

УДК 631.81:631.445.24:631.416:632.122.1:633.14

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПЛОДОРОДИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ, СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОЗИМОЙ РЖИ

© 2021 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, М. Т. Васбиева¹, Д. Г. Шишков¹

¹Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства ПФИЦ УрО РАН
614532 Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры 12, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2020 г.

После доработки 24.11.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

Изучено влияние длительного систематического применения (40 лет) возрастающих доз минеральных удобрений на показатели плодородия почвы. Показано сохранение исходного содержания органического углерода, увеличение содержания подвижного фосфора и обменного калия в 1.3–3.1 раза. Отмечено существенное подкисление почвы. Максимальные изменения наблюдали при дозе НРК150. Рассмотрено распределение содержания азота, фосфора и калия в растениях озимой ржи (корнях, надземной массе, зерне). Изучено влияние минеральных удобрений на содержание в почве подвижных форм тяжелых металлов (вытяжка 1н. НС1 и ААБ рН 4.8) и проведена оценка их поступления в растения в разных фазах развития озимой ржи (кущение, колошение, полная спелость).

Ключевые слова: длительный стационарный опыт, агрохимические свойства почвы, тяжелые металлы.

DOI: 10.31857/S0002188121040153

ВВЕДЕНИЕ

Изучение реакции растений на удобрения является важнейшим вопросом агрохимии. Минеральное питание имеет принципиальное значение при оценке и управлении параметрами эффективного плодородия и продукционного процесса сельскохозяйственных культур в агроэкосистемах. Сбалансированное минеральное питание — это основа формирования высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Удобрения стимулируют все обменные процессы в растениях на всех этапах их роста и развития [1].

Основную площадь пашни Пермского края занимают дерново-подзолистые почвы. Высокая и стабильная продуктивность дерново-подзолистых почв, отличающихся низким естественным плодородием, в условиях короткого вегетационного периода и дефицита тепла возможна при систематическом научно обоснованном применении агрохимических средств [2]. По данным [3], среди основных факторов повышения урожайности (сорт, средства защиты растений и др.) на долю минеральных удобрений приходится 40% прироста производства продовольствия. Потребление минеральных удобрений в мире в 2016 г. достигло 197.5 млн т. Резкое уменьшение объемов

применения удобрений в последние 20 лет в России в целом и в Пермском крае в частности привело к формированию отрицательного баланса питательных веществ в почве, что способствовало снижению урожайности и качества сельскохозяйственных культур. На сегодняшний день в Российской Федерации объемы внесения минеральных удобрений уступают среднемировым показателям (≈ 100 кг д.в./га) почти в 5 раз [3]. Насыщенность пашни в Пермском крае минеральными удобрениями в последние годы составила 10–14 кг д.в./га, органическими — 0.9–1.4 т/га. Согласно данным центра агрохимической службы, на конец 2019 г. 84% пахотных земель в Пермском крае относятся к категории низкой и очень низкой обеспеченности гумусом, 79% составляют кислые почвы, 34 и 14% относятся к почвам с низким содержанием подвижного фосфора и калия.

Органические и минеральные удобрения в своем составе кроме основных элементов питания содержат примеси, которые могут загрязнять почву и отрицательно влиять на развитие растений. К таким токсичным примесям причисляют тяжелые металлы (ТМ). Наиболее потенциально опасными как по набору, так и по концентрации ТМ являются фосфорсодержащие удобрения [3–

5]. Минеральные удобрения оказывают косвенное влияние на содержание ТМ — через подкисление почвы в результате их применения [6, 7]. В других работах [8–11] установлено, что внесение минеральных удобрений не влияло на содержание подвижных форм ТМ в пахотном слое почвы и их накопление в растениях. Почвы являются природными накопителями ТМ в окружающей среде и основным источником загрязнения сопредельных сред, включая растения [12]. Растениям доступны элементы, присутствующие в почве в водорастворимой и обменной форме. Накопление ТМ в растениях зависит от природно-климатических условий произрастания, биологических особенностей, а также технологии возделывания сельскохозяйственной культуры и даже от сорта [4, 13]. В репродуктивных органах, как правило, элементы-загрязнители накапливаются, значительно меньше, чем в вегетативных. Корнеплоды, клубни, плоды содержат значительно меньше ТМ, чем листья и стебли [14]. В настоящее время повышается научный интерес к вопросам безопасности применения удобрений, мелиорантов, средств защиты растений с точки зрения сохранения “здоровья” почвы и получения экологически чистой сельскохозяйственной продукции.

