

Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского
Серия «Биология, химия». Том 19 (58). 2006. № 2. С. 57-65.

УДК 550.424+591.531.1

**НАКОПЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ Cd, Zn, Cu, Al В ЛИСТЬЯХ ДУБА,
ЛИЧИНКАХ И ЭКСКРЕМЕНТАХ ЗЕЛЕНОЙ ДУБОВОЙ ЛИСТОВЕРТКИ И
НЕПАРНОГО ШЕЛКОПРЯДА**

Савушкина И.Г.

Еще в 30-х годах XX в. была доказана теснейшая взаимосвязь между содержанием металлов в окружающей среде и теле насекомых. Неоднократно отмечалось, что насекомые играют исключительно важную роль в круговороте химических элементов [1]. В частности насекомые-фитофаги ускоряют процесс возвращения микроэлементов в почву, прежде всего в виде экскрементов, а также огрызков и трупов. Кроме того, насекомые аккумулируют в своем теле те или иные химические элементы и тем самым участвуют в их перераспределении в природе, особенно в периоды вспышек массового размножения [2]. Однако, несмотря на многообразие видов насекомых, существующих в природе, и их важную роль в природных экосистемах можно отметить, что микроэлементарный состав представителей этого класса изучен недостаточно. Большинство работ, связанных с изучением характера накопления и перераспределения микроэлементов, посвящено системе почва – растение [3, 4]. Работы, в которых приводятся данные по содержанию микроэлементов в теле насекомых немногочисленны [5]. Еще в меньшей степени изучалось их перераспределение в цепи кормовое растение – насекомое-фитофаг [6, 7].

Опасными загрязнителями среды являются тяжелые металлы. Эта опасность обусловлена тем, что они не разлагаются в окружающей среде, аккумулируются в тканях живых организмов и весьма токсичны для них. В связи с этим в последнее время эта проблема все больше привлекает внимание исследователей.

В связи с малой изученностью участия насекомых-фитофагов в миграции и аккумуляции микроэлементов, и в частности тяжелых металлов, основной целью настоящего исследования явилось изучение содержания тяжелых металлов (Cd, Zn, Cu), а также алюминия в листьях дуба, насекомых-филлофагах (*Lepidoptera*) и их экскрементах. В качестве представителей насекомых были выбраны узкий олигофаг – зеленая дубовая листовертка (*Tortrix viridana* L.) и полифаг – непарный шелкопряд (*Lymantria dispar* L.). Эти виды являются наиболее опасными вредителями дубовых лесов. Поэтому весьма интересным представляется сравнение особенностей аккумуляции микроэлементов у представителей указанных трофических групп насекомых.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал собирали в мае 2003 г. на постоянной пробной площади "Лавровое", расположенной в 2 км к северо-западу от села Лавровое Алуштинского района (Южный макросклон Крымских гор). Из природных популяций брали гусениц непарного шелкопряда и зеленой дубовой листовертки находящихся на третьем-пятом возрастах, то есть в период наиболее интенсивного поглощения фитомассы. Отобранных гусениц в лаборатории помещали в стеклянные сосуды, закрытые марлей, и выкармливали листьями дуба пушистого. В связи с тем, что в предварительных исследованиях были установлены различия в содержании тяжелых металлов в листьях отдельных модельных деревьев [8], для кормления гусениц использовали листья, отобранные с тех же деревьев, что и гусеницы. Листья собирали однократно и хранили в полиэтиленовых пакетах в холодильнике при 4°C. Проводили два варианта кормления личинок: первый необработанными листьями дуба (контроль) и второй – предварительно обработанными раствором металлов листьями (опыт). Раствор для обработки листьев готовили из растворов государственных стандартных образцов (ГСО) чистых металлов. Концентрация металлов в растворе при экспериментальной обработке составляла: Cd – 0,05 мг/л, Zn – 10 мг/л, Cu – 10 мг/л, Al – 5 мг/л, что примерно в 3-5 раз выше их естественного содержания в листьях. Листья полностью погружали в приготовленный раствор, просушивали и затем использовали в качестве корма для личинок. Добавление кормовых листьев и удаление экскрементов проводили через день на протяжении 14 дней. Затем воздушно-сухие образцы листьев, гусениц и их экскрементов измельчали и подвергали озолению. Минерализацию листьев проводили методом сухого озоления, а гусениц и экскрементов – методом мокрого озоления. В полученных растворах металлы определяли атомно-абсорбционным методом в пламени ацетилен-воздух [9]. Анализ выполняли в трехкратной повторности. Содержание элементов пересчитывали в мг/кг массы воздушно-сухого вещества.

