

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-114-147



### Ссылки для цитирования:

Борисочкина Т.И., Котельникова А.Д., Рогова О.Б. Массоперенос химических элементов и их соединений в агроценозах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 114-147. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-114-147

### Cite this article as:

Borisochkina T.I., Kotelnikova A.D., Rogova O.B., The mass transfer of chemical elements and of their compounds in agrocenoses, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 110, pp. 114-147, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-114-147

### Благодарность:

Работа выполнена по теме НИР № 0439-2022-0010 “Изучить элементный состав системы почва – растение как фактор-индикатор состояния агроценоза и дисбаланс как критерий рисков химической деградации почв”.

### Acknowledgments:

The work was performed on the topic of the research No. 0439-2022-0010 “To study the elemental composition of the system soil – plant as a factor-indicator of the state of the agrocenosis and imbalance as a criterion of the risks of soil chemical degradation”.

## Массоперенос химических элементов и их соединений в агроценозах

© 2022 г. Т. И. Борисочкина\*, А. Д. Котельникова, О. Б. Рогова

*ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,*

\* <https://orcid.org/0000-0001-6123-4407>, e-mail: [geotibor@gmail.com](mailto:geotibor@gmail.com).

*Поступила в редакцию 19.04.2022, после доработки 26.04.2022,  
принята к публикации 24.05.2022*

**Резюме:** Проведен обзор и анализ литературных источников, освещающих массоперенос химических элементов в агроценозе в системе почва – растение. Рассмотрены отечественные и зарубежные методики оценки содержания подвижных форм химических соединений, поступающих из почвы в растения. Охарактеризованы явления антагонизма и синергизма, указано на необходимость их учета при

планировании внесения удобрений. Показано, что явления синергизма и антагонизма элементов могут быть использованы в земледелии для регулирования поступления тяжелых металлов или радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию. Дан анализ балансовой модели массопереноса химических элементов в агроценозе. Показано, что внесение органических удобрений в почву в большинстве случаев приводит к положительному балансу микроэлементов в агросистеме. Вынос микроэлементов сельскохозяйственными культурами увеличивается при применении минеральных удобрений в дозах, оптимальных для возделывания культур в данном регионе. В ряде случаев поступление тяжелых металлов с техногенными выпадениями может превосходить вынос металлов растениями из почвы, что может явиться причиной аккумуляции металлов в системе. На незагрязненных фоновых территориях уровни поступления микроэлементов из удобрений и атмосферных выпадений в агроценозах сопоставимы.

**Ключевые слова:** массоперенос, почва, растение, агроценоз, балансовая модель, синергизм, антагонизм.

## The mass transfer of chemical elements and of their compounds in agrocenoses

© 2022 T. I. Borisochkina\*, A. D. Kotelnikova, O. B. Rogova

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

*\*<https://orcid.org/0000-0001-6123-4407>, e-mail: [geotibor@gmail.com](mailto:geotibor@gmail.com).*

*Received 19.04.2022, Revised 26.04.2022, Accepted 24.05.2022*

**Abstract:** The analysis of publications on the mass transfer of chemical elements in agrocenosis in the soil – plant system was carried out. Methods for estimating the content of mobile forms of chemical compounds coming from the soil into plants are considered. The phenomena of antagonism and synergism are characterized, and the necessity to consider them while planning fertilizer application is indicated. It is shown that the phenomena of synergism and antagonism of elements can be used in agriculture to regulate the flow of heavy metals or radionuclides into agricultural products. A balance model for mass transfer of chemical elements in agrocenosis is analyzed. It is shown that the introduction of organic fertilizers in soil mostly leads to a positive balance of microelements in the agrosystem. To characterize the efficiency of fertilizer use an assessment of the balance of nutrients in the agrosystem is required. The removal of trace elements by agricultural crops

increases with the use of mineral fertilizers in doses that are optimal for the cultivation of crops in the region. In some cases, the input of heavy metals with technogenic fallout may exceed the removal of metals by plants from the soil. It may cause the accumulation of metals in the system. In uncontaminated background areas, the levels of microelement intake from fertilizers and atmospheric fallout in agrocenoses are comparable.

**Keywords:** mass transfer, soil, plant, agrocenosis, balance model, synergism, antagonism.

## ВВЕДЕНИЕ

Хозяйственная деятельность человека часто является причиной химической деградации почв агроценозов. Для разработки критериев оценки деградации необходимо целостное понимание механизмов, протекающих внутри агроэкосистемы. В представленной работе анализируется перемещение химических элементов в звене биогеохимического круговорота (в системе почва – сельскохозяйственная культура), рассматривается массоперенос химических компонентов, поступающих из почвы в растения и вынос их с растительной продукцией.

Сведения о миграции химических элементов и их соединений в системе почва – растение представляют интерес для исследования процессов, в которых перемещению химических элементов придается важное экологическое значение ([Ильин, 2006](#)). При этом необходимо отметить, что функционирование агроценозов значительно отличается от характера функционирования естественных экосистем. В агроэкосистеме отчуждается 20–80% от всей биопродукции, что приводит к разомкнутости круговорота химических элементов и изменению в системе баланса вещества и энергии, в то время как природная экосистема функционирует самостоятельно и является саморегулируемой системой, в которой биологические круговороты большинства химических элементов близки к замкнутому типу ([Ковда, 1981](#); [Фокин, 1988](#)).

Целью работы являлось обобщение информации, характеризующей круговорот и массоперенос химических элементов в агроэкосистеме, анализ использования балансовой модели при прогнозировании выноса и аккумуляции металлов в почвах агроценоза, рассмотрение явлений антагонизма и синергизма элементов в поч-

ве при их поступлении в растения, анализ методов оценки подвижных форм соединений химических элементов, участвующих в массопереносе, учет которых необходим для получения экологически безопасной продукции и грамотного использования удобрений.

## ПОДВИЖНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ АГРОЦЕНОЗОВ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИХ ДОСТУПНОСТИ ДЛЯ РАСТЕНИЙ

Основные транспортные потоки доступных для поглощения растениями веществ, приводящие к их вертикальному перемещению и перераспределению по почвенному профилю, происходят в рамках биологического круговорота по проводящим системам живых растений ([Фокин, 1999](#); [Фокин, 2004](#)). При этом абиотические транспортные потоки перемещения растворенных веществ через поровое пространство имеют подчиненное значение ([Фокин, 1999](#); [Фокин, Торшин, 2020](#)). В то же время зафиксировано наличие диффузионной и конвективно-диффузионной миграции Cd, Zn, Cu, Fe, Co, Ni в почвах, длительно орошаемых природными и сточными водами, установлены величины коэффициентов диффузии этих элементов (наиболее высокие значения скорости диффузии зарегистрированы у Cd). Для всех элементов параметры диффузии увеличивались с ростом валового содержания элемента и с ростом засоленности почв и оросительных вод ([Фрид и др., 2014](#); [Фрид и др., 2016](#)).

В дерново-подзолистой почве под влиянием избыточного увлажнения зафиксировано изменение ее физико-химических свойств (снижение ОВП, изменение pH), что повлекло за собой изменение фракционного состава металлов с переменной валентностью и увеличение содержания металлов в подвижных фракциях (водорастворимых, обменных, связанных с органическим веществом и аморфными соединениями железа). Параллельно с этим происходило снижение концентраций металлов в остаточной фракции и фракции, связанной с окристаллизованными соединениями железа. Увеличение подвижных соединений элементов в почвах увеличивает потенциальную способность их миграции в сопредельные среды ([Плеханова, 2007](#)). Водорастворимые и об-

менные фракции представляют собой наиболее подвижные и биологически доступные формы соединений металлов в почвах ([Ладонин, 2019](#)).

Одной из важнейших практических задач агрохимии, почвоведения, экологии и других дисциплин, связанных с природопользованием, является оценка количественного участия и роли отдельных соединений или групп соединений в поступлении различных элементов минерального питания и токсичных веществ в растения через их корневые системы ([Фокин, Торшин, 2020](#)). Почва и растения связаны набором обратных связей, откликов, оказывают влияние друг на друга на различных уровнях взаимодействия, включая изменения в элементном составе ([Ehrenfeld et al., 2005](#)).

Сложность почвенной минеральной матрицы, влияние целого ряда факторов, взаимное влияние элементов друг на друга значительно затрудняют исследования. Отсутствие сбалансированности содержания макро- и микроэлементов может являться причиной низкой продуктивности агроценозов и низкого качества сельскохозяйственной продукции ([Han et al., 2011](#)). Основными факторами, определяющими поведение элементов в почве, являются рН, содержание и характер органического вещества, емкость катионного обмена, гранулометрический состав. Различные типы почв могут значительно отличаться по преобладанию определенных индивидуальных, контрастных фаз-носителей металлов: карбонатов, (гидр)оксидов железа и марганца, глинистых минералов и гумусовых веществ ([Shan, Chen, 1993](#)). Помимо этого, следует принимать во внимание роль специфических почвенных процессов, способных влиять на процессы сорбции-десорбции элементов. Так в результате образования конкреций может снижаться содержание доступных для растений форм микроэлементов, вплоть до вывода части из них из биологического круговорота ([Тимофеева, 2018](#)). Последствия интегрального воздействия этих факторов химической и физической природы на элементный состав должны также изучаться комплексом дополняющих друг друга химических и физических методов.

