

ПЛОДОРОДИЕ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РЕПЕРНЫХ УЧАСТКОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2022 г. А. А. Уткин

*Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева
153012 Иваново, ул. Советская, 45, Россия*

E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 17.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Представлены результаты многолетних агрохимических и экотоксикологических исследований реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв сельскохозяйственного назначения Владимирской обл., которые проводили для установления уровня плодородия по основным агрохимическим показателям, содержанию микроэлементов и серы, экотоксикологического состояния — по содержанию валовых и подвижных форм тяжелых металлов. Установлено ухудшение таких показателей плодородия почв как обеспеченность органическим веществом, подвижными формами фосфора и калия, обменными основаниями кальция, магния, увеличения обменной и гидролитической кислотности. Произведена оценка плодородия почв по расчету почвенно-экологического индекса. Определена обеспеченность почв бором, молибденом, медью и подвижной серой. Концентрации валовых и подвижных форм тяжелых металлов в обследованных почвах не превышали допустимых уровней. По содержанию изученных металлов исследованные почвы относятся к слабозагрязненным и не являются опасными для культурных растений и здоровья человека. По коэффициентам корреляции Пирсона установлены особенности влияния свойств почвы на концентрации микроэлементов, серы, валовых и подвижных форм металлов.

Ключевые слова: плодородие, дерново-подзолистая почва, тяжелые металлы, микроэлементы, реперные участки, Владимирская обл.

DOI: 10.31857/S0002188122060126

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в результате недостаточного уровня развития земледелия России отмечается снижение объемов применения минеральных и органических удобрений, что приводит к существенному уменьшению уровня плодородия обрабатываемых почв, выражающееся в ухудшении агрохимических свойств, снижении урожайности сельскохозяйственных культур и качества растительной продукции [1–4].

Эффективное использование земель в агропромышленном производстве невозможно без проведения агрохимического и экотоксикологического обследований почв, которые обеспечивают землепользователя важной информацией, касающейся содержания подвижных форм макро- и микроэлементов питания растений, органического вещества, реакции почвенной среды и др. [5].

Кроме того, в связи с постоянным возрастанием антропогенной нагрузки на почву, вызванной

деятельностью автотранспорта, нерациональным ведением промышленного и сельскохозяйственного производств, остро стоит вопрос изучения экотоксикологического состояния почв по содержанию в них различных загрязняющих веществ, среди которых особое место занимают тяжелые металлы (ТМ). Увеличение химического загрязнения почв металлами обуславливает снижение их самоочищающей способности, повышение токсичности для живых организмов и общего негативного влияния на природную среду [6].

Установлено, что в Нечерноземной зоне России и, в частности, во Владимирской обл. отмечается значительная потеря почвами своего плодородия и постепенный переход в разряд малоплодородных и загрязненных земель, что создает угрозу вывода их из сельскохозяйственного оборота и, как следствие, недополучение необходимой растительной продукции [7–9].

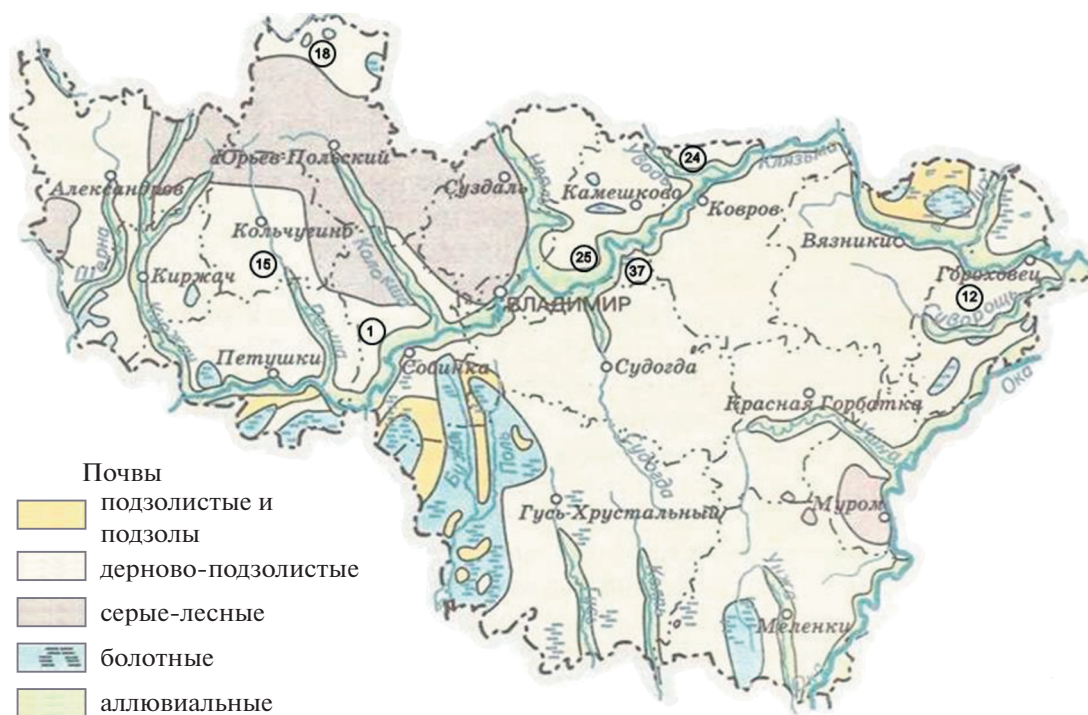


Рис. 1. Почвенная карта Владимирской области: числа – номера реперных участков.

Высокоэффективное ведение сельского хозяйства возможно только при соблюдении правильного подхода к проблемам, связанным с использованием, восстановлением и сохранением плодородия почв. Для обеспечения высоких урожаев культур необходимо регулярно наблюдать за параметрами, связанными с плодородием почв и их экотоксикологическим состоянием.

