

УДК 631.452:632.12:631.445.25(470.315)

ПЛОДОРОДИЕ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СВЕТЛО-СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2024 г. А. А. Уткин^{1,*}, И. Б. Нода²¹Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К.А. Тимирязева

127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

²Станция агрохимической службы “Ивановская”
153506 Ивановская область, с. Богородское, ул. Центральная, 8, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Представлены результаты многолетнего мониторинга светло-серой лесной почвы сельскохозяйственного назначения Ивановской обл., который проводили для установления уровня плодородия по основным агрохимическим показателям, содержанию подвижных форм микроэлементов и серы, экотоксикологического состояния по содержанию валовых и подвижных форм тяжелых металлов, мышьяка, цезия-137 и стронция-90. Установлены средние величины показателей, уровни их изменения и тренды изменения обменной и гидrolитической кислотности почвы, обеспеченности органическим веществом, подвижными формами азота, фосфора, калия, обменными кальцием, магнием и другими основаниями, подвижными формами бора, меди, цинка, молибдена, кобальта, марганца и серы. По содержанию микроэлементов в почве определены потребности применения микроудобрений. Определены изменения, концентрации и тренды изменения подвижных форм кадмия, свинца, меди, цинка, никеля, хрома, ртути и мышьяка в почве. Исследованием установлены фоновые величины, изменения и тенденции изменения удельных активностей цезия-137 и стронция-90, плотности загрязнения ими почвы участка и мощность экспозиционной дозы гамма-излучения. По коэффициентам корреляции Пирсона–Спирмена установлены особенности влияния содержания органического вещества, уровня кислотности и емкости катионного обмена на содержание подвижных форм микроэлементов, серы, валовых и подвижных форм металлов и радионуклидов.

Ключевые слова: плодородие, светло-серая лесная почва, микроэлементы, тяжелые металлы, искусственные радионуклиды, реперные участки, Ивановская обл.

DOI: 10.31857/S0002188124050096, EDN: CUNYZK

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях ведения земледелия в России нерациональное использование удобрений и средств химизации, снижение объемов их использования, несоблюдение системы обработки почв и агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур приводит к снижению плодородия почв, увеличению содержания в них токсикантов и, как следствие этого, снижению урожая сельскохозяйственных культур и их качества [1–4].

Обследование почв снабжает землепользователя необходимой информацией об уровне ее плодородия и экотоксикологическом состоянии по содержанию основных элементов питания, органического вещества, реакции почвенной среды, обеспеченности микроэлементами (МЭ), присутствию в почве различных поллютантов [5].

В связи с увеличением антропогенной нагрузки на биосферу и, в частности, на почву, остро стоит проблема изучения экологического состояния почв по содержанию в них тяжелых металлов (ТМ), мышьяка (As) и искусственных радионуклидов (ИРН). Усиление загрязнения почв этими токсикантами вызывает снижение их способности к самоочищению [6].

В последние десятилетия в Нечерноземной зоне отмечена значительная потеря даже относительно плодородными почвами своего плодородия и постепенный переход их в разряд низко плодородных и загрязненных земель, что создает угрозу их исключения из сельскохозяйственного оборота [7–9].

Высокоэффективное ведение сельского хозяйства возможно только при соблюдении правильного подхода к проблемам, связанным с использованием, восстановлением и сохранением почвенного плодородия.

Оценка показателей плодородия светло-серых лесных почв Ивановской обл. и их экотоксикологического состояния в научной литературе освещены слабо и требуют дополнительного изучения.

Цель работы – оценка уровня плодородия светло-серых лесных почв Ивановской обл. по основным агрохимическим показателям, содержанию МЭ и их экотоксикологического состояния по содержанию цезия-137 (^{137}Cs) и стронция-90 (^{90}Sr), подвижных и валовых форм соединений свинца (**Pb**), кадмия (**Cd**), меди (**Cu**), никеля (**Ni**), цинка (**Zn**), хрома (**Cr**), ртути (**Hg**) и мышьяка (**As**).

