

УДК 631.412:632.122.1:631.445.41

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО И ЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

© 2019 г. А. Х. Шеуджен¹, Н. Н. Нещадим¹, Н. Г. Гайдукова¹, И. В. Шабанова^{1,*}

¹ Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина
350044 Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

*E-mail: Shabanova_I_V@mail.ru

Поступила в редакцию 26.10.2017 г.

После доработки 09.09.2018 г.

Принята к публикации 12.10.2018 г.

В длительном полевом опыте (1991–2013 гг.) изучено влияние погодных условий и различных агротехнологий возделывания полевых культур 11-польного зернотравянопропашного севооборота на плодородие чернозема выщелоченного Западного Предкавказья (Luvic Chernic Phaeozems (Pachic)) и степень загрязнения почвы Mn, Cu, Co, Zn, Cd и Pb. Выявлена тенденция к снижению буферных свойств, дегумификации и повышению содержания подвижного фосфора в слое 0–40 см почвы при экстенсивной технологии производства зерна. Применение удобрений способствовало улучшению гумусного состояния пахотного слоя. Валовое содержание тяжелых металлов (ТМ) в слое 0–40 см составляло 0.5–0.7 ПДК. Показана низкая подвижность соединений Cu, Co, Zn в пахотном слое, количество подвижных форм всех изученных элементов было меньше ПДК, степень актуальной подвижности ТМ менялась в последовательности Cd > Mn > Co > Pb > Zn > Cu, отмечен дефицит содержания подвижной меди как микроэлемента.

Ключевые слова: природные и антропогенные факторы, физико-химические свойства почвы, чернозем выщелоченный, загрязнение почвы, тяжелые металлы.

DOI: 10.1134/S0002188119010095

ВВЕДЕНИЕ

Черноземы – важнейшие почвы для производства продовольственного зерна в Российской Федерации – обладают высоким потенциальным плодородием. Однако интенсификация земледелия, способствующая повышению урожайности зерновых культур, оказывает негативные воздействия на все звенья агроэкосистемы: почву, грунтовые воды, продукцию растениеводства [1].

Мониторинговые исследования почв, проводимые со второй половины XX в., фиксируют нарастание деградационных процессов в сельскохозяйственных угодьях многих стран, в т.ч. и в Российской Федерации [2, 3]. Почвенный покров подвергается воздействию как природных явлений (нарушению водного режима, ветровой эрозии, повышению среднегодовой температуры), так и антропогенных факторов, среди которых – увеличение объема применения агрохимических средств (удобрений, пестицидов, мелиорантов), вспашка, возделывание монокультур, что приводит к химической деградации почв. Особую оза-

боченность вызывают процессы дегумификации пахотного слоя, увеличение содержания подвижных фосфатов, снижение буферной способности почв по отношению к загрязняющим веществам – пестицидам, нитратам, тяжелым металлам [4, 5].

Тяжелые металлы (ТМ) способны изменять биологические свойства почвы, гумусное состояние, кислотность и др., что приводит к накоплению в продукции земледелия ТМ, в частности, металлов 1-го класса опасности (Zn, Cd, Pb) [6]. Проблема получения безопасной продукции является актуальной для всех стран. Одним из наиболее опасных загрязнителей является кадмий. В нашей стране предельно допустимая концентрация (ПДК) кадмия в продовольственном зерне составляет 0.1 мг/кг (СанПиН 2.3.2 1078-01), в странах ЕС ПДК кадмия для пшеницы равен 0.2 мг/кг. В работах ряда зарубежных авторов отмечен рост содержания Zn, Cd и Pb в почвах и растительной продукции: в Великобритании содержание кадмия в зерне пшеницы находится в пределах 0.01–0.3 мг/кг, Венгрии – 0.06–0.6, Швеции – 0.08–0.25 мг/кг [7]. Тенденция к возрастанию содержа-

ния кадмия и свинца в зерновой продукции выявлена и в Российской Федерации [8, 9]. Одним из источников увеличения концентрации кадмия в почвах и в продукции растениеводства исследователи считают минеральные и органические удобрения [10–14].

Цель работы – исследование закономерности изменения физико-химических показателей чернозема выщелоченного Западного Предкавказья и накопления ТМ в пахотном слое под воздействием природных факторов и агрохимических средств в условиях длительного полевого опыта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 1991–2013 гг. в стационарном многофакторном полевым опыте, заложенном в 1991 г. на опытной станции Кубанского госагроуниверситета (КубГАУ, г. Краснодар). В опыте изучают 11-польный зернотравянопропашной севооборот со следующим чередованием культур: люцерна–люцерна–озимая пшеница–озимый ячмень–подсолнечник–озимая пшеница–кукуруза на зерно–озимая пшеница–сахарная свекла–озимая пшеница–яровой ячмень с подсевом люцерны. Полевой опыт представлен 4-мя факторами: *A* – плодородие почвы, *B* – система удобрения, *C* – система защиты растений, *D* – система основной обработки почвы. Перед закладкой опыта (1991 г.) было проведено агрохимическое обследование почвы опытного поля (слой 0–40 см) для определения основных агрохимических показателей: емкости катионного обмена, потенциальной и актуальной кислотности почвенного раствора, содержания гумуса, элементов питания (NPK, микроэлементов) и тяжелых металлов. Для изучения закономерностей изменения свойств почвы под влиянием различных агротехнологий возделывания полевых культур в опыте были созданы модели уровней плодородия путем единовременного внесения навоза и суперфосфата (4 уровня фактора *A*): *A0* – естественный, *A1* – средний (внесены P200 и полупрепревший навоз КРС 200 т/га), *A2* – повышенный (удвоенные дозы P₂O₅ и навоза), *A3* – высокий (тройные дозы P₂O₅ и навоза). Для поддержания запланированных моделей почвенного плодородия во 2-й ротации севооборота навоз и суперфосфат вносили под кукурузу на зерно. Второй изученный фактор (*B*, система удобрения в севообороте): *B1* – минимальная доза (в среднем (NPK)91), *B2* – средняя доза ((NPK)182), *B3* – высокая – (NPK)364. Третий фактор *C* – защита растений: *C0* – без применения средств защиты растений, *C1* – биологическая защита от вредителей и бо-

лезней, *C2* – химическая защита от сорняков, *C3* – химическая защита растений от болезней, вредителей и сорняков. Четвертый фактор *D* – система основной обработки почвы: *D1* – безотвальная, *D2* – рекомендуемая для зоны (общепринятая, применяемая в хозяйствах), *D3* – отвальная обработка почвы с периодическим глубоким рыхлением до 70 см дважды в ротацию (перед посевом подсолнечника). Озимая пшеница (после люцерны): *D1* – дискование на 10–12 см после 2-го укоса люцерны, безотвальная обработка на 18–22 см; *D2* – дискование на 10–12 см после 2-го укоса люцерны, отвальная вспашка на 18–22 см, *D3* – дискование на 10–12 см после 2-го укоса люцерны, отвальная вспашка на 18–22 см. Озимая пшеница (после подсолнечника): *D1* – 2–3-кратное дискование на 10–12 см; *D2* – 2–3-кратное дискование на 10–12 см, *D3* – 2-кратное дискование на 6–8 см, отвальная вспашка на 18–22 см.