Для характеристики степени аккумуляции микроэлементов, поглощенных насекомыми из растительной пищи рассчитывали коэффициент биологического поглощения (КБП) [10,11] по формуле

$$КБП = C_n / C_p,$$

где C_n – концентрация химического элемента в насекомых, C_p – концентрация его в корме.

По данным А.И. Перельмана, КБП элементов изменяется от 0,001 до 100. В зависимости от его значения различают следующие группы элементов: энергично накапляемые – КБП = 10 ÷ 100; сильно накапляемые – КБП = 1 ÷ 10; средне накапляемые или среднего захвата – КБП = 0,1 ÷ 1,0; слабого захвата – КБП = 0,001 ÷ 0,1.

Расчет КБП проводили с учетом воздушно-сухого веса насекомых и растений, что привело к некоторому его снижению по сравнению с его величиной при расчете на его содержание в золе. Это связано с неодинаковой зольностью растений и насекомых. Тем не менее, при пересчете на воздушно-сухой вес характерные особенности в интенсивности поглощения тех или иных микроэлементов проступают также отчетливо, как и при расчете КБП на золу насекомых и растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На самом первом этапе исследований, когда кормовую листву обработали раствором с повышенной концентрацией металлов было установлено увеличение их содержания в корме в среднем в 1,5 – 2,5 раза. В целом же интервал значений полученных концентраций в листьях для всех определяемых металлов оказался близким к естественному, известному для рода *Quercus* из литературных данных [10, 12, 13].

При приготовлении кормовых листьев для кормления зеленой дубовой листовертки после обработки раствором концентрация кадмия в них увеличилась в 2,3 раза (0,035 мг/кг до обработки и 0,080 мг/кг после обработки). После обработки второй порции листьев – для кормления личинок непарного шелкопряда – его концентрация увеличилась в 2,5 раза (0,017 мг/кг против 0,043 мг/кг). Небольшое различие в увеличении концентрации в двух обработанных порциях корма, вероятно, вызвана индивидуальными различиями деревьев по таким показателям как размер листьев и их опущенность, что, возможно, повлияло на смачиваемость их раствором и таким образом на количество попавшего на них металла. После выкармливания гусениц зеленой дубовой листовертки и гусениц непарного шелкопряда листвой с нанесенным раствором кадмия произошло пропорциональное увеличение содержания элемента как в теле гусениц так и их экскрементах (рис.1). Так концентрация кадмия в теле гусениц зеленой дубовой листовертки выкармленных обработанной листвой возросла в 2,5 раза по сравнению с чистой листвой. При этом и в опыте и в контроле коэффициент биологического поглощения для зеленой дубовой листовертки составил 2,5.

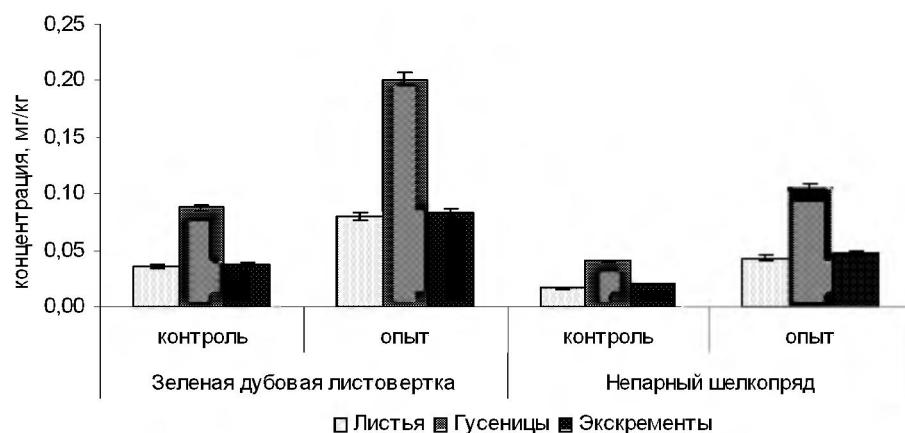


Рис.1. Изменение содержания кадмия в кормовых листьях дуба, теле гусениц зеленой дубовой листовертки и непарного шелкопряда и их экскрементах.