Необходимость изучения исследованных ТМ и ИРН объясняется тем, что они являются приоритетными поллютантами природной среды, и их соединения обладают высокой токсичностью для живых организмов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были светло-серые лесные почвы, доля которых в пахотном фонде почв Ивановской обл. составляет 7.6% или 24 тыс. га [10]. Данные по агрохимическому и экотоксикологическому обследованию светло-серой лесной почвы проанализированы за период 2009–2022 гг. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на реперном участке, расположенном в Гаврилово-Посадском р-не, путем отбора проб почвы из пахотного слоя 0–20 см. Почва реперного участка находилась в обработке, и ее использовали для выращивания сельскохозяйственных культур. Площадь участка 25 га.

С реперного участка ежегодно с 2009 по 2022 г. с помощью тростевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец, массой ≈ 0.5 кг составляли из 25–30 точечных проб и в среднем отбирали с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Агрохимические анализы почвы были выполнены согласно принятым методикам: обменная кислотность (pH_{KCl}) – ГОСТ Р 58594-2019, гидролитическая кислотность (H_r) – ГОСТ 26212-91, подвижные фосфор (P_2O_5) и калий (K_2O) – ГОСТ Р 54650-2011 (по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО), обменные основания кальция и магния (**Ca** и **Mg**) – ГОСТ 26487-85, органическое вещество (по методу Тюрина в модификации ЦИНАО) – ГОСТ 26213-91, сумма поглощенных оснований (*S*) (по методу Каппена) – ГОСТ 27821-88, нитратный азот (N-NO_3) – ГОСТ 26951-86, обменный аммоний (N-NH_4) – ГОСТ 26489-85, подвижный бор (**B**) (по методу Бергера–Труога в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50688-94, подвижный молибден (**Mo**) (по методу Григга в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50689-94, подвижная медь (**Cu**) (по методу Пейве–Ринькиса в модификации

ЦИНАО) – ГОСТ Р 50684-94, подвижный цинк (**Zn**) (по методу Пейве–Ринькиса) – в вытяжке 1.0 н. КС1, подвижный кобальт (**Co**) (по методу Пейве–Ринькиса в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50687-94, подвижный марганец (**Mn**) (по методу Пейве–Ринькиса в модификации ЦИНАО) – ГОСТ Р 50682-94, подвижная сера (**S**) (по методу ЦИНАО) – ГОСТ 26490-85. Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почвы основаниями (*V*) определяли расчетным способом.

Определение в почве подвижных форм ТМ проводили в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера pH 4.8 (ААБ), валовых форм Hg – в вытяжке 1.0 н. HNO_3 методом атомно-абсорбционной спектроскопии [11–13], валовые формы As – фотометрическим методом в вытяжке HNO_3 и H_2SO_4 (1 : 1) [14].

Определение ^{137}Cs и ^{90}Sr проводили на приборе УСК “Гамма Плюс” (Россия) в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-, бета-спектрометре с использованием программного обеспечения “Прогресс” (ВНИИФТРИ, 2003).

^{137}Cs и ^{90}Sr в почве определяли согласно методическим рекомендациям [15]. Гамма-спектрометрию проб почвы проводили в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л.

Измерение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭДГ) проводили согласно методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения [16].

МЭДГ измеряли на высоте 1 м над поверхностью почвы сцинтилляционным геологоразведочным радиометром СРП-68-01. На реперном участке проводили 8 замеров с последующим подсчетом средних показателей.

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обменная кислотность светло-серой лесной почвы за период 2009–2022 гг. изменялась в широких пределах – от слабо кислой до нейтральной при среднем уровне кислотности, соответствующим нейтральной среде (табл. 1).

