

ПОСТУПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВУ С ПОСЛЕУБОРОЧНЫМИ ОСТАТКАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

© 2022 г. О. Э. Суховеева*

Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

**e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com*

Поступила в редакцию 23.09.2021 г.

После доработки 14.12.2021 г.

Принята к публикации 30.12.2021 г.

Пожнивные и корневые остатки сельскохозяйственных культур – основной источник поступления углерода в пахотные почвы. Цель работы состояла в том, чтобы определить количество и долю в общей фитомассе послеуборочных остатков основных культур и углерода, поступающего с ними в почву. Для этого в 2019–2021 гг. были отобраны пробы озимой и яровой пшеницы, ячменя, овса и сои в пяти хозяйствах Курской, Рязанской, Самарской областей и Республике Чувашии. Рассчитано соотношение таких фракций растений, как корни, стерня, стебли, листья, мякина, зерно. У зерновых и зернобобовых культур на долю послеуборочных остатков (корней и стерни) приходится 1/4–1/5 сухой массы растения, при этом стерня составляет 1/6–1/10 массы, а доля корней не превышает 10%. На долю продуктивной части (зерна и мякины) приходится 1/2–1/3, на долю побочной продукции (стеблей и листьев) – 1/3 у злаков и 1/2 у сои. Количество привносимого в пахотный слой почвы углерода с корневыми остатками убывает в ряду озимая пшеница (569 кг С/га) > яровая пшеница (508 кг С/га) > ячмень (503 кг С/га) > овес (488 кг С/га) > соя (204 кг С/га). Стерня полевых культур является дополнительным источником углерода для почвы, размер которого прямо пропорционален высоте растения: 419 кг С/га у яровой, 405 кг С/га у озимой пшеницы, 281 кг С/га у овса, 232 кг С/га у сои, 135 кг С/га у ячменя. Для озимой пшеницы построены регрессионные уравнения зависимости количества пожнивных и корневых остатков от урожайности зерна.

Ключевые слова: Naplic Chernozem, Luvic Chernozem, Luvic Phaeozem, поживно-корневые остатки, почвенный углерод

DOI: 10.31857/S0032180X22060120

ВВЕДЕНИЕ

Пожнивные и корневые остатки сельскохозяйственных культур – основной источник поступления углерода в пахотные почвы. Согласно современным расчетам, с основной и побочной продукцией отчуждается в 2.0–2.2 раза больше фитомассы, чем остается в агроэкосистемах [12]. Более того, во многих странах до сих пор сохранилась практика сжигания стерни [22]. Существует множество альтернативных вариантов ее применения: скормливание скоту, компостирование, мульчирование, использование в строительстве крыш, производстве напитков, бумаги и кирпичей, в качестве биотоплива и упаковочного материала [21, 32], а также использование для выпаса, что способствует увеличению пула почвенного углерода [33].

В России давно признано, что сохранение послеуборочных растительных остатков – важнейшая часть ресурсосберегающих технологий обра-

ботки почвы [15]. В современной земледелии на их долю приходится 60–65% от всех источников органического вещества для почвы, а также возвращаются отчужденные растениями питательные элементы [17]. Использование стерни, особенно ее заделывание по сравнению с оставлением на поверхности способствует накоплению органического вещества в пахотных почвах [24], поддерживает их азотный статус [3], повышает долю стабильной фракции углерода и увеличивает микробную биомассу на 30% [27]. Рассчитано, что поступление в почву 7.7 т/га послеуборочных остатков яровой пшеницы эквивалентно внесению 3.9 т/га навоза, что на 71.5% уменьшает дефицитный баланс гумуса выщелоченных, обыкновенных и оподзоленных черноземов [2].

При внесении растительных остатков существенно возрастают запасы минерализуемых элементов (не только углерода, но и азота) в почве и, соответственно, интенсивность их минерализации микробной биомассой [16]. Многие исследо-

ватели сходятся во мнении, что наиболее интенсивно растительные остатки разлагаются сразу после заделки в почву — с сентября по март; корневые остатки расщепляются медленнее пожнивных [7, 12]. Остатки зерновых культур по сравнению с бобовыми и корнеплодами больше по массе, но разлагаются гораздо медленнее [4, 19].

Накопление углерода в почве — один из путей смягчения климатических изменений. В связи с этим наибольший интерес представляют однолетние культуры, поскольку их цикл развития проходит быстрее [26], особенно растения с глубокой корневой системой [28], так как около 40% продуктов фотосинтеза выводится через нее в ризосферу [29]. Надо понимать, что внесение растительных остатков одновременно приводит к усилению эмиссии углерода [11]. Но несмотря на это, в результате дыхания почвы теряется лишь малая часть углерода растительных остатков (12.5–14.7%), остальное переходит преимущественно в почвенное органическое вещество (3.2–82.0%), а также в микробную биомассу (4.0–6.0%) [9].

В 1977 г. Ф. И. Левиным была представлена методика определения массы растительных остатков по урожаю основной продукции [8]. Она и сейчас широко применяется для расчета послеуборочных остатков в различных работах, касающихся сельского хозяйства, углеродного цикла, почвенного органического вещества и эмиссии парниковых газов [14]. Но с тех пор не только изменились технологии возделывания культур, но и были выведены новые сорта, применяются усовершенствованные средства химизации и механизации. Можно утверждать, что за прошедшие 45 лет возникла необходимость корректировки исходных уравнений. Такие попытки уже предпринимались [12, 20], но были ограничены масштабом одного полевого опыта. В связи с этим становится актуальным провести подобную работу в широком географическом масштабе, охватив различные территории и выбрав в качестве объектов исследования хозяйства, расположенные в разных регионах.