В опыте изучают 48 технологий возделывания каждой культуры севооборота. Площадь делянки общая: 4.2 м × 25.0 м = 105 м², учетная для культур сплошного посева – 2.0 м × 17.0 м = 34 м², учетная для сахарной свеклы – 3.15 м × 17.0 м = 53.6 м², для кукурузы и подсолнечника – 2.8 м × 17.0 м = 47.6 м². Повторность опыта трехкратная, расположение делянок систематическое в 2-х блоках. Каждое поле севооборота имеет 144 делянки и занимает площадь 1.75 га (160.0 м × 109.2 м).

Полная схема опыта содержит 192 варианта, имеющих условные обозначения: первая цифра – уровень плодородия, вторая – система удобрения, третья – защита растений. Базовые варианты (технологии): 000 – контроль – экстенсивная технология, 111 – беспестицидная (N45P30K20), 222 – экологически допустимая (N90P60K40), 333 – интенсивная технология (N180P120K80). Почва опытного поля – чернозем выщелоченный слабогумусный сверхмощный легкоглинистый (по классификации почв России 2004 г. – агрочернозем глинисто-иллювиальный агрогенно переуплотненный глинистый; по WRB (2014 г.) – Phaeozems (Файоземы): Luvic Chernic Phaeozems (Pachic) с глубиной вскипания от 10%-ной HCl более чем 50 см от нижней границы горизонта AU; горизонты: PU1, PU2, PU3ad, AUi, AUb.i, BI, BCAmc, BCAmc.nc). Во время ротации севооборота образцы почвы отбирали на глубине 0–20 см (пахотный) и 20–40 см (подпахотный) под посевами пшеницы, ячменя, люцерны; сахарной свеклы, кукурузы и подсолнечника – глубине 0–30 см (пахотный) и 30–60 см (подпахотный). Перед очередной ротацией образцы отбирали из горизонтов почвенного разреза на глубину до гори-

зонта С включительно (до 240 см). Общими чертами морфологического строения профиля чернозема выщелоченного были: хорошо выраженная оформленность генетических горизонтов, большая мощность гумусового слоя (до 174 см), довольно однородная окраска почвенного профиля, средне уплотненное сложение почвенного профиля (за исключением пахотного слоя), хорошая оструктуренность почвенных горизонтов.

Гранулометрический состав почвы: содержание физической глины 59.1–63.9%, илистых частиц – 33.5–39.9%, песка – 2.8–6.3%. Валовые запасы фосфора и калия: K_2O – 1.9–2.0%; P_2O_5 – 0.18–0.26%. В пахотном слое почвы содержание подвижного фосфора составляло 130–150 мг/кг, гумуса – 2.9–3.6%, величины актуальной кислотности (pH_{H_2O}) 6.5–7.2, обменной кислотности (pH_{KCl}) 5.2–5.8.

Погодные условия в годы исследования: по увлажнению близкими к среднемноголетним данным (643 мм) были 2000, 2003, 2012 гг., переувлажненными (на 25–35% больше среднемноголетней нормы) – 1997, 1998, 2001, 2004, 2011 гг., с недостаточным увлажнением (на 20–30% меньше среднемноголетней нормы) – 2007, 2009, 2013 гг. За период исследования среднегодовое количество осадков составило 734 мм (на 91 мм больше среднемноголетней нормы). Промачивание почвы осадками достигало глубины 2-х м и более – до материнской породы. Среднегодовая температура воздуха превышала среднемноголетнюю (10.8°C) на 1.8–3.0°C.

Использованы следующие методы исследования почвенных образцов: содержание гумуса – по Тюрину (ГОСТ 26213-91), содержание подвижного фосфора – по Чирикову (ГОСТ 26204-91), гидролитическая кислотность – по Каппену (ГОСТ 26212-91), актуальная и обменная кислотность – потенциометрическим методом (ГОСТ 26423-85), кислоторастворимые соединения ТМ – по методу ЦИНАО в групповой азотнокислой вытяжке (МУ МСХ от 23.12.1993) на пламенном атомно-абсорбционном спектрометре “КВАНТ-2АТ”, содержание подвижных форм соединений ТМ – в групповой ацетатно-аммонийной вытяжке (РД 52.18.289-90) на атомно-абсорбционном спектрометре “КВАНТ-Z” с электротермической атомизацией, валовое содержание ТМ – методом рентгено-флуоресцентного анализа (прибор “МАКС-G”).

Полученные данные обработаны методом дисперсионного анализа [15].

Таблица 1. Динамика физико-химических свойств и содержания гумуса в пахотном слое чернозема выщелоченного (1991–2013 гг., контроль (экстенсивная технология), опытная станция КубГАУ, $n = 3$)

Показатель	Год				
	1991	1997 (±, %)	2003 (±, %)	2008 (±, %)	2013 (±, %)
Емкость катионного обмена (ЕКО), моль(экв)/100 г	39.5	36.6 (–7.3)	38.0 (–3.8)	41.4 (+4.8)	37.5 (–5.1)
Степень насыщенности основаниями, V , %	90.6	95.0 (+5.0)	92.6 (+2.2)	92.0 (+1.6)	91.8 (+1.3)
Актуальная кислотность, pH_{H_2O}	6.40	6.80 (+6.3)	6.72 (+5.0)	6.59 (+3.0)	6.69 (+4.5)
Обменная кислотность, pH_{KCl}	5.30	5.45 (+2.8)	5.38 (+1.2)	5.35 (+0.9)	5.39 (+1.2)
Гидролитическая кислотность H_T , моль(экв)/100 г	1.9	2.98 (+56.8)	4.38 (+131)	4.13 (+117)	2.77 (+45.8)
Гумус, %	3.14	3.05 (–0.09)	2.95 (–0.19)	2.89 (–0.21)	2.97 (–0.17)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение физико-химических свойств чернозема выщелоченного в период 1991–2013 гг. при выращивании озимой пшеницы на фоне экстенсивной технологии (вариант 000) выявило снижение емкости катионного обмена (ЕКО) в годы с повышенным увлажнением (960 мм, 1997 г.). Переувлажнение и повышенная температура в годы исследования способствовали усилению процессов выщелачивания (табл. 1). В период с 2003 по 2008 г. водный режим был умеренно влажным, что способствовало стабилизации поглотительной способности почвы – в 2008 г. установлена максимальная величина ЕКО, снижение этого показателя в 2013 г. было обусловлено переувлажнением (863 мм, 2011 г.).