Современная изменчивость параметров плодородия дерново-подзолистых почв Владимирской обл. и оценка их экотоксикологического состояния на реперных участках в научной литературе слабо освещены и требуют дополнительного изучения, что повышает актуальность проведенного исследования.

Объектом изучения были реперные участки с дерново-подзолистыми суглинистыми почвами. Доля дерново-подзолистых суглинистых почв в сельскохозяйственном фонде почв Владимирской обл. составляет $\approx 40\%$ [10].

Цель работы – оценка существующего уровня плодородия дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской обл. по основным агрохимическим показателям и их экотоксикологического состояния по содержанию валовых и подвижных форм соединений ТМ: свинца (Pb), кадмия (Cd), меди (Cu), никеля (Ni), цинка (Zn), кобальта (Co), хрома (Cr) и марганца (Mn).

Особое внимание к изученным поллютантам вызвано тем, что большинство из них относится к I и II классам химической опасности (ГОСТ 17.4.1.02–83), их соединения обладают высокой токсичностью для многих живых организмов, в т.ч. для культурных растений, животных и человека.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Агрохимическое и экотоксикологическое обследование почв проводили в 1993 и 2019 гг. в соответствии с ежегодным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на 7-ми реперных участках, расположенных во Владимирской обл. (рис. 1), путем закладки почвенных разрезов и отбора образцов почв из пахотного горизонта (0–20 см). Реперные участки располагались на пахотных землях и кормовых естественных угодьях. Преобладающая растительность участков – культурные растения, в редких случаях – злаковое разнотравье. Общая площадь реперных участков с дерново-подзолистыми суглинистыми почвами – 270 га. Почвенно-экологический индекс (ПЭИ) определяли по методике, разработанной в Почвенном институте им. В.В. Докучаева [11].

Физико-химические анализы почв были выполнены согласно следующим методикам: об-

Таблица 1. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистых суглинистых почв реперных участков

Реперный участок, №*	Район	Фракция, %		C _{орг} , %	P ₂ O ₅	K ₂ O	pH _{KCl}	H _r	Ca	Mg	S	ЕКО	V, %	ПЭИ							
		<0.001	<0.01												мг/кг почвы		мг-экв/100 г почвы				
1	Собинский	15.7	35.8	2.3	582	491	6.7	1.15	7.6	1.4	13.8	14.95	92.31	76.8							
		н/о**	н/о	2.7	609	501	7.1	0.79	8.7	1.7	14.7	15.49	94.90	79.0							
12	Гороховецкий	13.4	28.6	2.6	239	181	5.6	2.41	7.6	2.3	11.8	14.21	83.04	60.2							
		н/о	н/о	3.0	261	189	6.2	1.57	8.8	2.5	12.8	14.37	89.07	67.4							
15	Кольчугинский	25.1	47.6	2.4	210	110	6.3	1.03	9.4	2.3	16.8	17.83	94.22	50.5							
		н/о	н/о	2.7	245	123	6.7	0.76	10.0	2.5	17.5	18.26	95.84	56.6							
18	Юрьев-Польский	15.9	35.8	2.2	186	120	5.4	2.16	6.4	1.4	10.4	12.56	82.80	60.1							
		н/о	н/о	2.6	201	129	5.7	1.32	7.3	1.6	11.3	12.62	89.54	64.6							
24	Ковровский	12.6	22.9	1.5	209	41	6.2	0.70	5.0	1.2	10.6	11.30	93.81	49.0							
		н/о	н/о	1.9	232	49	6.6	0.51	5.7	1.5	12.0	12.51	95.92	55.5							
25	Камешковский	12.8	24.8	2.3	369	139	5.5	2.02	5.1	1.5	8.6	10.62	80.98	56.9							
		н/о	н/о	2.7	387	145	5.9	1.41	6.1	1.7	10.0	11.41	87.64	58.3							
37	Камешковский	13.2	27.8	2.6	352	125	5.8	1.86	5.9	1.1	9.5	11.36	83.63	54.8							
		н/о	н/о	2.9	376	129	6.3	1.27	6.8	1.3	10.5	11.77	89.21	63.5							
	M	15.5	31.9	2.3	307	172	5.9	1.62	6.7	1.6	11.6	13.26	87.25	58.3							
		н/о	н/о	2.6	330	181	6.4	1.09	7.6	1.8	12.7	13.78	91.73	63.6							
	V, %	28.5	26.7	16.4	46.1	85.0	8.1	40.3	23.6	31.0	24.2	19.4	6.7	15.8							
		н/о	н/о	13.4	43.1	81.4	7.6	36.6	20.7	26.2	20.8	17.8	4.0	12.8							
	±m	1.67	3.22	0.14	53.40	55.39	0.18	0.25	0.60	0.19	1.07	0.97	2.22	3.07							
		н/о	н/о	0.13	53.77	55.63	0.18	0.15	0.60	0.18	1.00	0.93	1.38	3.49							

Примечания. 1. M – среднее арифметическое, V, % – коэффициент вариации, ±m – ошибка среднего арифметического. н/о – не определяли. То же в табл. 2–4. 2. Над чертой – 2019 г., под чертой – 1993 г. То же в табл. 2–5.

менная кислотность (pH_{KCl}) – по ГОСТ Р 58594-2019, гидролитическая кислотность (H_r) – по ГОСТ 26212-91, подвижные фосфор (P₂O₅) и калий (K₂O) – по ГОСТ Р 54650-2011 (по Кирсанову в модификации ЦИНАО), обменные основания кальция и магния (Ca и Mg) – по ГОСТ 26487-85, органическое вещество (по Тюрину в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ 26213-91, сумма поглощенных оснований (S) (по Каппену) – по ГОСТ 27821-88, подвижная сера (S_{подв}) (по ЦИНАО) – по ГОСТ 26490-85, подвижный бор (B) (по Бергеру и Труогу в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ Р 50688-94, подвижная медь (Cu_{подв}) (по Пейве и Ринькису в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ Р 50684-94, подвижный молибден (Mo) (по Григгу в модификации ЦИНАО) – по ГОСТ Р 50689-94, фракции физической глины и ила (по Качинскому) – по [12]. Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почвы основаниями (V) определяли расчетным способом.