Цель работы — определить количество и долю в общей фитомассе пожнивно-корневых остатков основных сельскохозяйственных культур и углерода, поступающего с ними в почву.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования выбрали пять важнейших для европейской территории страны культур: озимую пшеницу, яровую пшеницу, ячмень, овес, сою. Отбор проб производили в 2019–2021 гг. в пяти хозяйствах, расположенных в Центральном и Поволжском федеральном округах. Подробное описание точек отбора проб, агрохими-

ческих и климатических условий представлено в табл. 1.

Годы отбора совпадают с самым теплым периодом за всю историю наблюдений, когда на фоне общего роста температуры теплообеспеченность культур возрастает, а влагообеспеченность — снижается. Во всех регионах, для которых доступны метеоданные, температура воздуха в вегетационный сезон была выше климатического нормы, а количество осадков — равно или ниже, несмотря на ливневые явления.

Почвенные условия во всех хозяйствах относительно схожи по своим характеристикам. Четыре точки находились на черноземах (в Курской и Самарской областях — типичных, в Рязанской — выщелоченных), очень близких по агрохимическим свойствам, и одна в Чувашии на серых лесных почвах. Важно учитывать, что во всех хозяйствах культуры выращивали в разные годы на разных полях, в пределах хозяйств почвенный покров отличается сильной вариабельностью.

Севообороты во всех хозяйствах схожи: озимая пшеница идет после пара, соя — после зерновых. Технологии возделывания культур в большинстве хозяйств (Курская биостанция, КФХ Е.А. Гусева и Чувашский конезавод) соответствуют классической, включая осеннюю вспашку, внесение удобрений, культивацию и подкормки, тогда как в “Орловке”-Агро-Инновационном Центре применяется технология по *till* и вносятся лишь микроудобрения.

В поле в 10 точках по диагонали через каждые 10 м из пахотного слоя почвы отбирали растения с корнем, общее число которых (в зависимости от культуры и густоты посева) составляло 30–70 шт. Отбор проводили в фазу восковой-полной спелости (для сои — дополнительно в фазу цветения). Число проб (объем выборки), отобранных за 3 года, составило: для озимой пшеницы — 8, для яровой пшеницы и сои — 5, для ячменя — 4 и для овса — 3.

Одновременно в полевых условиях (в каждой из 10 точек) измеряли ширину междурядий и количество растений в рядке на 1 м. В дальнейшем эти значения использовали для расчета густоты стояния — числа растений на гектар. В лаборатории измеряли высоту каждого растения, общую (общее число побегов) и продуктивную (число продуктивных побегов) кустистость для последующего расчета биологической урожайности. Каждое отобранное растение разделяли на 6 фракций: корни, стерня, стебли, листья (у сои дополнительно выделяли черешки), мякина (у сои — створки бобов), зерно.

Важной особенностью анализа было то, что пожнивно-корневые остатки оценивали до уборки. Высоту стерни подобрали эмпирически, исходя из информации в литературе и измерений на убранных полях. Для высокорослых растений, средняя длина стеблей которых превышала 70 см, уровень

Таблица 1. Характеристика точек отбора проб растений

Хозяйство	Регион	Годы отбора	Культура	Характеристика почвы		Технология возделывания			Потолные условия вегетационных сезонов*
				тип и гранулометрический состав	агрохимические свойства	удобрения (в физической массе)	предшественники	управление остатками	
Курская био-сферная станция, Институт географии РАН	Курская обл., Медвенский р-н	2019–2021	Озимая пшеница, ячмень, соя	Чернозем типичный, Haplic Chernozem (Loamic), тяжелосуглинистый	Гумус 7.5–9.6%, рН 6.5–7.0	Центральный федеральный округ			2019: T _{IV-IX} [9.7, 16.8, 21.7, 18.7, 19.2, 14.3] P _{IV-IX} [12.7, 73.2, 30.9, 49.2, 27.4, 37.8, 57.4] 2020: T _{IV-IX} [7.04, 11.74, 20.9, 20.7, 19.3, 16.8] P _{IV-IX} [26.8, 96.7, 73.0, 104.1, 10.7, 10.6] 2021: T _{IV-IX} [7.4, 14.7, 20.2, 23.1, 21.9, 11.3] P _{IV-IX} [64.5, 91.6, 64.5, 65.3, 39.9, 76.7]
						Соя и ячмень перед посевом аммиачная селитра 100 кг/га, озимая пшеница осенью диааммофоска 200 кг/га, первая подкормка аммиачная селитра 150 кг/га и вторая подкормка сульфат аммония 100 кг/га	1 поле: кукуруза–соя–соя, 2 поле: соя–подсолнечник–ячмень–кукуруза, 3 поле: пар–озимая пшеница–подсолнечник–ячмень	Стерня запахивается	
						Нет доступных данных			
Льговский сахарный комбинат	Курская обл., Льговский р-н	2020–2021	Озимая пшеница, овес	Чернозем выщелоченный, Luvis Chernozem (Loamic), тяжелосуглинистый	Гумус 3.8–7.0%, рН 5.8–6.5	Поволжский федеральный округ			2020: T _{IV-IX} [4.7, 12.1, 18.3, 19.5, 16.9, 14.3] P _{IV-IX} [34.7, 65.4, 125.9, 79.8, 46.9, 39.1] 2021: нет доступных данных
						Зерновые осенью диааммофоска 200 кг/га, первая подкормка КАС 30 кг/га, вторая подкормка КАС 20 кг/га	Севооборот: пар–озимая пшеница–соя–кукуруза–яровая пшеница, ячмень–рапс–подсолнечник	Стерня запахивается	
Крестьянско-фермерское хозяйство Е.А. Гусева	Рязанская обл., Сапожковский р-н	2020–2021	Озимая пшеница, яровая пшеница, соя	Чернозем выщелоченный, Luvis Chernozem (Loamic), тяжелосуглинистый	Гумус 4.7–7.3%, рН 5.8–6.6	Поволжский федеральный округ			2019: T _{IV-IX} [77.3, 17.7, 20.1, 20.0, 17.4, 11.5] P _{IV-IX} [35.1, 25.9, 1.0, 0.5, 0.0, 2.0]
						Соя не удобряют, яровая и озимая пшеница 50 кг/га N при посеве	Кукуруза–соя–яровая пшеница, горох или горчица–озимая пшеница	No till, обработка ботки пожнивных остатков микробными препаратами	
“Орловка”-Агро-Инновационный Центр	Самарская обл., Похвистневский р-н	2019	Озимая пшеница, яровая пшеница, соя	Чернозем типичный, Haplic Chernozem (Loamic), тяжелосуглинистый	Гумус 1.4–3.1%, рН 5.2–6.1	Поволжский федеральный округ			Нет доступных данных
Племенной конезавод им. В.И. Чапаева	Республика Чувашия, Ядринский р-н	2020–2021	Яровая пшеница, ячмень, овес	Серая лесная, Luvis Phaeozem (Siltic), супесчаная	Гумус 150 кг/га осенью, аммиачная селитра 100 кг/га весной	Все культуры диааммофоска 150 кг/га осенью, аммиачная селитра 100 кг/га весной	Озимая пшеница–ячмень, овес–горох–яровая пшеница	Солома возращается на поля и запахивается	