Аналогичная картина отмечена и для гусениц непарного шелкопряда. Коэффициент биологического поглощения при этом составил 2.4. Эти данные свидетельствуют о низкой барьерной способности перитрофической мембраны кишечника гусениц у этих

двух видов по отношению к кадмию. Согласно градации Перельмана кадмий у этих двух видов следует отнести к сильно накапляемым элементам.

Таким образом, увеличение концентрации данного элемента в корме приводит к пропорциональному увеличению его содержания в теле обоих видов насекомых, что подтверждается одинаковыми значениями КБП в опыте и в контроле.

Процесс возвращения микроэлементов в среду представляет не меньший интерес, чем закономерности его аккумулирования организмом насекомого. Основное масса элемента возвращается в почву, прежде всего, в виде экскрементов. Полученные данные указывают, что в экскрементах и зеленой дубовой листовертки и непарного шелкопряда содержание кадмия максимально приближено к его содержанию в корме. Причем эта закономерность наблюдается и в опыте и в контроле. Разница в содержании микроэлемента в листве и экскрементах насекомых достоверна только в контроле для гусениц дубовой листовертки, в остальных вариантах эксперимента достоверной разницы не выявлено.

Кадмий – особо токсичный элемент и занимает по токсичности второе место после ртути. Токсичное действие этого металла проявляется уже при очень низких концентрациях. Его избыток ингибирует синтез ДНК и белков, влияет на активность ферментов, нарушает у растений транспирацию и процесс фотосинтеза. Кроме того, в метаболизме растений он является антагонистом ряда элементов питания (Zn, Cu, Mn, Ni, Se, Ca, Mg, P). Многими исследователями отмечена способность кадмия сравнительно легко поступать из почвы в надземную часть растений и проникать в органы запасания ассимилятов [3]. В целом же по фитотоксичности и способности накапливаться в растениях в ряду тяжелых металлов он занимает первое место [14].

Однако, несмотря на высокую токсичность и повышенный интерес к этому элементу со стороны исследователей в растениеводстве, животноводстве и медицине, сведений о содержании кадмия в животных и растительных организмах очень немного. Только в последние десятилетия появились достоверные данные. Скорее всего, это связано с тем, что, как правило, содержание кадмия имеет очень низкие концентрации и для их определения необходимы современные методики и чувствительное оборудование. Также в настоящее время не известны конкретные биохимические процессы, которые проходили бы с участием данного элемента, и физиологическая роль кадмия, таким образом, изучена исключительно слабо.

Возможно, в связи с тем, что кадмий присутствует в кормовой листве в очень низких концентрациях (не превышающих 0,2 мг/кг), насекомые не нуждаются в действенных барьерных механизмах. По всей видимости, полученные в опыте концентрации не являются токсическими и не оказывают влияния на биохимические процессы в их организмах.

Из литературных данных известно, что насекомые способны накапливать кадмий в количествах значительно превышающих его содержание в кормовых растениях. Аккумуляционные процессы обнаружены у почвенных насекомых, у которых среднее содержание кадмия в организме оказалось в 3 раза выше, чем в почве [15]. Еще более показательны таковые данные для другой группы животных – моллюсков. Так, в тканях

земляных улиток было обнаружено превышение содержания кадмия в 30-50 раз по сравнению с его содержанием в листьях растений и почве [7]. Что касается выведения элемента из организма насекомых, то как и в нашем случае в литературе отмечается, что содержание металлов в экскрементах насекомых отражает их содержание в корме. Такая закономерность была отмечена для кадмия, свинца и цинка у личинок жуков, питающихся древесиной сосны [6].

Из всех исследованных тяжелых металлов цинк в организме насекомых присутствует в наиболее высоких концентрациях. Сопоставление содержания этого металла в личинках и их кормовых растениях указывает на его сильную аккумуляцию (рис. 2).

