

УДК 631.452:632.12:631.445.24(470.315)

МОНИТОРИНГ ПЛОДОРОДИЯ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕПЕРНЫХ УЧАСТКОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 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 25.11.2022 г.

После доработки 27.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Представлены результаты агрохимических и экотоксикологических исследований пахотного слоя реперных участков дерново-подзолистых почв сельскохозяйственного назначения Ивановской обл., которые проводили с целью установления уровня плодородия по основным агрохимическим показателям, содержанию серы и микроэлементов, экотоксикологического состояния – по валовым и подвижным формам тяжелых металлов и мышьяка. Установлено ухудшение таких показателей плодородия почв как обеспеченность аммонийным и нитратным азотом, подвижным калием, суммой поглощенных оснований и емкостью катионного обмена. Отмечено увеличение содержания подвижного фосфора, обменных кальция, магния и других поглощенных оснований при неизменном содержании органического вещества. Произведена оценка плодородия изученных почв по расчету почвенно-экологического индекса. Установлена обеспеченность почв микроэлементами и подвижной серой. Содержание валовых и подвижных форм металлов в почвах, за исключением мышьяка в почвах отдельных участков, не превышали предельно допустимых концентраций и кларков. Исследованные почвы относятся к слабозагрязненным и не являются опасными для культурных растений и здоровья человека. По коэффициентам корреляции Пирсона и Спирмена установлены характеры взаимовлияния обменной кислотности, содержания органического вещества и гранулометрического состава почв с содержанием доступных форм микроэлементов, валовых и подвижных форм металлов и мышьяка.

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

DOI: 10.31857/S0002188123040130, **EDN:** DJMRDT

ВВЕДЕНИЕ

В результате воздействия техногенных факторов, приводящих к проявлению негативных последствий в природной среде (технологические выбросы промышленных производств, выбросы при авариях, деятельность транспорта и т.п.) и глобальных геохимических процессов происходит загрязнение природной среды различными экотоксикантами, по этой причине охрана окружающей среды является одной из серьезных проблем современного человечества. Рациональное использование земельного фонда России не обходится без охраны почв и эффективного использования их плодородия. Загрязнение сельскохозяйственных угодий может оказывать негативное влияние на жизнедеятельность населения страны.

Для оценки степени и характера загрязнения угодий в целях сохранения и восстановления пло-

дородия почв, улучшения природной среды и охраны здоровья человека возникает необходимость систематического наблюдения и контроля за их состоянием [1]. Локальный мониторинг земель сельскохозяйственного назначения на реперных участках представляет собой систему наблюдений за состоянием сельскохозяйственных угодий для своевременного выявления изменений совокупности показателей почвы, влияющих на ее плодородие, а также предупреждения и устранения негативных процессов, происходящих в природной среде.

Агрохимическое и экотоксикологическое обследование почв обеспечивают землепользователя всей необходимой информацией по содержанию подвижных форм питательных элементов, гумуса, реакции почвенной среды, обеспеченности почвы обменными формами оснований, до-

ступными микроэлементами (МЭ) и присутствием в почве токсикантов и т.п. [2, 3].

Высокоэффективное ведение сельского хозяйства возможно только при соблюдении правильного подхода к проблемам, связанным с использованием, восстановлением и сохранением почвенного плодородия [4, 5]. В последние десятилетия в европейской части Нечерноземной зоны отмечается потеря плодородия многими почвами и их постепенный переход в разряд малоплодородных и загрязненных земель, что создает угрозу вывода их из сельскохозяйственного оборота [6–9].

Современная изменчивость параметров плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. и оценка их экотоксикологического состояния, в научной литературе освещены недостаточно и требуют дополнительного изучения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

Цель работы – оценить существующий уровень эффективного плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. по основным агрохимическим показателям и содержанию МЭ, экотоксикологическое состояние по содержанию подвижных и валовых форм соединений тяжелых металлов (ТМ): свинца, кадмия, меди, никеля, цинка, хрома, ртути и металлоида мышьяка.

Особое внимание к изученным экотоксикантам вызвано тем, что большинство из них относится к I и II классам химической опасности, их соединения обладают высокой токсичностью для многих живых организмов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – дерново-подзолистые почвы, доля которых в почвенном покрове пахотных земель Ивановской обл. составляет 92% [10]. Почвенно-агрохимическое и экотоксикологическое обследование почв проводили в 2014 и 2021 гг. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на 11 реперных участках, расположенных в отдельных районах Ивановской обл. (рис. 1), путем закладки почвенных разрезов и отбора образцов почв из пахотного слоя (0–20 см) для анализов.

Реперные участки располагались в основном на пахотных землях и кормовых естественных угодьях, преобладающая растительность участков – культурные растения, в редких случаях – разнотравье. Общая площадь обследованных дерново-подзолистых почв реперных участков – 207.7 га. Почвенно-экологический индекс (ПЭИ) определяли по методике, разработанной Почвенным институтом им. В.В. Докучаева [11].

Весной с каждого реперного участка в зависимости от его площади с помощью тростевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец, массой ≈ 0.5 кг составляли из 30 точечных проб и в среднем отбирали с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Анализы почв были выполнены по принятым в агрохимической практике методикам: обменная кислотность (pH_{KCl}) – ГОСТ Р 58594-2019, гидролитическая кислотность (H_f) – ГОСТ 26212-91, подвижные фосфор (P_2O_5) и калий (K_2O) – ГОСТ Р 54650-2011 (по Кирсанову в модификации ЦИНАО), аммиачный азот ($N-NH_4$) – ГОСТ 26489-85 (по ЦИНАО), нитратный азот ($N-NO_3$) – ГОСТ 26951-86, обменные основания кальция и магния (Ca^{2+} и Mg^{2+}) – ГОСТ 26487-85, органическое вещество ($C_{орг}$) – ГОСТ 26213-91 (по Тюрину в модификации ЦИНАО), сумма поглощенных оснований (S) – ГОСТ 27821-88 (по Каппену), подвижная сера ($S_{подв}$) – ГОСТ 26490-85 (по ЦИНАО), подвижный бор (B) – ГОСТ Р 50688-94 (по Бергеру и Труогу в модификации ЦИНАО), подвижный молибден (Mo) – ГОСТ Р 50689-94 (по Григгу в модификации ЦИНАО), обменный марганец (Mn) – ГОСТ 26486-85 (по ЦИНАО), подвижный кобальт (Co) – ГОСТ 50687-94 (по Пейве–Ринькису), фракции физической глины и ила (по Качинскому) – методика [12]. Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почвы основаниями (I) определяли расчетным способом.

Определение в почвах подвижных форм ТМ проводили в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера при pH 4.8, валовых форм Hg – в вытяжке 1.0 н. HNO_3 , методом атомно-абсорбционной спектроскопии [13–15], валовые формы As – фотометрическим методом в вытяжке $HNO_3 + H_2SO_4$ (1 : 1) [16].