* T_{IV-IX} – среднемесячные температуры воздуха за апрель–сентябрь, °C; P_{IV-IX} – среднемесячное количество осадков за апрель – сентябрь, мм.

Таблица 2. Поступление углерода в почву с растительными остатками

Культура	Биологическая урожайность, т/га		С, % (по [13])	Корни		Стерня	
	средняя*	диапазон		средняя*	диапазон	средняя*	диапазон
Озимая пшеница	4.83 ± 2.26	2.52–7.81	48.53	1173 ± 763**	257–2200	835 ± 301	424–1314
				569 ± 370	125–1068	405 ± 146	206–638
Яровая пшеница	4.09 ± 2.01	1.70–6.19	48.53	1047 ± 628	324–2149	863 ± 828	323–1613
				508 ± 305	157–1043	419 ± 402	157–783
Ячмень	3.62 ± 1.10	2.25–4.54	45.67	1102 ± 337	182–402	296 ± 90	796–1523
				503 ± 154	83–184	135 ± 41	364–696
Овес	2.22 ± 2.00	0.82–3.65	45.00	1084 ± 187	540–708	624 ± 119	952–1217
				488 ± 84	243–319	281 ± 54	428–548
Соя	3.49 ± 2.32	0.81–4.85	45.00	452 ± 142	198–874	516 ± 268	248–646
				204 ± 64	89–393	232 ± 121	112–291

* Даны средние и стандартные отклонения.

** Над чертой – сухая фитомасса, кг/га, под чертой – поступление углерода, кг С/га.

стерни выбрали равным 15 см; для низкорослых злаков – 14 см; для сои и ячменя – 8 см.

Каждый образец высушивали в течение 8 ч при температуре 105°C и взвешивали. Затем для каждого конкретного региона и года рассчитывали биологическую урожайность, массу корней и стерни, оставляемых после уборки, в пересчете на гектар, а также пропорции между фракциями фитомассы. Эти величины служили для расчета средних показателей по каждой культуре (средних по выборке), которые фактически были конечными искомыми величинами. Кроме того, оценивали количество углерода, приносимого в почву с послеуборочными остатками. Содержание углерода в фитомассе культур определяли по методике, утвержденной Распоряжением Минприроды России... [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Озимая пшеница – важнейшая продовольственная культура. По количеству растительных остатков она стоит на втором месте после многолетних трав в Центрально-Нечерноземной зоне и на третьем месте после трав и кукурузы в Черноземной зоне [12]. По нашим расчетам, средняя масса корней этой культуры была равна 1.17 т/га (табл. 2), что соответствует данным других исследователей, которые находятся в диапазоне 0.5–4.0 т/га (табл. 3). Масса стерни составила 0.84 т/га, что несколько меньше данных тех же литературных источников – 1.2–2.1 т/га.

Среди злаковых культур фитомасса озимой пшеницы содержит наибольшее количество углерода: 2.2 ± 0.35 т С/(га год), при этом 3/4 этого количества находится в надземной части, а 1/4 – в

корнях [30]. По нашим оценкам, озимая пшеница в среднем привносит в почву с растительными остатками почти тонну углерода: 974 кг С/га, из них 569 кг С/га приходится на корни. Если бы стерня не убиралась с поля, то это способствовало бы восполнению почвенного пула углерода еще на 405 кг С/га. Такое большое количество послеуборочных остатков по сравнению с другими культурами объясняется длительным периодом вегетации, охватывающем почти целый год.

Побочная продукция – стебли и листья – занимает 1/3 массы растения (33.7%) (рис. 1). Масса генеративной части озимой пшеницы составляет немногим меньше половины массы растения – 47.8%, при этом 58.7–80.3% от массы колоса составляет зерно, остальное – мякина. Это соответствует средней биологической урожайности этой культуры на уровне 4.83 ± 2.26 т/га.