Определение в почвах подвижных и валовых форм ТМ проводили в вытяжках ацетатно-аммонийного буфера pH 4.8 (ААБ) и 5.0 н. HNO₃ соот-

ветственно методом атомно-абсорбционной спектроскопии [13–15].

Степень подвижности ТМ в почве рассчитана как соотношение содержания подвижных соединений ТМ и валовой концентрации металла в почве и выражена в %.

Отдельные аналитические данные подвергали математической обработке и корреляционному анализу с расчетом коэффициента линейной корреляции Пирсона с использованием программы Statistica (версия 10).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обменная кислотность дерново-подзолистых суглинистых почв за период наблюдений увеличилась на 0.5 ед. с нейтральной до близкой к нейтральной, т.е. произошло подкисление почв (табл. 1). Вероятно, это явилось результатом снижения объемов известкования почв реперных участков за прошедшие годы.

Известно, что особенности проявления обменной и гидролитической кислотностей тесно

связаны между собой. Подтверждение этому было отмечено в нашем исследовании. В 1993 и 2019 гг. прослежена высокая корреляционная взаимосвязь $r_{H_r/pH_{KCl}} = -0.75$ и -0.84 , при $P = 0.95$ соответственно. Величины гидролитической кислотности исследованных почв реперных участков на протяжении всего периода мониторинга соответствовали преимущественно очень низкой степени кислотности. Средняя величина H_r за последние 26 лет увеличилась на 0.53 мг-экв/100 г почвы или на 48.6% от исходного уровня.

Средняя обеспеченность почв реперных участков органическим веществом на протяжении всего периода наблюдения, согласно существующей градации, преимущественно соответствовала низкому содержанию, при этом среднее содержание $C_{орг}$ в почвах участков снизилось на 0.3% (табл. 1).

Подвижные P_2O_5 и K_2O являются одними из основных элементов питания растений, этим определяется важность изучения этих форм их соединений в почвах. Обеспеченность дерново-подзолистых суглинистых почв участков подвижными P_2O_5 и K_2O широко варьировала от высокой до очень высокой и низкой до очень высокой степени на всем протяжении исследования соответственно. В целом, за весь период наблюдений на реперных участках отмечено выраженное снижение содержания подвижных форм P_2O_5 и K_2O . Наибольшее относительное снижение к уровню 1993 г. выявлено для P_2O_5 – 7.0, наименьшее – для K_2O – 5.0%.

По-видимому, снижение содержания подвижных форм P_2O_5 при отмеченном повышении кислотности почв могло быть связано с частичным переходом доступных соединений фосфора в прочносвязанные фосфаты. Рассчитанные коэффициенты корреляции средней силы взаимосвязи между уровнем pH_{KCl} и обеспеченностью почв P_2O_5 в 2019 и 1993 гг. в определенной мере подтвердили эту закономерность: $r = 0.50$ и 0.54 , $P = 0.95$ соответственно.

На протяжении всего периода наблюдения обеспеченность почв реперных участков обменным Ca соответствовала средней степени, содержание обменного Mg изменялось от средней до повышенной степени обеспеченности. Отметим, что среднее содержание Ca и Mg в почвах участков с 1993 г. снизилось на 11.9 и 11.1% соответственно. Суммарное содержание обменных Ca и Mg за период мониторинга уменьшилось на 1.2 мг-экв/100 г почвы или на 12.6% от исходного уровня.

Средняя доля присутствия обменных Ca и Mg в общем составе поглощенных катионов в 2019 и 1993 гг. составляла 71.8 и 74.9% соответственно, что свидетельствовало о значительной роли Ca и Mg в процессах генезиса и химизма дерново-подзолистых почв. Прослежена тенденция к снижению содержания обменных Ca и Mg предположительно по причине их вымывания из корнеобитаемого слоя вниз по профилю и выноса товарной частью урожая сельскохозяйственных культур.

Средняя обеспеченность почв участков поглощенными основаниями (S) за период наблюдений снизилась на 1.1 мг-экв/100 г почвы или на 8.7%. Отмечено, что степень насыщенности почв основаниями уменьшилась на 4.48% с высокой до повышенной.

Согласно градации распределения глинистых частиц в гранулометрическом составе, среди дерново-подзолистых почв реперных участков преобладают участки почв с легкосуглинистым составом (участки № 12, 24, 25 и 37).

Расчет ПЭИ, как комплекса показателей, позволяет объективно оценить состояние почвы по агрохимическим и физико-химическим свойствам, а также учесть такие факторы почвообразования как климатические условия и рельеф местности, выявлять негативные процессы, которые приводят к деградации и снижению плодородия. Установлено, что в среднем к 2019 г. на реперных участках отмечали снижение показателя ПЭИ на 5.3 балла или на 8.3% к уровню 1993 г.

К возможным причинам снижения показателя ПЭИ можно отнести уменьшение обеспеченности почв подвижными формами P_2O_5 и K_2O , увеличение кислотности почв, что было следствием уменьшения известкования и применения удобрений, содержащих фосфор и калий.

Анализ данных содержания в почвах участков подвижных форм микроэлементов и серы показал следующее (табл. 2).

Бор. Среднее содержание и пределы изменений водорастворимых форм В в изученных дерново-подзолистых почвах согласовались с данными, приведенными в работах [16, 17]. Согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны подвижными формами В и исходя из изменений его содержания в почвах участков, обеспеченность бором варьировала от очень низкой до очень высокой в течение всего периода наблюдения. В среднем, в 1993 и 2019 гг. обеспеченность почв участков подвижным В соответствовала высокой обеспеченности [18].