Гидролитическая кислотность, в отличие от обменной кислотности, была подвержена более сильному изменению, о чем свидетельствовал высокий коэффициент вариации. В основном гидролитическая

Таблица 1. Агрохимическая характеристика светло-серой лесной почвы

Показатель	$C_{\text{орг}}$, %	$N-NH_4$, мг/кг почвы	$N-NO_3$, мг/кг почвы	P_2O_5 , мг/кг почвы	K_2O , мг/кг почвы	pH _{KCl}	H_r , смоль(экв)/ 100 г почвы	Ca , смоль(экв)/ 100 г почвы	Mg , смоль(экв)/ 100 г почвы	S , смоль(экв)/ 100 г почвы	EKO , смоль(экв)/ 100 г почвы	V , %
<i>M</i>	2.3	1.7	3.1	202	139	5.7	1.27	8.1	2.4	17.5	18.8	92.7
<i>m</i>	0.1	0.3	0.4	12	14	0.1	0.14	0.5	0.2	1.0	0.92	1.1
<i>Me</i>	2.3	1.3	2.4	210	120	5.6	1.12	7.7	2.3	16.5	18.2	93.5
<i>V</i>	10.5	69.9	51.3	21	37	5.3	42.6	21.4	29.9	21.9	18.4	4.3
Lim	1.8–2.6	0.4–4.0	1.3–6.2	130–254	58–228	5.2–6.3	0.51–2.21	5.1–12.7	1.5–4.3	10.3–25.9	12.4–26.7	83.3–97.8

Примечание. *M* – среднее арифметическое, *m* – ошибка среднего арифметического, *Me* – медиана, *V* – коэффициент вариации, Lim – интервал изменения показателя. То же в табл. 2–4.

кислотность соответствовала очень низкой степени кислотности почвы.

Между проявлением обменной и гидролитической кислотности имелась тесная связь. Подтверждение этому было отмечено в нашем исследовании, где выявлена высокая достоверная корреляция: $r_{(H_r/pH_{KCl})} = -0.71, P = 0.95$.

В целом за период мониторинга отмечены тенденции к слабому снижению обменной и гидролитической кислотности, связанные с проведением в 2017 г. известкования почвы участка доломитовой мукой в дозе 3.1 т/га.

Средняя обеспеченность исследованной почвы органическим веществом соответствовала низкой степени. Отметим, что в динамике содержание органического вещества слабо повышалось за счет применения низких доз органических удобрений и возделывания на участке многолетних трав.

Подвижные соединения $N-NH_4$, $N-NO_3$, P_2O_5 и K_2O являются одними из основных элементов питания растений, и этим определяется важность изучения форм их соединений в почвах.

Согласно группировке обеспеченности почв аммонийной и нитратной формами азота [17], светло-серая лесная почва имела очень низкую обеспеченность доступным азотом на протяжении всего периода мониторинга. Содержание форм азота было подвержено сильному варьированию.

Обеспеченность светло-серой лесной почвы подвижным P_2O_5 изменялась от повышенной до очень высокой степени, при среднем содержании P_2O_5 , соответствующим высокой обеспеченности.

Присутствие подвижных форм K_2O в изученной почве менялось от низкого до высокого содержания,

при среднем содержании K_2O , соответствующим повышенной обеспеченности.

В целом за 14-летний период наблюдений установлены тренды увеличения содержания подвижных форм $N-NH_4$, $N-NO_3$, P_2O_5 и снижения содержания K_2O .

Обеспеченность обменным Ca проявлялась от средней до повышенной, обменным Mg – от средней до очень высокой. Среднее содержание Ca и Mg соответствовало средней и повышенной степеням обеспеченности почвы соответственно. Динамика содержания обменных Ca и Mg характеризовалась возрастающими трендами.

Средняя доля присутствия обменных Ca и Mg в общем составе поглощенных катионов изученной почвы составляла 61.3% (lim = 46.4–86.4%), что свидетельствовало о важности участия этих элементов в процессах химизма серых лесных почв.

Обеспеченность почвы поглощенными основаниями (показатель *S*) изменялась от средней до высокой, а степень насыщенности почвы основаниями (*V*) – от повышенной до высокой. Средняя обеспеченность почвы поглощенными основаниями соответствовала повышенной, а степени насыщенности ими – высокой. Емкостно-сорбционные показатели светло-серой лесной почвы с 2009 по 2022 г. имели четкую тенденцию к увеличению.