Поскольку для озимой пшеницы получено наибольшее число данных, это позволило построить регрессионные уравнения (рис. 2) связи оставляемых этой культурой корневых (M_k) и пожнивных (M_c) остатков с урожайностью (U):

$$M_k = 0.118U + 0.602$$

$$(R^2 = 0.122, N = 8, F_{\text{факт}} = 0.837 > F_{\text{табл}} = 0.396,$$

$$t_{\text{факт}} (\text{угловой коэффициент}) = 0.915 > t_{\text{табл}} = 0.396,$$

$$t_{\text{факт}} (\text{свободный член}) = 0.884 > t_{\text{табл}} = 0.411),$$

$$M_c = 0.083U + 0.435$$

$$(R^2 = 0.384, N = 8, F_{\text{факт}} = 3.747 > F_{\text{табл}} = 0.101,$$

Таблица 3. Количественная оценка послеуборочных остатков зерновых культур по данным литературы

Культура	Урожайность, т/га	Масса, т/га		Соотношение частей	Регион	Источник
		корней	стерни			
Озимая пшеница	2.9–4.6 без удобрений	2.0–2.3	1.4–1.8	Корни : стерня = 1.4–1.7	Ростовская область	[12]
	3.3–5.1 с удобрениями	2.3–2.9	1.5–2.1			
	–	1.98	1.23	Пожнивно-корневые остатки = 23.9%	Беларусь	[17]
	–	0.55–1.78	–	Подземная : надземная часть = 0.07–0.22	Швейцария	[23]
	3.15–3.75	2.7–4.0	–		Ивановская область	[10]
Яровая пшеница	–	3.97–4.16	–		Курская область	[4]
	–	–	–	Остатки : зерно = 1.70	Мир	[25]
	–	–	–	Остатки : зерно = 1.49	Мир	[21]
	–	2.75	1.08		Красноярский край	[1]
	–	2.00	0.71	Пожнивно-корневые остатки = 28.2%	Беларусь	[17]
Ячмень	–	2.1–4.1	–		Ивановская область	[10]
	2.0–2.5	7.70 (6.94–8.29)	–		Красноярский край	[2]
	3.0–3.5	2.48–2.89	–		Марий Эл	[6]
	4.0–4.5	5.0–5.6	–		Оренбургская область	[18]
	–	–	–	Остатки : зерно = 1.33–1.22	Беларусь	[20]
Овес	2.8–3.2	–	–	Остатки : зерно = 1.11–1.01		
	–	–	–	Остатки : зерно = 0.96–0.90		
	–	1.5–1.7	0.8–0.9	Корни : стерня = 1.9	Ростовская область	[12]
	–	2.40	0.99		Красноярский край	[1]
	–	1.78	1.07	Пожнивно-корневые остатки = 31.2%	Беларусь	[17]
Овес	–	3.0–4.2	–		Ивановская область	[10]
	3.19–3.72	1.02–1.54	–		Марий Эл	[6]
	2.0–3.0	3.92–4.14	–		Курская область	[4]
	4.0–5.0	2.7–3.1	–	Остатки : зерно = 1.30–1.02	Беларусь	[20]
	–	3.5–3.9	–	Остатки : зерно = 0.87–0.78		
Овес	–	2.80	1.05		Красноярский край	[1]
	–	1.63	0.91	Пожнивно-корневые остатки = 28.4%	Беларусь	[17]
	–	2.09–2.30	–		Марий Эл	[6]
	2.0–2.5	–	–	Остатки : зерно = 1.33–1.22	Беларусь	[20]
	3.0–3.5	–	–	Остатки : зерно = 1.11–1.01		
4.0–4.5	–	–	Остатки : зерно = 0.96–0.90			

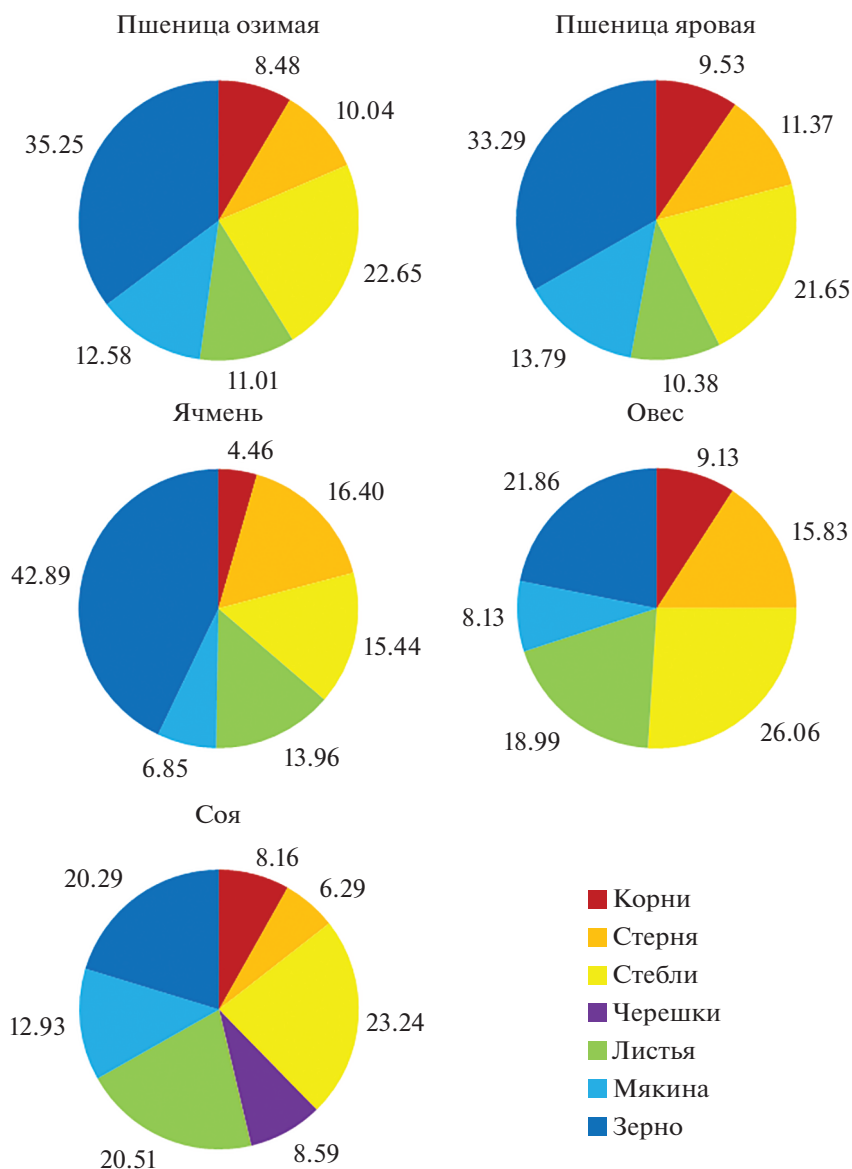


Рис. 1. Соотношение фракций в общей фитомассе культур.