Цель работы — изучение влияния возрастающих доз НРК на показатели плодородия дерново-подзолистой почвы и распределение содержания основных элементов питания и тяжелых металлов в растениях озимой ржи в разных фазах развития.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой стационарный опыт по изучению влияния различных доз минеральных удобрений на урожайность полевых культур заложен в 2-х последовательных во времени закладках в 1978–1980 гг. на опытном поле Пермского НИИСХ ПФИЦ УрО РАН на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве со следующими характеристиками (слой 0–20 см): pH_{KCl} 5.6, гидролитическая кислотность — 2.0, обменная — 0.025, сумма поглощенных оснований — 21.0 мг-экв/100 г почвы, содержание гумуса по Тюрину — 2.12%, подвижных форм фосфора в пахотном слое — 175, обменного калия — 203 мг/кг почвы (по Кирсанову). Схема опыта, варианты: внесение N0P0K0, N60P60K60, N90P90K90, N150P150K150. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, на клевере изучали последствие. В опыте использовали N_{aa} , P_{cd} и K_x . Известь вносили перед закладкой опыта в дозе по 1.0 H_r .

Органические удобрения в опыте не использовали. Севооборот — 8-польный со следующим чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница, клевер 1-го года пользования, клевер 2-го года пользования, ячмень, овес. Общая площадь делянки 120 м², учетная 76.4 м². Размещение вариантов рендомизированное. За время проведения опыта было внесено удобрений при дозе N60P60K60 — по 1560 кг д.в., при дозе N90P90K90 — по 2340 кг д.в. и при дозе N150P150K150 — по 3900 кг д.в. НРК/га.

Почвенные образцы для исследования отбирали в начале 6-й ротации севооборота в вегетационный период озимой ржи (сорт Фаленская 4) в слое 0–20 см. Агрохимические свойства почвы изучали с использованием следующих методов: содержание органического вещества — по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижный фосфор и калий — по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91), аммиачный азот — фотометрическим методом (ГОСТ 26489-85), нитратный азот — потенциометрическим методом (ГОСТ 26951-86). Содержание минерального азота рассчитывали суммированием аммонийной и нитратной форм. Определение содержания НРК в растениях проводили в воздушно-сухих размолотых образцах: общего азота — по методу Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-93), общего фосфора — спектрофотометрическим методом (ГОСТ 28902-91), общего калия — пламенно-фотометрическим методом после озоления (ГОСТ 30504-97). Содержание тяжелых металлов в почве (вытяжка 1н. HCl и ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) pH 4.8) и растениях определяли методом атомной абсорбции [15] на атомно-абсорбционном спектрометре iCE 3500 с пламенной атомизацией (Thermo Scientific, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики агрохимических свойств исследованной почвы показал, что содержание подвижных форм основных элементов питания перед посевом озимой ржи было высоким и очень высоким, содержание органического углерода — низким, характерным для дерново-подзолистых почв Предуралья. Кислотность почвы в зависимости от вариантов опыта варьировала от среднекислой до очень сильнокислой, pH_{KCl} 4.7–3.9 (табл. 1). Длительное систематическое применение минеральных удобрений привело к существенному подкислению дерново-подзолистой почвы. При внесении НРК в дозе 150 кг/га отмечено снижение pH_{KCl} на 0.3–0.8 ед. в течение всего вегетационного периода. Длительное внесение

Таблица 1. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы в течение вегетационного периода (6-я ротация)

Вариант	рН _{KCl}	N-NH ₄	N-NO ₃	N _{мин}	P ₂ O ₅	K ₂ O	C _{орг} , %
		мг/кг					
Перед посевом							
Без удобрений	4.7	30.0	17.0	47.0	200	138	1.06
N60P60K60	4.6	20.5	18.0	38.5	268	192	1.28
N90P90K90	4.1	20.3	16.9	37.2	342	300	1.37
N150P150K150	3.9	18.1	22.3	40.4	506	403	1.36
Кущение							
Без удобрений	5.0	22.3	3.9	26.2	148	136	1.10
N60P60K60	4.6	23.8	5.1	28.9	210	176	1.17
N90P90K90	4.4	29.4	8.6	30.0	305	216	1.17
N150P150K150	4.3	33.4	9.4	42.0	419	278	1.23
Колошение							
Без удобрений	4.7	11.6	2.5	14.1	177	170	1.11
N60P60K60	4.4	11.9	6.1	18.0	293	283	1.21
N90P90K90	4.0	12.7	17.9	30.6	410	307	1.19
N150P150K150	3.9	14.2	29.5	43.7	540	381	1.30
Полная спелость							
Без удобрений	4.5	5.1	3.4	8.5	185	180	1.10
N60P60K60	4.6	5.4	7.5	12.9	276	241	1.24
N90P90K90	4.3	4.9	6.2	11.1	321	249	1.24
N150P150K150	4.2	4.7	6.9	11.6	479	294	1.29
HCP ₀₅	0.2	2.5	1.8	3.8	34	23	0.10

