

## Роль удобрений в циклах микроэлементов в агроэкосистемах

Е. А. Карпова

*ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА КАРПОВА — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры агрохимии факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: агрохимия, биогеохимия, почвенная химия микроэлементов, экология.*

*119899 Москва, Ленинские горы, МГУ, факультет почвоведения, кафедра агрохимии, тел. (095)939-26-19, E-mail karp@soil.msu.ru*

Термин «микроэлемент» строгого определения не имеет. Он применяется как к химическим элементам, распространенность которых в земной коре менее 0,1 или 0,01%, так и к тем, что присутствуют в живом веществе в очень малых количествах [1]. В биологической и сельскохозяйственной литературе часто термин «микроэлементы» называют только те элементы, для которых доказано участие в жизненно важных процессах в организмах растений и животных. В сельском хозяйстве (растениеводстве) к микроэлементам относят в первую очередь бор, медь, цинк, марганец, молибден, кобальт, йод. Однако недостаточность знания о биохимических или физиологических функциях многих элементов, содержащихся в организмах в следовых количествах, еще не означает отсутствия этих функций. В.И. Вернадский писал: «Живое вещество охватывает и регулирует в области биосферы все или почти все химические элементы. Они все нужны для жизни и попадают в состав организма не случайно. Нет особых, жизни свойственных элементов. Есть главенствующие» [2]. Таким образом, в данной статье под термином микроэлементы будут пониматься элементы, присутствующие в живых организмах и природной среде в микроколичествах (менее 0,1%), без учета доказанности их биологической роли.

Питание является одним из важнейших факторов, определяющих здоровье и сохранение генофонда человечества. Получение пищевого сырья находится в сфере сельскохозяйственного производства. Растениеводческая агроэкосистема и ее основа или подсистема почва—растение формируют необходимую биопroduкцию. Решение проблемы получения больших количеств растениеводческой продукции высокого качества (с полноценным, характерным для каждого биологического вида, набором белков, жиров, углеводов, витаминов, минеральных веществ и отвечающей гигиеническим нормам содержания химических элементов) зависит во многом от состояния микроэлементов в почве и процесса их массообмена в системе почва—растение.

Процессы биогенного массообмена имеют циклический характер и получили название биологического круговорота. Это одна из базовых концепций биогеохимии и универсальное свойство биосферы [3—6]. Динамический массообмен химических элементов поддерживает химический состав как живых организмов (в т.ч. растений), так и основных слагаемых биосферы и, в первую очередь, состав почв, воды и воздуха. В.И. Вернадский обосновал, что история большинства химических элементов, составляющих 99,7% массы биосферы, связана с биогеохимическими циклами,

которые «обратимы лишь в главной части атомов, часть же элементов постоянно и неизбежно выходит из круговорота» [3].

Разная степень обратимости массообмена химических элементов в природных и антропогенно-измененных структурных единицах биосферы (естественных экосистемах и агроэкосистемах) является одной из причин их различной устойчивости.

Естественная экосистема функционирует самостоятельно и является системой саморегулируемой и наиболее устойчивой. В ней биологические круговороты большинства химических элементов близки к замкнутому типу. Только 3—4% биопroduкции вместе с минеральными соединениями уходит с водным и воздушным потоками и включается в геологический круговорот [7].

Агроэкосистема изменена человеком и управляется в значительной мере человеком. В ней коренным образом изменен механизм функционирования природных систем. В агроэкосистеме отчуждается 20—80% от всей биопroduкции, что приводит к разомкнутости круговорота химических элементов, к изменению баланса энергии в системе [7]. В агроэкосистемах для восполнения элементов питания и поддержания почвенного плодородия необходимо систематическое внесение удобрений и других агрохимических средств — это основной закон земледелия [8—10].

Удобрения и мелиоранты обычно содержат в качестве примеси микроэлементы и служат одним из источников их поступления в агроэкосистему. Однако влияние агрохимических средств на состояние микроэлементов в почвах не сводится только к их привносу извне. Все, что вносится в почву, реагирует с ее компонентами. Длительное применение удобрений и мелиорантов приводит к значительным изменениям химических, физических и биологических свойств почвы, что, в свою очередь, не может не повлиять на исходное (природное) состояние в ней микроэлементов. И такого рода изменения могут быть, если не необратимыми, то, по крайней мере, проявляться длительное время и после прекращения внесения агрохимических средств.

