества зависит устойчивость структурных элементов почвы. Число, размер и стабильность почвенных агрегатов во многом определяют характер изменения почвенных свойств [1, 17, 38, 47]. В почвах, в которых преобладают макроагрегаты, содержится больше органических и питательных веществ, они менее подвержены эрозии, в них создаются оптимальные условия для произрастания растений [43–45].

Длительное использование почв в сельскохозяйственной практике сопровождается нарушением структурно-агрегатного состояния верхней толщ почвенного профиля [25, 42]. Макроагрегаты обладают слабой устойчивостью и при систематических сельскохозяйственных нагрузках могут разрушаться, как по причине механического воздействия тяжелой техники, так и за счет

уменьшения поступления свежего органического вещества [1, 17]. При выводе пахотных почв из оборота агрегатный состав почв претерпевает серьезные изменения, что обусловлено восстановлением естественного биоценоза на залежах и воздействием факторов, унаследованных от пашни.

В течение последних нескольких лет сельскохозяйственная отрасль России демонстрирует высокие темпы роста. Актуальными становятся вопросы восстановления почвенных свойств залежей, а также оценка их рационального использования, особенно на разных стадиях сукцессий. В первую очередь это объясняется тем, что экономические затраты на возвращение в оборот заброшенных земель сильно различаются в зависимости от возраста залежи.

Цель работы – определить постагрогенное изменение структурно-агрегатного состояния и реакции среды агротемногумусовых подбелов, а также оценить характер изменения запасов углерода в ходе естественного восстановления.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работа проведена в Уссурийском городском округе, пос. Тимирязевский Приморского края в июле–августе 2021 гг. Исследуемые почвы классифицируются как агротемногумусовые подбелы по WRB-2015 Luvisc Albic Mollic Planosols (Epi-loamic, Endoclayic, Aric) [48]. Объектами служили почвы залежных участков 2-, 5-, 20- и 85-летнего возраста, расположенные на территории стационара ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, а также пахотные почвы полевого опыта (табл. 1). Залежи представляют собой поля, которые в прошлом использовались под полевые севообороты. Залежь возрастом 85 лет обкашивается раз в год в конце вегетационного сезона (сентябрь–октябрь).

Темногумусовые подбелы (PU–ELnn–BTnn–BT–C) формируются на озерно-аллювиальных

отложениях. Для них характерна высокая степень гумусированности, средне-, тяжелоглинистый гранулометрический состав (содержание глинистых частиц в верхнем горизонте достигает 80–85%). Высокая плотность верхних горизонтов способствует низкой водопроницаемости. Данные почвы широко представлены в пределах Западно-Приморской и Среднеамурской равнин [2, 4, 6]. Темногумусовые подбелы составляют основу пахотного фонда Приморского края (34.5% доли ценной пашни региона) [9].

Темногумусовые подбелы формируются под разнотравно-злаковой растительностью. Растительные сообщества исследуемых молодых залежей (2 и 5 лет) характеризуются низким видовым разнообразием. Хорошо развит травяной ярус, средняя высота которого не превышает 1 м, с явным преобладанием *Phleum pratense*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Elytrigia repens*. В 20-летних залежах растительное сообщество злаково-разнотравное, единично встречается подрост *Salix* sp. В травостое, высота которого составляет 50–70 см, доминируют *Phleum pratense*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Galium verum*, *Vicia amurensis*, *Artemisia rubripes*. На периодически косимой 85-летней залежи основу растительного сообщества составляют *Elytrigia repens*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Phleum pratense*, встречается *Artemisia rubripes*.

Стационарный опыт с систематическим, длительным использованием различных видов удобрений ведется с 1941 г. Смешанные образцы почвы отбирали по горизонтам по всему профилю разреза и трех прикопок с варианта, где в течение длительного периода используются органические удобрения: с 1941 до 2003 гг. вносили навоз (240 т/га в год), с 2004 по настоящее время происходит запахивание органической массы (бобово-злаковые травы). Учетная площадь опытной делянки составляет 150 м<sup>2</sup>. Отбор проб почвы с залежных участков осуществляли из прикопок (по 3 на каждом поле) с глубины 0–25, 25–50 см. Образцы почвы сушили на открытом воздухе. Верхняя часть (0–4 см) горизонта PU 85-летней залежи характеризовалась плотной дерниной. Для исключения искажения результатов по содержанию исследуемых показателей горизонт отделяли и не использовали в аналитической работе.