Исследование транспортных потоков в агроценозах (массопереноса) предполагает проведение анализа и оценки наиболее

активной части химических соединений, участвующих в переносе элементов из почвы в растения. Валовое содержание элементов в почве не является достаточно информативным показателем для оценки обеспеченности ими растений ([Siromlya, 2009](#)). Мобильность и доступность питательных элементов в почвах агроэкосистем, в том числе поступающих с удобрениями, в значительной степени регулируется динамическими процессами, протекающими в почве ([Dhaliwal et al., 2019](#)). Оценка содержания доступных форм элементов, наличия связи с компонентами почвы и прочности этих связей позволяет получить представление о запасе элементов, которые могут вовлекаться в биологический круговорот.

Возможности оценки доступности элементов для растений определяются несколькими подходами, такими как: 1) корреляция между пулом подвижных форм элементов в почве, определенных методами одиночной или последовательной экстракции, и их аккумуляцией в растениях; 2) модель активности свободных ионов (free ion activity model (FIAM)); 3) модель наземного биотического лиганда (terrestrial biotic ligand model (TBLM)); 4) модель диффузионных градиентов в тонких пленках (the diffusive gradients in thin films (DGT)); 5) метод изотопного разбавления (меченые атомы) ([Feng et al., 2005](#); [Кульнев и др., 2020](#)). При этом необходимо отметить, что содержание подвижных форм элементов может зависеть от гидрологических условий ([Плеханова, 2007](#)), климатических факторов, и в значительной степени может варьировать в зависимости от сезонов года ([Гайдукова и др., 2000](#)). Несмотря на то, что для отдельных элементов и видов растений могут наблюдаться четко коррелирующие зависимости в соотношении концентраций элементов в почве и органах растений, на сегодняшний день не существует метода экстракции, который мог бы релевантно отражать поступление элементов в растения из почвы для всех элементов, почв всех типов и всех видов растений ([Reimann et al., 2015](#)).

Тем не менее, методы одиночной и последовательной экстракции активно используются при изучении форм нахождения элементов в почвах, проводятся апробирования методик их определения на различных объектах и предлагаются новые подходы ([Menzies et al., 2007](#); [Rao et al., 2008](#); [Plekhanova, Bambusheva,](#)

[2010](#); [Ivezic et al., 2013](#); [Hosseinpur, Motaghian, 2015](#)).

В настоящее время для оценки содержания доступных для растений подвижных форм химических элементов в почве наиболее широко используется их экстрагирование различными реагентами. Эти подходы внедрены в системе Агротехимслужбы, а также находят применение при проведении эколого-геохимических исследований. При определении подвижных форм фосфора и калия для кислых почв Нечерноземной зоны стандартом в России является метод Кирсанова, который основан на извлечении подвижных фосфатов из почвы 0.2 н. раствором HCl. Для некарбонатных почв лесостепной и степной зон стандартом определения подвижных соединений фосфора и калия является метод Чирикова, основанный на извлечении фосфора и калия 0.5 н. раствором уксусной кислоты. Подвижные соединения фосфора и калия в карбонатных почвах определяют по методу Мачигина, в котором в качестве экстрагента используется углекислый аммоний. В странах Балтии для извлечения подвижных соединений фосфора используется смесь молочной и уксусной кислот, забуференных уксуснокислым аммонием до pH 3.7 (метод Эгнера–Рима–Доминго) ([Большаков и др., 2004](#)). Широкое распространение за рубежом при определении подвижных форм фосфора нашел метод Олсена, в котором в качестве экстрагента используется 0.5 н. раствор  $\text{NaHCO}_3$  (pH 8.5) ([Христенко, Иванова, 2011](#); [Horta, Torrent, 2007](#)). Метод рекомендован для анализа кислых, нейтральных и карбонатных почв. В последнее время он все чаще используется в России на территориях с высокой пестротой почвенного покрова.

Для характеристики обеспеченности почв микроэлементами в отечественной агрохимической практике получил широкое распространение метод экстракции ацетатно-аммонийным буферным раствором (pH 4.8) по Крупскому–Александровой. При этом ацетатно-аммонийный буфер используется как групповой экстрагент для различных элементов. Известными, но реже используемыми в силу большей трудоемкости, являются методы извлечения микроэлементов индивидуальными экстрагентами, разработанными Пейве и Ринькисом для характеристики содержания подвижных микроэлементов в почве и оценки обеспеченности ими растений ([Методические указания..., 1976](#)).

В настоящее время продолжают исследования и поиски новых методов, применение которых будет наиболее адекватно отражать коррелятивные зависимости между концентрацией подвижных элементов в почве и их содержанием в растениях ([Feng et al., 2005](#); [Fang et al., 2007](#); [Menzies et al., 2007](#); [Rao et al., 2008](#); [Ivezić et al., 2013](#); [Hosseinpur, Motaghian, 2015](#)). Одним из рассматриваемых вариантов является метод экстракции смесью низкомолекулярных органических кислот, имитирующей состав растительных экссудатов и метаболитов микроорганизмов (смесь сантимолярной уксусной, молочной, лимонной, яблочной, муравьиной кислот, взятых в соотношении 4 : 2 : 1 : 1 : 1) из образцов ризосферной части почвы и почвы в целом (RHIZO и A-RHIZO) ([Feng et al., 2005](#); [Fang et al., 2007](#)). В результате применения данного метода показаны достоверные корреляции между содержанием подвижных форм Cu, Cd, Zn в почве и содержанием этих элементов в корнях пшеницы на кислых, нейтральных и слабощелочных почвах (для Ni и Pb использование данного метода не показало столь успешного результата ([Feng et al., 2005](#))). При работе с почвенными пробами с естественной влажностью экстракция смесью низкомолекулярных кислот позволила получить более высокие коэффициенты корреляции ([Fang et al., 2007](#)). На основании анализа полученных результатов с применением множественной регрессии данный метод экстракции в большинстве случаев не требовал включения в уравнения параметров свойств почв для улучшения предсказуемости содержания элементов в корнях пшеницы.

Проведены исследования ЭДТА как экстрагента для определения биодоступности микроэлементов в системе почва – растение. При этом учитывалось, что ЭДТА является сильным хелатирующим компонентом, который, удаляет металлы, связанные с органическими компонентами почв, и частично металлы в оксидах и вторичных глинистых минералах. Результаты экстракции ЭДТА показывали достоверные коррелятивные зависимости с поглощением металлов растениями на кислых почвах, но явились неприменимым показателем доступности микроэлементов для щелочных и нейтральных почв ([Feng et al., 2005](#); [Ivezić et al., 2013](#)). Следует отметить, что в настоящее время не существует

метода, признанного универсальным для оценки биодоступности тяжелых металлов в почвах.

Временами для оценки сбалансированности массопереноса химических элементов из почвы в растения и обеспеченности сельскохозяйственных культур макро- и микроэлементами используется *метод листовой диагностики*. Ильиным В.Б. (1985) отмечается ряд недостатков этого метода, наиболее значимыми из которых являются следующие: 1) метод не дает возможности различать истинный дефицит элемента в почве от дефицита в питании растений, обусловленного антагонизмом с другими элементами; 2) не позволяет установить точные дозы удобрений, которые следует внести для корректировки дефицита в конкретных почвенных условиях (Ильин, 1985). Эти недостатки решаются комплексным подходом, сочетающим растительную диагностику и анализ почв, желательность которого подчеркивали и разработчики метода, в том числе и В.В. Церлинг, которой были обобщены основные наработки отечественных и зарубежных исследователей в этом направлении (Церлинг, 1978).

Обеспеченность растений элементами питания можно осуществлять, контролируя интенсивность биохимических процессов. А.С. Плешков и Б.А. Ягодин (1982) разработали метод диагностики питания растений по измерению фотохимической активности хлоропластов. Для диагностики авторы использовали определение фотохимической активности суспензии хлоропластов из средней пробы листьев исследуемых образцов. В суспензию добавляли диагностируемые элементы минерального питания, недостаток элемента устанавливали по увеличению, а избыток – по уменьшению фотохимической активности, по сравнению с контрольной суспензией. Содержание диагностируемых элементов в питательной среде корректировалось по соотношению, пропорциональному фотохимической активности. Метод позволяет определить потребность растений в 12–15 макро- и микроэлементах питания и дать рекомендации по проведению корневых и некорневых подкормок растений. Он расширяет диапазон диагностируемых элементов и повышает эффективность использования растениями минеральных элементов путем прямого установления их недостатка или избытка.

## СИНЕРГИЗМ, АНТАГОНИЗМ, ТОКСИЧНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ ИЗ ПОЧВЫ В РАСТЕНИЯ

Полученные представления о доступности питательных элементов в почве не всегда дают возможность достоверно оценить количество элементов, которое будет поглощено растением. Одним из факторов, объясняющих неопределенность в этом вопросе, являются возникающие при взаимодействии элементов между собой явления *синергизма* и *антагонизма*. Для синергизма характерно положительное взаимодействие между двумя и более элементами, приводящее к поглощению растением бóльшего количества элементов. Взаимодействие между элементами, приводящее к уменьшению поглощения одного или нескольких элементов, называется антагонизмом ([Malvi, 2011](#)). Синергизм и антагонизм во многом объясняют отсутствие четких корреляционных связей между содержаниями элементов, находящихся в почве, и концентрациями элементов, поступающих в растения. Эти явления осложняют определение доз удобрений, которые необходимо внести для восполнения дефицита элементов питания, так как при совместном внесении возможны негативные последствия взаимодействия элементов, что необходимо учитывать при создании оптимизированных систем питания растений ([Ринькис и др., 1989](#); [Кулаковская, 1990](#)). Явления синергизма и антагонизма между элементами в растениях непостоянны. Они возникают и меняют свой характер в зависимости от фазы развития растений, метеорологических условий ([Зубкова, 2004](#)). Характер взаимодействия между элементами зависит от свойств почвы, варьирует под воздействием внешних факторов, концентраций и пропорций контактирующих элементов ([Malvi, 2011](#)).