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения признака с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Средние уровни изученных показателей в исследованных образцах при нормальном распределении сравнивали между собой с помощью выборочного t -критерия Стьюдента для зависимых переменных ($p < 0.05$), при ненормальном – с помощью критерия Вилкоксона ($p < 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном распределении – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

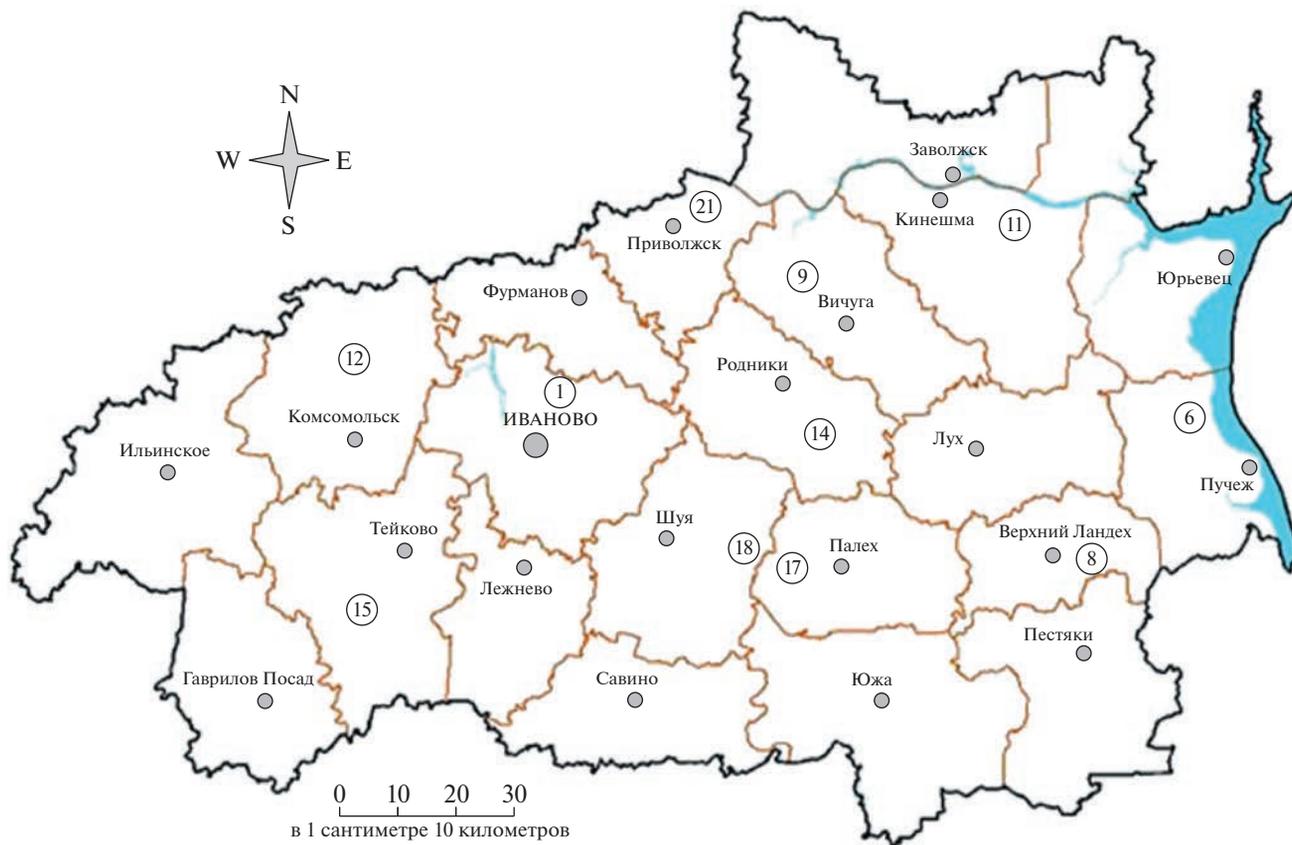


Рис. 1. Карта-схема Ивановской обл. с обозначением реперных участков мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За 7 лет наблюдения (с 2014 по 2021 г.), средняя величина обменной и гидролитической кислотности почв участков снизилась на 0.2 ед. и 0.20 смоль(экв)/кг почвы соответственно (табл. 1). Расчет *t*-критерия Стьюдента для зависимых переменных показал, что отмеченные изменения величин рН_{KCl} и *H*_г за период мониторинга почв были достоверными (*p* < 0.05). Почвы большей части участков по величине рН_{KCl} оставались преимущественно нейтральными, по величине *H*_г имели очень низкую степень кислотности, что явилось результатом увеличения объемов известкования исследованных почв за рассматриваемый период.

Известно, что природа проявления рН_{KCl} тесно связана с *H*_г. Подтверждение этому было отмечено в нашем исследовании. Прослежены достоверные (*p* < 0.05) корреляционные взаимосвязи заметной силы в 2021 г.: $r(H_g/pH_{KCl}) = -0.65$ и весьма высокой силы в 2014 г.: $r = -0.97$ (при *P* = 0.95).

Средние величины обеспеченности почв участков *C*_{орг} в 2014 и 2021 гг. достоверно не различались между собой, оставаясь на низком уров-

не обеспеченности, как и обеспеченность почв большинства участков.

Подвижные формы N-NH₄, N-NO₃, P₂O₅ и K₂O являются основными соединениями питания растений, и этим определяется важность их изучения в почвах. Следует отметить, что содержание в дерново-подзолистых почвах большинства участков N-NH₄ и N-NO₃ соответствовало очень низкой обеспеченности, что свидетельствовало о необходимости увеличения применения доз азотных удобрений для обеспечения потребности культур. За 7-летний период мониторинга среднее содержание N-NH₄ и N-NO₃ снизилось на 5.9 и 59.1% соответственно. Вероятно, что в основном потеря нитратов происходила по причине их вымывания вниз по профилю почвы и из-за выноса урожаем культур.

Расчет *t*-критерия Стьюдента для содержания N-NH₄ показал, что оно с 2014 по 2021 г. изменилось не существенно, а расчет критерия Вилкоксона для содержания N-NO₃ установил достоверность различия величин содержания нитратов в 2014 и 2021 гг.

С 2014 г. средняя обеспеченность дерново-подзолистых почв участков подвижным P₂O₅ из-

Таблица 1. Агрохимические свойства пахотного слоя дерново-подзолистых почв реперных участков