Антропогенное вмешательство и, в частности, сельскохозяйственное производство, может интенсифицировать внутрпочвенное выветривание. В результате возможны количественные изменения в содержании подвижных соединений химических элементов в почвах и концентрации их в растениях, интенсификация биогеохимических циклов. Причем в зависимости от геохимических ассоциаций микроэлементов в первичных минералах, наследуемых почвой от породы, увеличение накопления микроэлементов сельскохо-

Таблица 1

Содержание микроэлементов в калийных и азотных удобрениях [11], г/т

Удобрение минеральное	Со	Сг	Сu	Мп	Ni	Pb	Zn	As	Cd
Калийная селитра	0—1	140—172	2—24	13—27	12—30	8—20	0—12	0—5	н.о.
Сульфат калия	2—8	40—76	9—22	15—82	0—15	0—19	5—10	0—5	0—1
Калий хлористый	0—2	12—51	4—23	91—171	7—30	2—12	11—57	1—3	1—5
Карбамид	0—2	7—37	2—52	7—160	5—34	н.о.	2—29	0—2	н.о.
Сульфат аммония	0—8	12—172	0—51	27—428	5—93	0—2	5—69	0—18	0—2
Селитра аммиачная	0—1	2—22	2—18	10—76	4—17	0—1	6—30	н.о.	0—1
Вода аммиачная	1—12	69—121	17—92	100—368	20—117	0—1	62—108	2—12	0—1

Примечание: н.о. — не обнаружен

зайственными культурами может иметь как положительные, так и отрицательные стороны. Положительные связаны с возрастанием доступности растениям микроэлементов с жизненно важными функциями, что приводит к усилению метаболических процессов в растениях и, в конечном счете, к увеличению количества и улучшению качества биопродукции. Одна из отрицательных сторон интенсификации выветривания связана с аккумуляцией в растениях микроэлементов, регламентируемых ПДК.

#### Удобрения как источник микроэлементов

Уровень содержания микроэлементов в минеральных удобрениях определяется качеством исходного сырья и технологией его переработки. По данным ЦИНАО, приводимым М.М. Овчаренко [11], содержание примесей в калийных и азотных удобрениях невелико (табл. 1). Из всех исследованных микроэлементов наибольшие количества отмечены только для марганца — до 400 мг/кг. Практически отсутствуют в них примеси кадмия, мышьяка, кобальта. Незначительны количества никеля и свинца.

В табл. 2 показано содержание микроэлементов в фосфоритах и фосфорных удобрениях по данным зарубежных исследователей [1, 12—17].

В России значительную долю фосфатного сырья составляют апатитовые месторождения. Из фосфоритов основное место в балансе отечественных запасов фосфора занимают конкреционные. И фосфориты, и апатиты отличаются высоким содержанием фтора и стронция. Однако доля фтора в фосфатном сырье из

Таблица 2

Содержание микроэлементов в фосфоритах и фосфорных удобрениях по зарубежным данным, мг/кг

Элемент	Фосфориты [1, 13, 14]	Фосфорные удобрения [12, 15—17]
Мышьяк	0,4—190	2—1200
Кадмий	0,01—122	7—170
Никель	2—1000	7—32
Свинец	1—100	1—225
Цинк	50—871	90—1000
Стронций	1000—2000	25—500
Хром	2—1600	66—300
Фтор	3100	8500—15500

стран СНГ несколько ниже, чем в фосфоритах крупнейших зарубежных месторождений. Отечественное сырье выделяется и относительно низким содержанием кадмия.

В табл. 3 показано содержание микроэлементов в основных формах фосфорных удобрений, полученных из отечественного сырья (апатитов и фосфоритов).

Как видно из приведенных данных, среди минеральных удобрений наиболее обогащены микроэлементами фосфорные удобрения. Все виды фосфатного сырья и фосфорных удобрений из всех микроэлементов содержат значительные количества фтора. Простой и двойной суперфосфат, независимо от исходного сырья, а также фосфоритная мука большей части месторождений содержат существенные примеси стронция.