Степень насыщенности основаниями в годы исследования была выше исходной (1991 г.), что указывало на снижение содержания в почве катионов водорода (H^+) и алюминия (Al^{3+}). Актуальная кислотность почвенного раствора (pH_{H_2O}) снижалась, что свидетельствовало о процессах гидролиза в почве гидролитически щелочных солей (гидрокарбонатов натрия, калия): этот показатель был максимальным в 1997 г. при избытке влаги. Отмечена тенденция к росту обменной кислотности (на $\approx 1.2\%$), гидролитическая кис-

Таблица 2. Влияние технологий возделывания озимой пшеницы на физико-химические свойства почвы и содержание гумуса (1997–2013 гг., опытная станция КубГАУ, обработка D2, слой 0–40 см почвы, $n = 3$)

Технологии (вариант, НРК)	Год				НСП ₀₅
	1997	2003	2008	2013	
Емкость катионного обмена, смоль(экв)/100 г					
Беспестицидная (111, N45P30K20)	36.7	39.7	36.9	36.3	0.4
Экологически допустимая (222, N90P60K40)	36.7	40.5	37.9	36.9	
Интенсивная (333, N180P120K80)	36.9	40.9	38.2	37.5	
Актуальная кислотность, рН _{H₂O}					
Беспестицидная (111)	6.88	6.60	7.02	6.71	0.09
Экологически допустимая (222)	6.89	6.74	6.77	6.77	
Интенсивная (333)	6.88	6.65	6.60	6.78	
Гидролитическая кислотность, смоль(экв)/100 г					
Беспестицидная (111)	2.85	3.81	3.83	3.53	0.11
Экологически допустимая (222)	2.79	3.69	3.71	3.32	
Интенсивная (333)	2.63	3.18	3.97	3.23	
Гумус, %					
Беспестицидная (111)	3.35	3.41	3.47	3.48	0.10
Экологически допустимая (222)	3.46	3.50	3.56	3.55	
Интенсивная (333)	3.56	3.65	3.68	3.71	

лотность почвы в годы исследования повысилась на ≈46%.

Исследования гумусного состояния пахотного слоя почвы (0–40 см) в контрольном варианте выявили тенденцию к дегумификации чернозема выщелоченного (≈0.02% в год). Изучение влияния системы удобрения озимой пшеницы на динамику физико-химических показателей и содержание гумуса в пахотном слое в условиях рекомендуемой обработки почвы (D2, применяемая в хозяйствах края) показало повышение емкости катионного обмена в условиях экологически допустимой (N90P60K40) и интенсивной (N180P120K80) технологий (табл. 2). Актуальная кислотность стабилизировалась на уровне 6.79 и 6.73 (оптимальный диапазон для выращивания озимой пшеницы), что свидетельствовало о повышении буферных свойств почвы. Отмечено улучшение гумусного состояния пахотного слоя чернозема выщелочен-

ного во всех вариантах с применением удобрений – прибавка его запасов за 2 ротации севооборота составила от 0.34% (вариант N45P30K20) до 0.57% при внесении высоких доз (вариант N180P120K80).

Влияние способов основной обработки почвы на физико-химические свойства почвы проявилось в увеличении показателя ЕКО в условиях рекомендуемой обработки – при беспестицидной технологии на 10.5, при интенсивной – на 17.4%. При безотвальной обработке почвы происходило снижение ЕКО при использовании экологически допустимой и интенсивной технологий на 6.5 и 3.4% соответственно, применение отвальной обработки почвы (D3) способствовало незначительному повышению ЕКО в условиях экологически допустимой (1.2%) и интенсивной (3.5%) технологий.

Применение удобрений в условиях рекомендуемой обработки почвы вызывало незначительный рост гидролитической кислотности: при беспестицидной технологии (111) – на 13.7% к контролю, на фоне повышенного плодородия (222, N90P60K40) – на 7.9%, высокого (333, N180P120K80) – на 3.9%. Влияние безотвальной обработки (D1) почвы на величину гидролитической кислотности зависело от уровня плодородия: в условиях исходного плодородия (вариант 000) и среднего (111) происходило ее увеличение на 13.7 и 7.9%, на фоне повышенного (222) и высокого плодородия (333) гидролитическая кислотность снижалась на 7.9 и 4.2% соответственно. При безотвальной обработке (D1) актуальная кислотность почвенного раствора изменялась незначительно: беспестицидная технология повышает на 2.5%, экологическая и интенсивная – снижали этот показатель на 0.3 и 0.4%. Вероятно, это объясняется недостаточной аэрацией почвенного слоя, снижением микробиологической активности и меньшей растворимостью удобрений в условиях безотвальной обработки. Отвальная обработка (D3) чернозема выщелоченного способствовала стабилизации гидролитической кислотности, незначительное увеличение отмечено на фоне повышенного плодородия (вариант 222) – ≈3.0% и высокого (вариант 333) – ≈6.3%. На реакцию почвенного раствора отвальная обработка влияла неоднозначно: в условиях беспестицидной технологии (вариант 111) кислотность повысилась на 1.5%; экологическая (вариант 222) и интенсивная (вариант 333) технологии снизили этот показатель (2008 г.) на 1.5 и 3.4% соответственно. Подщелачивание почвенного раствора при внесении удобрений могло быть связано с последствием навоза, внесенного под кукурузу на зерно.

Содержание подвижного фосфора в пахотном слое чернозема выщелоченного в течение 2-х ротаций 11-польного зернотравянопропашного се-

вооборота (1992–2013 гг.) повысилось во всех вариантах опыта: в условиях экстенсивной технологии содержание подвижных фосфатов в пахотном слое чернозема выщелоченного перед закладкой опыта соответствовало среднему уровню обеспеченности (158 мг/кг), за годы 1-й ротации севооборота содержание подвижного фосфора в контрольном варианте возросло до высокого уровня – прибавка составила 14.5%, за годы 2-й ротации – до очень высокого (>200 мг/кг): прибавка составила 43.7% (рис. 1).