Сбалансированность химического состава внутри живых организмов – основное условие их нормального роста и развития, а реакции взаимодействия элементов могут служить причиной химических стрессов у растений ([Kabata-Pendias, 2011](#)). Наличие информации о взаимодействии питательных веществ может способствовать эффективному внесению удобрений и получению высоких урожаев ([Rietra et al., 2017](#)). Существуют методы, при которых явления антагонизма и синергизма элементов выявляются на ос-

новании оценки урожайности ([Rietra et al., 2017](#)). Однако использование урожайности как показателя может быть необоснованно, поскольку при одной и той же величине урожая может различаться структура получаемой продукции (например, мелкие и крупные семена). Также увеличение урожая не свидетельствует о сохранении при этом его качества, которое может снижаться по химическому и биохимическому составу ([Ельников, Рогова, 2017](#)).

Возможность оценить явления синергизма и антагонизма в основном дают модельные эксперименты, проводимые в лабораторных или полевых условиях, при которых исследуются изменения в поведении одних элементов при добавлении в среду других. Данные подобных экспериментов, проведенные Ринькисом с коллегами, позволили сделать вывод, что “поглощение всех элементов минерального питания растениями находится в тесной взаимосвязи” и “повышение концентрации какого-либо элемента в субстрате приводит к увеличению его концентрации в растении” ([Ринькис и др., 1989](#)). При этом концентрации элементов должны находиться в зоне оптимума, иначе превышение оптимального значения (избыток элемента) может приводить к снижению поглощения других элементов (антагонизм), тогда как компенсация дефицита элемента может способствовать поглощению прочих элементов (синергизм).

В результате проведения ряда экспериментов В.В. Степанок ([2003](#)) выделил некоторые закономерности взаимодействия элементов: элементы, входящие в одну группу периодической системы, проявляют антагонизм друг к другу; элементы, входящие в состав соседних групп, проявляют синергизм. Также отмечается, что указанные закономерности более ярко выражены для элементов главных подгрупп, и сила взаимодействия больше для элементов, которые сильнее различаются по химической активности ([Степанок, 2003](#)).

Изменениям во взаимодействии элементов может способствовать проведение различных мелиоративных мероприятий. Так показано, что увеличение концентрации кальция в почвенном растворе в результате известкования может способствовать проявлению антагонизма среди металлов, таких как Sr, Ba, Ra ([Алексеев, 1987](#)). Вследствие возникающей конкуренции за места поглоще-

ния на поверхности корней содержание данных элементов в растениях оказывается меньше, чем на почвах без известкования. Известкование приводит к уменьшению содержания в растениях большинства тяжелых металлов, однако щелочные значения рН влекут за собой увеличение доступности Сг и Мо. В целом синергизм и антагонизм элементов может быть использован в земледелии для регулирования поступления тяжелых металлов или радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и, как следствие, влиять на круговорот элементов ([Минеев, 2008](#)).

Взаимосвязь между калием и магнием в тканях растений может быть антагонистической или синергической в зависимости от вида растения и его возраста. Существуют синергические эффекты калия и магния на фотосинтез, транспорт и распределение углеводов, а также азотистый обмен. Антагонистическое действие калия на магний сильнее, чем магния на калий, что указывает на необходимость сбалансированного использования удобрений ([Xie et al., 2021](#)). Обнаружено антагонистическое действие меди на поступление молибдена в семена рапса ([Торшин, 1998](#)). Установлено влияние селена на увеличение содержания азота в зерне ячменя при двойной дозе внесения удобрений (2NPK) ([Долгодворова, Воронина, 2014](#); [Воронина и др., 2018](#)). Под действием кадмия снижались темпы накопления азота, фосфора и калия, под действием цинка снижались темпы накопления калия ([Зубкова, 2004](#)).

Исследованиями показано, что загрязнение почвы фтором явилось причиной нарушения интенсивности окислительно-восстановительных и гидролитических процессов, вследствие чего в почве произошло увеличение содержания восстановленных форм азота. Повышение дозы фтора в почве способствовало усилению поступления азота в растения ([Краснова и др., 1989](#)). При этом обменный кальций и магний являются основными компонентами почв, которые ограничивают избыточное поступление фтора в растения ([Борисочкина и др., 1991](#)).

Загрязнение среды свинцом приводит к ухудшению питания растений фосфором, а так как почвы Нечерноземной зоны России часто требуют внесения фосфорных удобрений, то, следовательно, присутствие в почве повышенных концентраций свинца предполагает необходимость внесения дополнительных доз фосфорных

удобрений ([Торшин, 1998](#)).

Зафиксированы явления антагонизма цинка и железа. Избыток цинка ведет к заметному снижению содержания железа в растениях. С другой стороны, железо снижает поступление цинка в растения и токсичность уже поглощенного цинка ([Kabata-Pendias, 2011](#); [Di Gioia et al., 2019](#)). Поглощение и перенос железа в органах растений во многом зависит от специфических особенностей растений, а также от почвенных параметров, наибольшее значение из которых имеют pH, содержание кальция и фосфора, а также соотношение содержаний некоторых тяжелых металлов. Симптомы железистой токсичности проявляются по-разному в зависимости от вида и стадии развития растений. Наиболее отчетливо фиксируемым признаком токсичности является величина отношения железа к другим тяжелым металлам (в частности Fe/Mn) ([Kabata-Pendias, 2011](#)).

Фосфор и цинк входят в число лимитирующих факторов, оказывающих негативное влияние на разбалансированность питания сельскохозяйственных культур, что следует учитывать при оценке эффективного плодородия почв и прогнозировании качества продукции. Однако совместное взаимодействие этих элементов на определенном уровне может быть антагонистичным. Повышенное применение фосфорных удобрений влечет за собой более медленное усвоение цинка растениями и даже приводит к его дефициту, что является причиной снижения урожайности ([Aboyeji et al., 2020](#)). Разработаны диагностические показатели, характеризующие возможные поражения хлорозом листьев кукурузы (выращенной на черноземе обыкновенном), вызванного нарушением соотношения фосфора и цинка. Разработанные параметры характеризуют критические уровни соотношения подвижного фосфора (метод Мачигина) и подвижного цинка (экстракция ацетатно-аммонийным буфером, pH 4.8) в почве. При соотношении P/Zn > 9 возможен хлороз растений. Нормальное развитие растений наблюдается при соотношении P/Zn в интервале 4–6 ([Аштаб, 1994](#); [Аштаб, Ельников, 1994](#)).

Сбалансированность валовых содержаний тяжелых металлов в почвах необходимо учитывать при выявлении специфических особенностей территориальных факторов, определяющих

изменение направленности токсикологической опасности под влиянием антропогенных воздействий или природных процессов. Результаты указывают на высокие индикаторные свойства показателей соотношения содержаний Fe, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на обследованных почвах, которые можно использовать для оценки токсикологической опасности в отношении тяжелых металлов ([Ельников, Рогова, 2015](#)). Явление токсичности возникло вследствие нарушения человеком систем саморегуляции и динамического равновесия, существовавшего в естественных биогеохимических циклах. Абсолютно токсичных элементов не существует, существуют только дозы, способные вызывать токсический эффект. Одинаково опасным является отклонение концентраций в обе стороны от оптимума ([Коробова, 2020](#)).

При этом результаты, получаемые для конкретных сельскохозяйственных культур, должны проверяться и на других видах, так как поступление элементов в растения, а значит и их вынос из почвы, в значительной степени определяется видовыми особенностями ([Протасова, 2005](#)). Отдельные таксоны могут различаться по потребности и возможности усвоения элементов, по способности поддерживать определенные диапазоны концентраций и соотношений питательных элементов в организме ([Han et al., 2011](#)). Различной способностью аккумулировать металлы во время онтогенеза могут обладать даже отдельные культурные сорта, что показано на примере аккумуляции редкоземельных элементов в различных сортах ячменя ([Birsin et al., 2010](#)).

Выделяют ряд механизмов, посредством которых растения могут активно взаимодействовать с почвой, регулируя возможность поглощения элементов ([Reimann et al., 2015](#)). А именно: 1) варьирование глубины залегания корней, где элементы выборочно поглощаются из почвы; 2) изменение среды вокруг корня за счет модификации почвенных условий, таких как pH, окислительно-восстановительный режим; 3) изменения на клеточном уровне, регулирующие поступление элементов, – модификация плотности, селективности и эффективности ионных каналов; 4) эволюционная адаптация.

Более активному выносу поглощенных питательных элементов может способствовать разнообразный видовой состав рас-

тений за счет конкуренции между видами ([Wu et al., 2020](#)), следовательно, при этом будет происходить более активный вынос элементов с полей, используемых для выращивания смеси трав (кормовых культур).

Значимую роль в изменении доступности элементов для растений, а значит и в перераспределении в агроэкосистеме, играют микроорганизмы ([Cuypers et al., 2013](#)), влияние которых следует учитывать при анализе биогеохимического круговорота элементов в агроэкосистемах.

## БАЛАНСОВЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ КРУГОВОРОТА И МАССОПЕРЕНОСА ЭЛЕМЕНТОВ В АГРОЦЕНОЗАХ

При прогнозировании массопереноса и аккумуляции металлов в агроэкоценозах находит применение балансовая модель ([Кошелева, 2002](#)). Оценка баланса питательных элементов в агроценозе позволяет охарактеризовать эффективность использования удобрений ([Лапа и др., 2013](#)). Баланс элементов в почве определяется по разности между их поступлением в почву и выносом с различными компонентами. В качестве статей выноса учитывают основную и побочную продукцию сельскохозяйственных культур, внутрипочвенный сток, эрозию и др. ([Лебедевский, Яковлева, 2012](#)). В качестве источников поступления элементов в почву рассматривают атмосферные выпадения, удобрения и мелиоранты, а также посевной материал. Поступление с посевным материалом незначительное (<0.1–0.3%). Поэтому при балансовых расчетах этой статьёй часто пренебрегают ([Попова, 1992](#)).

Баланс элементов в агроэкосистеме определяется множеством факторов, многие из которых не всегда учитываются при составлении балансовых расчетов. К ним следует отнести: отчуждение с сорняками; возврат с послеуборочными остатками; испарение элементов из почв; транспирация растениями; прижизненные выделения растений; развитие дернового процесса; потребление растениями элементов из нижних горизонтов почв (в то время как обычно изучается состав верхнего пахотного горизонта). Для некоторых территорий значимым является поступление элементов с атмосферными выпадениями и с распылением морской воды,

которое отслеживается на расстояния свыше нескольких десятков километров ([Савич и др., 2005](#); [Reimann et al., 2015](#)).

При этом необходимо отметить, что на незагрязненных территориях поступление металлов на поверхность почвы с удобрениями и мелиорантами является основным источником прихода металлов и составляет от 72% до 98% от общего потока ([Попова, 1992](#)). Многочисленные исследования показывают, что азотные и калийные удобрения не являются значительным источником поступления в агросистему микроэлементов ([Попова, 1992](#); [Овчаренко, 1995](#); [Овчаренко, 2000](#); [Карпова, 2003](#); [Карпова, Минеев, 2015](#)). Наибольшие количества примесей содержат фосфорные удобрения. Содержание примесей в фосфорных удобрениях зависит от состава исходного сырья и технологии производства ([Овчаренко, 1995](#); [Овчаренко, 2000](#); [Карпова, 2003](#); [Минеев, 2005](#)). В то же время проведенными исследованиями показано, что применение минеральных удобрений и фосфогипса на черноземах не привело к существенному изменению содержания Zn, Ni, Pb и Cd в почве ([Протасова, Горбунова, 2010](#)). Содержание Mn, Zn, Pb, Ni, Cd соответствовало фоновому уровню и не превышало ПДК ([Горбунова, Студин, 2016](#)). С точки зрения загрязнения почв тяжелыми металлами применение фосфорных удобрений не представляет опасности ([Минеев, 2005](#)).

В фосфорных удобрениях из отечественного сырья существенными являются примеси стронция и фтора. Зарубежное фосфатное сырье отличается повышенным содержанием кадмия ([Карпова, 2003](#); [Карпова, Минеев, 2015](#)). Концентрация стабильного стронция в простом суперфосфате из апатитового концентрата составляет 1.2% ([Гришина и др., 1991](#)). При использовании минеральных удобрений баланс большинства микроэлементов в зоне дерново-подзолистых почв отрицательный или нулевой. При внесении фосфорных удобрений из фосфоритов возможно накопление фтора, поэтому необходимо контролировать его содержание в почве ([Карпова, 2003](#)). Использование простого суперфосфата из апатитового концентрата и фосфоритной муки должно сопровождаться контролем содержания стронция в почвах и растительной продукции ([Карпова, Потатуева, 2004](#)). При длительном применении двойного суперфосфата на дерново-подзолистой почве зафик-

сировано повышение содержания всех форм стронция в почве, а наиболее существенные изменения произошли в содержании кислоторастворимой и обменной форм. Содержание валового стронция выросло не только в пахотном горизонте, но и в более глубоких слоях ([Черных и др., 1999](#)).

Внесение органических удобрений в большинстве случаев приводит к положительному балансу микроэлементов в агросистеме ([Карпова, Минеев, 2015](#)). Особенно существенен вклад органических удобрений в поступлении Zn, Cu, As, Ni ([Adriano, 2001](#)).

Вынос микроэлементов сельхозкультурами значительно увеличивается при применении минеральных удобрений в дозах, оптимальных для возделывания культур в данном регионе. В ряде случаев поступление тяжелых металлов с атмотехногенными выбросами может превосходить вынос металлов сельхозкультурами из почвы, что может явиться причиной их аккумуляции в системе ([Борисочкина, Кайданова, 1989](#); [Кайданова, Борисочкина, 1991](#); [Карпова, Минеев, 2015](#)). На незагрязненных фоновых территориях уровни поступления микроэлементов из удобрений и атмосферных выпадений для агросистем сопоставимы. Исключением являются агроландшафты с повышенной аэротехногенной нагрузкой, где в качестве источника поступления доминируют атмосферные выпадения, и в этом случае техногенное поступление металлов может превосходить агрогенное ([Минеев и др., 2015](#)).

Длительное использование высоких доз удобрений и мелиорантов на черноземных почвах не привело к загрязнению почв и сельскохозяйственной продукции тяжелыми металлами из-за высокого выноса элементов с растительной продукцией. При этом был зафиксирован дефицит подвижных соединений цинка и кобальта ([Протасова, 2005](#)). Вынос бора сахарной свеклой на удобренных вариантах на 12–14% выше, чем на вариантах без применения удобрений. Различия в выносе бора растениями из почв разной окультуренности не отразились на количестве подвижного (водорастворимого) бора в почвах удобренного и контрольного вариантов. Годовой вынос бора сахарной свеклой составлял  $n \cdot 10^{-2}\%$  от валовых запасов элемента пахотного и подпахотного слоев почвы. Содержание подвижного бора в типичных чернозе-

мах варьировало от 1.2 до 1.6 мг/кг, что является свидетельством высокой обеспеченности почв микроэлементом. В перспективе недостаточность водорастворимого бора в типичных черноземах может быть обусловлена не истощением почвы, а изменением ее физико-химических параметров, которые координируют процессы равновесия между твердой фазой почвы и почвенным раствором ([Борисочкина, Сиволобова, 1990](#)).

Необходимо отметить, что в последние годы резко снизились поставки минеральных удобрений сельскому хозяйству (в постсоветский период они сократились в 5 раз). В результате резко отрицательного баланса между внесением удобрений и выносом питательных веществ в земледелии России нарастают негативные процессы в агроэкосистемах, ухудшаются свойства почв, снижается содержание в них доступных форм основных биогенных элементов. Нарушение биологического круговорота веществ в агроценозе происходит вследствие недооценки закона возврата в почву биофильных элементов. Негативные изменения отмечаются на всех типах почв, даже на высокоплодородных черноземах ([Байбеков, 2003](#); [Минеев, 2011](#)).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ и обзор литературных источников по характеристике круговорота и массопереноса химических элементов в агроценозах. Показана более высокая интенсивность массопотока химических элементов на почвах сельхозугодий высокой окультуренности. Проанализированы статьи балансовой модели агроценоза: почва – удобрение – сельскохозяйственная культура. Затронуты вопросы оценки активной части химических соединений, участвующих в массопереносе. Рассмотрено взаимовлияние элементов при поступлении из почвы в растения (явления антагонизма и синергизма), которые следует учитывать при планировании эффективного использования питательных веществ. Подтверждено, что процессы химической деградации почв агроценозов сопровождаются разбалансированностью содержаний и соотношений питательных элементов в почвах.

Информация, позволяющая оценить масштабы и закономерности перемещения металлов в звене биогеохимического кругово-

рота (в системе почва – сельскохозяйственная культура), требует дополнения и серьезных доработок. Сложность почвенной органо-минеральной матрицы, воздействие целого ряда факторов, взаимное влияние элементов друг на друга подтверждают необходимость проведения дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, Ленинградское отделение, 1987. 142 с.
2. *Аштаб И.В.* Влияние свойств чернозема обыкновенного (предкавказского) карбонатного на обеспеченность растений цинком: Автореферат дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1994. 23 с.
3. *Аштаб И.В., Ельников И.И.* Агроэкологическая оценка обеспеченности чернозема цинком по элементному составу растений // Почвоведение. 1994. № 7. С. 108–115.
4. *Байбеков Р.Ф.* Агроэкологическое состояние почв при длительном применении удобрений. М.: ЦИНАО, 2003. 192 с.
5. *Большаков В.А., Белобров В.П., Шишов Л.Л.* Словник. Термины, их краткое определение, справочные материалы по общей и почвенной экологии, географии и классификации почв. М., 2004. 140 с.
6. *Борисочкина Т.И., Кайданова О.В.* Вынос микроэлементов растительностью как фактор устойчивости геосистем к загрязнению // Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М.: Институт географии РАН, 1989. С. 133–144.
7. *Борисочкина Т.И., Краснова Н.М., Головкова Т.В.* Особенности поглощения фтора растениями в условиях загрязнения // Сб. научных трудов. Техногенное воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1991. С. 21–28.
8. *Борисочкина Т.И., Сиволобова Т.С.* Балансовые расчеты обеспеченности бором типичных черноземов // Сб. Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине. Самарканд, 1990. С. 127.
9. *Воронина Л.П., Кирюшина А.П., Ксенофонтов А.Л., Тимофеева А.В., Голубкина Н.А.* Влияние селена на содержание азота в растениях и аминокислотный состав надземных органов ячменя // Агрохимия. 2018. № 9. С. 20–28.
10. *Гайдукова Н.Г., Кошеленко Н.А., Малюга Н.Г., Шоков Н.Р., Загорюлько А.В.* Мониторинг содержания тяжелых металлов в системе почва-растение // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2000. № 2–3. С. 103–106.