Таблица 3

Содержание микроэлементов в фосфорных удобрениях из апатитового концентрата\* и фосфоритов\*\* [11, 18-22], мг/кг

Удобрение	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	As	Ba	Cd	Ni	Pb	Zn	Mn	Sr, %	F, %
Суперфосфат*	20	3	220	0,2—1,6	11	2—5	10—20	21	1,2	0,6
Суперфосфат**	20	5	260	0,8—2,1	30	2—6	12—15	67	—	0,8
Двойной суперфосфат*	50	3	410	0,8—1,8	24	9,1	9,6	42	0,3	2,1
Двойной суперфосфат**	49	3—26	546	0,4—3,5	7—24	2,6—21	19—40	768	0,2	0,8
Аммофос*	51	1—9	11	4—5	5—14	3—12	17—142	200—300	0,06—0,1	1,9
Аммофос**	51	4—12	31	2—5	5—9	6—20	9—128	272—990	0,009—0,1	1,0
Диаммофос*	52	8,3	11	0,6	27	5	21	200	0,1	0,6
Диаммофос**	52	18,4	1,8	—	27	17	5	226	0,0006	0,1

В табл. 4 приведено ежегодное поступление микроэлементов в почву с дозой внесения 60 кг/га  $P_2O_5$  при максимальном содержании микроэлементов в удобрениях из российского сырья. Как видно, существенными являются только поступления фтора и стронция: 5200 г/га стронция с простым суперфосфатом из апатита и 30000 г/га фтора с фосфоритной мукой.

Таблица 4

Ежегодное поступление микроэлементов в почву при максимальном их содержании в фосфорных удобрениях. Доза внесения 60 кг/га [19–21]

Элемент	Природное содержание*, кг/га	Поступление, г/га
As	10	6
Cd	0,8	4,5
Pb	33	40
Ni	87	39
Cr	252	40
Ba	660	517
Zn	167	93
Sr	370	5200
F	1120	30000

\* Запас (природный) в пахотном горизонте (0–20 см) дерново-подзолистой суглинистой почвы

Содержание микроэлементов в органических удобрениях изменяется в широких пределах. Концентрация каждого из них в наиболее традиционном органическом удобрении — навозе крупного рогатого скота (КРС), может различаться на несколько порядков. Это зависит от применяемых кормовых минеральных добавок, а также от биогеохимических особенностей среды (биогеохимические провинции с избытком или недостатком различных химических элементов) и ее техногенного загрязнения. Так, концентрация мышьяка в навозе может варьировать от 0,1–10 мг/кг (средняя полоса России) до 10–50 мг/кг сухой массы (биогеохимическая провинция и техногенное загрязнение, Кабардино-Балкария). По данным С. William [23] содержание мышьяка в навозе КРС, а также в птичьем помете находится в пределах от 15 до 30 мг/кг.

С навозом в расчете на га почвы может поступать от 40 до 200 г свинца, от 2 до 100 г кадмия, от 7,5 до 350 г никеля, от 50 до 1000 г меди, от 3000 до 5000 г цинка и от 2000 до 5000 г марганца при дозе внесения 50 т/га [11, 24, 25].

Анализ многочисленных балансовых расчетов поступления микроэлементов с удобрениями и выноса их с растениеводческой продукцией показывает, что применение минеральных удобрений из отечественного сырья не приводит к накоплению большинства микроэлементов в агроэкосистемах на почвах, сформированных на лесовидных, покровных суглинках и флювиогляциальных отложениях, т.е. в значительной степени переработанных и, как правило, небогатых микроэлементами почвообразующих породах. Исключение составляет стронций, поступающий в значительных количествах с некоторыми формами фосфорных удобрений. При внесении суперфосфатов наблюдается положительный баланс элемента в агроэкосистемах, приводящий к увеличению его содержания в растениях и накоплению почвах [26]. Для второй макропримеси фосфорных удобрений — фтора,

баланс в большинстве агроэкосистем также положительный, что проявляется в увеличении на 3–5% в год общего содержания элемента в почвах [21, 27, 28]. Количество подвижных соединений фтора возрастает в основном при внесении аммофоса и диаммофоса, в составе которых элемент находится в легко растворимой форме — гексафторкремниевом аммония и сложных фторфосфатных комплексов с железом, алюминием, аммонием, магнием и кальцием [29]. Однако в большинстве случаев содержание элемента в почвах, не связанное с техногенным (промышленным) загрязнением, практически не влияет на урожайность и концентрацию фтора в репродуктивных органах зерновых культур [29] и органах запаса ассимилятов корне- и клубнеплодных растений [30, 31]. Фтор обладает низкой биологической доступностью [32].