$$t_{\text{факт}} (\text{угловой коэффициент}) = 1.936 > t_{\text{табл}} = 0.101,$$

$$t_{\text{факт}} (\text{свободный член}) = 1.927 > t_{\text{табл}} = 0.102),$$

где M_k – масса корней, т/га; M_c – масса стерни, т/га; Y – урожайность, т/га.

Даже при таком небольшом количестве данных значимость полученных коэффициентов по критериям Фишера (F) и Стьюдента (t) доказана. В дальнейшем исследования будут продолжены, что позволит расширить объем выборки.

Важно отметить, что подобные уравнения не несут объяснительную функцию, поскольку не выявляют условия окружающей среды, от которых в наибольшей степени зависит развитие веге-

тативной части растений. Они выполняют прогностическую функцию, так как позволяют опосредованно оценить количество послеуборочных остатков, используя в качестве предиктора зачатую единственную известный производственный показатель – урожайность.

В исходной методике Левина [8] уравнения имели следующий вид:

$$M_k = 0.09Y + 0.58 \text{ и } M_c = 0.04Y + 0.26$$

(при урожайности 1.0–2.5 т/га),

$$M_k = 0.07Y + 1.02 \text{ и } M_c = 0.01Y + 0.89$$

(при урожайности 2.6–4.0 т/га).

(Коэффициенты R^2 , F , t в работе не были приведены.)

Можно заметить, что в наших расчетах коэффициенты регрессии при независимой переменной значительно больше на фоне возросшей продуктивности. Это говорит о том, что в настоящее время при повышении урожайности количество пожнивных и корневых остатков будет увеличиваться гораздо интенсивнее, чем это предполагалось в предыдущих работах.

Яровые зерновые культуры. В качестве примеров яровых зерновых культур рассматриваются пшеница, ячмень и овес. Основная масса растений приходится на продуктивную часть. У колосовых культур, пшеницы и ячменя, она составляет практически половину: 47.1 и 49.7% соответственно. У овса, для которого характерно соцветие-метелка, она весит не более трети растения – 30.0%. При этом на долю зерна в зависимости от его состояния, сорта культуры, фазы спелости приходится 55.7–79.9% массы колоса у пшеницы, 84.5–89.7% – у ячменя и 66.6–79.2% – у овса. Это соответствует расчетной урожайности пшеницы на уровне 4.09 ± 2.01 т/га, ячменя 3.62 ± 1.10 т/га и овса 2.23 ± 2.00 т/га. Важно отметить, что у яровых зерновых культур наблюдается обратная пропорциональность между высотой растений и долей зерна в общей фитомассе ($r_p = -0.69, p < 0.001$).

Стебли-соломины составляют 1/4–1/5 массы растения: от 15.4% у ячменя до 26.1% у овса. На долю листьев приходит около 1/8 массы растения: от 10.4% у пшеницы до 19.0% у овса. Эта часть растений чаще всего интерпретируется как побочная продукция.

В общей биомассе культур доля корней мала и колеблется в пределах от 4.5% у ячменя до 9.1% у овса и 9.5% у пшеницы, что в натуральных единицах соответствует 1047 кг/га у пшеницы, 1084 кг/га у овса и 1102 кг/га у ячменя. Количество углерода корней убывает в ряду: яровая пшеница (508 кг С/га) > ячмень (503 кг С/га) > овес (488 кг С/га).

Стерня, как и корни, является одной из самых небольших частей растения: от 11.4% у пшеницы до 15.8% у овса и 16.4% у ячменя, что соответствует для этих культур 863, 624 и 296 кг/га. Как описано выше, высота среза зависела от высоты культур, то есть высота стерни была прямо пропорциональна высоте самих растений. На основании этого очевидно, что такие высокорослые культуры, как пшеница (419 кг С/га) и овес (281 кг С/га), возвращают в почву больше углерода со стерней по сравнению с ячменем (135 кг С/га).

Суммарная масса пожнивно-корневых остатков яровых культур, полученная в настоящем исследовании, была меньше, чем в результатах, полученных другими авторами. Вероятно, это связано с различиями по высоте оставляемой стерни и глубине отбора корней.

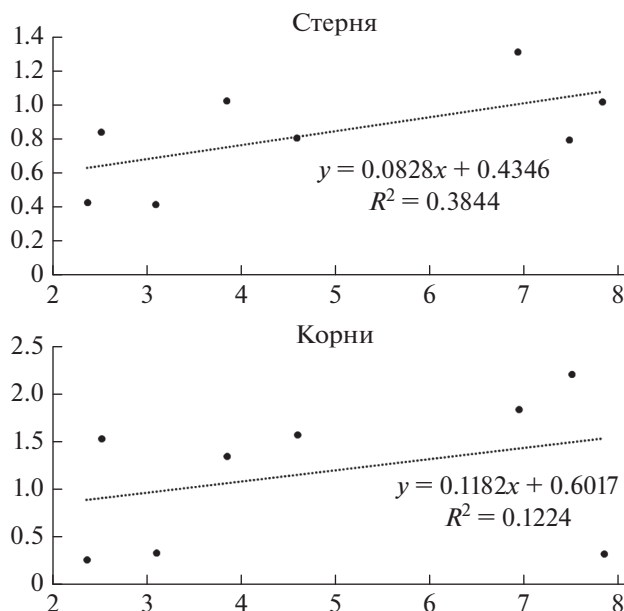


Рис. 2. Связь количества пожнивных и корневых остатков озимой пшеницы с ее урожайностью, т/га.