Реперный участок, №	Район	Фракция, %*		N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	C _{орг.} %	pH _{KCl}	H _r	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	ЕКО	V, %	ПЭИ, балл
		<0.001	<0.01													
1	Ивановский	4.8	18.3	1.7	3.1	186	156	2.1	5.2	1.37	5.9	2.1	11.8	13.2	89.6	53.1
				1.9	1.4	250	160	2.0	5.8	0.89	5.0	2.5	10.8	11.7	92.4	71.2
6	Пучежский	2.0	9.3	2.8	4.3	203	66	2.1	5.6	0.83	7.9	2.6	10.7	11.5	92.8	48.5
				2.0	1.0	250	90	1.7	6.3	1.13	4.6	2.8	9.1	10.2	89.0	55.3
8	Верхнеландеховский	3.5	16.0	2.9	2.3	90	130	1.9	5.0	1.26	8.4	2.3	12.5	13.8	90.8	45.6
				1.3	1.5	59	62	1.6	5.5	0.85	4.4	1.7	8.2	9.1	90.6	44.2
9	Вичугский	3.0	14.1	0.5	1.7	198	57	2.3	6.1	0.67	7.9	2.5	27.9	28.6	97.7	62.9
				2.6	1.3	225	75	2.1	6.2	0.47	7.6	3.4	27.6	28.1	98.3	63.5
11	Кинешемский	5.5	25.0	1.3	9.5	39	76	2.4	5.5	1.04	4.4	1.8	16.0	17.0	93.9	47.2
				2.5	1.2	130	75	2.2	5.9	0.75	9.4	3.5	16.2	17.0	95.6	58.3
12	Комсомольский	5.7	20.0	2.2	1.7	250	92	2.1	6.2	0.46	8.5	2.8	17.0	17.5	97.4	57.0
				1.4	0.9	111	57	2.1	6.2	0.31	5.1	2.8	20.7	21.0	98.5	52.0
14	Родниковский	5.2	31.0	1.6	5.9	56	87	1.8	5.1	1.29	6.1	1.9	12.2	13.5	90.4	47.1
				0.8	2.3	21	54	2.0	5.4	0.95	7.9	3.0	11.8	12.8	92.6	45.6
15	Тейковский	2.3	9.0	1.3	12.5	228	185	2.0	6.5	0.38	7.6	2.8	16.8	17.2	97.8	60.0
				0.4	4.1	250	110	2.5	6.2	0.51	5.1	2.1	9.9	10.4	95.1	58.4
17	Палехский	3.3	16.3	2.7	2.1	58	95	2.2	6.0	0.66	5.5	2.3	12.5	13.2	95.0	46.9
				2.7	2.5	250	90	3.0	6.8	0.35	7.6	2.0	19.4	19.8	98.2	60.5
18	Шуйский	4.9	16.2	0.5	1.7	40	66	3.1	5.7	0.99	4.6	2.2	17.2	18.2	94.6	53.8
				0.6	1.5	40	62	3.0	5.7	0.80	8.4	3.6	20.3	21.1	96.2	56.7
21	Приволжский	5.1	19.9	1.5	3.2	147	60	2.8	6.4	0.48	6.2	2.6	38.6	39.1	98.8	62.9
				0.9	1.9	145	57	2.6	6.5	0.29	8.7	4.0	30.8	31.1	99.1	67.5
<i>M</i>		4.1	17.7	1.7	4.4	136	97	2.3	5.8	0.86	6.6	2.3	17.6	18.4	94.4	53.2
<i>±m</i>		0.4	1.9	1.6	1.8	157	81	2.3	6.0	0.66	6.7	2.9	16.8	17.5	95.1	57.5
				0.3	0.3	28	9	0.1	0.1	0.09	0.6	0.2	2.3	2.3	1.1	2.5

Примечания. 1. В таблице приведены средние арифметические значения, *M* – среднее арифметическое, *m* – ошибка среднего арифметического. То же в табл. 2, 3. 2. Над чертой – 2014 г., под чертой – 2021 г. То же в табл. 2–4.

*Фракцию (%) определяли на момент закладки разреза.

менилась с повышенной до высокой, подвижным K₂O – уменьшилась, оставшись в пределах той же градации. Увеличение обеспеченности почв P₂O₅ можно объяснить применением фосфорсодержащих удобрений, уменьшение K₂O – сокращением внесения калийсодержащих удобрений. Отмеченные изменения в содержании P₂O₅ и K₂O в 2014 и 2021 гг. подчинялись закону ненормально-го распределения и были недостоверными.

Дерново-подзолистые почвы большинства участков с 2014 по 2021 г. преимущественно имели среднюю и повышенную степень обеспеченности обменными Ca²⁺ и Mg²⁺ соответственно. С 2014 г. среднее содержание Ca²⁺ и Mg²⁺ увеличилось на 1.5 и 26.1% соответственно, но тем не ме-

нее продолжало соответствовать средней и повышенной степеням обеспеченности основаниями.

Расчет *t*-критерия Стьюдента показал, что изменения в содержании Ca²⁺ и Mg²⁺ в 2-х зависимых выборках за 2014 и 2021 гг., были несущественными. Средняя доля присутствия обменных Ca²⁺ и Mg²⁺ в общем составе поглощенных катионов в 2014 и 2021 гг. составляла 63.4% (lim = 38.2–92.4%) и 58.6% (lim = 22.8–97.7%) соответственно, что свидетельствовало о важной роли этих элементов в процессах химизма дерново-подзолистых почв Ивановской обл.

Емкостно-сорбционные показатели (*S* и ЕКО) почв участков к 2021 г. снизились на 4.6 и 5.2% соответственно, а средняя величина *V* возросла на 0.7% по сравнению со показателями 2014 г. Срав-

нение между собой величин рассмотренных показателей в 2-х зависимых выборках показало, что отмеченные изменения не были достоверными ($p > 0.05$).

Средние величины S и V соответствовали повышенной степени поглощения и высокой степени насыщенности основаниями на протяжении всего периода наблюдения, соответственно.

Согласно градации распределения глинистых частиц, почвы большинства участков имели супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав.

Расчет ПЭИ позволил объективно оценить состояние почвы по агрохимическим свойствам, а также учесть такие факторы почвообразования как климатические условия и рельеф местности, выявить негативные процессы, которые приводили к деградации и снижению плодородия. Установлено, что с 2014 по 2021 г. в среднем на реперных участках отмечали повышение показателя ПЭИ на 4.4 балла или на 8.2% к исходному уровню (табл. 1). Увеличение ПЭИ в 2021 г. можно объяснить тем, что климатические условия 2021 г. были более благоприятными, чем условия 2014 г., которые сказались на формировании климатического показателя, а также улучшением обеспеченности почв участков подвижным P_2O_5 и снижением обменной кислотности за счет увеличения применения фосфорных и известковых удобрений. В то же время к наиболее вероятным причинам снижения ПЭИ отдельных участков можно отнести уменьшение обеспеченности подвижными формами K_2O в результате снижения применения калийных удобрений.

Одним из факторов, влияющим на плодородие почвы, урожайность и качество растительной продукции, является обеспеченность почв доступными формами МЭ питания растений [17]. Провели анализ данных содержания в дерново-подзолистых почвах реперных участков доступных форм МЭ (табл. 2).

Бор. Среднее содержание и пределы изменений водорастворимых форм В в почвах участков согласовалось с данными, приведенными в монографии Панасина для этих почв (0.43–1.7 мг/кг) [18]. Согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны подвижными формами В [19] и исходя из изменений его содержания в почвах большинства реперных участков в 2014 г., его содержание преимущественно отвечало средней степени обеспеченности. К 2021 г. количество участков, имеющих высокую обеспеченность почв В, возросло.

В своих работах Добровольский, Чернова и Бекецкая отмечали, что основными факторами, влияющими на уровни содержания МЭ и ТМ в

почвах, являются количество органического вещества, реакция среды и гранулометрический состав почвы [20, 21].

Механизмы адсорбции В компонентами почв пока изучены недостаточно. Однако адсорбция В в определенной мере зависит от величины pH_{KCl} , содержания $C_{орг}$ и тяжелых гранулометрических фракций почвы [22]. На дерново-подзолистых почвах реперных участков Ивановской обл. между величинами pH_{KCl} , содержанием $C_{орг}$ и суммы илестых и глинистых частиц и содержанием В установлены недостоверные корреляционные взаимосвязи, преимущественно – слабой и реже – умеренной силы (табл. 2).