Структурно-агрегатный состав почвенной массы горизонтов определяли методом сухого рассева с помощью грохота Retsch AS 200 basic (Германия). Навеску воздушно-сухой почвы (300 г) пропускали через набор сит с отверстиями диаметром 10, 5, 2, 1, 0.5 и 0.25 мм. Время встряхивания 2 мин, амплитуда вибрации 2.5 мм [20]. В ходе анализа рассчитывали коэффициент структурности ( $K_s$ ), долю агрономически ценных агрегатов размером 0.25–10 мм (АЦА), средневзвешенный диаметр агрегатов [23, 29].

Содержание общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) определяли методом хроматографии с помощью элементного анализатора Flash 2000 (Thermo, Великобритания), кислотность почв (рН солевой вытяжки) на рН-метре Mettler Toledo S220-Kit (Швейцария).

Математическую обработку данных проводили по общепринятым методикам, используя программу Statistica v.13. Для сравнения данных независимых выборок между собой применяли критерий Манна–Уитни (критерий U).

Исследование образцов проводили в специализированной лаборатории, а также с использованием технической базы Центра коллективного пользования Биотехнологии и генетической инженерии (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследуемых залежах наименее кислая реакция среды в верхней части профиля отмечена в почве 2-летней залежи (табл. 2). Вероятно, повлияло длительное внесение органических удобрений (перед выводом поля из оборота), а также увеличившееся поступление зольных элементов с резко сменившейся растительностью, что способствует нейтрализации органических кислот [18]. В 5-летних залежах величина рН составляла 5.2, а через 20 лет после прекращения использования, с появлением древесных пород – 4.5. В ходе постагрогенных сукцессий подкисление почвы является естественным процессом, на что указывают многие авторы [12, 13, 16, 18, 28, 31]. Увеличение кислотности во многом связывают с изменением состава опада и формированием подстилочного горизонта, особенно на этапе лесовосстановления.

Использование повышенных доз органических удобрений способствует замедлению скорости увеличения кислотности пахотных почв [18]. В исследуемом варианте опыта с внесением органических удобрений рН среды верхнего горизонта составил 5.08. При изучении свойств почвы в 2009–2013 гг. на данном стационаре показатель рН пахотного горизонта в этих удобряемых вариантах равнялся 5.3 [2].

Спустя 85 лет после прекращения использования почв уменьшения кислотности не наблюдалось, рН среды составляет 5.08. Вероятно, это связано с меньшим количеством кислых продуктов разложения органических остатков по сравнению с некосимыми аналогами, где они поступают в большем объеме [16, 22].

Структурное состояние исследуемых почв приведено на рис. 1. В верхней толще почвенного профиля как залежных, так и пахотных почв, структура “отличная”. В верхнем горизонте почвы 5-летней залежи отмечено наибольшее значение  $K_s$  (8.11). В пахотном горизонте почвы на пашне  $K_s$  составил 4.38. Это единственный из ис-

**Таблица 2.** Динамика реакции почвенной среды и содержание углерода в распахиваемом и в залежных темногумусовых подбелах

Возраст залежи	Слой, см	pH <sub>KCl</sub>	C <sub>общ</sub> , %
0 лет (пашня)	0–27	5.08 ± 0.10	1.37 ± 0.04
	27–42	5.05 ± 0.08	1.46 ± 0.05
2 года	0–25	6.05 ± 0.15	1.74 ± 0.07
	25–50	5.19 ± 0.11	1.52 ± 0.05
5 лет	0–25	5.23 ± 0.10	1.89 ± 0.05
	25–50	4.57 ± 0.9	1.13 ± 0.04
20 лет	0–25	4.51 ± 0.7	2.21 ± 0.09
	25–50	4.46 ± 0.9	1.64 ± 0.06
85 лет	4–11	5.08 ± 0.8	4.31 ± 0.12
	11–35	5.1 ± 0.07	1.68 ± 0.08
	35–55	4.72 ± 0.07	0.63 ± 0.02