Увеличение содержания подвижного фосфора в пахотном слое почвы в условиях экстенсивной технологии могло быть вызвано внутрпочвенным выветриванием под воздействием кислотных дождей, ветровой эрозии. Беспестицидная технология (111, N45P30K20) способствовала увеличению содержания подвижного фосфора за 1-ю ротацию севооборота относительно фона (1991 г.) на 34.2%, по сравнению с контрольным вариантом – на 14.6%, за 2-ю ротацию – на 29%. Экологически допустимая технология (222, N90P60K40) за 1-ю ротацию (1992–2003 гг.) вызвала увеличение содержания подвижных фосфатов относительно фона (1991 г.) на 58.2%, по сравнению с контролем – на 35.1%, за 2-ю ротацию (2003–2014 гг.) – на 40.5%. Повышение содержания фосфат-ионов в почвенном растворе в условиях интенсивной технологии (333, N180P120K80) по сравнению с контролем за 1-ю ротацию составило 50.3, за 2-ю – 93.8%. Значительный рост количества подвижного фосфора в пахотном слое, превышающий очень высокий уровень в 1.5–2.0 раза – признак снижения фосфатной буферности почвы и проявления процесса фосфатизации. Избыток ионов

$H_2PO_4^-$ в почвенном растворе ведет к подкислению, что может увеличивать подвижность соединений ТМ и, как следствие этого, их накопление в продукции растениеводства [16]. Кроме того, усиливаются процессы внутрпочвенного выветривания – химическая деградация прочно фиксированных соединений. Высокое содержание фосфат-ионов в почве при снижении влажности может способствовать образованию труднодоступных для растений форм микроэлементов в виде ортофосфатов, например, цинка (произведение растворимости $Zn_3(PO_4)_2 = 9.1 \times 10^{-33}$).

Почва опытного поля характеризовалась минимальным и умеренно-опасным уровнем загрязнения ТМ [17]. Минеральные удобрения и навоз, примененные в исследовании, содержали примеси ТМ (мг/кг сухого вещества): навоз (Mn – 469, Cu – 47.6, Zn – 112, Co – 10.8, Pb – 4.1, Cd – 0.1), аммофос (Mn – 85.0, Cu – 13.0, Zn – 13.7, Co – 0.6, Pb – 0.6, Cd – 0.4), хлористый калий (Mn – 6.81, Cu – 0.88, Zn – 3.33, Co – 0.05, Pb – 0.22, Cd – 0.05), аммиачная селитра (Mn – 7.23, Cu – 1.60, Zn – 5.97, Co – 0.40, Pb – 0.42,

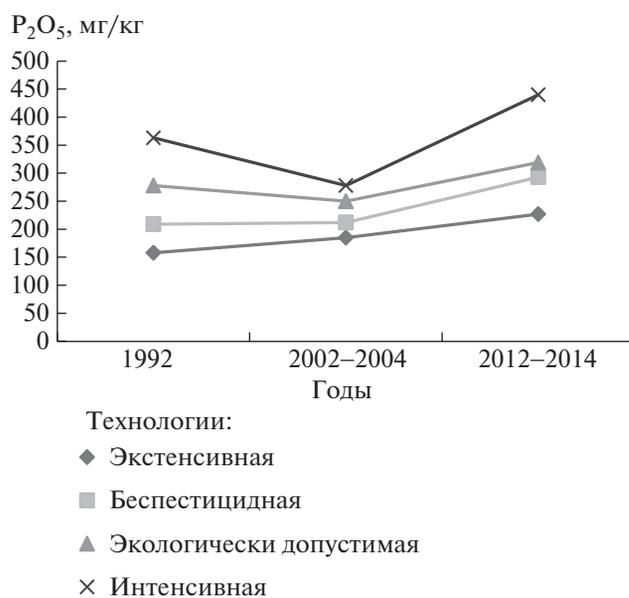


Рис. 1. Динамика содержания подвижного фосфора в пахотном слое чернозема выщелоченного при различных технологиях выращивания озимой пшеницы. Стандартное отклонение, %: 1992 г. – 15.6, 2002–2004 гг. – 13.5, 2012–2014 гг. – 16.7.

Cd – 0.099). Учитывая содержание ТМ в удобрениях, влажность и дозы внесения в вариантах, было рассчитано поступление тяжелых металлов в почву с удобрениями в течение полной ротации севооборота (табл. 3).

Кроме удобрений, источником поступления ТМ в пахотный слой почвы были атмосферные выпадения (осадки, пыльные бури, дым). Этими явлениями, очевидно, был обусловлен рост содержания кислоторастворимых соединений меди и цинка в контрольном варианте в течение 1-й ротации севооборота на 11.4% (медь) и 59% (цинк).

Таблица 3. Поступление тяжелых металлов в почву с удобрениями за полную ротацию севооборота, кг/га (1992–2003 гг.)

Вариант (технология)	Тяжелые металлы, кг/га % от фона (1991 г.)					
	Mn	Cu	Zn	Co	Pb	Cd
N45P30K20 (111, беспестицидная)	59.8	6.1	14.3	1.4	0.5	0.01
	4.12	11.6	10.9	4.8	0.89	0.85
N90P60K40 (222, экологически допустимая)	120	12.3	28.6	2.8	1.0	0.02
	8.3	23.2	21.8	9.6	1.8	1.7
N180P120K80 (333, интенсивная)	239	24.5	57.3	5.6	2.0	0.04
	16.6	46.4	43.6	19.4	3.6	3.5

Таблица 4. Динамика содержания подвижных соединений Mn, Cu, Co, Zn и Pb в пахотном слое (2003–2013 гг., культура – озимая пшеница, опытная станция КубГАУ, рекомендуемая обработка почвы (D2), $n = 3$)

Вариант	Содержание ТМ, мг/кг почвы									
	Mn		Cu		Zn		Co		Pb	
	2003 г.	2013 г.	2003 г.	2013 г.	2003 г.	2013 г.	2003 г.	2013 г.	2003 г.	2013 г.
Контроль (000)	25.5	92.1	0.59	0.14	2.22	0.59	0.09	0.27	0.58	1.70
111	27.8	94.1	0.30	0.13	3.43	0.62	0.05	0.22	0.83	2.00
222	24.6	97.5	0.70	0.11	2.22	0.59	0.08	0.24	0.62	1.70
333	25.7	94.6	0.65	0.13	3.43	0.62	0.12	0.23	1.15	2.10
Среднее	25.9	94.5	0.56	0.13	2.22	0.59	0.09	0.24	0.79	1.88
<i>HCP</i> _{0.5}	0.6	1.0	0.06	0.04	0.83	0.05	0.03	0.04	0.24	0.18