Органические удобрения во многих случаях приводят к положительному балансу некоторых микроэлементов в агроэкосистеме. Особенно существенен их вклад в поступление цинка, меди, мышьяка и никеля [33].

#### Роль удобрений в изменении свойств почвы и процессах выветривания

Вопрос изменения физико-химических (агрохимических) свойств почв (в частности, дерново-подзолистых) под влиянием длительного внесения минеральных удобрений наиболее интенсивно изучается в течение нескольких последних десятилетий [34–37]. Основные направления этих изменений установлены: нарастание всех видов кислотности, снижение содержания обменных катионов, гумуса, увеличение количества подвижных соединений фосфора. В каждом конкретном случае степень изменения свойств зависит от многих факторов, основными из которых для почв одного типа и при одинаковых условиях сельскохозяйственного использования являются гранулометрический и минералогический состав, исходное содержание органического вещества, а также состояние почвенного поглощающего комплекса. Периодическое известкование, особенно в сочетании с внесением органических удобрений, позволяет не только нивелировать многие негативные изменения свойств почвы (увеличение кислотности, снижение количества поглощенных оснований), но и повысить эффективное плодородие почвы.

Многие исследования показывают, что применение минеральных удобрений, извести и других мелиорантов, а также сельскохозяйственная обработка почв (распахивание, культивация и др.) интенсифицируют процессы выветривания и трансформации минералов [38–41].

По определению П.В. Ивашова [42] внутрипочвенное выветривание — это комплекс биогеохимических процессов физико-химического и биогенного разрушения (трансформации) первичного минерального вещества в составе генетических горизонтов почв под действием среды (почвенного раствора, гумуса, органических и неорганических соединений, микроорганизмов и фауны) и функционирования почвы в целом как биогеохимической системы.

Внутрипочвенное выветривание — важнейший биогеохимический процесс, благодаря которому макро- и микроэлементы, прочно связанные в кристаллической решетке первичных минералов, переходят в менее фиксированное состояние. Освобождающиеся в

процессе выветривания элементы включаются в разнообразные реакции: образования вторичных минеральных фаз, комплексообразования, ионного обмена, корневого и микробного поглощения, а также могут мигрировать в нижележащие горизонты и латерально. В природных экосистемах устанавливается определенная интенсивность процесса выветривания, связанная с типом почвообразования. В этих условиях формируется соотношение форм элементов в почве, которые находятся между собой в динамическом квазиравновесии.

Среди химических процессов выветривания А. Кабата-Пендиас и Х. Пендиас [1] выделили пять основных: растворение, гидратация, гидролиз, окисление, восстановление и карбонатизация.

В агроэкосистемах интенсифицировать внутрипочвенное выветривание может система сельскохозяйственной обработки почвы [36, 38]. В этом случае происходит физическое измельчение первичных минералов (особенно слюды), приводящее к увеличению их поверхности и, как следствие, способности к разного рода взаимодействиям.

Наиболее существенным фактором интенсификации внутрипочвенного выветривания являются агрохимические средства, воздействие которых на почву может быть прямым и косвенным. Прямое — это непосредственное химическое взаимодействие удобрений и мелиорантов с почвой. Косвенное воздействие связано с метаболизмом растений и микроорганизмов и сопровождается выделением в почву различных химических веществ. Еще один аспект косвенного действия агрохимических средств может быть связан с интенсивным ростом корней растений, приводящим к усилению механического воздействия на почву.

Химическое взаимодействие удобрений и других агрохимических средств с почвой происходит в результате реакций гидролиза, осаждения—растворения и обменных процессов. Растворение минеральных удобрений в почвах сопровождается гидролитическими реакциями. В большинстве случаев они приводят к снижению рН (сульфат аммония, аммиачная селитра, суперфосфаты). Даже если такое изменение почвенно-геохимической среды временно и локально, его результатом может быть разрушение как первичных, так и вторичных минералов. Например, вокруг гранул суперфосфатов при их растворении высвобождается фосфорная кислота и рН при этом часто снижается до 2 [43]. Но в большинстве случаев при внесении низких и средних доз удобрения постоянного подкисления почвы не происходит, поскольку при взаимодействии фосфорной кислоты с минеральной частью образуются фосфаты железа и алюминия, а в почвах, обогащенных кальцием, соответствующие разноосновные фосфаты, а также гидроксиапатит. Присутствующие в простом суперфосфате сульфат-ионы могут оказывать растворяющее действие на алюминийсодержащие первичные минералы.