11. *Горбунова Н.С., Студин А.Ф.* Содержание тяжелых металлов при длительном применении удобрений в агроценозах кукурузы на черноземах выщелоченных // Вестник ВГУ, серия: химия, биология, фармация. 2016. № 4. С. 49–54.
12. *Гришина Л.А., Копчик Г.Н., Моргунов Л.В.* Организация и проведение почвенных исследований для экологического мониторинга. М.: МГУ, 1991. 82 с.
13. *Долгодворова А.П., Воронина Л.П.* Оценка действия селена на растения ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) на фоне внесения минеральных удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 4. С. 23–27.
14. *Зубкова В.М.* Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах и влияние удобрений на их поведение в системе почва-растение: Автореф. дис. ... д. биол. наук. М.: ТСХА, 2004. 40 с.
15. *Ельников И.И., Рогова О.Б.* Диагностика обеспеченности почв фосфором с учетом взаимосвязи его подвижной формы с агрохимическими свойствами почв и сбалансированностью химического состава растений // Системы интенсификации земледелия как основа инновационной модернизации аграрного производства. 2017. С. 208–212.
16. *Ельников И.И., Рогова О.Б.* О развитии исследований по агроэкологической оценке почв с применением методов почвенно-растительной диагностики // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. Материалы первой Всероссийской открытой конференции. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2015. С. 347–352.
17. *Ильин В.Б.* К оценке массопотока тяжелых металлов в системе почва-сельскохозяйственная культура // Агрохимия. 2006. № 3. С. 52–59.
18. *Ильин В.Б.* Элементарный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
19. *Кабата-Пендиас А.* Проблемы современной бигеохимии микроэлементов // Российский химический журнал. 2005. Т. 49. № 3. С. 15–19.
20. *Кайданова О.В., Борисочкина Т.И.* Вынос тяжелых металлов растениями из черноземов в зоне техногенного воздействия // Сб. научных трудов. Техногенное воздействие на почвы и их плодородие; методы контроля. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1991. С. 28–33.
21. *Карпова Е.А.* Состояние микроэлементов в агроэкосистемах // Техногенез и бигеохимическая эволюция таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 76–87.

22. *Карпова Е.А., Минеев В.Г.* Тяжелые металлы в агроэкосистеме. М., 2015. 215 с.
23. *Карпова Е.А., Потатуева Ю.А.* Последствия применения различных форм фосфорных удобрений: стронций в системе дерново-подзолистая почва-растение // *Агрохимия*. 2004. № 1. С. 91–96.
24. *Ковда В.А.* Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. М.: Наука, 1981. 182 с.
25. *Коробова Е.М.* Токсичность как биогеохимическая проблема // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 10. С. 949–954.
26. *Кошелева Н.Е.* Моделирование биогеохимических циклов тяжелых металлов в агроландшафтах на основе балансового подхода // *Геохимия ландшафтов и география почв*. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 389–405.
27. *Краснова Н.М., Борисочкина Т.И., Головкина Т.В.* Рост райграса на черноземе, загрязненном фтором // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 1989. Вып. 49. С. 27–30.
28. *Кулаковская Т.Н.* Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат, 1990. 219 с.
29. *Кульнев В.В., Насонов А.Н., Цветков И.В., Король Т.С., Шаховская К.А.* Биотестирование почв на основе фрактальных характеристик растений // *Принципы экологии*. 2020. Т. 9. № 4 (38). С. 3–20.
30. *Ладонин Д.В.* Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. М.: Изд-во Московского университета, 2019. 312 с.
31. *Лапа В.В., Кулеш О.Г., Лопух М.С.* Вынос и баланс элементов питания в зернотравяном севообороте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // *Почвоведение и агрохимия*. 2013. № 2. С. 143–150.
32. *Лебедевский И.А., Яковлева Е.А.* Минеральные удобрения как фактор трансформации тяжелых металлов в системе почва растение на примере чернозема выщелоченного Кубани // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2012. № 77. С. 536–545.
33. Методические указания по агрохимическому обследованию и картографированию почв на содержание микроэлементов. М., 1976. 80 с.
34. *Минеев В.Г.* Актуальные задачи агрохимии в условиях современного земледелия // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2011. № 1. С. 3–9.
35. *Минеев В.Г.* Воспроизводство плодородия почвы и экологические функции удобрений в агроценозе // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2008. № 1. С. 3–6.
36. *Минеев В.Г.* Агрохимия и качество пшеницы. Экологические проблемы и функции агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2005. 601 с.
37. *Минеев В.Г., Едемская Н.Л., Карпова Е.А.* Особенности динамики соединений меди в агроценозах на дерново-подзолистых почвах при

длительном применении удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2015. № 4. С. 3–19.

38. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 4. С. 8–16.

39. *Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение: Автореф. дис. ... д. с.-х. наук. М., 2000. 60 с.

40. *Плеханова И.О., Савельева В.А.* Трансформация соединений кобальта при увлажнении // Почвоведение. 1999. № 5. С. 568–574.

41. *Плеханова И.О.* Трансформация соединений Fe, Mn, Co и Ni в дерново-подзолистых почвах при различных уровнях влажности // Известия РАН. Серия биологическая. 2007. № 1. С. 82–90.

42. *Плешков А.С., Ягодин Б.А.* Способ обеспечения растений минеральными элементами. Авторское свидетельство на изобретение SU952168. 1982.

43. *Попова А.А.* Сезонная динамика и баланс тяжелых металлов в дерново-подзолистой почве: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1992. 24 с.

44. *Протасова Н.А.* Тяжелые металлы в черноземах и культурных растениях Воронежской области // Агрохимия. 2005. № 2. С. 80–86.

45. *Протасова Н.А., Горбунова Н.С.* Соединения цинка, никеля, свинца и кадмия в обыкновенных черноземах Каменной Степи при длительном применении удобрений и фосфогипса // Агрохимия. 2010. № 7. С. 52–61.

46. *Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Паэгле Г.В., Куницкая Т.А.* Система оптимизации и методы диагностики минерального питания растений. Рига: Зинатне, 1989. 196 с.

47. *Савич В.И., Трубицина Е.В., Замараев А.Г., Кобзаренко В.И., Духанин Ю.А., Никольский Ю.Н.* Баланс вещества и энергии в пахотной дерново-подзолистой почве // Известия ТСХА. 2005. № 4. С. 11–23.

48. *Степанок В.В.* Влияние комплексов техногенных элементов на химический состав сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2003. № 1. С. 50–60.

49. *Тимофеева Я.О.* Особенности круговорота микроэлементов в агроэкосистемах в условиях формирования почвенных конкреций // Аграрный вестник Урала. 2018. № 12 (179). С. 14–21.

50. *Торшин С.П.* Влияние естественных и антропогенных факторов на формирование естественного состава продукции растениеводства: Дис. ... д. биол. наук. М.: ТСХА, 1998. 280 с.

51. *Фокин А.Д.* Эколого-биогеохимические подходы к оптимизации агроэкосистем // Почвоведение. 1988. № 9. С. 71–75.

52. *Фокин А.Д.* Роль растений в перераспределении вещества по почвенному профилю // Почвоведение. 1999. № 1. С. 125–133.

53. *Фокин А.Д.* Роль растений в формировании трансформационных и транспортных потоков вещества в наземных экосистемах // В сб. Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии. М., 2004. С. 101–121.
54. *Фокин А., Торшин С.* Растения в жизни почв и наземных экосистем. Нетрадиционные подходы и решения в поведении биологически значимых элементов. Lap Lambert Academic Publishing, 2020. 184 с.
55. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция меди, цинка и кадмия в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // Агрохимия. 2014. № 11. С. 62–73.
56. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция железа, кобальта и никеля в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // Агрохимия. 2016. № 8. С. 68–81.
57. *Христенко А.А., Иванова С.Е.* Проблема повышения точности диагностики фосфатного состояния почв Украины // Вестник Международного института питания растений. 2011. № 2. С. 6–9.
58. *Церлинг В.В.* Агрохимические основы диагностики минерального питания сельскохозяйственных культур. М.: Наука, 1978. 216 с.
59. *Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф.* Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. М.: Агроконсалт, 1999. 176 с.
60. *Aboyaji C.M., Dunsin O., Adekiya A.O., Suleiman K.O., Chinedum C., Okunlola F.O., Joseph, Abiodun, Ejue S.W., Adesola O.O., Olofintoye T.A.J., Owolabi I.O.* Synergistic and antagonistic effects of soil applied P and Zn fertilizers on the performance, minerals and heavy metal composition of groundnut // Open Agriculture. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 1–9.
61. *Adriano D.C.* Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. New York: Springer, 2001. 867 p.
62. *Birsin M.A., Adak M.S., Inal A., Aksu A., Gunes A.* Mineral element distribution and accumulation patterns within two barley cultivars // Journal of plant nutrition. 2010. Vol. 33. No. 2. P. 267–284.
63. *Cuypers A., Remans T., Weyens N., Colpaert J., Vassilev A., Vangronsveld J.* Soil-plant relationships of heavy metals and metalloids // Heavy metals in soils. Dordrecht: Springer, 2013. P. 161–193.
64. *Dhaliwal S.S., Naresh R.K., Mandal A., Singh R., Dhaliwal M.K.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review // Environmental and Sustainability Indicators. 2019. Vol. 1–2. 100007.