минеральных удобрений обеспечило сохранение исходного содержания в почве органического углерода. Минеральные удобрения могут способствовать увеличению содержания органического вещества благодаря увеличению количества поступающего в почву органического материала, изменению физико-химических свойств почвы, увеличению численности и активности почвенных микроорганизмов [16–18]. Максимальное достоверное увеличение содержания органического углерода в 1.2–1.3 раза отмечено перед посевом озимой ржи и в фазе полной спелости растений, что связано с нахождением почвы в относительно стабильном состоянии. В фазах кушения и колошения влияние минеральных удобрений проявилось в меньшей степени, что можно объяснить активной минерализацией органического вещества.

Выявлено уменьшение содержания минерального азота в почве к фазе полной спелости в 3–5 раз относительно его содержания в почве перед посевом. Минеральный азот в фазах кушения и полной спелости был представлен в большей сте-

пени аммиачной формой, процесс нитрификации был слабым из-за холодной и дождливой погоды вегетационного периода. Примерно одинаковое количество нитратной и аммонийной форм азота определено в почве в фазе колошения. Содержание P₂O₅ и K₂O в зависимости от фаз развития растений озимой ржи изменялось в меньшей степени. Их минимальное количество во всех вариантах отмечено в фазе кушения. При длительном внесении минеральных удобрений выявлено увеличение содержания подвижного фосфора и обменного калия по сравнению с контрольным вариантом в 1.3–3.1 раза во всех фазах развития озимой ржи. Отмечена тесная корреляция между содержанием минерального азота, подвижного фосфора и обменного калия в почве (в фазах весеннего кушения и колошения) и дозами внесенных минеральных удобрений ($r = 0.92–0.99$).

Озимая рожь – важнейшая продовольственная и кормовая культура. Она менее требовательна к почвенным и климатическим условиям, чем другие зерновые, хорошо отзывается на внесение минеральных удобрений. Считается, что расте-

Таблица 2. Содержание азота, фосфора и калия в растениях озимой ржи в разных фазах ее развития, %

Вариант	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Корни									
Без удобрений	0.72	0.87	0.60	0.51	0.38	0.23	2.29	1.54	0.37
N60P60K60	0.64	1.23	0.90	0.74	0.51	0.27	2.11	1.98	0.36
N90P90K90	0.65	1.73	0.84	0.74	0.57	0.29	2.61	2.53	0.29
N150P150K150	0.68	1.76	0.95	0.84	0.45	0.30	3.04	1.55	0.24
Надземная масса (стебли + листья)									
Без удобрений	3.08	1.87	0.37	1.03	0.71	0.16	4.20	2.70	0.50
N60P60K60	4.11	2.13	0.60	1.37	0.84	0.18	4.95	3.07	0.55
N90P90K90	4.42	2.92	0.74	1.35	0.84	0.18	5.51	3.69	0.64
N150P150K150	4.58	2.59	0.94	1.52	0.84	0.22	5.79	3.57	0.77
Зерно									
Без удобрений			1.46			0.84			0.50
N60P60K60			1.76			0.84			0.48
N90P90K90			1.85			0.82			0.51
N150P150K150			1.95			0.85			0.50
HCP ₀₅	0.13	0.12	0.13	0.05	0.10	0.05	0.20	0.20	0.06

Примечание. В графе 1 – фаза кущения, 2 – фаза колошения, 3 – фаза полной спелости.