Молибден. Содержание подвижных форм Мо в исследованных почвах реперных участков согла-

Таблица 2. Концентрации микроэлементов и подвижной серы в почве, мг/кг

Реперный участок, №	Район	В	Cu _{подв}	Mo	S _{подв}
1	Собинский	<u>2.16</u>	<u>11.8</u>	<u>0.095</u>	<u>8.1</u>
		1.99	9.7	0.087	19.3
12	Гороховецкий	<u>0.56</u>	<u>5.0</u>	<u>0.124</u>	<u>3.1</u>
		0.51	3.8	0.114	12.1
15	Кольчугинский	<u>0.90</u>	<u>5.3</u>	<u>0.130</u>	<u>2.1</u>
		0.79	3.9	0.119	5.9
18	Юрьев-Польский	<u>0.78</u>	<u>4.5</u>	<u>0.083</u>	<u>3.9</u>
		0.66	4.0	0.071	7.6
24	Ковровский	<u>0.64</u>	<u>5.0</u>	<u>0.120</u>	<u>4.4</u>
		0.59	4.2	0.122	10.2
25	Камешковский	<u>0.18</u>	<u>9.6</u>	<u>0.135</u>	<u>9.1</u>
		0.11	8.9	0.139	17.9
37	Камешковский	<u>н/о</u>	<u>8.1</u>	<u>0.082</u>	<u>н/о</u>
		н/о	7.0	0.079	н/о
<i>M</i>		<u>0.87</u>	<u>7.0</u>	<u>0.110</u>	<u>5.1</u>
		0.78	5.9	0.104	12.2
<i>V, %</i>		<u>77.9</u>	<u>40.2</u>	<u>20.6</u>	<u>55.2</u>
		82.3	43.3	24.3	44.7
$\pm m$		<u>0.28</u>	<u>1.1</u>	<u>0.009</u>	<u>1.2</u>
		0.26	1.0	0.009	2.2
<i>r</i> (фракция <0.01 мм, %)		<u>0.36</u>	<u>-0.15</u>	<u>0.04</u>	<u>-0.46</u>
		н/о	н/о	н/о	н/о
<i>r</i> (C _{орг} , %)		<u>0.08</u>	<u>0.22</u>	<u>-0.15</u>	<u>-0.04</u>
		0.07	0.21	-0.24	0.20
<i>r</i> (рН _{KCl})		<u>0.78*</u>	<u>0.40</u>	<u>0.02</u>	<u>0.08</u>
		0.76*	0.25	0.03	0.21
<i>r</i> (ЕКО, мг-экв/100 г почвы)		<u>0.48</u>	<u>-0.11</u>	<u>0.19</u>	<u>-0.50</u>
		0.49	-0.23	0.07	-0.32

* Значимые коэффициенты корреляции ($r > \pm 0.70$) при $P = 0.95$. То же в табл. 5.

совалась с пределами его содержания в дерново-подзолистой почве, отмеченными в работе [19]. Согласно градации обеспеченности почв подвижными формами Mo и исходя из изменений его содержания и средних концентраций в почвах участков, обеспеченность молибденом характеризовалась низкой степенью на всем протяжении исследования [18].

Медь. Пределы содержания форм Cu_{подв} в почвах участков значительно превышали пределы содержания, указанные для данной почвы в работе [17]. Обеспеченность почв участков Cu_{подв} варьировала от высокой до очень высокой в 2019 г. и от

средней до очень высокой в 1993 г. В среднем, на протяжении всего периода мониторинга обеспеченность почв участков Cu_{подв} соответствовала очень высокой степени [18].

Серя. Исходя из среднего содержания S_{подв}, исследованные почвы в 2019 г. имели низкий уровень обеспеченности, в 1993 г. — высокий [20]. Общее содержание серы в почве определяется почвообразующими породами и содержанием в них органического вещества. Установлено, что с органическим веществом почвы связано до 70–90% валовых запасов серы. Между содержанием углерода органического вещества и серой в его

составе установлена тесная прямая корреляционная связь линейной зависимости [21]. Ввиду того, что изученные почвы бедны $C_{\text{орг}}$, между содержанием $C_{\text{орг}}$ и $S_{\text{подв}}$ в почвах не было установлено достоверно выраженной корреляционной взаимосвязи: $r = -0.04$ и 0.20 (табл. 2).

Между суммарным содержанием частиц физической глины и ила и подвижным В установлена прямая корреляция средней силы взаимосвязи: $r = 0.36$. Подтверждение выявленной силе и характеру зависимости для дерново-подзолистых суглинистых почв отмечено в работе [22].

Содержание гумуса в почве является специфическим и противоречивым критерием оценки содержания подвижных форм микроэлементов. На факт проявления слабой корреляции между содержанием гумуса и форм микроэлементов, в частности $C_{\text{подв}}$, в дерново-подзолистых почвах указано в работах [22, 23], что полностью подтверждено результатами настоящего исследования.

На высокую корреляцию прямой зависимости между концентрацией подвижного В и $pH_{\text{КСI}}$ почвы в своей работе указывал В.Б. Ильин [24], что не противоречило рассчитанным нами величинам корреляции.

Между содержанием в дерново-подзолистой суглинистой почве $S_{\text{подв}}$ и подвижного В и величиной ЕКО почвы отмечена взаимосвязь средней силы обратной и прямой зависимостей. Отрицательную корреляционную зависимость ЕКО/ $S_{\text{подв}}$ можно объяснить тем, что подвижные соединения серы в виде сульфатов за счет своего отрицательного заряда не могут адсорбироваться на поверхности одноименно заряженных почвенных частиц.

С 1993 г. среднее содержание $S_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистых суглинистых почвах уменьшилось к 2019 г. на 58.2%, что, возможно, могло быть причиной снижения применения серосодержащих удобрений, систематическим ежегодным выносом серы из почвы урожаем и вымыванием сульфатов из пахотного слоя почв участков.