следуемых вариантов, где в подпахотном слое  $K_s$  больше, чем в вышележащем горизонте. Пахотный и подпахотный горизонты на пашне не имеют резких различий в отношении глыбистой фракции, что может быть связано с глубокой вспашкой с оборотом пласта и переуплотнением в результате нагрузки от прохождения сельскохозяйственной техники [10, 37]. Средневзвешенный диаметр агрегатов также различался незначительно (4.0–4.2 мм). Содержание АЦА в подпахотном горизонте увеличивается по сравнению с пахотным одновременно со снижением содержания фракции пыли в структурном составе. Следует отметить, что  $K_s$  и количество АЦА в пахотном горизонте почвы современной пашни оказались меньше, чем в залежных аналогах.

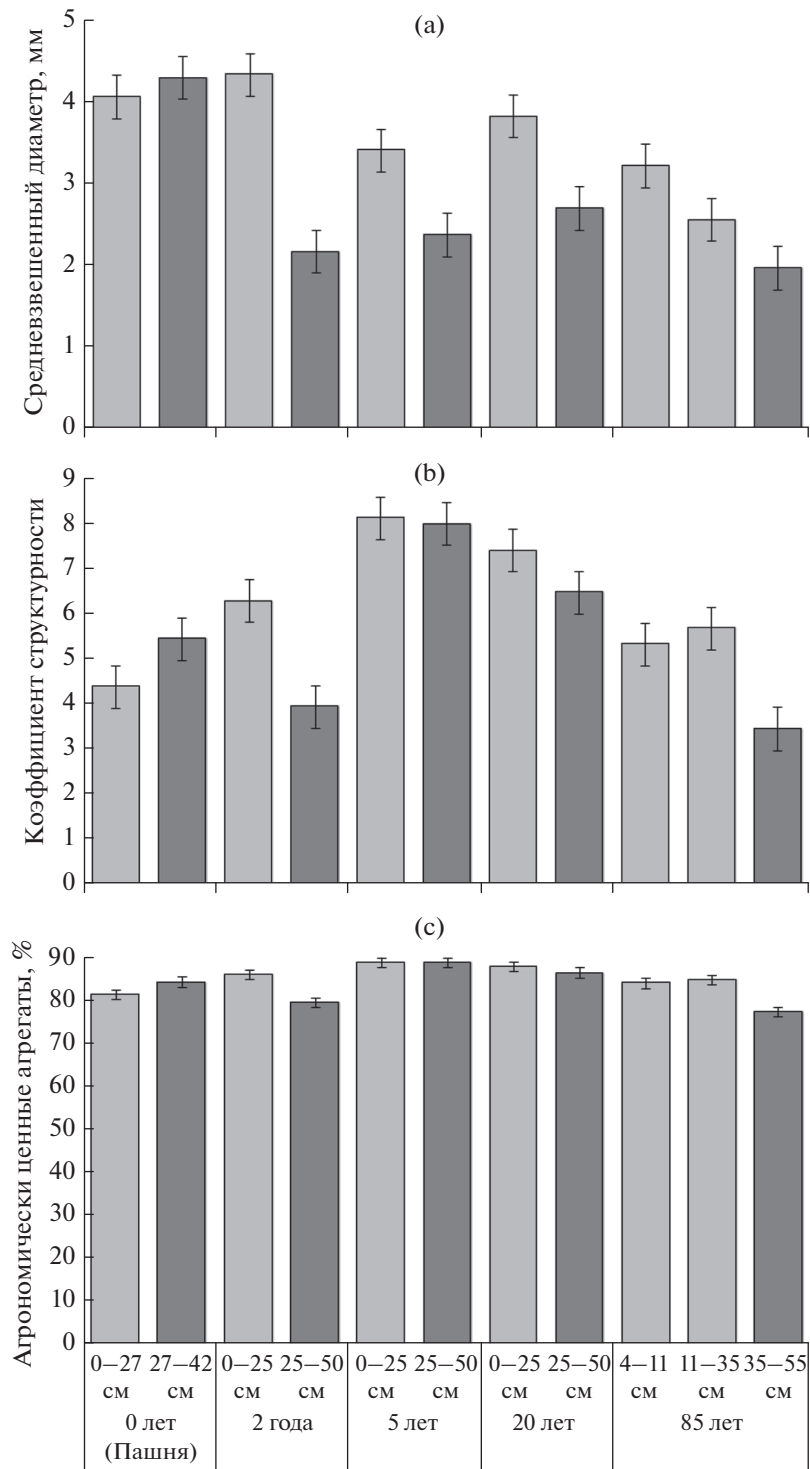
В верхнем горизонте 2-летней залежи преобладают фракции агрегатов диаметром  $>5$  мм (рис. 2). За счет этого средневзвешенный диаметр агрегатов в поверхностном горизонте больше, чем в других залежных вариантах. Возможно, это связано с тем, что на участке перед выводом из оборота была проведена глубокая вспашка. В подпахотном горизонте наблюдается уменьшение количества агрегатов диаметром  $>5$  мм с одновременным увеличением содержания фракции тонкого песка и пыли ( $<0.25$  мм). Данный факт объясняется тем, что основная корневая система травянистых растений, представленных на молодой залежи, сосредоточена в верхнем слое. Горизонт был более рыхлый и водопроницаемый, мелкие фракции из гумусового слоя вымылись в подгумусовый [3, 5]. Коэффициент структурности в бывшем пахотном горизонте по сравнению с нижележащим слоем больше в 2 раза.