ния озимой ржи к фазе весеннего кущения потребляют 35–50%, к фазе выхода в трубку – 75–80% максимального поступления азота за вегетацию [19–21]. За этот период растения поглощают 55–58% фосфора и 50–52% калия из почвы и удобрений, к концу колошения их поступление из почвы практически завершается. По данным наших исследований, наибольшее количество азота в корнях озимой ржи отмечено в фазе колошения (0.87–1.76%). К фазе полной спелости содержание этого элемента в корнях уменьшалось в 1.4–2.1 раза в зависимости от варианта опыта (табл. 2). Максимальное количество фосфора и калия в корнях отмечено в фазе весеннего кущения (0.51–0.84 и 2.11–3.04% соответственно), наблюдали постепенное их снижение к фазе полной спелости: содержание P₂O₅ снизилось в 2.2–2.8 раза, K₂O – в 5.9–12.7 раза.

В надземной массе озимой ржи наблюдали максимальное накопление основных элементов питания в фазе весеннего кущения. Содержание N в зависимости от дозы NPK варьировало от 3.08 до 4.58%, фосфора – от 1.03 до 1.52% и калия – от 4.20 до 5.79%. Количество азота, фосфора и калия в надземной части растений снижалось по мере созревания культуры. Их содержание в стеблях и листьях растений к фазе колошения уменьшилось в 1.5–1.9 раза. В зерне и соломе количество

NPK было в 4.9–9.0 раза меньше, чем в надземной массе растений в период кущения.

Основную часть элементов питания растения используют в период весеннего кущения до фазы конец колошения–начало цветения на формирование биомассы и конечного урожая. В фазе полной спелости наблюдают отток элементов питания из корней, листьев и стеблей в органы накопления ассимилятов для формирования зерна. Содержание азота в зерне составило 1.46–1.95, P₂O₅ – 0.82–0.85, K₂O – 0.48–0.51% в зависимости от дозы внесенных минеральных удобрений. Тесная корреляционная связь установлена между дозами NPK и количеством азота в зерне и соломе озимой ржи ($r = 0.97$ и 0.95 соответственно). Таким образом, озимая рожь наиболее интенсивно поглощала азот в фазе кущения и аккумулировала его в основном в стеблях и листьях. Аналогично процесс биологической аккумуляции проходил для фосфора и калия. Их было практически в 2 раза больше в стеблях и листьях, чем в корнях в фазах кущения и колошения. В фазе полной спелости в зерне аккумулировалось больше азота и фосфора, чем в других органах растений.

Для оценки безопасности использования минеральных удобрений были проведены исследования по содержанию в почве подвижных форм меди, цинка, кадмия и свинца, т.к. ТМ на сегодняшний день являются одними из основных за-

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в почве в разных фазах развития растений озимой ржи, мг/кг

Вариант	Cu		Pb		Zn		Cd	
	1М НСl	ААБ рН 4.8	1М НСl	ААБ рН 4.8	1М НСl	ААБ рН 4.8	1М НСl	ААБ рН 4.8
Перед посевом								
Без удобрений	6.62	0.98	9.08	Ниже предела обнаружения	5.23	1.32	0.54	0.39
N60P60K60	4.84	1.21	6.09		5.08	1.33	0.55	0.39
N90P90K90	5.12	3.68	7.98	1.64	5.22	1.21	0.55	0.47
N150P150K150	5.45	3.02	7.29	1.70	5.74	1.35	0.57	0.47
Кущение								
Без удобрений	4.50	Ниже пре- дела обна- ружения	4.67	Ниже предела обнаружения	5.42	1.35	0.57	0.56
N60P60K60	4.31		4.76		5.50	1.44	0.56	0.57
N90P90K90	4.40		5.02		5.65	1.48	0.56	0.56
N150P150K150	4.30		4.89		5.92	1.44	0.56	0.59
Колошение								
Без удобрений	4.50	Ниже пре- дела обна- ружения	4.69	Ниже предела обнаружения	5.76	1.24	0.56	0.58
N60P60K60	4.37		4.23		6.00	1.22	0.58	0.58
N90P90K90	4.50		4.16		6.41	1.35	0.49	0.36
N150P150K150	4.37		4.37		6.59	1.46	0.43	0.38
Полная спелость								
Без удобрений	4.59	Ниже пре- дела обна- ружения	4.21	Ниже предела обнаружения	5.74	1.07	0.43	0.35
N60P60K60	4.30		4.10		6.28	1.13	0.42	0.37
N90P90K90	4.54		4.31		6.48	1.17	0.43	0.37
N150P150K150	4.60		4.48		7.15	1.30	0.45	0.36
НСР ₀₅	1.63	0.64	1.11	0.27	0.22	0.27	0.10	0.02
ПДК	50	3	60	6	60	23	1.0	—

грязнителей окружающей среды [22, 23]. Кроме этого, территория опытного поля Пермского НИИСХ ПФИЦ УрО РАН находится под влиянием ветров, дующих с Осенцовского промышленного узла, поэтому объекты окружающей среды (почва и растительность) могут быть загрязнены токсичными веществами. В 2013 г. вблизи исследованных участков была открыта федеральная трасса Пермь–Екатеринбург.