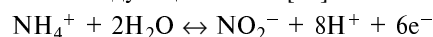
Растворение извести приводит к резкому локальному возрастанию рН почти до 7,5 вокруг частицы удобрения, следствием чего является увеличение количества растворимых органических веществ [44] и их взаимодействие с минеральной частью почвы.

Растворение удобрений сопровождается также обменными реакциями с почвенным поглощающим

комплексом (ППК). Поскольку в дерново-подзолистых почвах большую долю в ППК занимают ионы водорода, обмен катионов калия, аммония, кальция вызывает снижение рН.

Взаимодействие удобрений с почвой в агроэкосистеме имеет не только химический, но и физиолого-биохимический аспект. Поглощение катионов почвенного раствора растениями происходит в обмен на протоны. Результатом действия физиологически кислых удобрений является снижение рН почвы. Аммонийные формы удобрений и мочевины являются физиологически кислыми, а нитраты натрия, калия и кальция — физиологически щелочными [45]. При внесении сульфата аммония значение рН в ризосфере корней растений снижается на 2—3 единицы, тогда как применение нитрата кальция вызывало увеличение рН на 0,7 единиц [46].

Применение азотных удобрений в аммонийной форме может стимулировать развитие процессов нитрификации, которые, в свою очередь, сопровождаются выделением протонов в почву. Так, трансформация аммонийных форм азота микроорганизмами (*Nitrosomonas* и *Nitrobacter*) в окисные формы осуществляется по следующей схеме [33]:



Сбалансированное действие удобрений приводит к активному развитию растений и микроорганизмов, которое сопровождается выделением в почву различных химических веществ, обладающих растворяющим действием на почвенные минералы.

Природные хелатирующие агенты (низкомолекулярные органические кислоты, аминокислоты, фенолы), а также  $\text{CO}_2$  и органические восстановители поступают в почву с продуктами метаболизма грибов и микроорганизмов, при деградации растительных остатков, почвенного органического вещества и органических удобрений [47—49]. Все эти вещества способствуют мобилизации химических элементов из первичных (и вторичных) минералов, которая приводит к их трансформации.

В работе Д.И. Ковалишиной и Г.В. Платонова [50] было показано усиление разрушения первичных минералов, особенно железосодержащих слюды, под действием возрастающих доз органических удобрений.

Микробиологическая деструкция органического вещества (почвы и удобрений) приводит к интенсивной мобилизации калия, кальция, железа и марганца из гранита, т.е. к усилению выветривания последнего [47].

Несбалансированность элементов питания может также приводить к усилению внутрипочвенного выветривания. Французскими исследователями [51] показано значительное возрастание выветривания биотита под действием растений и бактерий при низком содержании калия в почве. Применение неполного удобрения (несбалансированное соотношение элементов питания), а также неоправданно высоких доз минерального удобрения приводило к разрушению основных и средних плагиоклазов [52].

Выветривание в результате биотических процессов в наибольшей степени проявляется в зоне контакта корней растения и почвы — в ризосфере. В ризосфере выветривание обусловлено совместным воздействием

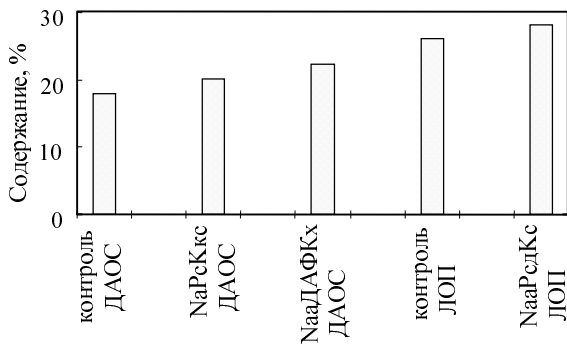


Рис. 1. Содержание несиликатного железа (% от общего содержания железа) в дерново-подзолистых почвах в длительных полевых опытах.