65. *Di Gioia F., Petropoulos S.A., Ozores-Hampton M., Morgan K., Roskopf E.N.* Zinc and Iron Agronomic Biofortification of Brassicaceae Microgreens // *Agronomy*. 2019. Vol. 9. No. 11. 677.
66. *Ehrenfeld J.G., Ravit B., Elgersma K.* Feedback in the plant-soil system // *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2005. Vol. 30. P. 75–115.
67. *Fang J., Wen B., Shan X.Q., Lin J.M., Owens G.* Is an adjusted rhizosphere-based method valid for field assessment of metal phytoavailability? Application to non-contaminated soils // *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 150. No. 2. P. 209–217.
68. *Feng M.-H., Shan X.-Q., Zhang S.-Z., Wen B.* Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat // *Chemosphere*. 2005. Vol. 59. P. 939–949.
69. *Han W.X., Fang J.Y., Reich P.B., Ian Woodward F., Wang Z.H.* Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China // *Ecology Letters*. 2011. Vol. 14. No. 8. P. 788–796.
70. *Hosseinpur A.R., Motaghian H.* Evaluating of many chemical extractants for assessment of Zn and Pb uptake by bean in polluted soils // *Journal of soil science and plant nutrition*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 24–34.
71. *Horta M. do C., Torrent J.* The Olsen P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphate release from acid soils // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2007. P. 283–292.
72. *Ivezić V., Lončarić Z., Engler M., Kerovec D., Singh B. R.* Comparison of different extraction methods representing available and total concentrations of Cd, Cu, Fe, Mn and Zn in soil // *Poljoprivreda*. 2013. Vol. 19. No. 1. P. 53–58.
73. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. 4<sup>th</sup> edition. Florida. USA: CRC Press/Taylor-Francis Group, 2011. 548 p.
74. *Leinweber P., Paetsch C., Schulten H.R.* Heavy metal retention by organo-mineral particle-size fractions from soils in long-term agricultural experiments // *Archives of Agronomy and Soil Science*. 1995. Vol. 39. No. 4. P. 271–285.
75. *Malvi U.R.* Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium // *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*. 2011. Vol. 24. No. 1. P. 106–109.
76. *Menzies N.W., Donn M.J., Kopittke P.M.* Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils // *Environmental pollution*. 2007. Vol. 145. No. 1. P. 121–130.
77. *Plekhanova I.O., Bambusheva V.A.* Extraction methods for studying the fractional composition of heavy metals in soils and their comparative assessment // *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 9. P. 1004–1010.

78. Qian J., Shan X., Wang Z., Tu Q. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil // *Science of the Total Environment*. 1996. Vol. 187. No. 2. P. 131–141.
79. Rao C.R.M., Sahuquillo A., Sanchez J.F.L. A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soils and related materials // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2008. Vol. 189. No. 1. P. 291–333.
80. Reimann C., Englmaier P., Fabian K., Gough L., Lamothe P., Smith D. Biogeochemical plant–soil interaction: variable element composition in leaves of four plant species collected along a south–north transect at the southern tip of Norway // *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 506. P. 480–495.
81. Rietra R.P.J.J., Heinen M., Dimkpa C.O., Bindraban P.S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency // *Communications in soil science and plant analysis*. 2017. Vol. 48. No. 16. P. 1895–1920.
82. Shan X., Chen B. Evaluation of sequential extraction for speciation of trace metals in model soil containing natural minerals and humic acid // *Analytical Chemistry*. 1993. Vol. 65. P. 802–807. DOI: [10.1021/ac00054a026](https://doi.org/10.1021/ac00054a026).
83. Siromlya T.I. On available forms of chemical compounds in soils // *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. Vol. 2. P. 678–685.
84. Wu J., Zeng H., Zhao F., Chen C., Liu W., Yang B., Zhang W. Recognizing the role of plant species composition in the modification of soil nutrients and water in rubber agroforestry systems // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 723. 138042.
85. Xie K., Cakmak I., Wang S., Zhang F., Guo S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants // *The Crop Journal*. 2021. Vol. 9. No. 2. P. 249–256.

## REFERENCES

1. Alekseev Yu.V., *Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh* (Heavy metals in soils and plants), Leningrad: Agropromizdat, Leningradskoe otделение, 1987, 142 p.
2. Ashtab I.V., *Vliyanie chernozema obyknovennogo (predkavkazskogo) karbonatnogo na obespechennost' rastenii tsinkom: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Influence of properties of common (pre-Caucasian) carbonate chernozem on the provision of plants with zinc, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1994, 23 p.
3. Ashtab I.V., El'nikov I.I., *Agroekologicheskaya obespechennosti chernozema tsinkom po ehlementnomu sostavu rastenii* (Agroecological

assessment of zinc provision in chernozem by elemental composition of plants), *Pochvovedenie*, 1994, No. 7, pp. 108–115.

4. Baibekov R.F., *Agroekologicheskoe sostoyanie pochv pri dlitel'nom primenении udobrenii* (Agro-ecological state of soils under long-term application of fertilizers), Moscow: TSINAO, 2003, 192 p.

5. Bol'shakov V.A., Belobrov V.P., Shishov L.L., *Slovník. Terminy. Ikh kratkoe opredelenie, spravochnye materialy po obshchei i pochvennoi ehkologii, geografii i klassifikatsii pochv* (Terms, their brief definition, references on general and soil ecology, geography and classification of soils), Moscow, 2004, 140 p.

6. Borisochkina T.I., Kaidanova O.V., Vynos mikroelementov rastitel'nost'yu kak faktor ustoichivosti geosistem k zagryazneniyu (The removal of microelements by vegetation as a factor in the stability of geosystems to pollution), In: *Faktory i mekhanizmy ustoichivosti geosystem* (Factors and mechanisms of stability of geosystems), Moscow, Institut geografii RAN, 1989, pp. 133–144.

7. Borisochkina T.I., Krasnova N.M., Golovkova T.V., Osobennosti pogloshcheniya ftora rasteniyami v usloviyakh zagryazneniya (Features of absorption of fluorine by plants under pollution), In: *Tekhnogennoe vozdeistvie na pochvy i ikh plodorodie; metody kontrolya* (Technogenic Impact on Soils and Their Fertility; Methods of Control), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 1991, pp. 21–28.

8. Borisochkina T.I., Sivolobova T.S., Balansovye raschety obespechennosti borom tipichnykh chernozemov (Balance calculations of boron availability of typical chernozems), In: *Mikroelementy v biologii i ikh primeneniye v sel'skom khozyaistve i meditsine* (Microelements in biology and their use in agriculture and medicine), Samarkand, 1990, pp. 127.

9. Voronina L.P., Kiryushina A.P., Ksenofontov A.L., Timofeeva A.V., Golubkina N.A., Vliyanie selena na sodержanie azota v rasteniyakh i aminokislotnyi sostav nadzemnykh organov yachmenya (Effect of selenium on nitrogen content in plants and amino acid composition of the aboveground organs of barley), *Agrokimiya*, 2018, No. 9, pp. 20–28.

10. Gaidukova N.G., Koshelenko N.A., Malyuga N.G., Shokov N.R., Zagorul'ko A.V., Monitoring sodержaniya tyazhelykh metallov v sisteme pochva-rastenie (Monitoring of heavy metals in the soil-plant system), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya*, 2000, No. 2–3, pp. 103–106.

11. Gorbunova N.S., Studin A.F., Soderzhanie tyazhelykh metallov pri dlitel'nom primenении udobrenii v agrotsenozakh kukuruzy na vyshchelochennykh chernozemakh (The content of heavy metals during long-term application of fertilizers in the agrocenosis of corn on chernozem

leached), *Vestnik VGU, seriya: khimiya, biologiya, farmatsiya*, 2016, No. 4, pp. 49–54.

12. Grishina L.A., Koptsik G.N., Morgun L.V., *Organizatsiya i provedenie issledovaniy dlya ekhologicheskogo monitoring* (Organization and conduct of soil research for environmental monitoring), Moscow: MGU, 1991, 82 p.

13. Dolgodvorova A.P., Voronina L.P., Otsenka deistviya selena na rasteniya yarovogo yachmenya (*Hordeum vulgare* L.) na fone vneseniya mineral'nykh udobrenii (Evaluation of selenium action on plants of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) against the background of mineral fertilization), *Problemy agrokhimii i ekhologii*, 2014, No. 4, pp. 23–27.

14. Zubkova V.M., *Osobennosti nakopleniya i raspredeleniya tyazhelykh metallov v sel'skokhozyaistvennykh kul'turakh i vliyanie udobrenii na ikh povedenie v sisteme pochva-rastenie: Avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* (Features of accumulation and distribution of heavy metals in agricultural crops and the influence of fertilizers on their behavior in the soil-plant system, Extended abstract of Dr. biol. sci. thesis), Moscow: TSKHA, 2004, 40 p.

15. El'nikov I.I., Rogova O.B., Diagnostika obespechennosti pochv fosforom s uchetom vzaimosvyazi ego podvizhnoi formy s agrokhimicheskimi svoystvami pochv i sbalansirovannost'yu khimicheskogo sostava rastenii (Diagnosis of soil phosphorus supply taking into account the relationship of its mobile form with agrochemical properties of soils and the balance of the chemical composition of plants), In: *Sistemy intensivifikatsii zemledeliya kak osnova innovatsionnoi modernizatsii agrarnogo proizvodstva* (Systems of intensification of agriculture as the basis of innovative modernization of agricultural production), 2017, pp. 208–212.