За 26-летний период мониторинга среднее содержание В, Си и Мо в почвах реперных участков увеличилось на 11.5, 18.6 и 5.7%. Это повышение обеспеченности подвижными формами микроэлементов можно связать в основном с поступлением в почвы дополнительных количеств этих элементов от промышленных источников загрязнения и, в меньшей степени, от удобрений.

Данные о загрязненности почв участков ТМ приведены в табл. 3. В настоящее время для минеральных почв по-прежнему не разработаны вели-

чины предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) для многих ТМ, при этом встречающиеся в научной литературе фоновые показатели содержания металлов в почвах сильно меняются в зависимости от различных почвенно-климатических условий их образования, деятельности человека и т.п. Поэтому для оценки содержания ТМ использовали методику, применяемую в геохимии, заключающуюся в сравнении полученных величин валовых концентраций металлов в дерново-подзолистых почвах Владимирской обл. с имеющимися как валовыми и подвижными ПДК, так и с кларками элементов в земной коре [25].

Медь. Средняя обеспеченность и пределы изменений содержания Си в изученной почве во многом подтверждены другими исследованиями, в которых отмечено среднее содержание валовой Си, переходящей в вытяжку 5.0 н. HNO_3 , на уровне 10–15 мг/кг почвы при диапазоне изменений 0.1–47.9 мг/кг [26]. Среднее содержание подвижных форм Си, переходящих в вытяжку ААБ рН 4.8 во многом соответствовало показателям, характерным для почв европейской части России [19].

Цинк. В ряде работ для Zn приведены в основном согласующиеся с нашими средние валовые и подвижные концентрации металла [19], а также пределы содержания (28.0–45.0 мг/кг) в почве [26, 27].

Кадмий. Валовое содержание Cd в пахотных дерново-подзолистых почвах России невелико и меняется в пределах 0.30–2.40 мг/кг при среднем содержании 0.56 мг/кг [28]. Установленные нами средние показатели и пределы изменения содержания валового Cd в дерново-подзолистой почве были значительно меньше. Отмеченные пределы изменений содержания подвижных форм Cd в изученной почве и среднее содержание подвижных форм металла соотносились с данными, указанными в других работах [19, 29].

Свинец. Содержание валового Pb и пределы изменения его содержания в дерново-подзолистых почвах Владимирской обл. имели сходные параметры со средней обеспеченностью валовым Pb на уровне 9.0 мг/кг и с пределами изменений от 2.6 до 43.0 мг Pb/кг исследованной почвы Русской равнины [8].

Никель. Рассчитанные средние показатели содержания Ni в почвах реперных участков Владимирской обл. хорошо укладывались в пределы изменений содержания валовых форм для данных почв России – 6.0–25.0 мг/кг почвы [19, 26, 28]. Средние концентрации подвижных форм Ni за весь период обследования в почвах участков были

Таблица 3. Содержание форм ТМ в почве, мг/кг

Реперный участок, №	Район	Валовые формы, мг/кг								Подвижные формы, мг/кг						
		Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cr
1	Собинский	13.7	98.7	0.20	10.1	12.6	8.9	17.5	205	0.41	0.92	0.13	0.61	0.18	0.48	0.52
		13.2	93.6	0.16	9.3	10.6	8.2	15.8	199	0.32	1.22	0.09	0.54	0.13	0.40	0.43
12	Гороховецкий	10.9	37.2	0.20	13.0	18.0	13.7	11.3	311	0.27	1.73	0.18	0.45	0.19	0.41	0.28
		9.3	32.3	0.17	12.1	16.4	12.6	10.2	297	0.25	1.45	0.12	0.39	0.12	0.32	0.24
15	Кольчугинский	6.2	9.7	0.18	9.3	14.2	11.5	13.5	314	0.51	1.40	0.07	0.49	0.22	0.41	0.42
		5.4	9.5	0.13	8.7	12.3	11.0	11.2	305	0.44	1.21	0.07	0.42	0.27	0.34	0.37
18	Юрьев-Польский	9.3	29.5	0.17	11.7	19.2	7.9	14.4	247	0.28	0.97	0.11	0.54	0.21	0.40	0.48
		6.9	22.8	0.14	10.4	17.5	7.1	12.3	233	0.30	0.76	0.06	0.50	0.23	0.30	0.39
24	Ковровский	4.7	20.4	0.18	9.6	11.8	5.8	5.9	225	0.31	0.85	0.10	0.70	0.21	0.38	0.35
		4.3	18.4	0.12	9.5	10.3	5.1	4.6	214	0.25	0.77	0.10	0.61	0.16	0.31	0.31
25	Камешковский	10.4	23.9	0.21	13.1	17.5	7.6	11.5	93	0.40	1.15	0.15	0.63	0.12	0.39	0.29
		9.8	20.0	0.14	12.3	15.6	6.5	9.8	89	0.32	1.05	0.11	0.57	0.10	0.35	0.23
37	Камешковский	4.5	23.2	0.22	4.3	8.8	5.2	3.2	226	0.27	1.31	0.16	0.44	0.17	0.33	0.20
		4.0	19.2	0.15	3.7	8.4	4.6	2.7	209	0.22	1.22	0.10	0.41	0.14	0.26	0.16
	M	8.5	34.7	0.19	10.2	14.6	8.7	11.0	232	0.35	1.19	0.13	0.55	0.19	0.40	0.36
		7.6	30.8	0.14	9.4	13.0	7.9	9.5	221	0.30	1.10	0.09	0.49	0.16	0.33	0.30
	V, %	40.8	85.0	9.3	29.7	26.1	35.1	44.9	32.2	26.3	26.3	29.6	17.9	18.4	11.2	31.9
		44.6	92.4	11.9	30.5	26.9	37.8	47.2	32.6	24.3	23.2	23.0	17.6	38.0	13.5	32.3
	±m	1.3	11.1	0.01	1.1	1.4	1.1	1.9	28	0.03	0.12	0.01	0.04	0.01	0.02	0.04
		1.3	10.8	0.01	1.1	1.3	1.1	1.7	27	0.03	0.10	0.01	0.03	0.02	0.02	0.04
	ПДК(ОДК) _{вал/подв}	(132)	(220)	(2)	32	(80)	н/д*	н/д	1500	3	23	н/д	6	4	5	6
	Кларк мировой [25]	55	70	0.2	12.5	75	25	100	950							
	Кларк региональный [32]	8.5	47.3	н/д	14.9	35.7	4.6	84.8	609							

*н/д – нет данных.