ДАОС — тяжелосуглинистые почвы Долгопродной агрохимической опытной станции; ЛОП — супесчаные почвы Люберецкого опытного поля; Naa — аммиачная селитра; Na — сульфат аммония; Pс — простой суперфосфат; Pсд — двойной суперфосфат; ДАФ — диаммофос; Кх — хлористый калий; Кс — сульфат калия; Ккс — калийная соль

корневых выделений и продуктов жизнедеятельности различных микроорганизмов, которое приводит в значительному уменьшению количества легковыветриваемых минералов типа амфиболов и плагиоклазов. Так их (а также хлоритов — минералов из подкласса слоистых силикатов) содержание возрастает в следующем порядке: внутри ризосферы < за ризосферой < в основной массе почвы [53].

Исследованиями Н.П. Чижиковой [39—41] была установлена направленность изменения минералогического состава тонкодисперсной фракции почв при длительном применении минеральных (калийных) удобрений: в результате кислотного гидролиза разрушаются смешанослойные слюда-сметитовые образования, сметиты, хлориты, биотиты, вермикулиты; накапливаются мусковит-серициты, каолиниты, кварц.

Соединения железа, относящиеся к свободным (не силикатным) формам в почвах, образуются в процессе выветривания и почвообразования и могут служить показателем выраженности внутрипочвенного выветривания. Собственными исследованиями [54] было показано, что применение некоторых видов и форм минеральных удобрений усиливает внутрипочвенное

выветривание в дерново-подзолистых почвах различного гранулометрического и минералогического состава, которое проявлялось в возрастании количества несиликатного железа в вариантах длительных опытов с внесением азотных, фосфорных и калийных удобрений (NPK) в оптимальных дозах по сравнению с контролем (без удобрения) (рис. 1). По воздействию на внутрипочвенное выветривание виды удобрений можно расположить в следующем порядке: азотные (аммиачная селитра) >> фосфорные (двойной суперфосфат) > калийные (хлористый калий). Периодическое известкование приводит к значительному снижению количества свободного железа. Это может быть связано с изменением интенсивности внутрипочвенного выветривания из-за частичной нейтрализации продуктов гидролиза удобрений и кислотности почв. При периодическом внесении извести в почву в ней формируется реакция среды, близкая к нейтральной с  $pH_{KCl} \approx 6$ . (Одними из показателей кислотно-основного состояния почв служат pH водной и солевой вытяжек —  $pH_{H_2O}$  и  $pH_{KCl}$ . В солевой вытяжке, как правило, значения pH более низкие, чем в водной, за счет реакций катионного обмена с почвенным поглощающим комплексом, значительную долю в котором составляют ионы водорода. Поскольку задачей известкования служит изменение не только фактической, но и обменной кислотности почв, в данном случае был использован показатель  $pH_{KCl}$ .) С другой стороны, известкование повышает плодородие почвы и создает оптимальные условия для роста растений. В результате увеличения урожайности возрастает общий вынос большинства химических элементов из почвы, в том числе и железа [54].

Иллюстрацией к пониманию возможных отрицательных последствий усиления процессов выветривания и соответствующей интенсификации циклов микроэлементов в результате применения удобрений в агроэкосистемах, функционирующих в районах геохимических аномалий, могут служить опыты Р.И. Первуниной [55] с внесением малорастворимого оксида кадмия в почвы вегетационных опытов. Внесение разных доз (от 1 до 100 мг/кг) оксида кадмия в дерново-подзолистую почву на фоне применения полного минерального удобрения значительно усиливало поглощение элемента растениями ячменя (рис. 2). Природные геохимические аномалии, связанные с рудной минерализацией и имеющие распространение в предгорных и горных районах, характеризуются высоким валовым содержанием различных микроэлементов (определенных ассоциаций) в почвах, часто

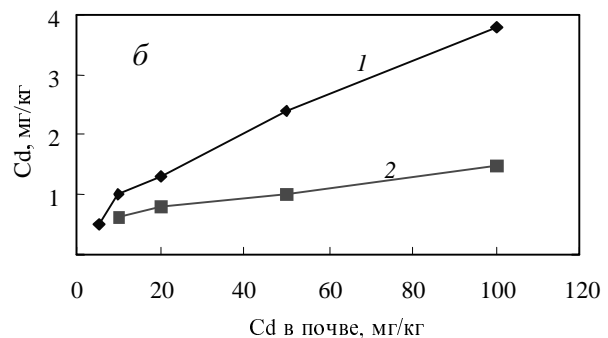
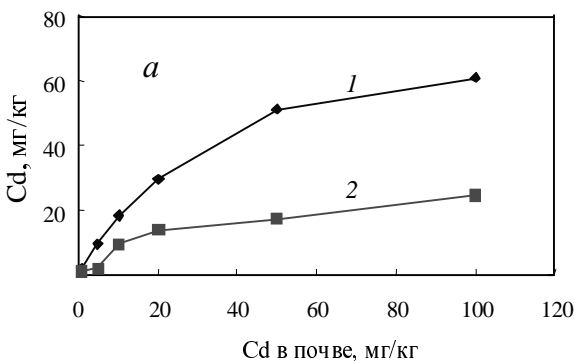