Mn, Cu, Zn и Co имеют важное значение как микроэлементы для роста, развития и формирования урожая полевых культур. Характер изменения содержания подвижных соединений этих элементов в годы исследования был различным. В условиях экстенсивной технологии концентрация подвижных форм марганца возросла с 2006 г. по 2013 г. более, чем в 5 раз, количество подвижных форм меди снизилось в 5 раз, содержание подвижных форм кобальта увеличилось в 1.9 раза (табл. 4). Внесение удобрений способствовало повышению содержания подвижных форм марганца во всех вариантах, содержание подвижных форм меди и кобальта при беспестицидной технологии (111) снижалось, в условиях экологически допустимой (222) и интенсивной (333) технологий – незначительно возрастало. Результаты исследования не выявили превышения ПДК подвижных форм (ААБ-вытяжка, рН 4.8) тяжелых металлов в пахотном слое чернозема выщелоченного (ПДК, мг/кг: Mn – 140, Cu – 5, Co – 4, Zn – 23 и Pb – 5, в том числе и по нормативам эколого-токсикологической оценки (ГН 2.1.7.2041-06) ПДК, мг/кг: Mn – 80, Cu – 1.5, Co – 2.5, Zn – 10.0, Pb – 3.0).

Содержание подвижных форм кадмия в контрольном варианте в 2006 г. составило 1.1 ПДК, в остальные годы исследования концентрация подвижного кадмия находилась на уровне 0.5–0.7 ПДК эколого-токсикологической оценки (0.1 мг Cd/кг почвы). Цинк, свинец и кадмий относятся к элементам 1-го класса опасности, возможен процесс накопления их в продукции растениеводства. В отдельные годы была выявлена тенденция к повышению содержания подвижных соединений Mn, Zn, Pb и Cd в почве. Для оценки влияния водного режима на динамику содержания подвижных форм Mn, Cu, Zn, Pb, Cd и Co в пахотном слое чернозема выщелоченного использовали корреляционный анализ: прямая корреляционная связь выявлена только для соединений меди ($r = 0.564$), обратная для Mn ($r = -0.315$), Pb

($r = -0.541$), Cd ($r = -0.404$) и Co ($r = -0.386$), водный режим почвы не оказывал влияния на содержание подвижных соединений цинка в пахотном слое ($r = 0.092$). Внесение удобрений в условиях повышенного увлажнения способствовало увеличению содержания подвижных соединений меди и цинка и снижению подвижных форм марганца и кобальта в пахотном слое почвы – происходил процесс их вымывания в нижние горизонты [18]. Во всех вариантах опыта содержание подвижных форм Cu, Zn, Pb и Co было меньше фоновое и ПДК, в 2013 г. количество подвижного марганца превысило ПДК по эколого-токсикологической оценке на 15%. В настоящее время при анализе состава соединений ТМ в почвах основное внимание уделяется соотношению прочнофиксированных и непрочносвязанных форм с почвенными компонентами.

Способы обработки почвы влияли на содержание различных форм ТМ в пахотном слое чернозема выщелоченного (2009–2013 гг., контроль, рис. 2). Результаты исследования зависимости валового содержания ТМ (ВФ) от способов обработки почвы – безотвальной (D1), рекомендуемой (D2), отвальной (D3) позволили получить следующие ряды в убывающем порядке (мг/кг): марганец – D2 (790) > D3 (751) > D1 (736), медь – D2 (87.1) > D1 (79.0) > D3 (74.0), цинк – D1 (78.6) > D3 (76.0) > D2 (74.5), свинец – D2 (21.1) > D3 (19.0) > D1 (18.0), кобальт – D3 (22.0) > D2 (21.0) > D1 (19.5). Валовое содержание кадмия рентгенофлуоресцентным методом достоверно определено не было. Общее количество изученных ТМ было меньше ПДК во всех вариантах опыта, за годы исследования (с 1991 г.) возросло валовое содержание свинца в пахотном слое почвы на 15% при рекомендуемой обработке почвы (D2).

Анализ почвенных образцов на содержание кислоторастворимых соединений (экстрагент HNO₃, 5 М) ТМ выявил следующий характер зависимости этих форм от способа обработки поч-