Кислоторастворимые формы ТМ, извлекаемые 1М НСl, характеризуют потенциальный запас подвижных соединений металлов в почве. Цинк и медь относятся к группе приоритетных антропогенных загрязнителей, в то же время они являются биофильными микроэлементами, способствуют формированию генеративных органов растений. По степени обеспеченности микроэлементами [24] изученная почва относится к категории “средне обеспеченная” медью и “низко обеспеченная” цинком. По данным [4, 5], свинец и кадмий не считаются жизненно необходимыми для растений, не имеют определенного функцио-

нального значения. Однако роль этих элементов выяснена не до конца. В работах [25–29] отмечали положительное действие свинца на рост и развитие растений и кадмия – на всхожесть семян [30]. Содержание кислоторастворимых форм ТМ в пахотном слое (0–20 см) во всех фазах развития озимой ржи не превышало предельно-допустимых концентраций (ПДК) для почв и не зависело от дозы внесенных удобрений (табл. 3). Проект нормативов предельно допустимого содержания в почве кислоторастворимых форм (потенциально доступных для растений) элементов в свое время был незавершен. Несмотря на это, он нашел применение в практике экологических работ, однако эти нормативы не являются официально утвержденными [22]. Отмечена тенденция к уменьшению содержания кадмия в кислотной вытяжке в фазе полной спелости ржи.

Содержание ТМ в ацетатно-аммонийной вытяжке (рН 4.8) характеризует их “актуальную подвижность”. Концентрация в почве подвижных соединений ТМ динамична во времени, что объ-

Таблица 4. Влияние минеральных удобрений на содержание цинка в надземной и корневой массе озимой ржи, мг/кг

Вариант	Кушение		Колошение		Полная спелость		
	надземная масса	корни	надземная масса	корни	зерно	солома	корни
Без удобрений	33.1	28.2	25.5	19.6	18.9	7.3	15.8
N60P60K60	37.4	37.9	31.9	27.6	11.5	9.8	Ниже пре-дела обнару-жения
N90P90K90	38.7	33.9	28.9	31.9	32.1	19.1	
N150P150K150	37.3	33.9	30.4	35.0	35.3	18.7	
HCP ₀₅	1.7	2.5	3.8	5.4	10.1	6.3	—
ПДК/МДУ*					50	50	—

*МДУ – максимально-допустимый уровень содержания элемента в кормах сельскохозяйственных животных (соломе, зерне, зернофураже).

ясняется, прежде всего, деятельностью микроорганизмов и возрастными изменениями интенсивности поглощения химических элементов растениями. Содержание подвижных форм меди и свинца, извлекаемых ААБ (рН 4.8), во всех фазах роста озимой ржи оказалось ниже предела обнаружения. Внесение удобрений оказало влияние в большей степени на подвижность в почве кадмия и цинка. Концентрация подвижной формы цинка, извлекаемой ААБ (рН 4.8), изменялась от 1.35–1.48 в фазе кушения до 1.07–1.30 мг/кг в фазе полной спелости, кадмия – от 0.56–0.59 до 0.35–0.37 мг/кг соответственно. Превышения ПДК в почве подвижных форм меди, свинца и цинка, извлекаемых из почвы ААБ (рН 4.8), не наблюдали [31].

Известно, что на поступление ТМ из почвы в растения влияют такие факторы, как кислотность почвы, гранулометрический состав, содержание органического вещества и погодные условия вегетационного периода [11, 32]. В сухую погоду усиливается процесс перехода ТМ из почвы в растения, в сырую – замедляется. В растительной массе ТМ накапливаются по-разному. Исследованиями доказано, что в корнях накапливается наибольшее количество ТМ, в генеративных органах – наименьшее. По степени насыщенности ТМ основные органы растений обычно располагаются в ряд: корни > листья > стебли > семена (плоды) [33]. Для некоторых ТМ, например, свинца характерна противоположная направленность распределения в органах растений [13]. Это связано с неодинаковой биофильностью элементов. Различия в распределении обусловлены проявлением защитных механизмов растений по отношению к “ненужным” элементам или концентрациям, превышающим потребности.