Заращение пашни в течение пяти лет способствовало значительному улучшению структуры верхних горизонтов почвы. Коэффициент структурности слоя 0–25 см увеличился до 8.1, количество АЦА до 89%. В подпахотном горизонте значе-

ния данных показателей были несколько меньше. Улучшение структуры произошло из-за уменьшения в агрегатном составе глыбистой фракции и увеличения за счет этого фракций 2–5 мм, особенно в подпахотном горизонте.

Бывший пахотный горизонт 20-летней залежи характеризовался отличным структурным состоянием,  $K_s$  равнялся 7.4, что превышало данный показатель пахотного аналога на 60%. В отличие от более молодых участков, в агрегатном составе наблюдается небольшое увеличение содержания глыбистой фракции, а также агрегатов диаметром 5–10 мм. Визуально это крупные плотные комочки, скрепленные корнями травянистой растительности. При этом отмечено уплотнение сложения горизонтов ввиду более компактной упаковки выровненных по размеру структурных отделностей. Вероятно, антропогенно-преобразованные горизонты стали претерпевать изменения, ведущие к дифференциации и формированию исходного органогенного горизонта [19]. Ранее отмечено [3, 26], что в залежных почвах района исследований процессы восстановления разрушенной в результате механических обработок почвенной структуры начинаются спустя 15–20 лет.

Верхняя толща 85-летней залежи имела меньший  $K_s$  по сравнению с более молодыми постагрогенными участками, что, вероятно, вызвано расслоением пахотного горизонта и образованием дернового слоя на поверхности (слой 0–4 см представлял собой плотную дернину). Наибольшие значения  $K_s$  в горизонте 11–35 см, здесь отмечается и наибольшее количество АЦА, что связано, в первую очередь, с уменьшением в агрегатном составе глыбистой фракции. В агрегатном составе количество глыбистой фракции уменьшается с глубиной (в горизонте 35–55 см агрегаты диаметром  $>10$  мм отсутствуют) с одновременным увеличением фракции  $<0.25$  мм.



**Рис. 1.** Структурно-агрегатные характеристики распаиваемого и залежных агрогумусовых подбелов различного возраста: а – средневзвешенный диаметр агрегатов, б – коэффициент структурности, с – агрономически ценные агрегаты.

В целом исследуемые залежные почвы отличаются улучшенным структурным состоянием по сравнению с почвой современной пашни. Данные согласуются с выводами других исследователей, указывающих на улучшение структурно-аг-

регатного состояния почв после прекращения антропогенной нагрузки [3, 26, 32, 43, 44].