примерно в 2 раза меньше средней концентрации (0.39 мг/кг), приведенной в работе [19].

Кобальт. Среднее валовое содержание Co в почвах участков в основном соответствовало среднему валовому содержанию ТМ (10.0 мг/кг) в суглинистой дерново-подзолистой почве [26]. Содержание подвижных форм Co в почвах участков было значительно меньше средних показателей (0.75–3.0 мг/кг) [16].

Хром. Данные по содержанию валового Cr в почвах России весьма разноречивы. Например, установлено, что в суглинистых дерново-подзолистых почвах в среднем его содержится от 70 до 175 мг/кг [30]. Отметим, что изученные почвы реперных участков Владимирской обл. отличались существенно меньшим содержанием валового Cr по сравнению с приведенными выше показателя-

ми. Полученные нами величины содержания подвижного Cr в исследованных почвах также отличались меньшими концентрациями по сравнению с показателями, отмеченными для центрально-европейской части России, где средняя концентрация поллютанта составляет 2.62–2.66 мг/кг [19, 29].

Марганец. Концентрация валовых форм Mn в дерново-подзолистых почвах России изменяется от 270 до 720 мг/кг [31]. В работе [32] установлено фоновое валовое содержание Mn в почвах Владимирской обл. 609 мг/кг с изменениями от 203 до 1040 мг/кг. Полученные нами концентрации валового Mn располагаются вблизи нижней границы этого предела.

На всех реперных участках содержание валовых и подвижных форм изученных ТМ были зна-

Таблица 4. Степени подвижности ТМ в почве, %

Реперный участок, №	Район	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cr
1	Собинский	<u>3.0</u>	<u>0.9</u>	<u>65.0</u>	<u>6.0</u>	<u>1.4</u>	<u>5.4</u>	<u>3.0</u>
		2.4	1.3	56.3	5.8	1.2	4.9	2.7
12	Гороховецкий	<u>2.5</u>	<u>4.7</u>	<u>90.0</u>	<u>3.5</u>	<u>1.1</u>	<u>3.0</u>	<u>2.5</u>
		2.7	4.5	70.6	3.2	0.7	2.5	2.4
15	Кольчугинский	<u>8.2</u>	<u>14.4</u>	<u>38.9</u>	<u>5.3</u>	<u>1.5</u>	<u>3.6</u>	<u>3.1</u>
		8.1	12.7	53.8	4.8	2.2	3.1	3.3
18	Юрьев-Польский	<u>3.0</u>	<u>3.3</u>	<u>64.7</u>	<u>4.6</u>	<u>1.1</u>	<u>5.1</u>	<u>3.3</u>
		4.3	3.3	42.9	4.8	1.3	4.2	3.2
24	Ковровский	<u>6.6</u>	<u>4.2</u>	<u>55.6</u>	<u>7.3</u>	<u>1.8</u>	<u>6.6</u>	<u>5.9</u>
		5.8	4.2	83.3	6.4	1.6	6.1	6.7
25	Камешковский	<u>3.8</u>	<u>4.8</u>	<u>71.4</u>	<u>4.8</u>	<u>0.7</u>	<u>5.1</u>	<u>2.5</u>
		3.3	5.3	78.6	4.6	0.6	5.4	2.3
37	Камешковский	<u>6.0</u>	<u>5.6</u>	<u>72.7</u>	<u>10.2</u>	<u>1.9</u>	<u>6.3</u>	<u>6.3</u>
		5.5	6.4	66.7	11.1	1.7	5.7	5.9
	<i>M</i>	<u>4.7</u>	<u>5.4</u>	<u>65.5</u>	<u>6.0</u>	<u>1.4</u>	<u>5.0</u>	<u>3.8</u>
		4.6	5.4	64.6	5.8	1.3	4.5	3.8
	<i>V, %</i>	<u>46.5</u>	<u>78.5</u>	<u>24.1</u>	<u>37.4</u>	<u>32.3</u>	<u>26.4</u>	<u>42.0</u>
		44.5	67.1	22.3	43.3	40.6	29.3	47.1
	$\pm m$	<u>0.8</u>	<u>1.6</u>	<u>6.0</u>	<u>0.8</u>	<u>0.2</u>	<u>0.5</u>	<u>0.6</u>
		0.8	1.4	5.4	1.0	0.2	0.5	0.7

Таблица 5. Коэффициенты линейной корреляции между свойствами почвы и формами содержания ТМ