Рис. 2. Накопления кадмия вегетативной массой (а) и зерном (б) ячменя в зависимости от содержания в почве (по данным [55]): 1 — с применением NPK; 2 — без NPK

сочетающимся с низким уровнем их подвижности и связанным с ним невысоким накоплением растениями. Интенсификация выветривания в этих условиях может приводить к усилению аккумуляции растениями микроэлементов, в том числе наиболее опасных загрязнителей.

### Заключение

Роль минеральных удобрений и других агрохимических средств в циклах микроэлементов в агроэкосистемах двояка. С одной стороны они являются одним из источников микроэлементов. И с этих позиций с минеральными удобрениями вносятся в основном стронций и фтор, с органическими — медь, мышьяк, цинк и никель. Другая сторона воздействия удобрений — интенсификация процессов выветривания. По воздействию на внутрипочвенное выветривание виды удобрений можно расположить в следующем порядке: азотные (аммиачная селитра) >> фосфорные (двойной суперфосфат) > калийные (хлористый калий). Интенсификация выветривания под влиянием внесения удобрений в зонах распространения обогащенных микроэлементами почвообразующих пород (геохимические аномалии) может приводить к возрастанию концентрации элементов в растениях, в том числе и гигиенически нормируемых.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989, 439 с.
2. Вернадский В.И. Изв. АН СССР. ОМОН. Сер. геол., 1938, т. 18, № 1, с. 19—34.
3. Вернадский В.И. Очерки геохимии. М.: изд. АН СССР, 1932, 465 с.
4. Вернадский В.И. Избранные сочинения. М.: изд. АН СССР, 1954—1960.
5. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998, 413 с.
6. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004, 647 с.
7. Ковда В.А. Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. М.: Наука, 1981, 182 с.
8. Паников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай. М.: Агропромиздат, 1987, 512 с.
9. Каптанов Н.Н. Научные основы современных систем земледелия. М.: Агропромиздат, 1988, с. 3—28.
10. Минеев В.Г. Агрохимия. М.: изд. МГУ, 1990, 485 с.
11. Тяжелые металлы в системе почва—растение—удобрение. Под ред. М.М. Овчаренко. М.: Минсельхоз, ЦИНАО, 1997, 289 с.
12. Mukherjee A. In: Metals in the Environment. N.Y., 2001, p. 433—471.
13. Bowen H.J. Environmental Chemistry of the Elements. New York: Academic Press, 1979, 333 p.
14. Trudinger P.A., Swaine D.J. Biogeochemical Cycling of Mineral Forming Elements. Amsterdam: Elsevier, 1979, 612 p.
15. Haneklaus S., Fleckenstein J., Schnug E. Soil Quality, Sustainable Agriculture and Environmental Security in Central and Eastern Europe. Eds. M.J. Wilson, B. Maliszewska-Kordybach. NATO 1997, Sci. Series. 2. Environmental Security, v. 69, p. 101—113.
16. Kabata-Pendias A., Pendias H. Biogeochemia pierwiastkow sladowych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999, 398 s.
17. Contaminants and the Soil Environment in the Australasia—Pacific Region. Ed. R. Naidu. Dordrecht—Boston—London: Kluweracademic Publishers, 1996, p. 323—359.
18. Гаполюк Э.И., Кремленкова Н.П., Аксаментов Я.Б. Тр. ИЭМ, 1983, вып. 11 (97), М.: Гидрометеиздат, с. 3—11.
19. Карпова Е.А., Потатуева Ю.А. Химизация сельского хозяйства, 1990, № 2, с. 44—47.
20. Карпова Е.А., Потатуева Ю.А. Там же, 1991, № 4, с. 30—33.
21. Потатуева Ю.А., Касицкий Ю.И., Хлыстовский А.Д. и др. Агрохимия, 1994, № 11, с. 98—113.