При этом важно отметить, что в Распоряжении Минприроды... [13] принято унифицированное содержание углерода в фитомассе. Например, 45.67% в ячмене и 45.00% в овсе. Но его реальные концентрации в разных частях растений могут отличаться. Так, в овсяно-ячменной смеси углерода в корнях было 48.0%, в стерне – 46.9%, в надземной части – 46.8% [5].

Соя оставляет на полях 516 кг/га в виде стерни и 452 кг/га в виде корней, благодаря этому в почву привносится 232 кг С/га за счет надземной и 204 кг С/га за счет подземной частей растения. В других исследованиях масса оставляемой стерни меньше (0.44 т/га), а корней – больше (1.18 т/га) [1]. Но важно учитывать, что у бобовых стержневая корневая система, поэтому соя оставляет много корней в нижележащих горизонтах. Так, в слое 0–210 см биомасса корней этой культуры достигала 0.86–1.93 т/га, при этом соотношение между корнями и надземной частью равно 0.09–0.26 [31]. В настоящем исследовании это соотношение было на нижней границе интервала (0.09), поскольку оценивали только долю корней в пределах пахотного горизонта, которая составляет 8.2% от массы целого растения.

В целом зернобобовые культуры накапливают небольшое количество послеуборочных остатков: если принять остатки многолетних трав за 100%, то зернобобовые оставят после себя лишь 28 (в Нечерноземье) – 35% (в Черноземье) остатков, что в 1.4–1.8 раз меньше, чем у озимых зерновых [12].

Соя сложна для анализа в связи с особенностями биологии развития. Так, в летний период она

обладает значительной массой листьев, но по мере созревания бобов листья опадают, и к моменту уборки невозможно определить их количество для каждого растения. В связи с этим для сои отбор проб проводят в два периода: в фазу начала цветения, когда листья достигают полного развития, но бобов еще нет, и в фазу спелости, когда листья опали, а зерно полностью сформировалось.

На долю листьев приходится 1/5 массы растения (20.5%), по этому показателю соя превосходит злаки. Отдельной фракцией у этой культуры выделяются черешки, доля которых также значительна и составляет 8.6% от массы растения. Опадая, листья дополняют пул почвенного углерода. По нашим данным, масса листовых пластин составляет 0.91–2.45 т/га, черешков – 0.34–1.33 т/га, что при среднем содержании углерода 45% дает прибавку почвенного пула этого элемента на уровне 0.56–1.70 т С/га.

Примерно такая же доля у этой бобовой культуры приходится на зерно (20.3%), а вся генеративная часть с учетом створок бобов составляет треть массы растения (33.2%), то есть гораздо меньше, чем у зерновых. Таким образом, при средней расчетной урожайности сои, равной 3.49 ± 2.32 т/га, соотношение зерна и послеуборочных остатков составляет 3.6.

Дискуссионные моменты. Следует обговорить некоторые несовершенства используемых методов. Наиболее существенным среди них является неизбежные потери части корневой системы при ее извлечении из почвы. В связи с невозможностью отбора почвенных монолитов с полей в действующих хозяйствах, считаем допустимым индивидуальный отбор проб корней с глубины не более пахотного горизонта (не затрагивая нижележащие слои), основываясь на распределении их массы по глубине и по слоям почвы. Для злаков данный подход уместен, поскольку их корневая система мочковатая и расположена преимущественно в верхнем слое почвы. Так, у озимой пшеницы в пахотном горизонте сосредоточено 55–78% корней [23]. По данным других авторов, у озимых в слое 0–20 см сосредоточено 30–50% корней, а в слое 0–50 см – 73–78% корней. У яровой пшеницы в пахотном слое расположено 36–41% корней, а в полуметровом – 58–69%. У ячменя эти доли составляют 33–39 и 60–62% соответственно [10].

Вторым дискуссионным вопросом остается высота стерни, поскольку уровень среза стеблей при уборке зависит от особенностей жатки и рельефа поля. В большинстве работ такой вопрос не возникает, поскольку остатки отбираются после уборки. Наш подход отличается тем, что остатки определяются, когда культуры еще находятся на полях. Такой способ позволяет решить проблему, состоящую в том, что после уборки и последую-

щей вспашки трудно отделить остатки данной культуры от неразложившейся массы предыдущей культуры и сорняков. В работе белорусских исследователей [20] высота среза была аналогична выбранной нами и определялась биологией культуры: для озимых 18 см, для яровых 15 см от поверхности почвы. В нашем исследовании высота среза зависела от высоты культуры, и для высокорослых растений уровень стерни был выбран равным 15 см, для низкорослых – 8 см.