За период с 2014 по 2021 г. содержание В в изученных почвах увеличилось на 25.9%, однако, как показал расчет критерия Вилкоксона, отмеченное изменение не было достоверным.

Молибден. Содержание подвижных форм Мо в почвах участков согласуется с пределами его содержания в дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах (0.11–0.15 мг/кг), отмеченными в работе [23]. По градации обеспеченности почв Мо [19] большинство почв участков в 2014 г. имели низкую обеспеченность элементом, к 2021 г. количество участков, имеющих среднюю обеспеченность, увеличилось.

Поведение минеральных форм подвижного Мо в почвах зависит от уровня pH_{KCl} [22]. Установлено, что между содержанием подвижного Мо и величиной pH_{KCl} в 2014 г. была установлена существенная ($p < 0.05$) корреляционная взаимосвязь заметной силы, в 2021 г. – несущественная умеренная. Содержание подвижного Мо хуже коррелировало с содержанием $C_{орг}$ и суммы фракций илестых и глинистых частиц, чем с величиной pH_{KCl} (табл. 2), что нашло подтверждение при изучении содержания подвижного Мо в дерново-подзолистых почвах Кировской обл. [9].

Сравнение содержания Мо в 2-х выборках с помощью t -критерия Стьюдента показало, что содержание Мо в почвах не существенно увеличилось на 15.4%.

Кобальт. Содержание подвижного Со в почвах участков согласовалось с пределами его содержания в дерново-подзолистых почвах (0.12–3.0 мг/кг), отмеченными в работе [24]. В 2014 г. большинство почв участков имели низкую обеспеченность Со, к 2021 г. – среднюю, что сказалось на средней величине обеспеченности почв элементом [19].

Распределение Со в почве зависит от содержания физической глины и илестых фракций, $C_{орг}$, оксидов железа и величины pH_{KCl} [22]. Между содержанием подвижного Со и показателями pH_{KCl} , содержанием $C_{орг}$, и илестых и глинистых частиц

Таблица 2. Концентрации МЭ и $S_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистых почвах, мг/кг

Реперный участок, №	Район	В	Мо	Со	Mn	$S_{\text{подв}}$
1	Ивановский	<u>0.43</u>	<u>0.10</u>	<u>0.89</u>	<u>66.3</u>	<u>4.5</u>
		0.72	0.08	2.01	58.0	2.3
6	Пучежский	<u>0.44</u>	<u>0.11</u>	<u>0.81</u>	<u>60.0</u>	<u>4.2</u>
		0.56	0.09	1.63	73.0	4.2
8	Верхнеландеховский	<u>0.53</u>	<u>0.10</u>	<u>0.62</u>	<u>60.5</u>	<u>4.0</u>
		0.52	0.17	0.79	70.0	2.3
9	Вичугский	<u>0.42</u>	<u>0.14</u>	<u>1.07</u>	<u>73.2</u>	<u>4.4</u>
		0.52	0.13	1.36	80.0	3.0
11	Кинешемский	<u>0.56</u>	<u>0.15</u>	<u>1.01</u>	<u>78.4</u>	<u>3.9</u>
		0.66	0.08	1.55	67.0	2.1
12	Комсомольский	<u>0.41</u>	<u>0.14</u>	<u>0.93</u>	<u>51.3</u>	<u>4.1</u>
		0.55	0.14	1.70	71.0	3.0
14	Родниковский	<u>0.47</u>	<u>0.12</u>	<u>0.95</u>	<u>70.0</u>	<u>5.2</u>
		0.74	0.21	1.69	58.0	1.5
15	Тейковский	<u>0.69</u>	<u>0.13</u>	<u>0.90</u>	<u>65.1</u>	<u>2.8</u>
		0.81	0.23	1.22	65.0	1.8
17	Палехский	<u>0.43</u>	<u>0.17</u>	<u>0.80</u>	<u>75.3</u>	<u>5.1</u>
		0.35	0.16	1.34	25.0	2.3
18	Шуйский	<u>0.47</u>	<u>0.13</u>	<u>0.91</u>	<u>70.1</u>	<u>4.8</u>
		1.08	0.23	1.61	61.0	4.1
21	Приволжский	<u>1.12</u>	<u>0.14</u>	<u>1.30</u>	<u>69.8</u>	<u>5.0</u>
		0.92	0.09	1.84	69.0	3.5
	М	<u>0.54</u>	<u>0.13</u>	<u>0.93</u>	<u>67.3</u>	<u>4.4</u>
		0.68	0.15	1.52	63.4	2.7
	±m	<u>0.06</u>	<u>0.01</u>	<u>0.05</u>	<u>2.3</u>	<u>0.2</u>
		0.06	0.02	0.10	4.3	0.3
	$r(C_{\text{орг}}/MЭ)$	<u>0.06*</u>	<u>0.34</u>	<u>0.52</u>	<u>0.35</u>	<u>0.30</u>
		0.37	-0.04	0.14	-0.39*	0.14
	$r(pH_{KCl}/MЭ)$	<u>0.05*</u>	<u>0.60**</u>	<u>0.53</u>	<u>-0.03</u>	<u>-0.25</u>
		-0.33	-0.31	0.09	0.19*	0.28
	$r(\text{сумма } <0.001 \text{ и } <0.01/MЭ)$	<u>0.04*</u>	<u>0.13</u>	<u>0.31</u>	<u>0.25</u>	<u>0.50</u>
		0.16	-0.07	0.39	-0.34*	-0.39
	В	=				
		-				
	Мо	<u>-0.06*</u>	=			
		0.29	-			
	Со	<u>0.16*</u>	<u>0.39</u>	=		
		0.39	-0.43	-		
	Mn	<u>0.11*</u>	<u>0.49</u>	<u>0.35</u>	=	
		-0.26*	-0.25*	-0.08*	-	
	$S_{\text{подв}}$	<u>-0.19*</u>	<u>0.18</u>	<u>0.25</u>	<u>0.32</u>	=
		0.26	-0.23	0.26	0.51*	-

*Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена.

**Значимые коэффициенты корреляции при $P = 0.95$. То же в табл. 4.

в дерново-подзолистых почвах участков установлены недостоверные корреляционные взаимосвязи заметной, умеренной и слабой силы соответственно (табл. 2). Оценка содержания S_o с помощью 2-выборочного t -критерия Стьюдента показала, что увеличение его присутствия в почвах на 63.4% было существенным.

Марганец. Для дерново-подзолистых почв России характерно наличие наибольших количеств обменных форм Mn (50–150 мг/кг почвы) [22]. Среднее содержание обменного Mn в 2014–2021 гг. соответствовало высокой степени обеспеченности [19]. В своей работе Битюцкий [22] отмечает, что концентрация Mn в почвах зависит от реакции среды и содержания гумуса. Зырин указывает на то, что значительная часть подвижного Mn почв сосредоточена в тонкодисперсных частицах и в связях с органическим веществом [25]. В нашем исследовании между содержанием обменного Mn и величиной pH_{KCl} установлены слабые недостоверные корреляции, между содержанием $S_{орг}$ – корреляции умеренной силы, между содержанием частиц ила и глины – корреляции слабой и умеренной силы (табл. 2). На отсутствие взаимосвязей четкого характера между содержанием обменного Mn и pH_{KCl} в дерново-подзолистых почвах Удмуртии и Кировской обл. России, Беларуси отмечено в работах [9, 26, 27]. Отсутствие высоких и значимых связей между рассмотренными свойствами дерново-подзолистых почв и содержанием подвижного Mn в них может быть связано с тем, что значительное влияние на содержание подвижного Mn оказывает окислительно-восстановительный потенциал почвы и содержание лабильного органического вещества [28]. Как показал расчет критерия Вилкоксона, содержание Mn в 2021 г. не существенно снизилось на 5.8% к уровню 2014 г.