Варьирование всех изученных агрохимических показателей светло-серой лесной почвы участка подчинялось закону нормального распределения, за исключением содержания $N-NO_3$.

Одним из факторов, тесно связанным с плодородием почвы, является обеспеченность почв доступными для растений формами МЭ [18]. Данные

Таблица 2. Концентрации подвижных форм микроэлементов и серы в светло-серой лесной почве, мг/кг

Показатель	V	Mo	Cu	Zn	Co	Mn	S
<i>M</i>	0.65	0.15	3.70	1.69	1.19	54.45	2.6
<i>m</i>	0.05	0.01	0.32	0.07	0.17	2.13	0.4
<i>Me</i>	0.62	0.16	3.41	1.67	0.95	55.50	3.3
<i>V</i>	26.62	12.14	31.93	14.76	52.89	14.61	64.2
Lim	0.46–0.95	0.12–0.18	2.80–7.60	1.27–2.11	0.56–3.10	31.90–65.00	0.3–4.8
$r_{(C_{орг}/MЭ)}$	0.02	0.30	–0.14*	0.10	0.37*	0.22*	0.38*
$r_{(pH_{KCl}/MЭ)}$	0.23	–0.02	0.49*	0.08	0.59**	0.01*	0.20*
$r_{(EКО/MЭ)}$	0.07	0.34	0.50*	0.31	0.76**	–0.01*	0.37*

Примечание. Без звездочки – коэффициенты линейной корреляции Пирсона, * – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, ** – значимые коэффициенты корреляции при $P = 0.95$. То же в табл. 3–4.

содержания в почве подвижных форм МЭ представлены в табл. 2.

Бор. Среднее содержание и пределы изменений водорастворимых форм В в светло-серой лесной почве согласовались с данными, приведенными в работах Пейве и Каталымова для этой почвы [19, 20]. Согласно градации обеспеченности почв подвижными формами В, и исходя из среднего содержания элемента в почве участка, светло-серые лесные почвы имели среднюю обеспеченность В с изменениями содержания от средней до богатой обеспеченности [21].

Молибден. Содержание подвижных форм Мо в исследованной почве участка согласовалась с пределами его содержания в светло-серой лесной (0.05–0.41 мг/кг) почве, отмеченными в работе [22]. По градации обеспеченности почв Мо его среднее содержание в светло-серой лесной почве указывало на среднюю обеспеченность с незначительным варьированием содержания [21].

Медь. Пределы содержания подвижных форм Си в светло-серой лесной почве укладывались в интервалы содержания, указанные в работе Панасина для почвы этого типа [23]. Исходя из средней обеспеченности Си изученной почвы, и согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны, почва участка имела среднюю обеспеченность подвижной Си [21], при этом изменение содержания Си варьировали от среднего до очень богатого.

Цинк. Пределы изменений содержания подвижного Zn в почве участка в основном совпадали с пределами содержания его усвояемых форм в данной почве [24]. Усредненное содержание подвижных форм Zn в почве указывало на среднюю обеспеченность почвы МЭ, однако в отдельные годы содержание Zn повышалось до богатой обеспеченности.

Кобальт. Содержание подвижного Со и пределы его изменения в почве соответствовали типичным показателям для этой почвы [24]. Варьирование содержания

подвижного Со отмечено от бедной обеспеченности до богатой. Среднее содержание Со в почве указывало на среднюю степень обеспеченности.

Марганец. Для серых лесных почв России характерно наличие больших количеств подвижных форм Mn (lim = 115–1360 мг/кг почвы) [24]. Среднее содержание подвижного Mn в почве участка в 2009–2022 гг., согласно градации обеспеченности почв России подвижными формами МЭ, соответствовало средней степени обеспеченности [21].

Сера. Исходя из среднего содержания и пределов варьирования содержания подвижной S, исследованная почва имела низкий уровень обеспеченности элементом [25].