Основное отличие залежных почв от пахотных аналогов состоит в преобразовании гумусово-аккумулятивной части профиля. Антропогенно-

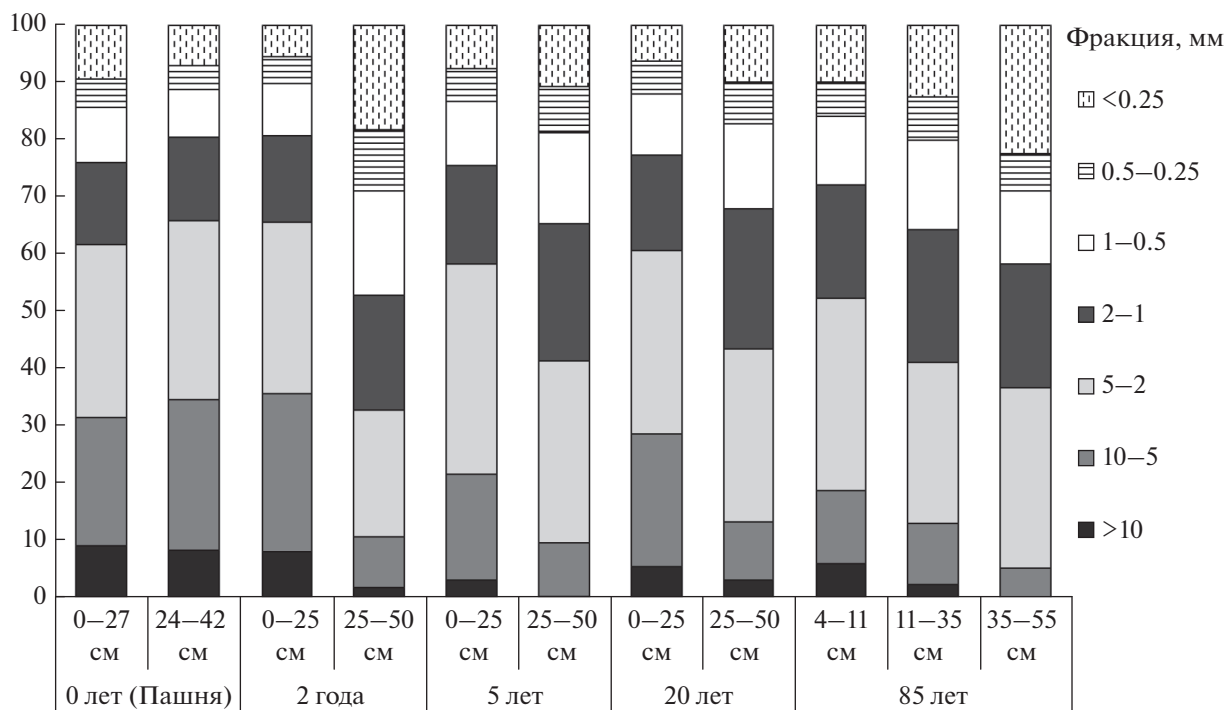


Рис. 2. Распределение фракций агрегатов в распашиваемом и залежных агро Chernozem подбелах различного возраста.

преобразованные горизонты претерпевают изменения, ведущие к дифференциации и формированию исходного органического горизонта [8, 16, 18, 19, 27, 28]. В исследуемых вариантах явная дифференциация бывшего пахотного горизонта отмечена в 85-летней залежи, верхняя часть которого представляла собой плотную дернину, густо пронизанную корнями травянистых растений.

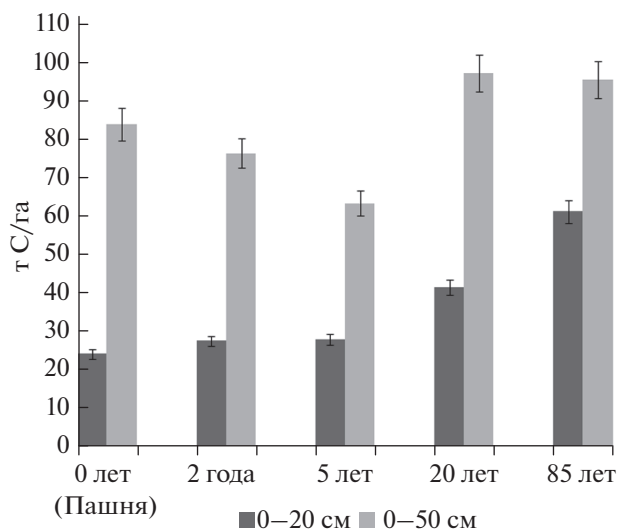


Рис. 3. Запасы углерода в распашиваемом и залежных агро Chernozem подбелах различного возраста.