Биологическая урожайность, рассчитываемая по данным анализа массы зерна в колосе, получается равна или выше реальной, поскольку в лабораторных условиях исключены потери при уборке и обмолоте. Например, для озимой пшеницы средняя расчетная урожайность, полученная в настоящем исследовании, составляла 4.83 ± 2.26 т/га. Эта цифра несколько больше, чем средняя по данным Росстата за 2019–2020 гг. по Центральному (3.90–4.87 т/га) и Приволжскому (1.93–3.46 т/га) федеральным округам, в которых расположены хозяйства. Аналогичная ситуация наблюдается для яровых культур: пшеницы 4.09 ± 2.01 т/га (по сравнению с 3.65–4.20 т/га в Центральном и 1.68–1.89 т/га в Приволжском федеральных округах) и ячменя 3.62 ± 1.10 т/га (по сравнению с 3.26–3.79 т/га в Центральном и 1.98–2.21 т/га в Приволжском федеральных округах). Важно отметить, что полученные показатели сопоставимы с данными полевых опытов. Например, в Ростовской области урожайность озимой пшеницы 3.3–5.1 т/га и ячменя – 2.8–3.2 т/га [12], в Курской для первой культуры – 3.1–3.7 т/га и для второй – 3.2–3.7 т/га [4].

Несомненным преимуществом работы является проведение исследования непосредственно в действующих хозяйствах, тогда как большинство подобных оценок пожнивно-корневых остатков проводится в длительных опытах [4, 6, 20]. Охват большого количества регионов и почвенно-климатических условий позволяет решить проблему пространственной вариабельности и индивидуальных особенностей возделываемых в каждой точке сортов и различий между ними по урожайности, высоте стебля, кустистости и другим признакам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У зерновых и зернобобовых культур на долю послеуборочных остатков приходится 1/4–1/5 сухой массы растения, при этом стерня составляет 1/6–1/10 массы, а доля корней не превышает 10%. На долю продуктивной части приходится 1/2–1/3, побочной продукции – 1/3 у злаков и 1/2 у сои. Количество углерода, привносимого в пахотный слой почвы с корневыми остатками, варьирует в диапазоне 204–569 кг С/га и убывает в ряду: озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес > соя.

Стерня полевых культур является дополнительным источником углерода для почвы в размере 135–419 кг С/га. Запас углерода убывает в ряду яровая пшеница > озимая пшеница > овес > соя > ячмень, прямо пропорционально высоте растений. В перспективе работа будет направлена на расширение набора рассматриваемых культур и усовершенствование расчетной методики определения количества пожнивно-корневых остатков по урожайности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств грантов РНФ № 20-76-00023 (полевые работы в Курской, Рязанской областях, Республике Чувашия) и № 18-17-00178 (полевые работы в Самарской области), а также темы государственного задания Института географии РАН № FMGE-2019-0007 (лабораторные анализы).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Волошин Е.И., Ивченко В.К.* Баланс растительных остатков сельскохозяйственных культур в учхозе “Миндерлинское” // Вестник КрасГАУ. 2020. № 4(157). С. 59–65.
2. *Волошин Е.И., Ивченко В.К., Количенко А.А.* Особенности накопления растительных остатков яровой пшеницы на государственных сортоучастках Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2021. № 6(171). С. 47–57.
3. *Гамзиков Г.П., Сулейменов С.З.* Азотминерализующая способность серой лесной почвы Новосибирского Приобья при компостировании и паровании растительных остатков // Почвоведение. 2021. № 5. С. 582–591.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21050087>
4. *Дудкина Т.А.* Поступление в почву органического вещества в севооборотах с разным соотношением групп культур // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 8. С. 38–41.
5. *Жукова И.В., Жуков З.С.* Аккумуляция биогенных элементов в растительных остатках на агрочерноземах Красноярской лесостепи // Вестник КрасГАУ. 2016. № 11(122). С. 78–85.
6. *Замятин С.А., Ефимова А.Ю., Максуткин С.А.* Накопление пожнивно-корневых остатков в зависимости от вида полевого севооборота // АПК: инновационные технологии. 2019. № 3. С. 25–33.
7. *Лазарев А.П., Майсимова Д.Р.* Скорость разложения послеуборочных остатков полевых культур в черноземах за осенне-весенний и годовой периоды // Почвоведение. 2006. № 6. С. 751–757.
8. *Левин Ф.И.* Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // Агрохимия. 1977. № 8. С. 36–42.
9. *Мамаева Г.Г.* Сравнительная оценка количества углерода, поступившего в почву из корневых или послеуборочных остатков при нулевой и традиционной обработках почвы (США) // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журн. 2005. № 2. С. 390.
10. *Мельцаев И.Г., Зинченко С.И., Эседулаев С.Т., Лоцинина А.Э.* Севооборот и система обработки – основы повышения плодородия почв и урожайности в Верхневолжье. Иваново: Верхневолжский ФАНЦ, 2019. 392 с.
11. *Наздрачёв Я.П., Филонов В.И., Мамыкин Е.В.* Особенности минерализации в почве послеуборочных остатков пшеницы и рапса // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48. № 2. С. 101–107.
12. *Новиков А.А., Кисаров О.П.* Обоснование роли корневых и пожнивных остатков в агроценозах // Политематический сетевой электронный научный журн. КубГАУ. 2012. № 78. С. 643–652.
13. Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р “Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов”.
14. *Романовская А.А., Гитарский М.Л., Карабань Р.Т., Назаров И.М.* Оценка эмиссии N₂O от не утилизируемой в аграрном секторе страны мортмассы сельскохозяйственных растений. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. Т. 18. С. 276–286.
15. *Русакова И.В.* Ресурсосберегающие технологии использования растительных остатков // Агрохимический вестник. 2012. № 3. С. 40–42.
16. *Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Тулина А.С., Кудеяров В.Н.* Разложение и минерализация фитомассы в серой лесной почве: кинетический анализ // Почвоведение. 2001. № 5. С. 569–577.
17. *Скируха А.Ч., Грибанов Л.Н., Усень А.А.* Корневые и пожнивные остатки полевых культур в севообороте как резерв повышения содержания основных элементов минерального питания в почве // Земледелие и селекция в Беларуси. 2017. № 53. С. 13–19.
18. *Халин А.В., Бакиров Ф.Г., Нестеренко Ю.М., Поляков Д.Г.* Оценка влияния культур и звеньев севооборотов на количество органического вещества, поступающего в почву с растительными остатками, на черноземах южных Оренбургской области // Бюл. Оренбургского НЦ УРО РАН. 2016. № 1. С. 17.
19. *Хрюкин Н.Н., Дедов А.В., Несмеянова М.А.* Динамика разложения растительных остатков в черноземе типичном // Агрохимический вестник. 2018. № 1. С. 2–4.
20. *Цыбулька Н.Н.* Количество послеуборочных растительных остатков сельскохозяйственных культур в зависимости от уровней урожайности // Весці Нацыянальнай Акадэміі Навук Беларусі. Серыя Аграрных Навук. 2007. № 1. С. 49–55.
21. *Abdurrahman M.I., Chaki S., Saini G.* Stubble burning: Effects on health & environment, regulations and man-