За время проведения мониторинга динамики содержания подвижных форм МЭ установлены тренды их изменения. Содержание Мо, Си, Zn, Со и S имело тренд к увеличению, Mn – к снижению, В – без заметного изменения. Исходя из фактического уровня обеспеченности светло-серой лесной почвы каждым МЭ, она имела среднюю потребность в их применении в качестве микроудобрения. Вероятно, что на повышение обеспеченности почвы подвижными формами Мо, Си, Zn, Со и S сказалось их поступлением в почву с макроудобрениями и от внешних источников загрязнения. Варьирование содержания Си, Со, Mn и S не подчинялось закону нормального распределения, Zn, В и Мо – имело нормальное распределение.

В своем исследовании выявили взаимосвязи между концентрациями доступных форм МЭ и отдельными свойствами почвы, которые оценивали по величинам коэффициентов линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена (табл. 2).

Установлено, что концентрация подвижного Со в почвах зависела от величины ЕКО и уровня pH_{KCl} [23]. Полученные в нашем исследовании высокие значимые коэффициенты корреляции между содержанием подвижного Со и указанными

Таблица 3. Концентрации форм ТМ и As в светло-серой лесной почве, мг/кг

Показатель	Подвижные формы						Валовые формы	
	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Hg	As
<i>M</i>	0.14	1.46	0.06	0.62	0.47	0.31	0,021	2.25
<i>m</i>	0.01	0.10	0.01	0.06	0.05	0.03	0,003	0.16
<i>Me</i>	0.12	1.44	0.06	0.57	0.40	0.32	0,016	2.33
<i>V</i>	29.29	26.36	30.76	38.16	38.69	20.20	52,67	26.99
Lim	0.09–0.20	0.93–2.11	0.03–0.10	0.30–1.14	0.24–0.86	0.20–0.35	0.010–0.051	1.00–3.53
ПДК	3	23	Нет данных	6	4	6	2.1	2
$r_{(C_{орг}/TM)}$	–0.04*	0.34	0.05	–0.11	0.11	0.54*	0.39*	–0.12
$r_{(pH_{KCl}/TM)}$	–0.58**	0.06	–0.07	–0.29	–0.53	0.68*	0.15*	0.32
$r_{(EKO/TM)}$	–0.52*	0.43	–0.28	0.02	–0.14	0.74*	0.63**	0.38

свойствами почвы подтверждали эту зависимость. В остальных случаях между содержанием подвижных форм МЭ и свойствами светло-серой лесной почвы отмечены недостоверные корреляции слабой и реже – средней силы.

Данные содержания подвижных форм ТМ и валового содержания Hg и As в светло-серой лесной почве приведены в табл. 3.

Медь. Среднее содержание и изменение количества подвижных форм Cu, переходящих в вытяжку ААБ рН 4.8, соответствовали усредненным показателям, характерным для почв Европейской части России [26].

Цинк. Содержание подвижного Zn в исследованной почве характеризовалось типичными показателями, характерными для данной почвы.

Кадмий. Отмеченные пределы изменений содержания подвижных форм Cd и средние содержания подвижных форм ТМ соотносились с показателями, указанными в других работах [18, 26].

Свинец. Отмеченные пределы изменения и среднее содержание подвижного Pb в почве участка были в 10 раз меньше показателей, характерных для серой лесной почвы (0.3–11.8 мг/кг почвы) [27].

Никель. Среднее содержание подвижных форм Ni в светло-серой лесной почве в основном соотносилось с данными, приведенными в работе [26].

Хром. Концентрации подвижных форм Cr в светло-серой почве были значительно меньше по сравнению со показателями (2.62–2.66 мг/кг), отмеченными для Центрально-Европейской части России [26, 27].

Ртуть. Фоновые валовые концентрации Hg в незагрязненных почвах оценивают \approx до 0.9 мг/кг почвы [26]. Фоновые валовые концентрации Hg в незагрязненных серых лесных почвах России оценивают

от 0.04 до 0.75 мг Hg/кг почвы [28]. Содержание валовой Hg в светло-серой лесной почве Ивановской обл. было в 4–15 раз меньше содержания Hg в серых лесных почвах страны.