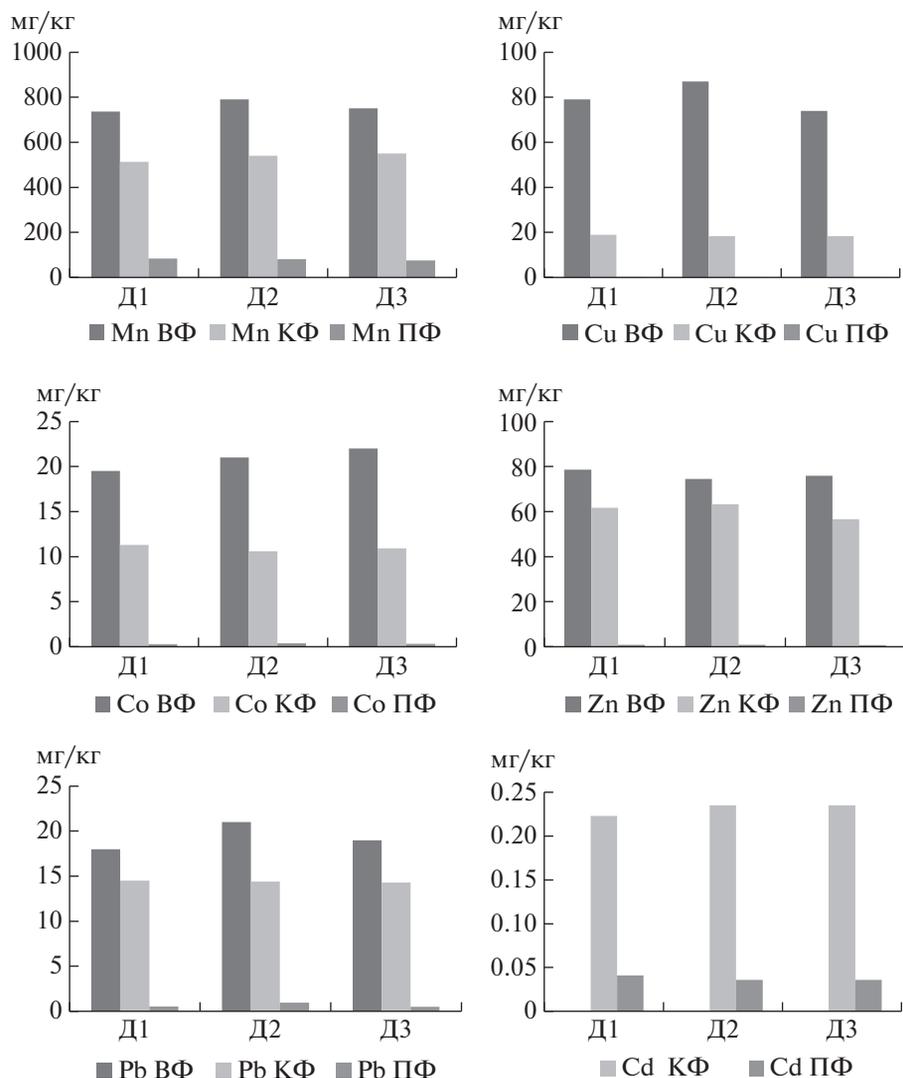


Рис. 2. Изменение валового содержания (ВФ), кислоторастворимых (КФ) и подвижных (ПФ) форм Mn, Cu, Zn, Co, Pb и Cd при различных способах основной обработки почвы (контроль, слой 0 – 20 см): D1 – безотвальная, D2 – рекомендуемая (применяемая в хозяйствах), D3 – отвальная обработка. Содержание подвижных форм меди, цинка и кобальта составило (среднее, мг/кг): Cu – 0.18, Zn – 0.6 и Co – 0.20; стандартное отклонение, %: $Mn_{ВФ}$ – 9.2, $Mn_{КФ}$ – 17.0, $Mn_{ПФ}$ – 7.5, $Cu_{ВФ}$ – 31.0, $Cu_{КФ}$ – 4.7, $Cu_{ПФ}$ – 8.9, $Zn_{ВФ}$ – 18.0, $Zn_{КФ}$ – 6.8, $Zn_{ПФ}$ – 11.0, $Co_{ВФ}$ – 38.0, $Co_{КФ}$ – 7.8, $Co_{ПФ}$ – 19.0, $Pb_{ВФ}$ – 25.0, $Pb_{КФ}$ – 5.9, $Pb_{ПФ}$ – 16.0, $Cd_{КФ}$ – 18.0, $Cd_{ПФ}$ – 28.0.

вы (мг/кг): марганец – D₃ (550) > D₂ (540) > D₁ (513), медь – D₁ (18.9) > D₂ (18.4) ≈ D₃ (18.4), цинк – D₂ (63.3) > D₁ (61.7) > D₃ (56.6), свинец – D₁ (14.5) > D₂ (14.4) > D₃ (14.3), кобальт – D₁ (11.3) > D₃ (10.9) > D₂ (10.6), кадмий – D₂ (0.235) ≈ D₃ (0.235) >> D₁ (0.223).

Количество кислоторастворимых форм цинка и свинца превышало кларк валового содержания: на 13–27% – Zn и 45% – Pb. Азотная кислота извлекала из почв несколько форм соединений ТМ – воднорастворимые, обменные, карбонаты, фосфаты, сульфиды и другие малорастворимые в воде соли; при нагревании возможно извлечение соединений металлов, соосажденных в оксидах же-

леза и марганца. К прочнофиксированным формам относят комплексы ТМ с органическими соединениями и связанные в структуры силикатов.

Установлено, что наибольшая доля прочнофиксированных соединений (в % от валового содержания) выявлена для меди – 76–79% в зависимости от способа обработки почвы, что указывало на высокую буферность чернозема выщелоченного Западного Предкавказья по отношению к меди как ТМ: медь переходит в труднодоступные соединения с почвенными компонентами [15]. Доля прочнофиксированных соединений Mn, Co, Zn и Pb в пахотном слое почвы (обработка D₂) составила: 31.6, 49.5, 20.9 и 31.4% соответственно.

Количество прочнофиксированных соединений ТМ зависело от природных факторов, доз внесенных удобрений и способов обработки почвы. Установлены следующие ряды изученных элементов по содержанию прочнофиксированных соединений в зависимости от способа основной обработки почвы: безотвальная обработка (*D1*) – $\text{Cu} > \text{Co} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Pb}$, рекомендуемая (*D2*) – $\text{Cu} > \text{Co} > \text{Mn} \sim \text{Pb} > \text{Zn}$, отвальная (*D3*) – $\text{Cu} > \text{Co} > \text{Mn} \sim \text{Zn} > \text{Pb}$. Цинк и свинец относятся к ТМ I-го класса опасности, доля прочнофиксированных соединений этих элементов меньше, чем меди, марганца и кобальта, что указывало на возможность загрязнения почв и продукции земледелия этими металлами. Способ обработки почвы оказывал влияние на соотношение прочнофиксированных и кислоторастворимых соединений цинка и свинца: в условиях безотвальной (*D1*) и отвальной (*D3*) обработок в пахотном слое чернозема выщелоченного увеличивалось содержание кислоторастворимых соединений Pb.

Свинец и кадмий относятся к особо опасным загрязняющим веществам, поэтому важное экологическое значение имеет потенциальная доступность (доля кислоторастворимых форм от валового содержания) этих элементов для сельскохозяйственных культур. Для соединений цинка и свинца выявлена высокая степень потенциальной доступности – 68–80% Pb, максимальная отмечена при безотвальной обработке; 75–85% Zn, при этом максимальная отмечена при рекомендуемой обработке. При применении рекомендуемой обработки почвы потенциальная доступность ТМ уменьшалась в ряду $\text{Zn} > \text{Mn} \sim \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cu}$. Удобрения влияли на перераспределение свинца и кобальта в почвенном профиле – отмечена миграция их соединений в нижние профили (АВ2 и В). В пахотном горизонте аккумуляровались подвижные соединения марганца, цинка, кадмия [19]. Характер корреляционной связи количества кислоторастворимых форм с водным режимом был различным: прямая – для соединений Pb ($r = 0.665$) и кадмия ($r = 0.708$), обратная – меди ($r = -0.789$), цинка ($r = -0.529$) и кобальта ($r = -0.412$). Тесная связь емкости катионного обмена и гидролитической кислотности почвы с содержанием кислоторастворимых форм ТМ выявлена для меди (0.844 и 0.832) и кобальта (0.816 и 0.830).