- agement practices // *Environ. Adv.* 2020. V. 2. Art. 100011. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100011>
22. Chan K.Y., Heenan D.P. The effects of stubble burning and tillage on soil carbon sequestration and crop productivity in southeastern Australia // *Soil Use and Management*. 2005. V. 21. № 4. P. 427–431. <https://doi.org/10.1079/SUM2005357>
 23. Hirte J., Walder F., Hess J., Büchi L., Colombi T., van der Heijden M.G., Mayer J. Enhanced root carbon allocation through organic farming is restricted to topsoils // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 755. № 2. Art. 143551. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143551>
 24. Huang G.B., Luo Z.Z., Li L.L., Zhang R.Z., Li G.D., Cai L.Q., Xie J.H. Effects of stubble management on soil fertility and crop yield of rainfed area in Western Loess Plateau, China // *Appl. Environ. Soil Sci.* 2012. V. 2012. Art. 256312. <https://doi.org/10.1155/2012/256312>
 25. Jain N., Bhatia A., Pathak H. Emission of Air Pollutants from Crop Residue Burning in India // *Aerosol and Air Quality Res.* 2014. V. 14. P. 422–430. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.01.0031>
 26. Jansson C., Faiola C., Wingler A., Zhu X.-G., Kravchenko A., de Graaff M.-A., Ogden A.J., Handakumbura P.P., Werner C., Beckles D.M. Crops for Carbon Farming // *Frontiers in Plant Science*. 2021. V. 12. Art. 636709. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.636709>
 27. Jha P., Hati K.M., Dalal R.C., Dang Y.P., Kopittke P.M., Menzies N.W. Soil carbon and nitrogen dynamics in a Vertisol following 50 years of no-tillage, crop stubble retention and nitrogen fertilization // *Geoderma*. 2020. V. 358. Art. 113996. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113996>
 28. Kell D.B. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration // *Annals of Botany*. 2011. V. 108. № 3. P. 407–418. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr175>
 29. Kumar R., Pandey S., Pandey A. Plant roots and carbon sequestration // *Current Science*. 2006. V. 91. № 7. P. 885–890.
 30. Mathew I., Shimelis H., Mutema M., Chaplot V. What crop type for atmospheric carbon sequestration: Results from a global data analysis // *Agriculture, Ecosystems Environment*. 2017. V. 243. P. 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.008>
 31. Ordóñez R.A., Archontoulis S.V., Martinez-Feria R., Hatfield J.L., Wright E.E., Castellano M.J. Root to shoot and carbon to nitrogen ratios of maize and soybean crops in the US Midwest // *Eur. J. Agronomy*. 2020. V. 120. Art. 126130. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126130>
 32. Porichha G.K., Hu Y., Rao K.T.V., Xu C.C. Crop Residue Management in India: Stubble Burning vs. Other Utilizations including Bioenergy // *Energies*. 2021. V. 14. Art. 4281. <https://doi.org/10.3390/en14144281>
 33. Stavi I., Barkai D., Islam K.R., Zaady E. No adverse effect of moderate stubble grazing on soil quality and organic carbon pool in dryland wheat agro-ecosystems // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. V. 35. P. 1117–1125. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0299-9>

Input of Organic Carbon in Soil with Post-Harvest Crop Residues

O. E. Sukhoveeva*

Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com*

Crop residues are the main source of carbon input to arable soils. The aim of the research was to determine the amount and proportion in the phytomass of post-harvest crop residues of major crops and the carbon that input to soil with them. For this purpose, samples of winter and spring wheat, barley, oats, and soybean in the five farms of Kursk, Ryazan, and Samara regions and the Republic of Chuvashia were taken over 2019–2021 yrs. The ratio of such plant fractions as roots, stubble, stems, leaves, chaff, and grain was calculated. For grain and legume crops, post-harvest residues (roots and stubble) account for 1/4–1/5 of the dry phytomass, with stubble accounting for 1/6–1/10 of the mass and the share of roots not exceeding 10%. The productive part (grains and chaff) accounts for 1/2–1/3, the by-products (stems and leaves) account for 1/3 in cereals and 1/2 in soybeans. The amount of carbon brought to the plough soil layer with root residues decreases in the series winter wheat (569 kg C/ha) > spring wheat (508 kg C/ha) > barley (503 kg C/ha) > oats (488 kg C/ha) > soybeans (204 kg C/ha). The stubble of field crops is an additional source of carbon for the soil, the amount of which is directly proportional to the height of the plants: 419 kg C/ha for spring wheat, 405 kg C/ha for winter wheat, 281 kg C/ha for oats, 232 kg C/ha for soybeans, 135 kg C/ha for barley. Regression equations of dependence of stubble and root residues amount on grain yield were calculated for winter wheat.

Keywords: Haplic Chernozem, Luvic Chernozem, Luvic Phaeozem, crop residues, soil carbon