Предположительно, повышение обеспеченности подвижными формами V , Mo и Co связано прежде всего с поступлением в дерново-подзолистые почвы дополнительных количеств данных элементов от техногенных источников загрязнения, а также с удобрениями.

Сера. Общее содержание серы в почве определяется почвообразующими породами и содержанием органического вещества. Установлено, что с органическим веществом почвы может быть связано до 70–90% валовых запасов серы. Между содержанием $S_{орг}$ и серы в его составе установлена прямая корреляционная связь линейной зависимости. Однако между содержанием валовых и подвижных форм серы в почвах не всегда отмечена прямая линейная корреляция [29]. В нашем исследовании между содержанием $S_{орг}$ и $S_{подв}$ в почвах была выявлена умеренной и слабой тесноты недостоверная корреляционная взаимосвязь.

Корреляции между $S_{подв}$ и величиной pH_{KCl} , между $S_{подв}$ и содержанием суммы частиц ила и глины имели разные направленности, но одинаковые по силе взаимосвязи.

Исходя из среднего содержания $S_{подв}$, дерново-подзолистые почвы в течение всего периода мониторинга имели низкий уровень обеспеченности $S_{подв}$ (<1 мг/кг почвы) [30]. С 2014 г. среднее содержание $S_{подв}$ в почвах реперных участков к 2021 г. достоверно снизилось на 38.6%, что можно объяснить уменьшением применения органических и серосодержащих удобрений, систематическим ежегодным выносом элемента из почвы урожаем и вымыванием сульфатов из пахотного слоя почв участков.

Между доступными формами изученных МЭ в дерново-подзолистых почвах отмечены недостоверные корреляционные взаимосвязи прямой и обратной зависимости, изменяющиеся по годам (табл. 2). По-видимому, концентрации доступных форм МЭ в почвах больше зависели от присутствия других сопутствующих химических элементов.

В настоящее время для минеральных почв по-прежнему не разработаны величины 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 изменяются в зависимости от различных почвенно-климатических условий их образования, деятельности человека и т.п. Поэтому, для оценки концентрации ТМ и As использовали методику, применяемую в геохимии, заключавшуюся в сравнении полученных величин валовых или подвижных концентраций экотоксикантов в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. с имеющимися валовыми и подвижными ПДК и кларками ТМ в земной коре [31].

Валовые концентрации ТМ в почвах дают полную характеристику почвы относительно актуального содержания в них экотоксикантов. Более объективными являются данные по содержанию подвижных или доступных для растений форм металлов. Данные о концентрациях подвижных и валовых форм ТМ и As в почвах участков представлены в табл. 3.

В настоящем исследовании также решили выявить взаимосвязи между доступными содержаниями изученных МЭ, валовыми и подвижными формами ТМ и указанными свойствами дерново-подзолистых почв, которые оценивали по величинам коэффициентов линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена, при $P = 0.95$ (табл. 2, 4).

Таблица 3. Концентрации форм ТМ и As в дерново-подзолистых почвах, мг/кг

Реперный участок, №	Район	Подвижные формы						Валовые формы	
		Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Hg	As
1	Ивановский	<u>0.17</u>	<u>0.72</u>	<u>0.042</u>	<u>0.40</u>	<u>0.40</u>	<u>0.63</u>	<u>0.016</u>	<u>1.80</u>
		0.10	1.13	0.035	0.60	0.30	н/о*	0.027	2.47
6	Пучежский	<u>0.12</u>	<u>0.61</u>	<u>0.051</u>	<u>1.28</u>	<u>0.26</u>	<u>0.81</u>	<u>0.011</u>	<u>1.30</u>
		0.11	1.04	0.050	0.68	0.50	н/о	0.027	1.33
8	Верхнеландеховский	<u>0.10</u>	<u>0.69</u>	<u>0.048</u>	<u>0.37</u>	<u>0.60</u>	<u>0.93</u>	<u>0.008</u>	<u>1.70</u>
		0.08	0.90	0.026	0.57	0.50	н/о	0.014	2.20
9	Вичугский	<u>0.12</u>	<u>0.68</u>	<u>0.043</u>	<u>0.70</u>	<u>0.25</u>	<u>0.68</u>	<u>0.012</u>	<u>3.80</u>
		0.09	1.50	0.074	1.36	0.32	н/о	0.027	3.27
11	Кинешемский	<u>0.15</u>	<u>0.90</u>	<u>0.042</u>	<u>0.38</u>	<u>0.56</u>	<u>0.65</u>	<u>0.014</u>	<u>4.05</u>
		0.11	1.61	0.069	0.84	0.50	н/о	0.027	3.81
12	Комсомольский	<u>0.12</u>	<u>0.94</u>	<u>0.043</u>	<u>0.35</u>	<u>0.36</u>	<u>0.58</u>	<u>0.016</u>	<u>1.78</u>
		0.10	0.80	0.039	0.85	0.39	н/о	0.027	1.14
14	Родниковский	<u>0.11</u>	<u>1.06</u>	<u>0.060</u>	<u>0.23</u>	<u>0.38</u>	<u>0.38</u>	<u>0.018</u>	<u>3.25</u>
		0.11	0.83	0.042	0.66	0.28	н/о	0.027	3.20
15	Тейковский	<u>0.11</u>	<u>1.72</u>	<u>0.035</u>	<u>0.68</u>	<u>0.30</u>	<u>0.71</u>	<u>0.014</u>	<u>1.13</u>
		0.09	1.90	0.061	0.97	0.35	н/о	0.014	0.90
17	Палехский	<u>0.15</u>	<u>1.79</u>	<u>0.035</u>	<u>1.25</u>	<u>0.42</u>	<u>0.84</u>	<u>0.017</u>	<u>1.83</u>
		0.15	0.75	0.079	0.69	0.36	н/о	0.027	0.86
18	Шуйский	<u>0.19</u>	<u>1.08</u>	<u>0.063</u>	<u>0.52</u>	<u>0.47</u>	<u>0.52</u>	<u>0.014</u>	<u>2.90</u>
		0.11	1.75	0.047	1.16	0.60	н/о	0.027	2.37
21	Приволжский	<u>0.25</u>	<u>1.13</u>	<u>0.045</u>	<u>0.33</u>	<u>0.36</u>	<u>1.15</u>	<u>0.014</u>	<u>2.38</u>
		0.16	2.38	0.070	1.07	1.39	н/о	0.027	2.65
	<i>M</i>	<u>0.14</u>	<u>1.03</u>	<u>0.046</u>	<u>0.59</u>	<u>0.40</u>	<u>0.72</u>	<u>0.014</u>	<u>2.36</u>
		0.11	1.33	0.054	0.86	0.50	н/о	0.025	2.20
	$\pm m$	<u>0.01</u>	<u>0.12</u>	<u>0.003</u>	<u>0.11</u>	<u>0.03</u>	<u>0.06</u>	<u>0.001</u>	<u>0.30</u>
		0.01	0.16	0.005	0.08	0.09	н/о	0.002	0.31
	ПДК	3	23	–	6	4	6	2.1	2
	Кларк мировой	55	70	0.2	12.5	75	100	0.08	1.8

*н/о – не определяли. То же в табл. 4.