22. Крамарев С.М., Скрипник Л.Н., Коваленко В.Е. и др. Там же, 2000, № 2, с. 67—72.
23. William C. Commun. Soil Science and Plant Analysis, 1976, v. 7, № 2, p. 169—174.
24. Гомонова Н.Ф. Мат. конф. «Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах». М., 1994, с. 180—186.
25. Потатуева Ю.А., Касицкий Ю.И., Сидоренкова Н.К. и др. Агрохимия, 2001, № 4, с. 61—66.
26. Карпова Е.А. Сб. тез. между научн. конф. «Современные проблемы загрязнения почв. М.: МГУ, РФФИ, 2004, с. 216—217.
27. Крейдман Ж.Е. Химизация сельского хозяйства, 1988, № 10, с. 39—40.
28. Минеев В.Г., Грачева Н.К., Кирпичников Н.А., Черная В.И. Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Л.: Гидрометеиздат, 1989, с. 326—329.
29. Шелепова О.В., Потатуева Ю.А. Агрохимия, 2003, № 9, с. 78.
30. Черная В.И. Бюл. ВНИИ удобр. и агропочвовед., 1988, т. 92, с. 76—80.
31. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Агрохимия, 2001, № 2, с. 74—78.
32. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Там же, 2002, № 2, с. 66—76.
33. Adriano D.C. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. New York: Springer, 2001, 867 p.
34. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф. Докл. ВАСХНИЛ, 1990, № 6, т. 400, с. 19—23.
35. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф. Почвоведение, 2001, № 9, с. 1103—1110.
36. Романова Т.А., Тихонов С.А. Успехи почвоведения. Советские почвоведы к XIII Международному конгрессу почвоведов. М.: Наука, 1986, с. 207—212.
37. Касицкий Ю.И., Игнатов В.Г., Потатуева Ю.А., Сидоренкова Н.К. Плодородие, 2004, № 2, т. 17, с. 23—25.
38. Ивашов П.В. Тр. биогеохимической лаборатории. Т. 24. М.: Наука, 2003, с. 23—36.
39. Чижикова Н.П., Прищеп Н.И. Докл. РАСХН, 1996, № 3, с. 20—21.
40. Чижикова Н.П. Почвоведение, 2002, № 7, с. 867—875.
41. Чижикова Н.П. Мат. IV Всерос. конф. «Проблемы эволюции почв». Пушкино, 2003, с. 216—221.
42. Ивашов П.В. Биогеохимия внутрипочвенного выветривания. М.: Наука, 1993, 379 с.
43. Finck A. Fertilizers and fertilization: Introduction and practical guide to crop fertilization. Weinheim, 1982, 424 p.
44. Jansson G. Cadmium from Plough to Plate. Report FOOD 21 5/2002. Sweden, 2002, p. 13—15.
45. Андрианов П.И. Научн.-агрон. ж., 1926, № 1, с. 30—9.
46. Romheld V., Marschner H.A. Trans. XIII Congr. Inter. Soc. Soil Sci. Hamburg, 13—20 Aug. 1986, v. 3, p. 937—938.
47. Фокин А.Д., Карпунин А.И., Раджабова П.А. Изв. ТСХА, 1996, вып. 3, с. 97—104.
48. Fischer K. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, v. 137, p. 267—286.
49. Barcelo J., Poschenrieder C., Tolza R.P. Biogeochemistry of Trace Elements 7-th ICOVTE. Uppsala, Sweden, 2003, Symp. 02, p. 162—163.
50. Ковалишина Д.И., Платонов Г.В. Тез. докл. VI съезда Всес. об-ва почвоведов. Кн. 3. Тбилиси, 1981, с. 19—20.
51. Turpault M.-R., Calvaruso C., Leclerc-Cessac E. e. a. Abstracts Eurosoil 2004. Freiburg, Germany, p. 330—331.
52. Зверева Т.С., Непримерова С.В. Тез. докл. III съезда документального об-ва почвоведов (11—15 июля 2000 г., Суздаль). Кн. 2. М., 2000, с. 337—338.
53. Seguin V., Courchesne F., Gagnon C. e. a. Biogeochemistry of Trace Elements 7-th ICOVTE. Uppsala, Sweden, 2003, Symp. 02, p. 124—125.
54. Карпова Е.А. Почвоведение (в печати).
55. Первунина Р.И. Тр. ИЭМ, 1983, вып. 11(97), с. 62—68.