Соединения ТМ, извлекаемые ацетатно-аммонийным буфером (ААБ рН 4.8), определяют их актуальную подвижность – обеспеченность пахотных угодий доступными для растений формами микроэлементов. Степень актуальной подвижности (ω , %) определяли как долю содержания подвижных форм, извлеченных ААБ, от кислоторастворимых. Актуальная подвижность ТМ в зависимости от способа обработки почвы изменялась в следующей последовательности (%): безотвальная (*D1*) – $\text{Cd} (18.4) > \text{Mn} (16.2) > \text{Pb} (3.7) >$

$\text{Co} (2.4) > \text{Zn} (1.4) > \text{Cu} (0.9)$, рекомендуемая (*D2*) – $\text{Cd} (15.3) > \text{Mn} (14.9) > \text{Co} (3.6) > \text{Pb} (3.1) > \text{Zn} (1.3) > \text{Cu} (0.9)$, отвальная (*D3*) – $\text{Cd} (16.9) > \text{Mn} (13.8) > \text{Pb} (3.4) > \text{Co} (2.8) > \text{Zn} (1.2) > \text{Cu} (1.0)$. Следовательно, наибольшей подвижностью в черноземе выщелоченном обладал кадмий – особо опасный ТМ, поэтому актуальной является проблема снижения его подвижности [20]. Крайне слабая подвижность соединений меди в пахотном слое почвы – в пределах 1% от кислоторастворимых форм – является причиной дефицита доступных для растений ионов меди в почвенном растворе. По агрохимическим и геохимическим критериям обеспеченность чернозема выщелоченного подвижной медью очень низкая – за годы исследования ее содержание снизилось с высокого (4–7 мг/кг) до очень низкого (по классификации Аринушкиной) – медь активно переходила в труднодоступные формы. Подобную тенденцию наблюдали и с подвижными соединениями цинка и кобальта, извлекаемых ААБ: обеспеченность чернозема выщелоченного подвижным цинком была низкой, кобальтом – средней.

Недостаток эссенциально важных микроэлементов (Cu, Zn, Co) в почве для роста и развития озимой пшеницы вызывает микроэлементную неполноценность ее продукции. Исследования химического состава зерна озимой пшеницы на содержание Mn, Cu, Zn и Co показали дефицит этих микроэлементов в зерне (0.5–0.3 нормы по агрохимическим критериям). Внесение удобрений увеличивало вынос микроэлементов из почвы, и баланс содержания Mn, Cu, Zn и Co в верхнем горизонте чернозема выщелоченного Западнo-Предкавказья был отрицательным.

Содержание подвижных соединений кадмия и свинца в почве (слой 0–40 см) было меньше ПДК (0.5–0.7 мг/кг), но кадмий активно поглощали растения. По величине коэффициента биологического поглощения (*КБИ*) растениями полевых культур из чернозема выщелоченного изученные ТМ образовали ряд: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Co}$ [21]. Накопление Pb и Cd в зерне составило 0.6–0.8 ПДК для продовольственного сырья и больше ПДК сырья для детского питания, особенно для кадмия (1.5–2.5 ПДК). При содержании свинца и кадмия в зерне даже в пределах ПДК существуют риски накопления их в организме человека, повышается индивидуальный риск смерти до второго – предельно допустимого риска [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов мониторинговых исследований влияния природных и антропогенных факторов на свойства чернозема выщелоченного, проведенных в условиях длительного многофакторного стационарного полевого опыта, позво-

лил заключить, что агрохимические свойства почвы изменялись: емкость катионного обмена уменьшалась в годы с повышенным увлажнением, применение удобрений способствовало улучшению этого показателя; при внесении удобрений незначительно снижалась гидролитическая кислотность в сравнении с контрольным вариантом, стабилизировалась актуальная кислотность на уровне 6.79 – 6.73, что свидетельствовало о повышении буферных свойств почвы. В условиях экстенсивной технологии выявлен процесс гумификации чернозема выщелоченного под влиянием природных факторов (убыль ~0.02% в год), применение удобрений улучшало гумусное состояние пахотного слоя чернозема выщелоченного: прибавка его запасов за 2 ротации севооборота составила от 0.34 (вариант N45P30K20) до 0.57% (вариант N180P120K80).

Применение высоких доз удобрений (вариант N180P120K80) вызывало двукратное увеличение содержания фосфатов в почвенном растворе (до 440 мг/кг), что приводило к снижению фосфатной буферности почвы. В процесс фосфатизации наибольший вклад вносили минеральные удобрения (36%), доля влияния органических удобрений составила ≈13.

Мониторинг содержания тяжелых металлов в слое 0–40 см чернозема выщелоченного не выявил превышения ПДК валового содержания всех изученных элементов. Валовое содержание цинка не превышало ПДК, но было больше фона для черноземов. Валовое содержание марганца, кобальта и свинца составило: марганец – 0.45–0.6 ПДК, кобальт – 0.40–0.44 ПДК, свинец – 0.6–0.7 ПДК.

Многолетние исследования содержания подвижных соединений тяжелых металлов в почвенных образцах (культура – озимая пшеница) показали низкую обеспеченность пахотного слоя чернозема выщелоченного доступными для растений соединениями меди, цинка и кобальта, количество подвижного марганца соответствовало среднему уровню обеспеченности в условиях рекомендуемой и отвальной обработок почвы, безотвальная обработка способствовала увеличению содержания подвижного марганца до высокого уровня (превышение ПДК по эколого-токсикологической оценке). Высокая степень подвижности отмечена для кадмия (15.3–18.4%) и марганца (13.8–16.2%), наименьшая – для меди (0.85–1.0%), степень актуальной подвижности изученных элементов уменьшалась в последовательности: Cd > Mn ≫ Co ~ Pb > Zn > Cu. Содержание прочнофигированных соединений этих элементов в пахотном слое чернозема выщелоченного уменьшалось в последовательности: Cu > Co > Mn ~ Pb > Zn при рекомендуемой обработке почвы.

По эколого-токсикологическим нормативам чернозем выщелоченный был экологически чистым по содержанию доступных форм марганца (0.5 ПДК), меди (0.06 ПДК), цинка (0.05 ПДК), кобальта (0.07 ПДК), свинца (0.15–0.40 ПДК) и кадмия (0.4–0.6 ПДК). С позиции агрохимических критериев в пахотном слое сложился избыток подвижного марганца, дефицит меди и цинка, высокий уровень содержания кадмия и свинца. Эколого-токсикологическая оценка земель сельскохозяйственного назначения не учитывает доступность элементов питания для сельскохозяйственных растений.