16. El'nikov I.I., Rogova O.B., O razvitiy issledovaniy po agroekhologicheskoi otsenke pochv s primeneniem metodov pochvenno-rastitel'noi diagnostiki (On the development of research on agro-ecological assessment of soils using soil-vegetation diagnostic methods), *Materialy pervoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Pochvennye i zemel'nye resursy: sostoyanie, otsenka, ispol'zovanie"* (Proc. First All-Russian Open Conference: "Soil and land resources: state, evaluation"), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2015, pp. 347–352.

17. Il'in V.B., K otsenke massopotoka tyazhelykh metallov v sisteme pochva-sel'skokhozyaistvennaya kul'tura (To estimate the mass flux of heavy metals in the soil-agricultural system), *Agrokhimiya*, 2006, No. 3, pp. 52–59.

18. Il'in V.B., *Ehlementarnyi khimicheskii sostav rastenii* (Elemental chemical composition of plants), Novosibirsk: Nauka, 1985, 129 p.

19. Kabata-Pendias A., Problemy sovremennoi bigeokhimii mikroehlementov (Problems of modern biochemistry of trace elements), *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 49, No. 3, pp. 15–19.

20. Kaidanova O.V., Borisochkina T.I., Vynos tyzhelykh metallov rasteniyami iz chernozemov v zone tekhnogennoy vozdeystviya (Heavy metals removal by plants from chernozems in the zone of technogenic impact), In: *Tekhnogennoye vozdeystvie na pochvy i ikh plodorodie; metody kontrolya* (Technogenic Impact on Soils and Their Fertility; Methods of Control), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 1991, pp. 28–33.
21. Karpova E.A., Sostoyaniye mikroelementov v agroekosistemakh (State of microelements in agroecosystems), In: *Tekhnogenez i biogeokhimiyskaya ehvolyutsiya taksonov biosfery* (Technogenesis and biogeochemical evolution of biosphere taxa), Moscow: Nauka, 2003, pp. 76–87.
22. Karpova E.A., Mineev V.G., *Tyzhelye metally v agroekosisteme* (Heavy metals in agroecosystem), Moscow, 2015, 215 p.
23. Karpova E.A., Potatueva Yu.A., Posledstviya primeneniya razlichnykh form fosfornykh udobrenii: strontsiy v sisteme dernovo-podzolistaya pochva-rasteniye (Consequences of different forms of phosphorus fertilizers: strontium in the sod-podzolic soil-plant system), *Agrokhiymiya*, 2004, No. 1, pp. 91–96.
24. Kovda V.A., *Pochvennyi pokrov, ego uluchsheniye, ispol'zovaniye i okhrana* (Soil cover, its improvement, use and protection), Moscow: Nauka, 1981, 182 p.
25. Korobova E.M., Toksichnost' kak biogeokhimiyskaya problema (Toxicity as a biogeochemical problem), *Geokhiymiya*, 2020, Vol. 65, No. 10, pp. 949–954.
26. Kosheleva N.E., Modelirovaniye biogeokhimiyskikh tsiklov tyzhelykh metallov v agrolandshaftakh na osnove balansovogo podkhoda (Modeling of biogeochemical cycles of heavy metals in agrolandscapes based on balance approach), In: *Geokhiymiya landshaftov i geografiya pochv* (Geochemistry of landscapes and soil geography), Smolensk: Oikumena, 2002, 389–405 p.
27. Krasnova N.M., Borisochkina T.I., Golovkova T.V., Rost raigrasa na chernozeme, zagryaznennom ftorom (Ryegrass growth on chernozem contaminated with fluorine), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1989, Vol. 49, pp. 27–30.
28. Kulakovskaya T.N., *Optimizatsiya agrokhimiyskoy sistemy pochvennoy pitaniya rastenii* (Optimization of agrochemical system of soil nutrition of plants), Moscow: Agropromizdat, 1990, 219 p.
29. Kul'nev V.V., Nasonov A.N., Tsvetkov I.V., Korol' T.S., Shakhovskaya K.A., Biotestirovaniye pochv na osnove fraktal'nykh kharakteristik rastenii (Biotesting soils based on fractal characteristics of plants), *Printsipy ehkologii*, 2020, Vol. 9, No. 4(38), pp. 3–20.
30. Ladonin D.V., *Formy soedinenii tyzhelykh metallov v tekhnogenno-zagryaznennykh pochvakh* (Forms of heavy metal compounds in

technogenically polluted soils), Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2019. 312 p.

31. Lapa V.V., Kulesh O.G., Lopukh M.S., Vynos i balans ehlementov pitaniya v zernotravyanom sevooborote na dernovo-podzolistoi legkosuglinistoi pochve (The removal and balance of nutrients in the grain-grass crop rotation on sod-podzolic light loamy soil), *Pochvovedenie i agrokhiimiya*, 2013, No. 2, pp. 143–150.

32. Lebedovskii I.A., Yakovleva E.A., Mineral'nye udobreniya kak faktor transformatsii tyazhelykh metallov v sisteme pochva rastenie na primere chernozema vyshchelochennogo Kubani (Mineral fertilizers as a factor in the transformation of heavy metals in the system soil plant on the example of leached chernozem Kuban), *Politematicheskii setevoi ehlektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, No. 77, pp. 536–545.

33. *Metodicheskie ukazaniya po agrokhiimicheskomu obsledovaniyu i kartografirovaniyu pochv na sodержanie mikroehlementov* (Methodological guidelines for agrochemical examination and mapping of soils for the content of trace elements), Moscow: 1976, 80 p.

34. Mineev V.G., Aktual'nye zadachi agrokhiimii v usloviyakh sovremennogo zemledeliya (Actual problems of agrochemistry in modern agriculture), *Problemy agrokhiimii i ehkologii*, 2011, No. 1, pp. 3–9.

35. Mineev V.G., Vosproizvodstvo plodorodiya pochvy i ehkologicheskie funktsii udobrenii v agrotsenoze (Recovery of soil fertility and ecological functions of fertilizers in agrocenosis), *Problemy agrokhiimii i ehkologii*, 2008, No. 1, pp. 3–6.

36. Mineev V.G., *Agrokhiimiya i kachestvo pshenitsy. Ehkologicheskie problemy i funktsii agrokhiimii* (Agrochemistry and quality of wheat. Ecological Problems and Functions of Agrochemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 601 p.

37. Mineev V.G., Edemskaya N.L., Karpova E.A., Osobennosti dinamiki soedinenii medi v agrotsenozakh na dernovo-podzolistykh pochvakh pri dlitel'nom primenenii udobrenii (Features of the dynamics of copper compounds in agrocenoses on sod-podzolic soils with long-term use of fertilizers), *Problemy agrokhiimii i ehkologii*, 2015, No. 4, pp. 3–19.

38. Ovcharenko M.M., Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie–udobrenie (Heavy metals in the system soil–plant–fertilizer), *Khiimiya v sel'skom khozyaistve*, 1995, No. 4, pp. 8–16.

39. Ovcharenko M.M., *Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie–udobrenie: Avtoref. ... diss. dokt. s.-kh. nauk* (Heavy metals in system soil–plant–fertilizer, Extended abstract of Dr. agri. sci. thesis), Moscow, 2000, 60 p.

40. Plekhanova I.O., Savel'eva V.A., Transformatsiya soedinenii kobal'ta pri uvlazhnenii (Transformation of cobalt compounds at moistening), *Pochvovedenie*, 1999, No. 5, pp. 568–574.
41. Plekhanova I.O., Transformatsiya soedinenii Fe, Mn, Co i Ni v dernovo-podzolistykh pochvakh pri razlichnykh urovnyakh vlazhnosti (Transformation of Fe, Mn, Co and Ni compounds in sod-podzol soils at various levels of humidity), *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2007, No. 1, pp. 82–90.
42. Pleshkov A.S., Yagodin B.A., *Sposob obespecheniya rastenii mineral'nymi ehlementami* (Method of providing plants with mineral elements), Copyright certificate for the invention SU952168, 1982.
43. Popova A.A., *Sezonnaya dinamika i balans tyazhelykh metallov v dernovo-podzolistoi pochve: Avtoref. ... diss. kand. biol. nauk* (Seasonal dynamics and balance of heavy metals in sod-podzolic soil, Extended abstract of Cand. biol. sci. thesis), Moscow, 1992, 24 p.
44. Protasova N.A., Tyazhelye metally v chernozemakh i kul'turnykh rasteniyakh Voronezhskoi oblasti (Heavy metals in chernozems and cultural plants of Voronezh region), *Agrokhimiya*, 2005, No. 2, pp. 80–86.
45. Protasova N.A., Gorbunova N.S., Soedineniya tsinka, nikelya, svintsya i kadmiya v obyknovennykh chernozemakh Kamennoi Stepi pri dlitel'nom primenenii udobrenii i fosfogipsa (Compounds of zinc, nickel, lead and cadmium in common chernozems of Stone Steppe under long-term application of fertilizers and phosphogypsum), *Agrokhimiya*, 2010, No. 7, pp. 52–61.
46. Rin'kis G.Ya., Ramane Kh.K., Paehgle G.V., Kunitskaya T.A., *Sistema optimizatsii i metody diagnostiki mineral'nogo pitaniya rastenii* (Plant mineral nutrition optimization system and diagnostic methods), Riga: Zinatne, 1989, 196 p.
47. Savich V.I., Trubitsina E.V., Zamaraev A.G., Kobzarenko V.I., Dukhanin Yu.A., Nikol'skii Yu.N., Balans veshchestva i ehnergii v pakhotnoi dernovo-podzolistoi pochve (The balance of matter and energy in arable sod-podzolic soil), *Izvestiya TSKhA*, 2005, No. 4, pp. 11–23.
48. Stepanok V.V., Vliyanie kompleksov tekhnogennykh ehlementov na khimicheskii sostav sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (Influence of complexes of anthropogenic elements on chemical composition of agricultural crops), *Agrokhimiya*, 2003, No. 1, pp. 50–60.
49. Timofeeva Ya.O., Osobennosti krugovorota mikroehlementov v agroehkossistemakh v usloviyakh formirovaniya pochvennykh konkretnykh sostavov (Peculiarities of microelement cycle in agroecosystems under conditions of soil nodule formation), *Agrarnyi vestnik Urala*, 2018, No. 12(179), pp. 14–21.
50. Torshin S.P., *Vliyanie estestvennykh i antropogennykh faktorov na formirovanie estestvennogo sostava produktsii rasteniyevodstva: Diss. ... dokt. biol. nauk* (Influence of natural and anthropogenic factors on the formation of

the natural composition of crop production, Dr. biol. sci. thesis), Moscow: TSKHA, 1998, 280 p.