Анализ различных частей растений озимой ржи показал, что содержание в них меди, свинца

и кадмия было меньше предела обнаружения, а содержание цинка в корнях, стеблях и листьях уменьшалось постепенно при переходе растений из вегетативной фазы в репродуктивную (табл. 4). Содержание цинка в зерне озимой ржи варьировало от 11.5 до 35.3, в соломе – от 7.3 до 19.1 мг/кг и не превышало ПДК для пищевых продуктов [34] и МДУ для кормов сельскохозяйственных животных [35]. Полученная продукция может быть использована как на продовольственные цели, так и на кормовые. Применение удобрений увеличило количество цинка в растениях озимой ржи (корнях, надземной массе, зерне) в 1.1–2.6 раза. Таким образом, в условиях незагрязненной ТМ дерново-подзолистой почвы была получена экологически чистая сельскохозяйственная продукция.

ВЫВОДЫ

1. Длительное систематическое внесение минеральных удобрений способствовало сохранению исходного содержания органического углерода в почве, увеличению содержания подвижного фосфора и обменного калия в 1.3–3.1 раза. Отмечено существенное подкисление дерново-подзолистой почвы. Максимальное влияние на агрохимические показатели почвы наблюдали при дозе NPK150.

2. Установлено, что озимая рожь наиболее интенсивно поглощала азот в фазе кушения и аккумулировала его в основном в стеблях и листьях. Аналогично процесс биологической аккумуляции проходил для фосфора и калия. Их содержание было практически в 2 раза больше в надземной массе, чем в корнях, в фазах кушения и колошения. В фазе полной спелости в зерне аккумулировалось азота и фосфора больше, чем в других органах растений.

3. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почве не зависело от дозы внесенных удобрений. Содержание подвижных форм меди и свинца, извлекаемых ААБ (рН 4.8), в почве во всех фазах роста озимой ржи было ниже предела обнаружения. Внесение НРК оказало влияние в большей степени на содержание в почве подвижных форм кадмия и цинка, извлекаемых ААБ (рН 4.8).