Свойства почвы	Cu		Zn		Cd		Pb		Ni		Co		Cr		Mn	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Фракция <0.01 мм, %	<u>0.02</u>	<u>0.70*</u>	<u>-0.02</u>	<u>0.17</u>	<u>-0.45</u>	<u>-0.65</u>	<u>-0.07</u>	<u>-0.35</u>	<u>0.09</u>	<u>0.53</u>	<u>0.47</u>	<u>0.38</u>	<u>0.55</u>	<u>0.56</u>	<u>0.54</u>	<u>н/о</u>
	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
$S_{орг}, %$	<u>0.29</u>	<u>0.03</u>	<u>0.10</u>	<u>0.73*</u>	<u>0.54</u>	<u>0.51</u>	<u>-0.10</u>	<u>-0.85*</u>	<u>0.12</u>	<u>-0.29</u>	<u>0.46</u>	<u>-0.01</u>	<u>0.16</u>	<u>-0.27</u>	<u>0.20</u>	<u>н/о</u>
	0.35	0.06	0.15	0.78*	0.78*	0.16	-0.08	-0.77*	0.24	-0.16	0.48	0.01	0.26	-0.29	0.16	н/о
pH_{KCl}	<u>0.06</u>	<u>0.55</u>	<u>0.52</u>	<u>-0.31</u>	<u>-0.07</u>	<u>-0.44</u>	<u>-0.32</u>	<u>0.29</u>	<u>-0.59</u>	<u>0.31</u>	<u>0.01</u>	<u>0.54</u>	<u>0.24</u>	<u>0.47</u>	<u>0.16</u>	<u>н/о</u>
	0.20	0.26	0.57	0.31	0.03	0.01	-0.28	0.08	-0.70*	0.02	0.14	0.52	0.18	0.30	0.25	н/о
$TM_{вал.ф./подв.ф.}$	<u>0.14</u>	<u>-0.29</u>	<u>0.76*</u>	<u>0.31</u>	<u>-0.06</u>	<u>0.50</u>	<u>0.82*</u>	<u>н/о</u>	<u>0.14</u>	<u>0.52</u>	<u>0.18</u>	<u>0.30</u>	<u>0.25</u>	<u>н/о</u>	<u>н/о</u>	
	0.15	0.27	0.41	0.32	0.08	0.37	0.77*	н/о						н/о	н/о	

Примечание. В графе 1 – валовое содержание, 2 – содержание подвижных форм.

чительно меньше ПДК и/или ОДК. На отдельных участках отмечено слабое превышение величин мирового и регионального кларков.

Установлено, что с 1993 г. увеличилось среднее содержание валовых форм всех изученных ТМ, причем наибольшее увеличение валового содержания на 34.7% было отмечено для Cd, наименьшее – на 4.9% – для Mn.

На протяжении всего периода мониторинга подвижность ТМ в почвах участков снижалась в

ряду: Cd > Pb > Zn > Co > Cu > Cr > Ni (табл. 4). Полученные показатели степени подвижности ТМ во многом согласовались с другими исследованиями, проведенными на этих почвах [7, 33]. За 26 лет изучения средние показатели степеней подвижности соединений Cd и Co в почве участков слабо увеличились, остальных ТМ – остались прежними.

В своих работах [34, 35] отмечено, что важными факторами, влияющими на уровни concentra-

ций ТМ в почвах, являются количество органического вещества в почве, реакция среды и гранулометрический состав. В нашем исследовании решили выявить взаимосвязь концентраций валовых и подвижных форм изученных ТМ с отдельными агрохимическими свойствами почвы, которую оценивали величинами коэффициентов линейной корреляции Пирсона при $P = 0.95$ (табл. 5).

Судя по рассчитанным величинам коэффициентов, более сильное (при условии, что $r \geq \pm 0.7$) влияние на концентрацию форм ТМ оказывало содержание органического вещества, менее выраженное воздействие оказывало изменение уровня pH_{KCl} и содержание глинистых и илестых частиц.

Выявленные корреляционные связи показали, что достоверное поглощение частицами глинистой и илестой фракций было характерно только для подвижной Cu. Валовые и подвижные соединения Cd хуже остальных ТМ адсорбировались на поверхности мелкодисперсных частиц, а соединения Cr, Mn и Co, наоборот, лучше поглощались глинистыми и илестыми частицами.

Судя по рассчитанным коэффициентам корреляции, органическое вещество суглинистой дерново-подзолистой почвы не связывало подвижные соединения Zn и валовые Cd, и наоборот, эффективно участвовало в поглощении подвижных форм соединений Pb.

Нечетко выраженным характером отличалось влияние кислотности почвы на поведение форм изученных ТМ. Отмечено, что повышение обменной кислотности почвы приводило к некоторому увеличению концентраций валовых форм Zn ($r = 0.52-0.57$) и подвижных форм Co ($r = 0.52-0.54$) и более заметному снижению концентрации валовых форм Ni ($r = -0.70$ и $r = -0.59$).

Высокая достоверная взаимосвязь между изменением концентрации валовых и подвижных форм ТМ в почвах отмечена только для Cr ($r = 0.77-0.82$) и для Cd ($r = 0.76$), в остальных случаях изученная взаимосвязь была средней и слабой силы.

Расчет суммарного показателя загрязнения исследованных почв ТМ определяли по формуле: $Z_c = \sum K_{C_i} - (n - 1)$, где n – число анализируемых элементов, K_{C_i} – коэффициент концентрации i -го химического элемента, $K_{C_i} = C_i/C_{Фi}$, где C_i – фактическая валовая концентрация элемента в почве, $C_{Фi}$ – фоновая (кларковая) региональная концентрация [36].

Расчет Z_c показал, что почвы всех реперных участков имели допустимую степень загрязнения

с рассчитанными показателями $Z_c < 16$, следовательно, их можно использовать для возделывания любых культур с обязательным контролем уровня воздействия источников загрязнения почвы и доступности ТМ для культур.

ВЫВОДЫ

1. За период мониторинга реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв по средним величинам агрохимических показателей установлено увеличение обменной и гидролитической кислотности почв, снижение обеспеченности $S_{орг}$, также подвижными формами K_2O и, особенно, P_2O_5 , содержания обменных Ca, Mg и S, также показателей ЕКО и V. Оценка исследованных почв с 1993 по 2019 г. по системе ПЭИ выявила устойчивую тенденцию к его снижению на 5.3 балла.

2. Усредненная обеспеченность почв участков в течение всего периода наблюдения B и Cu соответствовала высокому и очень высокому уровням, Mo – низкому. Для $S_{подв}$ отмечено существенное снижение обеспеченности с высокого уровня в 1993 г., до низкого в 2019 г. За 26-летний период мониторинга в почвах участков отмечено увеличение среднего содержания B, Cu и Mo.