Медь. Среднее содержание подвижных форм Cu, переходящих в вытяжку ААБ рН 4.8, за весь период наблюдения в почвах участков отличалось существенно меньшими показателями по сравнению с усредненным содержанием, характерным для дерново-подзолистых почв европейской части России [32].

Байдина и Ильин указывали, что обычно наибольшее содержание подвижной Cu находится в верхних горизонтах почв, обогащенных органическим веществом [33, 34]. В нашем случае отмечено подтверждение этому факту, о чем свидетельствовали коэффициенты корреляции заметной и достоверно высокой силы взаимосвязи.

Шихова и Егошина отмечали, что содержание подвижной Cu в пахотных горизонтах дерново-

подзолистых почв Кировской обл. не зависело от величины рН_{KCl} [9]. Факт наличия слабой взаимосвязи между подвижной Cu и показателем рН_{KCl} установлен и в нашем исследовании.

Подвижные формы Cu прочно связываются глинистыми и илистыми частицами суглинистых и глинистых почв. Однако в виду того, что дерново-подзолистые почвы участков имели небольшую долю присутствия в своем гранулометрическом составе указанных частиц, то и взаимосвязь, объясняющая эту зависимость, отличалась низкими и недостоверными величинами (табл. 2). Как показал расчет критерия Вилкоксона, за исследованный период отмечено достоверное снижение содержания подвижных форм Cu на 27.3%.

Таблица 4. Коэффициенты линейной парной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена между свойствами дерново-подзолистых почв и концентрациями в них ТМ и As

Свойства почвы/ТМ	ТМ							
	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Hg	As
r (C _{орг} /ТМ)	<u>0.85**</u>	<u>0.17*</u>	<u>0.28</u>	<u>0.19</u>	<u>0.10</u>	<u>0.19</u>	<u>-0.01</u>	<u>0.33</u>
	0.52	0.41	0.57	0.44	0.30*	н/о	0.23	-0.20
r (рН _{КCl} /ТМ)	<u>0.25*</u>	<u>0.48*</u>	<u>-0.49</u>	<u>0.20*</u>	<u>-0.55</u>	<u>0.32</u>	<u>0.15</u>	<u>-0.16</u>
	0.43*	0.18	0.73**	0.24	0.25*	н/о	0.23*	-0.51
r (сумма <0.001 и <0.01/ТМ)	<u>0.28*</u>	<u>0.21*</u>	<u>0.34</u>	<u>-0.79**</u>	<u>0.41</u>	<u>-0.38</u>	<u>0.54</u>	<u>0.59</u>
	0.40*	-0.14	-0.14	-0.19	-0.05*	н/о	0.49*	0.61**
Cu	=	=	=	=	=	=	=	=
Zn	<u>0.27*</u>	=	=	=	=	=	=	=
	0.05*	=	=	=	=	=	=	=
Cd	<u>-0.03*</u>	<u>-0.32*</u>	=	=	=	=	=	=
	0.48*	0.44	=	=	=	=	=	=
Pb	<u>0.04*</u>	<u>-0.15*</u>	<u>-0.30*</u>	=	=	=	=	=
	0.14*	0.67**	0.53	=	=	=	=	=
Ni	<u>0.12*</u>	<u>0.17*</u>	<u>0.14</u>	<u>-0.31*</u>	=	=	=	=
	0.37*	0.40*	0.11*	0.28*	=	=	=	=
Cr	<u>0.01*</u>	<u>0.04*</u>	<u>-0.41</u>	<u>0.25*</u>	<u>0.04</u>	=	=	=
	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	=	=	=
Hg	<u>0.21*</u>	<u>0.59*</u>	<u>-0.05</u>	<u>-0.32*</u>	<u>-0.18</u>	<u>-0.48</u>	=	=
	0.65**	-0.15*	0.30*	0.22*	0.00*	н/о	=	=
As	<u>0.38*</u>	<u>0.00*</u>	<u>0.30</u>	<u>-0.25*</u>	<u>0.20</u>	<u>-0.35</u>	<u>0.14</u>	=
	0.07	0.27	0.06	0.24	-0.04*	н/о	0.37*	=

Цинк. Среднее содержание подвижного Zn в исследованных почвах во многом соответствовало среднему содержанию ТМ в дерново-подзолистых почвах центральных районов Нечерноземной зоны России [35].

Природа взаимосвязи подвижных соединений Zn с содержанием C_{орг} и показателем рН_{КCl}, по наблюдениям многих авторов, имеет сложный и неоднозначный характер, что может проявляться в недостоверных и низких корреляциях [9, 18, 22], завися от доли присутствия в органическом веществе почв лабильных фракций, режима увлажнения, окислительно-восстановительного потенциала почвы и др. Судя по рассчитанным величинам коэффициентов корреляций, подвижные соединения Zn слабо и умеренно коррелировали с содержанием C_{орг} и показателем рН_{КCl} (табл. 4). Во многом схожие с нашими величинами коэффициентов корреляций, между содержаниями подвижного Zn и C_{орг} были получены в работе

Шиховой и Егошиной для дерново-подзолистых почв Кировской обл. ($r = 0.30$) [9]. Корреляция между содержаниями подвижных форм Zn и суммы количества частиц глины и ила в изученных почвах имела различное направление и слабую степень связи. В 2021 г. среднее содержание подвижного Zn в почвах незначительно ($p > 0.05$) увеличилось на 29.1% к уровню 2014 г.

Кадмий. Отмеченные пределы изменений и средние величины содержания подвижных форм Cd в почвах участков соотносятся с данными, указанными в монографии [9], полученными для дерново-подзолистых почв.

В накоплении подвижного Cd почвами большую роль играет органическое вещество и особенно его лабильные формы, содержание которых в дерново-подзолистых почвах невелико [9, 36]. В силу этого, исследованные почвы имели недостоверную заметную и слабую положительную корреляционную взаимосвязь между содер-

жаниями $C_{\text{орг}}$ и подвижных форм Cd. Между содержанием подвижного Cd и показателем pH_{KCl} в 2021 г. прослежена отчетливая положительная достоверная корреляция, в 2014 г. – отрицательная слабая.

Andersson утверждал, что Cd активнее связывается органическим веществом, чем тонкодисперсными частицами глинистых минералов, и его концентрация в почве положительно коррелирует с содержанием $C_{\text{орг}}$ [37], что нашло свое подтверждение в нашем исследовании.

Распределение подвижного Cd в почвах участков подчинялось закону нормального распределения. Анализ сравнения зависимых выборок показал, что отмеченное увеличение средней концентрации металлического токсиканта на 17.4% не было достоверным.