4. Длительное систематическое применение возрастающих доз НРК от 60 до 150 кг д.в./га не привело к накоплению тяжелых металлов в растениях озимой ржи. Концентрация меди, свинца и кадмия была меньше предела обнаружения. Содержание цинка в озимой ржи (корнях, надземной массе, зерне) варьировало от 7.3 до 38.7 мг/кг, что не превышало ПДК для зерна и МДУ для солом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кидин В.В.* Система удобрения. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 534 с.
2. *Елькина Г.Я.* Оптимизация минерального питания растений на подзолистых почвах. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 278 с.
3. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почвы России и пути его регулирования // Плодородие. 2020. № 6. С. 3–13.
4. *Дабахов М.В., Дабахова Е.В., Титова В.И.* Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования. Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2005. 165 с.
5. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л., 1987. 142 с.
6. *Nino-Savala A.G., Zhuang Z., Ma X., Fangmeier A., Li H.F., Tang A.H., Liu X.J.* Cadmium pollution from phosphate fertilizers in arable soils and crops: an overview // Front. Agricult. Sci. Engin. 2019. № 6 (4). P. 419–430. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019273>
7. *Ладонин Д.В., Марголина С.Е.* Взаимодействие гуминовых кислот с тяжелыми металлами // Почвоведение. 1997. № 7. С. 806–811.
8. *Добровольский Г.В., Розанов Б.Г., Гришина Л.А.* Охрана почв на современном этапе. Проблемы почвоведения в агрохимии. М.: Наука, 1986. С. 118–130.
9. *Потатуева Ю.А.* Эколого-агрохимическая оценка фосфорных и фосфорсодержащих удобрений в длительных полевых опытах // Агрохимия. 2013. № 6. С. 83–94.
10. *Митрофанова Е.М.* Агроэкологические аспекты снижения отрицательного влияния кислотности почв в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия Предуралья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Пермь: ПермГСХА им. Д.Н. Прянишникова, 2011. 46 с.
11. *Витковская С.Е.* Оценка риска загрязнения агроэкосистем тяжелыми металлами // Агрохимия. 2013. № 11. С. 78–85.
12. *Соколов О.А., Черников В.А.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. 184 с.
13. *Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Мирошниченко Н.Н., Фатеев А.И., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А.* Накопление и распределение тяжелых металлов в растениях зоны техногенеза // Агрохимия. 2013. № 9. С. 65–75.
14. *Черников В.А., Соколов О.А.* Экологически безопасная продукция. М.: Колос, 2009. 438 с.
15. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 57 с.
16. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
17. *Christopher S.F., Lal R.* Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils // Critic. Rev. Plant Sci. 2007. V. 26. P. 45–64. <https://doi.org/10.1080/07352680601174830>
18. *Verdenelli R.A., Dominchin M.F., Perez-Brandan C., Rovea A., Vargas-Gil S., Meriles J.M.* Effect of long-term mineral fertilisation on soil microbial abundance, community structure and diversity in a Typic Hapludoll under intensive farming systems // Annal. Appl. Biol. 2019. V. 3 (175). P. 363–375. <https://doi.org/10.1111/aab.12546>
19. *Шмырева Н.Я.* Использование азота удобрений озимой рожью при различных способах внесения азотных удобрений в условиях эрозионных ландшафтов // Агрохимия. 2007. № 10. С. 44–49.
20. *Шарифуллин Л.Р., Кольцов А.Х., Марьин Г.С.* Интенсивные технологии возделывания озимой ржи. М.: Агропромиздат, 1989. 125 с.
21. *Минеев В.Г.* Агрохимия. М.: Наука, 2006. 719 с.
22. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
23. *Елькина Г.Я., Денева С.В., Лантева Е.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение в биогеоценозах Большеземельной тундры // Теор. и прикл. экол. 2019. № 3. С. 41–47. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-041-047>
24. *Сычев В.Г., Аристархов А.Н.* Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротекс, 2003. 240 с.
25. *Арышева С.П., Анисимов В.С., Санжарова Н.И.* Изучение миграционной способности Рb в системе почва–растение и его фитотоксичность в почвах разного типа // Агрохимия. 2013. № 1. С. 85–94.
26. *Убугунов В.Л., Доржонова В.О.* Оценка фитотоксичности свинца в дерново–подбуре // Вестн. ТомскГУ. 2010. № 338. С. 207–211.
27. *Дмитраков Л.М., Дмитракова Л.К., Абашина Н.А., Пинский Д.Л.* Влияние свинца на морфометрические показатели овса // Агрохимия. 2004. № 8. С. 48–53.

28. *Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Казнина Н.М.* Влияние ионов свинца на рост и морфофизиологические показатели растений ячменя и овса // Физиол. и биохим. культ. раст. 2001. Т. 33. № 5. С. 387–393.
29. *Елькина Г.Я.* Поведение свинца в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрехимия. 2015. № 8. С. 73–80.
30. *Мельничук Ю.П.* Влияние ионов кадмия на клеточное деление и рост растений. Киев: Наукова думка, 1990. 148 с.
31. ГН 2.1.7.2041-06 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве”. М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 2006.
32. *Водяницкий Ю.Н.* Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах // Почвоведение. 2014. № 4. С. 420–432.
33. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва–растение // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1112–1119.
34. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Минздрав РФ, 2002.
35. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М.: Госагропром СССР, ГУ ветеринарии, 1987. 5 с.

Influence of the Mineral Fertilizers on Sod-Podzolic Soil Fertility, Content of Major Nutrients and Heavy Metals in Winter Rye

N. E. Zavyalova^{a, #}, M. T. Vashieva^a, and D. G. Shyshkov^a

^a Perm Research Institute of Agriculture of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS
ul. Kul'tury 12, Perm Territory, Lobanovo 614532, Russia

[#]E-mail: nezavyalova@gmail.com

It was studied the effect of prolonged systematic use (40 years) of increasing doses of mineral fertilizers on soil fertility indicators. There was an increase in the content of organic carbon by 1.2–1.3 times, mobile phosphorus and exchange potassium by 1.3–3.1 times. Significant soil acidification was noted. Maximum changes were observed at a dose of NPK of 150 kg a.v./ha. The distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in winter rye plants (roots, aerial mass, grain) is considered. The effect of mineral fertilizers on the content of mobile forms of heavy metals (extract 1n. HCl and AAB with pH 4.8) in the soil was studied, and their input into plants was assessed by the phases of development of winter rye (tillering, heading, full ripeness).

Key words: long stationary experience, agrochemical properties of the soil, heavy metals.