Мышьяк. Средняя валовая концентрация As в почве участка составляла 2.25 мг/кг. Установлено, что валовое содержание As в верхнем слое незагрязненной почвы меняется от 0.2 до 16 мг/кг [29], что отвечает оценке Ковды [30], считавшим накопление As в почвах в интервале 2–20 мг/кг относительно безопасным.

Динамика изменения содержания Ni, Cd, Cr и Cu в исследованной почве за период наблюдения описывалась возрастающими трендами, Zn, Pb, Hg и As – понижающими. Во всех случаях концентрации подвижных форм ТМ и валовых форм Hg в светло-серой лесной почве были значительно меньше величин ПДК, т.е., почва относится к слабозагрязненной и не является опасной для культурных растений и здоровья человека. Присутствие валовых форм As в почве превышало величину валовой ПДК в 1.77 раза, что создало опасность перехода металлоида из почвы в растения и далее по трофической цепи в организм человека. В то же время, принимая во внимание такие показатели как рН_{KCl} > 5.5) и гранулометрический состав почвы участка (суглинистый), установлено, что содержание валового As не превышало величины валовой ОДК_{As} (10 мг As/кг почвы). Изменение содержания Zn, Cd, Pb, Ni и As подчинялось закону нормального распределения, Cu, Cr и Hg – ненормальному распределению.

В своих работах Добровольский [31], Чернова и Бекская [32] отмечали, что важными факторами, влияющими на поведение ТМ в почвах, являются количество органического вещества, реакция среды и ЕКО. В нашем исследовании выявили взаимосвязи концентраций валовых и подвижных форм изученных поллютантов с данными агрохимическими свойствами

Таблица 4. МЭДГ, удельная активность и плотность загрязнения светло-серой лесной почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr

Показатель	^{137}Cs		^{90}Sr		МЭДГ мкР/ч
	Бк/кг	Ки/км ²	Бк/кг	Ки/км ²	
<i>M</i>	6.9	0.048	3.8	0.027	12.5
<i>m</i>	0.3	0.002	0.4	0.003	0.4
<i>Me</i>	7.0	0.049	3.5	0.025	12.9
<i>V</i>	13.7	14.3	42.2	42.1	12.5
<i>Lim</i>	5.2–8.4	0.036–0.059	2.3–7.8	0.016–0.055	8.0–14.5
$r_{(\text{C}_{\text{орг}}/\text{ИРН})}$	0.27		0.18*		
$r_{(\text{pH}_{\text{KCl}}/\text{ИРН})}$	0.25		–0.26*		
$r_{(\text{ЕКО}/\text{ИРН})}$	–0.10		–0.37*		

почвы, которые оценивали по величинам коэффициентов корреляции (табл. 3).

В большинстве случаев между формами содержания ТМ и свойствами светло-серой лесной почвы отмечены взаимосвязи слабой и средней силы и реже – высокой. Судя по рассчитанным коэффициентам корреляции, более сильное влияние на концентрацию форм ТМ оказывало изменение уровня кислотности и величины ЕКО, наименее воздействие оказывало содержание $\text{C}_{\text{орг}}$. Отметим, что снижение кислотности почвы достоверно влияло на уменьшение содержания подвижных форм Си, а увеличение ЕКО существенно влияло на поглощение Нг на поверхности почвенных коллоидов.

Определение удельной активности ИРН позволило охарактеризовать радиационную обстановку на исследованной территории путем сравнения их удельных активностей со среднестатистическим их содержанием в почвах, обусловленным их глобальными выпадениями. Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в светло-серой лесной почве участка отражены в табл. 4.

Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве участка не превышали величины фона глобальных выпадений – 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [33]. Плотность загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr пахотного слоя почвы в среднем составляла 0.048 Ки/км² ($\text{lim} = 0.036\text{--}0.059$) и 0.027 Ки/км² ($\text{lim} = 0.016\text{--}0.055$) соответственно, что было значительно меньше допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки – 1.0 и 0.1 Ки/км² соответственно. Это позволило отнести почву участка к незагрязненной территории, пригодной без ограничений для сельскохозяйственного использования [5]. Варьирование величин МЭДГ, удельной активности и плотности загрязнения почвы ^{90}Sr не подчинялись закону нормального распределения.