Свинец. Содержание подвижного Pb в изученных почвах было близко к его содержанию в дерново-подзолистых почвах Русской равнины [9]. Среди многих видов почв самым высоким средством к поглощению Pb обладают гумусированные почвы [36]. Шихова и Егошина отмечали, что для подвижных форм Pb характерна прямая корреляция с величиной кислотности почвы [9]. Однако в нашем случае дерново-подзолистые почвы имели слабую и умеренную корреляцию с величиной pH_{KCl} и содержанием $C_{\text{орг}}$. Илистые и глинистые частицы преимущественно легких по гранулометрическому составу исследованных почв не принимали активного участия в снижении концентрации подвижного Pb, о чем свидетельствовали рассчитанные коэффициенты корреляции (табл. 4). Содержание форм подвижного Pb в почвах участков отвечало ненормальному распределению, а анализ сравнения зависимых выборок выявил, что снижение средней концентрации Pb на 27.3% не было существенным.

Никель. Концентрации подвижных форм Ni в изученных почвах участков во многом повторяли результаты, отмеченные для этих почв в работе [9], где было показано, что растворимость Ni в дерново-подзолистых почвах находится в обратной зависимости от величины pH_{KCl} . Однако в нашем исследовании влияние величины pH_{KCl} не однозначно сказывалось на содержании подвижного Ni, что очевидно могло быть связано с различиями в окислительно-восстановительном состоянии почв, качественном состоянии гумуса и режиме увлажнения почв [38].

Отмечено, что содержание подвижного Ni слабо коррелировало с гранулометрическим составом дерново-подзолистых почв Кировской обл. [9], особенно тогда, когда почвы содержали мало илистых и глинистых частиц. Подтверждение этому факту можно найти и в нашем исследова-

нии, т.к. малое присутствие в исследованных почвах глинистых и особенно илистых частиц практически не коррелировало с содержанием подвижного Ni (табл. 4). Увеличение содержания подвижного Ni в почвах участков за период мониторинга на 25.0%, как показал расчет критерия Вилкоксона, не было существенным.

Данные по содержанию подвижного Cr в почвах европейской части России весьма разнородны. Например, в суглинистых дерново-подзолистых почвах России его содержание изменяется от 0.5 до 4 мг Cr/кг при средней концентрации 2.6 мг/кг [9]. Обследованные дерново-подзолистые почвы Ивановской обл. не превышали усредненные показатели и пределы содержания подвижного Cr в дерново-подзолистых почвах России.

Отмечено, что для подвижного Cr характерно отсутствие четких закономерностей его поведения не только в пахотном слое, но и по всему профилю дерново-подзолистых почв, отсутствие связи с содержанием $C_{\text{орг}}$ и величиной pH_{KCl} [9]. Рассчитанные нами коэффициенты корреляции показали слабую взаимосвязь между содержанием $C_{\text{орг}}$, величиной pH_{KCl} и содержанием подвижного Cr. Возможно, что на содержание подвижного Cr в большей степени влияет качественный состав органического вещества, а не его общее содержание в дерново-подзолистых почвах. Между содержаниями тонкодисперсных почвенных частиц и подвижного Cr отмечена отрицательная заметная корреляция.

Ртуть. Фоновые валовые концентрации Hg в незагрязненных дерново-подзолистых почвах оцениваются приблизительно от 0.04 до 0.75 мг/кг почвы [39]. Содержание валовой Hg в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. было примерно в 2 раза меньше нижнего предела ее содержания. По данным ряда авторов [40, 41], органическое вещество почв обладает высокой способностью к поглощению Hg, а снижение обменной кислотности с 3.0 до 6.0 приводит к уменьшению концентрации Hg, т.е. ее иммобилизации [42]. В месте с тем влияние содержания органического вещества и величины pH_{KCl} практически никак не сказывалось на содержании валовой Hg в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. Более заметное влияние на поглощение валовой Hg оказывало содержание фракций ила и глины, что подтверждено положительными корреляциями с заметными силами взаимосвязи (табл. 4). За период мониторинга содержание валовой Hg в почвах участков, как показал анализ сравнения 2-х выборок, достоверно возросло на 75.7%.

Мышьак. Средние фоновые валовые концентрации As в дерново-подзолистых суглинистых почвах оценены в 2.2 мг/кг [43]. В целом содержа-

ние As в верхнем слое незагрязненной почвы обычно меняется в интервале от 0.2 до 16 мг/кг [44], что вполне отвечает оценке Ковды [28], считавшим накопление As в почвах в интервале 2.0–20 мг/кг относительно безопасным.

Установлено, что максимальные концентрации металлоида, как правило, связаны с почвами обогащенными органическим веществом [36]. В нашем исследовании подтверждение этому факту не обнаружилось, т.к. рассчитанные коэффициенты корреляции имели недостоверную разнонаправленную слабую и умеренную взаимосвязь между содержаниями $C_{орг}$ и As.

О влиянии кислотности почвы на подвижность соединений As в литературных источниках приведены противоречивые сведения [44]. Изменение уровня pH_{KCl} дерново-подзолистых почв Ивановской обл. имело обратную корреляционную взаимосвязь слабой и заметной силы с концентрацией валовых форм As (табл. 4). Наиболее заметное и достоверное влияние на изменение содержания валового As проявлялось со стороны небольшого присутствия в почвах тонкодисперсных почвенных частиц – ила и глины, которые, тем не менее, эффективно адсорбировали As на своей поверхности. Средняя концентрация валовых форм As в почвах участков к 2021 г. несущественно ($p > 0.05$) снизилась на 6.8% к исходному уровню 2014 г. Увеличение концентрации As в почвах агроценозов связано главным образом с поступлением в них поллютанта вместе с пестицидами [44], поэтому отмеченное нами снижение концентрации металлоида можно объяснить отказом от применения мышьяксодержащих пестицидов, а также ежегодными выносами As урожаем культур.

Во всех случаях концентрации подвижных форм изученных ТМ и валовых форм Hg в дерново-подзолистых почвах были значительно меньше ПДК и величин кларков. Присутствие валовых форм As в почвах половины участков превышало кларк в 1.22–2.25 раза и валовую величину ПДК – в 1.10–2.02 раза, что создавало опасность перехода металлоида из почвы в растительную продукцию и далее по трофической цепи в организм человека. В то же время, принимая во внимание величину pH_{KCl} и гранулометрический состав почв тех участков, где превышался уровень валовой ПДК_{As}, было отмечено, что содержание валового As не превышало величины валовой ОДК_{As} [45].

В большинстве случаев между формами содержания исследованных ТМ в дерново-подзолистых почвах отмечали взаимосвязи слабой и умеренной силы и реже – заметной. Установлено, что только между содержанием подвижных форм

Pb и Zn, валовой формы Hg и подвижной формы Cu имелась достоверная положительная взаимосвязь (табл. 4), что может свидетельствовать о том, что между ними существуют некие общие механизмы взаимодействия с органическими, минеральными и органо-минеральными компонентами дерново-подзолистых почв.

ВЫВОДЫ

1. За период мониторинга реперных участков дерново-подзолистых почв отмечено достоверное снижение величин pH_{KCl} и H_r , а также содержания N-NO₃, недостоверное увеличение содержания подвижного P₂O₅, обменных Ca²⁺ и Mg²⁺, V, недостоверное снижение содержания подвижных N-NH₄, K₂O, а также S и ЕКО, при неизменном содержании $C_{орг}$. Оценка исследованных почв с 2014 по 2021 г. по системе ПЭИ выявила слабую тенденцию к его увеличению на 4.4 балла.