Исследование показало, что в целом чернозёмные подбелы отличаются невысоким содержанием  $C_{\text{общ}}$ , что характерно для почв региона [14, 21]. Содержание  $C_{\text{общ}}$  в горизонте 4–11 см самой зрелой из исследуемых залежей составляло 4.31%. В более молодых залежах содержание  $C_{\text{общ}}$  в верхнем горизонте было значительно меньше. Стоит отметить, что 85-летняя залежь подвергалась периодическому кошению, соответственно основной источник органического вещества с поля убирался. По некоторым данным [11], периодическое отчуждение травостоя при длительной постагрогенной сукцессии способствует увеличению накопления  $C_{\text{общ}}$  по сравнению с некосимыми вариантами. В целом в исследуемом хронояру наблюдалась положительная динамика изменения содержания  $C_{\text{общ}}$  с увеличением возраста постагрогенного периода, что согласуется с результатами работ других исследователей [15, 18, 32, 34, 36, 40].

Почва пашни характеризовалась наименьшим содержанием  $C_{\text{общ}}$  в верхнем горизонте почвы. При этом в подпахотном горизонте наблюдается накопление  $C_{\text{общ}}$ , что вероятно связано с длительным применением органических удобрений животного происхождения [18, 32] одновременно с перемешиванием почвенной массы горизонтов между собой при распашке [14]. В почвах всех исследуемых залежей содержание  $C_{\text{общ}}$  с глубиной уменьшается.

По мере развития сукцессионных процессов усиливается миграция углерода и происходит его перераспределение в почвенном профиле. Запасы углерода в верхнем горизонте (0–25 см) увеличиваются после прекращения распашки, достигая максимального значения к 85 годам (рис. 3). После вывода полей из оборота в толще 0–50 см запасы снижаются, что вероятно связано с резким уменьшением поступления органического вещества в виде удобрений. Позитивная динамика запасов углерода начинается через 5 лет после вывода земель из оборота, и к 20-летнему сроку прекращения распашки его запасы существенно увеличиваются. Стоит отметить, что почвы залежей 20- и 85-летнего возраста по запасам углерода в толще 0–50 см статистически значимо не различаются.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционные методы ведения сельскохозяйственной деятельности ведут к ухудшению структурно-агрегатного состояния почвы. Количество глыбистой фракции (>10 мм) на пашне больше по сравнению с залежными аналогами. Коэффициент структурности и количество агрономически ценных агрегатов в подпахотном горизонте больше, чем в пахотном, что, вероятно, связано с систематическим механическим воздействием на почву. Изъятие темногумусовых подбелов из сельскохозяйственного использования способствовало улучшению структурно-агрегатных характеристик почвы. Коэффициент структурности в 20-летней залежи, равный 7.4, превышал показатель ее пахотного аналога на 60%.

По мере постагрогенного восстановления растительности происходит подкисление почв, что связано с изменением состава опада и формированием дернового слоя. В 20-летней залежи при появлении древесных пород наблюдалось некоторое увеличение уровня рН. В верхнем горизонте почвы 85-летней периодически косимой залежи и в пахотном горизонте современной пашни рН среды составлял 5.08.