3. Концентрации валовых и подвижных форм изученных ТМ, за исключением Cr, подвижных форм Cd и Co, в почвах участков в основном соответствовали наиболее типичным показателям для данного типа почв России.

4. На всех реперных участках концентрации валовых и подвижных форм изученных ТМ были значительно меньше ПДК или ОДК. В почвах отдельных участков отмечено несущественное превышение мирового и регионального кларков.

5. За период наблюдений подвижность соединений Cd и Co слабо возросла, для остальных ТМ – осталась прежней. Наибольшей подвижностью из ТМ отличалось поведение Cd, наименьшей – Ni.

6. С 1993 г. в почвах участков увеличилось среднее содержание валовых и подвижных форм всех изученных ТМ.

7. Наиболее сильное влияние на содержание форм ТМ оказывало содержание в почве $S_{орг}$ и менее выраженное влияние – содержание частиц физической глины и величина pH_{KCl} .

8. Оценка почв по суммарному показателю загрязнения их ТМ показала, что почвы всех участков имели допустимую степень загрязнения ($Z_c < 16$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
2. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // *Почвоведение*. 2019. № 9. С. 1130–1139.
3. *Уткин А.А.* Химия минеральных удобрений: уч. пособ. Иваново: ИГСХА, 2021. 91 с.
4. *Уткин А.А.* Эффективное применение органических удобрений в сельскохозяйственном производстве: уч. пособ. Иваново: ИГСХА, 2022. 81 с.
5. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Оценка уровня плодородия и агроэкологического состояния выработанных торфяных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2021. № 9. С. 3–12.
6. *Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С.* Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агротех. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
7. *Комаров В.И.* Эколого-агрохимическая оценка содержания тяжелых металлов в агроландшафтах Владимирской области: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.—Пушкин, 2004. 20 с.
8. *Шихова Л.Н.* Содержание и динамика тяжелых металлов в почвах северо-востока европейской части России: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.—Пушкин, 2005. 46 с.
9. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 12–22.
10. *Рагимов А.О.* Эколого-функциональная роль почв в формировании уровня благополучия населения Владимирской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2015. 23 с.
11. *Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н., Карманов И.И., Ефремов В.В.* Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв. М.: Агропромиздат, 1991. 304 с.
12. *Гаврилова И.П., Касимов Н.С.* Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
13. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
14. Руководящий документ. Массовая доля кислоторастворимых форм металлов в пробах почв, грунтов и донных отложений. Методика измерений методом атомно-абсорбционной спектроскопии. РД 52.18.191-2018. Обнинск: Росгидромет, 2019. 36 с.
15. Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 52.18.289-90. М.: Росгидромет, 1990. 36 с.
16. *Пейве Я.В.* Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.
17. *Катальмов М.В.* Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 330 с.
18. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
19. *Шихова Л.Н., Егошина Т.Л.* Тяжелые металлы в почвах и растениях таежной зоны северо-востока европейской России. Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2004. 264 с.
20. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2016. № 5. С. 39–47.
21. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.
22. *Панасин В.И.* Микроэлементы и урожай. Калининград: Калининград. кн. изд-во, 2000. 276 с.
23. *Гамзиков Г.П.* Почвенная диагностика питания растений и применения удобрений на черноземных почвах // Особенности формирования и использования почв Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1982. С. 191–204.
24. *Ильин В.Б.* Химические элементы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1982. 113 с.
25. *Taylor S.R.* Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1964. V. 28. № 8. P. 1273–1285.
26. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
27. *Зырин Н.Г., Чеботарева Н.А.* К вопросу о формах соединений меди, цинка, свинца в почвах и доступности их для растений // Содержание и формы соединений микроэлементов в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 324–350.
28. *Черных Н.А., Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.
29. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / Под общей ред. М.М. Овчаренко. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.
30. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: АН СССР, 1957. 237 с.
31. *Кабанов Ф.И.* Микроэлементы и растения. М.: Просвещение, 1977. 136 с.
32. *Трифонов Т.А.* Экологический атлас Владимирской области / Под ред. Т.А. Трифоновой. Владимир: ВлГУ, 2007. 92 с.
33. *Каплунова Е.В.* Трансформация соединений цинка, свинца и кадмия в почвах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1983. 23 с.
34. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
35. *Чернова О.В., Бекецкая О.В.* Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // *Почвоведение*. 2011. № 9. С. 1102–1113.
36. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Метод. указ. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.

Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Loamy Soils of the Vladimir Region

A. A. Utkin

*D.K. Belyaev Ivanovo State Agricultural Academy
ul. Sovetskaya 45, Ivanovo 153012, Russia
E-mail: aleut@inbox.ru*

The results of long-term agrochemical and ecotoxicological studies of reference sites of sod-podzolic loamy soils of agricultural use of the Vladimir region, which were carried out to establish the level of fertility according to the main agrochemical indicators, the content of trace elements and sulfur, ecotoxicological state – according to the content of gross and mobile forms of heavy metals, are presented. The deterioration of such indicators of soil fertility as the availability of organic matter, mobile forms of phosphorus and potassium, exchange bases of calcium, magnesium, increased metabolic and hydrolytic acidity has been established. Soil fertility was assessed by calculating the soil-ecological index. The provision of soils with boron, molybdenum, copper and mobile sulfur has been determined. The concentrations of gross and mobile forms of heavy metals in the surveyed soils did not exceed acceptable levels. According to the content of the studied metals, the studied soils are slightly polluted and are not dangerous for cultivated plants and human health. According to the Pearson correlation coefficients, the peculiarities of the influence of soil properties on the concentrations of trace elements, sulfur, gross and mobile forms of metals are established.

Key words: fertility, sod-podzolic soil, heavy metals, trace elements, reference sites, Vladimir region.