Результаты исследования позволили рекомендовать производителям зерна озимой пшеницы в условиях Краснодарского края применение экологически допустимой технологии при рекомендуемой обработке почвы. Эта технология обеспечивает высокую урожайность (68–72 ц зерна/га), качество зерна соответствует нормативам ГОСТ “сильной” и “ценной” пшеницы, содержание Cd и Pb в зерне меньше ПДК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Василько В.П., Герасименко В.Н., Нецадим Н.Н.* Плодородие орошаемых и гидроморфных пахотных земель Северного Кавказа и путь его оптимизации. Краснодар: КубГАУ, 2010. 173 с.
2. *Власенко В.П., Терпелец В.И.* Деградиционные процессы в почвах Краснодарского края и методы их регулирования Краснодар: КубГАУ, 2012. 204 с.
3. Почвенно-экологические основы и проблемы земледелия в Северо-Западном Предкавказье. Краснодар: КубГАУ, 2006. 333 с.
4. *Водяницкий Ю.Н.* Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–375.
5. *Карпова Е.А., Минеев В.Г.* Тяжелые металлы в агроэкосистеме. М.: КДУ, 2015. 252 с.
6. *Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф.* Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами. Ростов-н/Д: СКНЦ ВШ, 2000. 232 с.
7. *Jonsson J.O., Eriksson J.* The effect of fertilization for higher protein content on Cd level in wheat grain // Biogeochem. Trace Element. 7th ICOVTE. Sweden: Uppsala, 2003. V. 3. P. 242–243.
8. *Лебедевский И.А., Шеуджен А.Х., Хурум Х.Д.* Содержание тяжелых металлов в почвах Кубани // Аграр. вестн. Урала. Екатеринбург: УралГАУ, 2010. Т. 69. № 3. С. 67–69.
9. *Потатуева Ю.А., Сидоренкова Н.К.* Влияние загрязнения кадмием на содержание подвижных форм элемента в почве и накопление его растениями и урожай сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2010. № 6. С. 73–82.
10. *Яковлев А.С., Евдокимова М.В.* Экологическое нормирование почв и управление их качеством // Почвоведение. 2011. № 5. С. 582–596.

11. *Jonsson G., Wik K., Oborn J.* Effect of pH and zinc addition on cadmium solubility in six swedish arable soils // *Proceed. 6th ICOBTE. Guelph, Ontario, Canada, 2001.* P. 441.
12. *Laperche V.* Immobilization of lead by in situ formation of lead phosphates in soils // *Environmental restoration of metals – contaminated soils / Ed. Iskandar I.K. Boca Ration, 2001.* P. 61–76.
13. *Mortvedt J.J., Mays D.A., Osborn G.* Uptake by wheat of cadmium and other heavy metal contaminants in phosphate fertilizers // *J. Environ. Qual. 1981. V. 10.* P. 193–197.
14. *Johnston J.* Temporal trends in cadmium in crops and soils // *Proceed. 6th ICOBTE. Guelph, Ontario, Canada, 2001.* P. 308.
15. *Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н.* Методика агрохимических исследований и статистическая оценка результатов Майкоп: ОАО “Полиграф–ЮГ”, 2015. 664 с.
16. *Гайдукова Н.Г., Кошеленко Н.А., Есипенко С.В.* Влияние содержания фосфатов на степень подвижности тяжелых металлов в пахотном слое почвы // *Тр. КубГАУ. Краснодар, 2006. Вып. 3. С. 188–196.*
17. Карта загрязнений химическими элементами почв Краснодарского края. Саратов: Роскартография, 2000.
18. *Гайдукова Н.Г., Терпелец В.И., Баракин Н.С., Шабанова И.В.* О распределении соединений Mn, Cu, Zn, Pb, Cd и Co в почвенном профиле чернозема выщелоченного Азово-Кубанской низменности // *Политемат. Сетев. электр. научный журн. КубГАУ (Научн. журн. КубГАУ) [Электр. ресурс]. Краснодар: КубГАУ, 2014. № 95. С. 729–741. <http://ej.kubagro.ru/2014/01/pdf/47.pdf>*
19. *Нещадим Н.Н., Гайдукова Н.Г., Шабанова И.В., Сидорова И.И.* Об экологических рисках, связанных с накоплением свинца и кадмия в зерне озимой пшеницы, выращенной на черноземе выщелоченном Западного Предкавказья // *Тр. КубГАУ. Краснодар: КубГАУ, 2008. Вып. 431(459). С. 59–73.*
20. *Леднев А.В., Ложкин А.В.* Ремедиация загрязненных кадмием агродерново-подзолистых почв // *Почвоведение. 2017. № 5. С. 624–633.*
21. *Гайдукова Н.Г., Шабанова И.В., Нещадим Н.Н., Загорюлько А.В.* Эколого-агрохимические аспекты влияния удобрений на баланс тяжелых металлов в почве и продуктивность сельскохозяйственных культур: Монография. Краснодар: КубГАУ, 2016. 288 с.

Influence of Natural and Anthropogenic Factors on Physical and Chemical Properties of Leached Chernozem and Its Pollution by Heavy Metals

A. H. Sheudzhen^a, N. N. Neshadim^a, N. G. Gaydukova^a, and I. V. Shabanova^{a,#}

^a *I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University
ul. Kalinina 13, Krasnodar 350044, Russia*

[#] *E-mail: Shabanova_I_V@mail.ru*

In the long-term field experience (1991–2013) the influence of weather conditions and various agricultural technologies of cultivation of field crops of 11-full grain-grass crop rotation on the fertility of leached Chernozem of the Western Ciscaucasia (Luvic Chernic Phaeozems (Pachic)) and the degree of soil contamination Mn, Cu, Co, Zn, Cd and Pb was studied. The tendency to decrease the buffer properties, dehumification and increase the content of mobile phosphorus in the layer of 0–40 cm of soil with extensive grain production technology was revealed. The use of fertilizers contributed to the improvement of the humus state of the arable layer. The gross content of heavy metals (HM) in the 0–40 cm layer was 0.5–0.7 MPC. The low mobility of Cu, Co, Zn compounds in the arable layer was shown, the number of mobile forms of all studied elements was less than MPC, the degree of actual mobility of HM varied in the sequence Cd > Mn > Co > Pb > Zn > Cu, the deficit of mobile copper content as a trace element was noted.

Key words: natural and anthropogenic factors, physical and chemical properties of soil, leached Chernozem, soil pollution, heavy metals.