Содержание углерода устойчиво увеличивается в течение всего исследованного периода постагрогенеза. Накопление углерода происходит за счет многократного увеличения запасов фитомассы, отсутствия отчуждения растительного материала, формирования горизонта подстилки. В первые годы после вывода полей из оборота запасы углерода в толще 0–50 см снижаются. В 20-летних залежах запасы углерода в верхней 50-сантиметровой толще профиля составляли 97.4 т С/га, что на 65% больше, чем в 2-летней залежи.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121031000134-6).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьева З.С.* Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС, 2010. 240 с.
2. *Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Ковшик И.Г.* Изменение агрохимических свойств основных пахотных почв юга Дальнего Востока при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1244–1250. <https://doi.org/10.1134/S1064229316100057>
3. *Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Перепелкина П.А., Киселева И.В., Тимофеева Я.О.* Агрогенные и постагрогенные изменения запасов углерода и физических свойств подбелов темногумусовых // Почвоведение. 2021. № 6. С. 747–756. <https://doi.org/10.1134/S1064229321060041>
4. *Голов В.И.* Круговорот серы и микроэлементов в основных агроэкосистемах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2004. 316 с.
5. *Зайдельман Ф.Р.* Подзоло- и глееобразование. М.: Наука, 1974. 204 с.
6. *Иванов Г.И.* Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
7. *Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года: в 8 т.* М.: Статистика России, 2018. 459 с.
8. *Кечайкина И.О., Рюмин А.Г., Чуков С.Н.* Постагрогенная трансформация органического вещества дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1178–1192. <https://doi.org/10.1134/S1064229311100061>
9. *Костенков Н.М., Оздобихин В.И.* Почвы и почвенные ресурсы юга Дальнего Востока и их оценка // Почвоведение. 2006. № 5. С. 517–526. <https://doi.org/10.1134/S1064229306050012>
10. *Кузнецова И.В., Тихонравова П.И., Бондарев А.Г.* Изменение свойств залежных серых лесных почв // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1142–1150. <https://doi.org/10.1134/S1064229309090142>
11. *Ларионова А.А., Ермолаев А.М., Никитишин В.И., Лопес де Гереню В.О., Евдокимов И.В.* Баланс углерода в пахотных серых лесных почвах при разных способах сельскохозяйственного использования // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1464–1474. <https://doi.org/10.1134/S1064229309120060>
12. *Литвинович А.В., Пыльова И.А.* Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой суглинистой почвы в процессе постагрогенной эволюции // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования. СПб., 2009. С. 160–164.

13. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Т.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
14. *Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Шапова Л.Н.* Оценка гумусного состояния и продуцирования CO<sub>2</sub> почвами природных и агрогенных ландшафтов юга Дальнего Востока России // Почвоведение. 2017. № 1. С. 48–55.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229317010124>
15. *Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А.* Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1435.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229314090117>
16. *Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А.* Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229320020106>
17. *Тейт Р.Л.* Органическое вещество почвы: биологические и экологические аспекты. М.: Наука, 1991. 400 с.
18. *Телеснина В.М., Жуков М.А.* Влияние способа сельскохозяйственного освоения на динамику биологического круговорота и ряда почвенных свойств в ходе постагрогенной сукцессии (Костромская область) // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1114–1129.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229319070135>
19. *Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мишин Д.М.* Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229317120109>
20. *Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Голуб А.П., Юдина А.В.* Оптимизация анализа агрегатного состава почв методом автоматического расцева // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. № 96. С. 149–177.  
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-149-177>
21. *Хавкина Н.В.* Гумусообразование и трансформация органического вещества в условиях переменного-глеевого почвообразования. Уссурийск: Изд-во ПГСХА, 2004. 272 с.
22. *Чеве́рдин Ю.И., Пороти́ков И.Ф.* Влияние антропогенных факторов на реакцию почвенной среды черноземов // Агрохимия. 2015. № 8. С. 15–22.
23. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
24. *Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Radeloff V.C.* Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data // Remote Sensing Environ. 2012. V. 124. P. 334–347.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.019>
25. *Beare M.H., Cabrera M.L., Hendrix P.F., Coleman D.C.* Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1994. V. 58. P. 787–795.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030021x>
26. *Burdukovskii M., Kiseleva I., Perepelkina P., Kosheleva Y.* Impact of different fallow durations on soil aggregate structure and humus status parameters // Soil and Water Res. 2020. V. 15. P. 1–8.  
<https://doi.org/10.17221/174/2018-SWR>
27. *Cramer V.A., Hobbs R.J., Standish R.J.* What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly // Trends Ecol. Evol. 2008. V. 23. P. 104–112.  
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.005>
28. *Falkengren-Grerup U., ten Brink D.-J., Brunet J.* Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40–80 years of forest growth on agricultural soils // Forest Ecol. Manag. 2005. V. 225. P. 74–81.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.027>
29. *Hillel D.* Introduction to Environmental Soil Physics. Amsterdam: Acad. Press, 2003. 494 p.
30. *Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L.* Self restoration of postagrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2013. V. 207–208. P. 221–233.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>
31. *Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L.* Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics // Geoderma. 2009. V. 152. P. 35–42.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014>
32. *Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Luise Giani.* Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // Catena. 2015. V. 129. P. 18–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.016>
33. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y.* Carbon cost of collective farming collapse in Russia // Global Change Biol. 2014. V. 20. P. 938–947.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
34. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V. O.* Assessment and prediction of changes in the reserves of organic carbon in abandoned soils of European Russia in 1990–2020 // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. P. 1371–1377.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229308130048>
35. *Li S., Li X.* Global understanding of farmland abandonment: A review and prospects // J. Geograph. Sci. 2017. V. 27. P. 1123–1150.  
<https://doi.org/10.1007/s11442-017-1426-0>
36. *Liao J.D., Boutton T.W., Jastrow J.D.* Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland // Soil Biol. Biochem. 2006. V. 38. P. 3184–3196.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.003>
37. *Lipiec Y., Hatano R.* Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth // Geoderma. 2003. V. 116. P. 107–136.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1)
38. *Nichols K.A., Toro M.* A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation // Soil Till. Res. 2011. V. 111. P. 99–104.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.014>
39. *Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., van Wese-mael B., Schumacher J., Gensior A.* Temporal dynam-