2. Среднее содержание и пределы изменений содержания подвижных форм В, Мо, Со и Мп соответствовали типичным показателям, характерным для дерново-подзолистых почв России. В 2021 г. в почвах реперных участков отмечено недостоверное увеличение обеспеченности подвижными формами В и Мо и достоверное увеличение содержания Со. С 2014 г. среднее содержание Мп в почвах к 2021 г. снизилось недостоверно, S_{подв} – достоверно. Корреляции между содержанием МЭ в почвах, величиной pH_{KCl} , содержанием $C_{орг}$, наличием глинистых и илистых частиц в основном имели недостоверные зависимости слабой и умеренной силы.

3. Среднее содержание и пределы изменений содержания подвижных и валовых форм Cu и Hg соответственно отличались заметно меньшими показателями, по сравнению с усредненным содержанием и пределами, характерными для дерново-подзолистых почв. Концентрации подвижных форм Zn, Cd, Pb, Ni, Cr и валового As в почвах участков во многом согласовывались с показателями, характерными для легких дерново-подзолистых почв. За период мониторинга в почвах участков недостоверно увеличились концентрации Zn, Cd и Ni, содержание Hg увеличилось существенно, Pb и As – снизились несущественно, для содержания Cu было отмечено достоверное снижение.

4. Концентрации подвижных форм изученных ТМ и валовых форм Hg в почвах были значительно меньше ПДК и величин кларков. Присутствие валового As в почвах некоторых участков превышало кларк в 1.22–2.25 раза и валовую ПДК_{As} в 1.10–2.02 раза, что создает опасность перехода As

из почвы в растительную продукцию и организм человека.

5. Оценка корреляций между содержанием форм ТМ, показателем pH_{KCl} , содержанием $S_{орг}$, суммы илестых и глинистых частиц и между содержаниями самих ТМ в почвах показала, что отмеченные взаимосвязи имели довольно сложный характер проявления по силе, во многом зависящий от сезонной динамики каждого из них и от других, не изучавшихся в работе, свойств почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Плющиков В.Г., Кузнецов А.В., Павлихина А.В.* Методы агроэкологического мониторинга на реперных участках. М.: Россельхозакадемия, 2002. 58 с.
2. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова. Метод. рук.-во. М.: Росинформагротех, 2005. 784 с.
3. *Самсонова В.П., Кротов Д.Г., Лавринова Е.Ю.* Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области // *Агрохимия*. 2017. № 7. С. 11–18. <https://doi.org/10.7868/S000218811707002X>
4. *Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С.* Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агрохим. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
5. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
6. *Уткин А.А.* Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188122060126>
7. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Оценка уровня плодородия и агроэкологического состояния выработанных торфяных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2021. № 9. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0002188121090118>
8. *Уткин А.А., Лукьянов С.Н.* Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 12–21. <https://doi.org/10.31857/S0002188122030139>
9. *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.
10. *Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д.* Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищество научн. изд. КМК, 2006. 509 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 спектрометрии. 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.: Госком СССР по гидрометеорологии, 1990. 36 с.
16. Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом. М.: ЦИНАО, 1993. 13 с.
17. *Ильин В.Б., Сысо А.И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
18. *Панасин В.И.* Микроэлементы и урожай. Калининград: ОГУП “Калининград. кн. изд-во”, 2000. 276 с.
19. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
20. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
21. *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.
22. *Битюцкий Н.П.* Микроэлементы и растение. Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 232 с.
23. *Бакирова В.Г., Минибаев В.Г., Тюменева Р.Б.* Содержание различных форм марганца, кобальта и молибдена в дерново-подзолистых и серых лесных оподзоленных почвах Марийской и Чувашской АССР // *Научные основы повышения плодородия почв*. Саранск, 1983. С. 114–118.
24. *Пейве Я.В.* Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.
25. *Зырин Н.Г.* Узловые вопросы учения о микроэлементах в почвоведении. Доклад на соискание уч. степ. д-ра биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 1968. 39 с.
26. *Клебанович Н.В.* Влияние кислотности дерново-подзолистых почв Беларуси на содержание подвижных форм микроэлементов // *Весці Акад. Аграр. Навук Беларусі*. 1998. № 3. С. 37–40.
27. *Кузнецов Н.К.* Микроэлементы в почвах Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 1994. 285 с.
28. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
29. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.
30. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2016. № 5. С. 39–47.

31. *Taylor S.R.* Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1964. V. 28. № 8. P. 1273–1285.
32. *Катальмов М.В.* Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 330 с.
33. *Байдина Н.Л.* Содержание элементов-биофилов в черноземах и дерново-подзолистых почвах Приобья // *Изв. СО АН СССР. Сер. Биол.* 1985. Вып. 3. № 18. С. 26–31.
34. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в система почва–растение. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
35. *Ермолаев С.А., Сычев В.Г., Плющиков В.Г.* Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв России // *Плодородие*. 2001. № 1. С. 4–9.
36. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / Под общ. ред. М.М. Овчаренко. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.
37. *Andersson A.J.* The distribution of heavy metals in soil material as influenced by the ionic radius // *Swed. J. Agric. Res.* 1977. V. 7. P. 79–83.
38. *Водяницкий Ю.Н., Добровольский В.В.* Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 1998. 216 с.
39. *Зырин Н.Г., Садовникова Л.К.* Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1985. 209 с.
40. *Удоденко Ю.Г.* Накопление и распределение ртути в почвах и педобионтах заповедных территорий (на примере Воронежского и Окского заповедников): Дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 2014. 158 с.
41. *Lindquist O., Johansson K., Bringmark L., Timm B., Aastrup M., Andersson A., Hovsenius G., Håkanson L., Iverfeldt Å. and Meili M.* Mercury in Swedish environment resent on causes, consequences and corrective methods // *Water Air Soil Pollut.* 1991. V. 55. 157 p.
42. *Yin Y., Allen H., Sanders P.* Adsorption of mercury (II) by soil: effects of pH, chloride, and organic matter // *J. Environ. Qual.* 1996. № 4. P. 837–844.
43. *Чернькова Т.В.* Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.
44. *Кабата Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
45. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2 “Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (вместе с “СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные правила и нормы... ”).

Monitoring of Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Soils of the Ivanovo 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 agrochemical and ecotoxicological studies of the arable layer of reference plots of sod-podzolic soils for agricultural purposes of the Ivanovo region are presented, which were carried out in order to establish the level of fertility according to the main agrochemical indicators, the content of sulfur and trace elements, ecotoxicological state – by gross and mobile forms of heavy metals and arsenic. The deterioration of such indicators of soil fertility as the availability of ammonium and nitrate nitrogen, mobile potassium, the amount of absorbed bases and the capacity of cation exchange has been established. An increase in the content of mobile phosphorus, exchangeable calcium, magnesium and other absorbed bases was noted with an unchanged content of organic matter. The fertility of the studied soils was assessed by calculating the soil-ecological index. The provision of soils with trace elements and mobile sulfur has been established. The content of gross and mobile forms of metals in soils, with the exception of arsenic in the soils of individual sites, did not exceed the maximum permissible concentrations and clarks. The studied soils are slightly polluted and are not dangerous for cultivated plants and human health. According to the Pearson and Spearman correlation coefficients, the characters of the mutual influence of metabolic acidity, the content of organic matter and the granulometric composition of soils with the content of available forms of trace elements, gross and mobile forms of metals and arsenic are established.

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