За время проведения мониторинга средняя величина МЭДГ почвы реперного участка не превышала средний показатель МЭДГ почв Ивановской обл. (15.4 мкР/ч) [34]. Пределы изменений МЭДГ почвы участка соответствовали типичным показателям серых

лесных почв России (8.0–13.6 мкР/ч) [35]. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$, уровень pH_{KCl} и величина ЕКО не оказывали заметного влияния на аккумуляцию ^{137}Cs и ^{90}Sr серой лесной почвой.

ВЫВОДЫ

1. За период мониторинга величина pH_{KCl} светло-серой лесной почвы в основном соответствовала уровню, близкому к нейтральному. Средние ежегодные величины гидролитической кислотности (H_T) преимущественно соответствовали очень низкой степени кислотности почвы. Отмечены тренды слабого снижения показателей pH_{KCl} и H_T .
2. Средняя обеспеченность почвы $\text{C}_{\text{орг}}$ соответствовала низкой степени. В динамике с 2009 по 2022 г. содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ слабо увеличилось.
3. Исследованная серая лесная почва имела очень низкую среднюю обеспеченность минеральным азотом в течение мониторинга. Средняя обеспеченность подвижными соединениями P_2O_5 и K_2O соответствовала высокой и повышенной степени соответственно. Установлены тренды увеличения содержания подвижных форм N-NH_4 , N-NO_3 , P_2O_5 и снижения содержания K_2O .
4. Среднее содержание обменных Са и Mg соответствовало средней и повышенной степеням обеспеченности почвы соответственно. Динамика содержания Са и Mg характеризовалась возрастающими трендами.
5. Средняя обеспеченность почвы основаниями соответствовала повышенной степени, степени насыщенности ими – высокой. Емкостно-сорбционные показатели почвы имели тенденцию к увеличению.
6. Концентрации подвижных форм В, Мо, Си, Zn, Со и Mn в почве участка соответствовали типичным показателям, свойственным для светло-серых лесных почв России. Почва имела среднюю степень обеспеченности изученными МЭ и низкую степень обеспеченности S. Концентрации Мо, Си, Zn, Со и S в почве

имели тренды к увеличению, Mn – к снижению, В – без изменения.

7. Содержания подвижных Pb, Cr и Hg в почве участка отличались значительно меньшими величинами в отличие от типичных показателей, характерных для данной почвы. Динамика изменения содержания Ni, Cd, Cr и Cu в почве описывалась возрастающими трендами, Zn, Pb, Hg и As – понижающими.

8. Концентрации подвижных форм ТМ и валовых форм Hg в светло-серой лесной почве были значительно меньше величин ПДК. По содержанию изученных ТМ почвы относятся к слабозагрязненным и не являются опасными для культурных растений и здоровья человека.

9. Снижение кислотности почвы достоверно влияло на снижение содержания подвижных форм Cu, а увеличение ЕКО существенно влияло на поглощение Hg почвенными коллоидами.

10. Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве участка не превышали показателей фона глобальных выпадений. Плотность загрязнения пахотного слоя ^{137}Cs и ^{90}Sr была значительно меньше допустимых уровней, что позволило отнести почву участка к незагрязненной территории, пригодной без ограничений для сельскохозяйственного использования. Средняя величина МЭДГ почвы реперного участка не превышала средний показатель МЭДГ почв Ивановской обл.

Авторы выражают благодарность сотрудникам САС “Ивановская” и лично Е.А. Востряковой за помощь в проведении почвенных анализов.