- ics of soil organic carbon after land use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach // *Global Change Biol.* 2011. V. 17. P. 2415–2427.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>
40. *Post W.M., Kwon K.C.* Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential // *Global Change Biol.* 2000. V. 6. P. 317–327.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>
41. *Ramankutty N., Foley J.A.* Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992 // *Global Biogeochem. Cycles.* 1999. V. 13. P. 997–1027.  
<https://doi.org/10.1029/1999GB900046>
42. *Simansky V., Pollakova N., Jonczak J., Jankowski M.* Which soil tillage is better in terms of the soil organic matter and soil structure changes? // *J. Centr. Eur. Agr.* 2016. V. 17. P. 391–401.  
<https://doi.org/10.5513/JCEA01/17.2.1720>
43. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil Till. Res.* 2004. V. 79. P. 7–31.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
44. *Tisdall J.M., Oades J.M.* Organic matter and water-stable aggregates in soils // *Eur. J. Soil Sci.* 1982. V. 33. P. 141–163.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
45. *Tormena C.A., Karlen D.L., Logsdon S., Cherubin M.R.* Visual Soil Structure Effects of Tillage and Corn Stover Harvest in Iowa // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2016. V. 80. P. 720–726.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2015.12.0425>
46. *Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P.* Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land // *Forest Ecol. Manag.* 2002. V. 169. P. 137–147.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00304-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00304-3)
47. *Wang L., Li X.G., Lv J., Fu T., Ma Q., Song W., Wang Y.P., Li F.M.* Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China // *Soil Till. Res.* 2017. V. 167. P. 46–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.004>
48. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015.

## Dynamics of Soil Acidity, Structural-Aggregate State and Carbon Stocks in Agro-Dark-Humus Podbels in the Course of Postagrogenic Development

M. L. Burdukovskii<sup>1, \*</sup>, Ya. O. Timofeeva<sup>1</sup>, V. I. Golov<sup>1</sup>, I. V. Kiseleva<sup>1</sup>, and R. V. Timoshinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690022 Russia*

<sup>2</sup>*Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk, 692539 Russia*

\*e-mail: mburdukovskii@gmail.com

Changes in the structural-aggregate state, soil acidity and carbon stocks of dark-humus podbels (Luvic Albic Mollic Planosols (Epiloamic, Endoclayic, Aric)) during their postagrogenic evolution have been studied. Studied were fallow soils in the territory of A.K. Chaika Experimental Field Station of the Federal Research Center for Agrobiotechnology of the Far East (Timiryazevskii settlement). It was established that the removal of soil from agricultural use is restored by its natural structure. It was established that the content of agronomically valuable aggregates increases and their weighted average diameter decreases in the former arable layer. As vegetation is restored, soils are acidified. The most sharp increase in the level of pH was observed in the 20-year-old fallow with the appearance of woody plants. The content and reserve of carbon in the fallow soils showed a stable tendency of increasing during the entire postagrogenic period under study. Carbon reserves in a layer of 0–25 cm increase after the cessation of plowing, reaching the maximum value by 85 years. Carbon reserves in the 20- and 85-year-old fallow soils were not statistically significant in the thickness of the soil 0–50 cm.

*Keywords:* abandoned lands, fallow land, soil structure, agro-dark-humus podbels