51. Fokin A.D., *Ekologo-biogeokhimicheskie podkhody k optimizatsii agroekosistem* (Ecological and biogeochemical approaches to optimization of agro-ecosystem), *Pochvovedenie*, 1988, No. 9, pp. 71–75.

52. Fokin A.D., *Rol' rastenii v pereraspredelenii veshchestva po pochvennomu profilu* (The role of plants in redistribution of matter on soil profile), *Pochvovedenie*, 1999, No. 1, pp. 125–133.

53. Fokin A.D. *Rol' rastenii v formirovani i transportnykh potokov veshchestva v nazemnykh ekosistemakh*. V sb. Aktual'nye problemy pochvovedeniya, agrokhimii i ekologii. M. 2004, pp.101–121

54. Fokin A., Torshin S., *Rasteniya v zhizni pochv i nazemnykh ehkosistem. Netraditsionnye podkhody i resheniya v povedenii biologicheskii znachimykh ehlementov* (Plants in life of soils and land ecosystems. Unconventional approaches and solutions in the behavior of biologically significant elements), Lap Lambert Academic Publishing, 2020, 184 p.

55. Frid A.S., Goma Botkhina Saad M.A., Borisochkina T.I., *Migratsiya medi, tsinka i kadmiya v aridnykh pochvakh Egipta, oroshaemykh prirodnyimi i gorodskimi stochnymi vodami* (Migration of copper, zinc and cadmium in arid soils of Egypt irrigated by natural and urban wastewater), *Agrokhimiya*, 2014, No. 11, pp. 62–73.

56. Frid A.S., Goma Botkhina Saad M.A., Borisochkina T.I., *Migratsiya zheleza, kobal'ta i nikelya v aridnykh pochvakh Egipta, oroshaemykh prirodnyimi i gorodskimi stochnymi vodami* (Migration of iron, cobalt and nickel in arid soils of Egypt irrigated by natural and urban wastewater), *Agrokhimiya*, 2016, No. 8, pp. 68–81.

57. Khristenko A.A., Ivanova S.E., *Problema povysheniya tochnosti diagnostiki fosfatnogo sostoyaniya pochv Ukrainy* (The problem of improving the accuracy of diagnosis of phosphate status of soils in Ukraine), *Vestnik Mezhdunarodnogo instituta pitaniya rastenii*, 2011, No. 2, pp. 6–9.

58. Tserling V.V., *Agrokhimicheskie osnovy diagnostiki mineral'nogo pitaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* (Agrochemical bases of diagnostics of mineral nutrition of agricultural crops), Moscow: Nauka, 1978, 216 p.

59. Chernykh N.A., Milashchenko N.Z., Ladonin V.F., *Ehкотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами* (Ecotoxicological aspects of soil contamination by heavy metals), Moscow: Agrokonsalt, 1999, 176 p.

60. Aboyeji C.M., Dunsin O., Adekiya A.O., Suleiman K.O., Chinedum C., Okunlola F.O., Joseph, Abiodun, Ejue S.W., Adesola O.O., Olofintoye T.A.J., Owolabi I.O., Synergistic and antagonistic effects of soil applied P and Zn

fertilizers on the performance, minerals and heavy metal composition of groundnut, *Open Agriculture*, 2020, Vol. 5, No. 1, pp. 1–9.

61. Adriano D.C., *Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals*, New York: Springer, 2001, 867 p.

62. Birsin M.A., Adak M.S., Inal A., Aksu A., Gunes A., Mineral element distribution and accumulation patterns within two barley cultivars, *Journal of plant nutrition*, 2010, Vol. 33, No. 2, pp. 267–284.

63. Cuypers A., Remans T., Weyens N., Colpaert J., Vassilev A., Vangronsveld J., Soil-plant relationships of heavy metals and metalloids, *Heavy metals in soils*, Dordrecht: Springer, 2013, pp. 161–193.

64. Dhaliwal S.S., Naresh R.K., Mandal A., Singh R., Dhaliwal M.K., Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review, *Environmental and Sustainability Indicators*, 2019, Vol. 1, 100007.

65. Di Gioia F., Petropoulos S.A., Ozores-Hampton M., Morgan K., Roskopf E.N., Zinc and Iron Agronomic Biofortification of Brassicaceae Microgreens, *Agronomy*, 2019, Vol. 9, No. 11, 677.

66. Ehrenfeld J.G., Ravit B., Elgersma K., Feedback in the plant-soil system, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 2005, Vol. 30, pp. 75–115.

67. Fang J., Wen B., Shan X.Q., Lin J.M., Owens G., Is an adjusted rhizosphere-based method valid for field assessment of metal phytoavailability? Application to non-contaminated soils, *Environmental Pollution*, 2007, Vol. 150, No. 2, pp. 209–217.

68. Feng M.-H., Shan X.-Q., Zhang S.-Z., Wen B., Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat, *Chemosphere*, 2005, Vol. 59, pp. 939–949.

69. Han W.X., Fang J.Y., Reich P.B., Ian Woodward F., Wang Z.H., Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China, *Ecology Letters*, 2011, Vol. 14, No. 8, pp. 788–796.

70. Hosseinpour A.R., Motaghian H., Evaluating of many chemical extractants for assessment of Zn and Pb uptake by bean in polluted soils, *Journal of soil science and plant nutrition*, 2015, Vol. 15, No. 1, pp. 24–34.

71. Horta M. do C., Torrent J., The Olsen P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphate release from acid soils, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2007, pp. 283–292.

72. Ivezić V., Lončarić Z., Engler M., Kerovec D., Singh B.R., Comparison of different extraction methods representing available and total concentrations of Cd, Cu, Fe, Mn and Zn in soil, *Poljoprivreda*, 2013, Vol. 19, No. 1, pp. 53–58.

73. Kabata-Pendias A., Trace Elements in Soils and Plants. 4<sup>th</sup> edition. Florida. USA: CRC Press/Taylor-Francis Group, 2011, 548 p.
74. Leinweber P., Paetsch C., Schulten H.R., Heavy metal retention by organo-mineral particle-size fractions from soils in long-term agricultural experiments, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1995, Vol. 39, No. 4, pp. 271–285.
75. Malvi U.R., Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium, *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 2011, Vol. 24, No. 1, pp. 106–109.
76. Menzies N.W., Donn M.J., Kopittke P.M., Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils, *Environmental pollution*, 2007, Vol. 145, No. 1, pp. 121–130.
77. Plekhanova I.O., Bambusheva V.A., Extraction methods for studying the fractional composition of heavy metals in soils and their comparative assessment, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 9, pp. 1004–1010
78. Qian J., Shan X., Wang Z., Tu Q., Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil, *Science of the Total Environment*, 1996, Vol. 187, No. 2, pp. 131–141.
79. Rao C.R.M., Sahuquillo A., Sanchez J.F.L., A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soils and related materials, *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, Vol. 189, No. 1, pp. 291–333.
80. Reimann C., Englmaier P., Fabian K., Gough L., Lamothe P., Smith D., Biogeochemical plant–soil interaction: variable element composition in leaves of four plant species collected along a south–north transect at the southern tip of Norway, *Science of the Total Environment*, 2015, Vol. 506, pp. 480–495.
81. Rietra R.P.J.J., Heinen M., Dimkpa C.O., Bindraban P.S., Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency, *Communications in soil science and plant analysis*, 2017, Vol. 48, No. 16, pp. 1895–1920.
82. Shan X., Chen B., Evaluation of sequential extraction for speciation of trace metals in model soil containing natural minerals and humic acid, *Analytical Chemistry*, 1993, Vol. 65, pp. 802–807, DOI: [10.1021/ac00054a026](https://doi.org/10.1021/ac00054a026).
83. Siromlya T.I., On available forms of chemical compounds in soils, *Contemporary Problems of Ecology*, 2009, Vol. 2, pp. 678–685.
84. Wu J., Zeng H., Zhao F., Chen C., Liu W., Yang B., Zhang W., Recognizing the role of plant species composition in the modification of soil nutrients and water in rubber agroforestry systems, *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 723, 138042.

85. Xie K., Cakmak I., Wang S., Zhang F., Guo S., Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants, *The Crop Journal*, 2021, Vol. 9, No. 2, pp. 249–256.