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., Аканова Н.И., Нода И.Б. Динамика содержания и распределения микроэлементов в дерново-подзолистых почвах и растениях агроценозов // *Агрохимия*. 2023. № 8. С. 3–15. <https://doi.org/10.31857/S0002188123080100>
4. Уткин А.А., Мазиров М.А. Эффективное применение органических удобрений в сельскохозяйственном производстве: уч. пособ. Иваново: ИГСХА, 2022. 80 с.
5. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Метод. рук-во / Под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова. М.: Росинформагротех, 2005. 784 с.
6. Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С. Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агрохим. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
7. 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>
8. 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>
9. Уткин А.А. Мониторинг плодородия и экотоксикологического состояния реперных участков дерново-подзолистых почв Ивановской области // *Агрохимия*. 2023. № 4. С. 19–31. <https://doi.org/10.31857/S0002188123040130>
10. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Тов-во научн. изд-й КМК, 2006. 509 с.
11. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
12. 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.
13. 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.: Гос. комитет СССР по гидрометеорологии, 1990. 36 с.
14. Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом. М.: ЦИНАО, 1993. 13 с.
15. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия / Под ред. Н.Г. Рыбальского. М.: Минприроды России, 1992.
16. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.
17. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: РАСХН, СО, 2013. 790 с.
18. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
19. Пейве Я.В. Агрохимия и биохимия микроэлементов. Избр. тр. М.: 1980. 430 с.

20. *Катальмов М.В.* Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 330 с.
21. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
22. *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.
23. *Панасин В.И.* Микроэлементы и урожай. Калининград: Калининград. кн. изд-во, 2000. 276 с.
24. *Битюцкий Н.П.* Микроэлементы и растение. Уч. пособ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 232 с.
25. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 5. С. 39–47.
26. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение–удобрение / Под ред. М.М. Овчаренко. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.
27. *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.
28. *Зырин Н.Г., Садовникова Л.К.* Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1985. 209 с.
29. *Кабата Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
30. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
31. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
32. *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.
33. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. К.П. Махонько. Обнинск: НПО “Тайфун”, 1991.
34. *Уткин А.А., Аканова Н.И., Нода И.Б.* Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в дерново-подзолистых почвах и растениях реперных участков Ивановской области // Агрохимия. 2023. № 7. С. 75–85.
<https://doi.org/10.31857/S0002188123070116>
35. *Орлов П.М., Аканова Н.И.* Радиоактивность почв сельскохозяйственных угодий Сибири в условиях различной интенсивности химизации сельскохозяйственного производства // Агрохимия. 2019. № 9. С. 91–96.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119090102>

Fertility and Ecotoxicological Condition of Light Gray Forest Soils of the Ivanovo Region

A. A. Utkin^{a,*}, I. B. Noda^b

^a*Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy,
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127434, Russia*

^b*Agrochemical Service Station “Ivanovskaya”,
ul. Centralnaya 8, d. Bogorodskoye 153506, Russia*

^{*}*E-mail: aleut@inbox.ru*

The results of long-term monitoring of light gray forest soil for agricultural purposes in the Ivanovo region are presented, which was carried out to establish the level of fertility according to the main agrochemical indicators, the content of mobile forms of trace elements and sulfur, the ecotoxicological state according to the content of gross and mobile forms of heavy metals, arsenic, caesium-137 and strontium-90. The average values of the indicators, their levels of change and trends in changes in the metabolic and hydrolytic acidity of the soil, availability of organic matter, mobile forms of nitrogen, phosphorus, potassium, exchangeable calcium, magnesium and other bases, mobile forms of boron, copper, zinc, molybdenum, cobalt, manganese and sulfur have been established. According to the content of trace elements in the soil, the needs for the use of micronutrients are determined. Changes, concentrations and trends in the mobile forms of cadmium, lead, copper, zinc, nickel, chromium, mercury and arsenic in the soil have been determined. The study established background values, changes and trends in the specific activities of caesium-137 and strontium-90, the density of their contamination of the soil of the site and the power of the exposure dose of gamma radiation. According to the Pearson–Spearman correlation coefficients, the peculiarities of the influence of the content of organic matter, the level of acidity and the capacity of cation exchange on the content of mobile forms of trace elements, sulfur, gross and mobile forms of metals and radionuclides were established.

Keywords: fertility, light gray forest soil, trace elements, heavy metals, artificial radionuclides, reference sites, Ivanovo region.