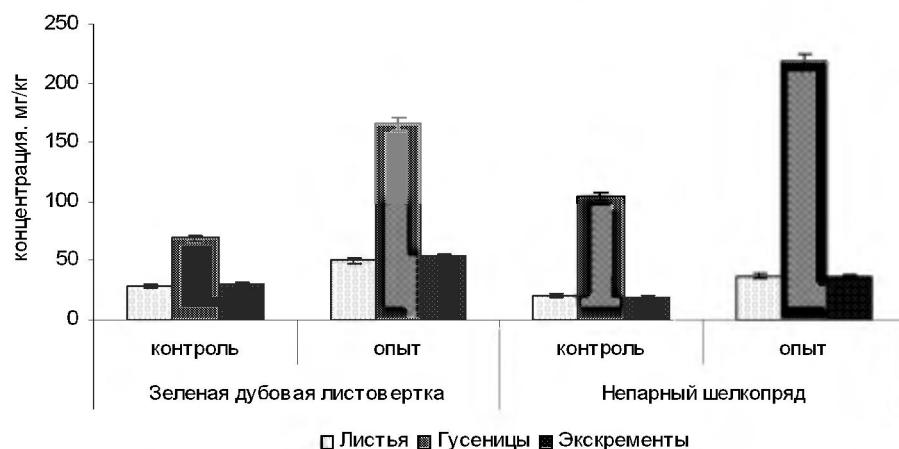


Рис. 2. Изменение содержания цинка в кормовых листьях дуба, теле гусениц зеленой дубовой листовертки и непарного шелкопряда и их экскрементах

Особенно активно этот процесс протекает у личинок непарного шелкопряда (коэффициент биологического поглощения в контроле – 5, в опыте – 5.8). Очевидно, для обеспечения нормальной жизнедеятельности насекомые вынуждены аккумулировать цинк. Этот факт еще раз указывает на исключительно важную роль его в обмене веществ насекомых. Так известно, что этот металл входит в состав ферментов типа угольной антидразы или гормонов типа инсулина. Также отмечается, что наибольшие концентрации этого элемента у насекомых наблюдаются в период интенсивного роста и полового созревания [16].

В литературе отмечено, что цинк имеет слабую фитотоксичность. Она проявляется только в том случае, когда содержание этого элемента в тканях растений превышает 300-500 мг/кг сухого вещества [17]. Таким образом, полученные в опыте концентрации металла не достигают критического уровня содержания цинка в растении и, по всей видимости, не являются токсичными для насекомых.

Что касается вывода этого металла с экскрементами, то здесь получены закономерности, отмеченные ранее для кадмия. То есть наблюдается максимальное приближение содержание цинка в экскрементах к его содержанию в корме и в опыте и в контроле для обоих видов.

Несколько другие закономерности имеет характер накопления данными насекомыми меди (рис. 3).

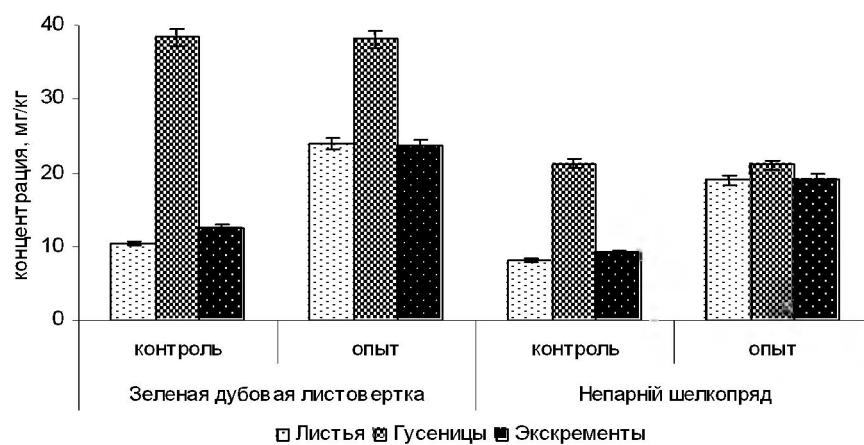


Рис. 3. Изменение содержания меди в кормовых листьях дуба, теле гусениц зеленой дубовой листовертки и непарного шелкопряда и их экскрементах.

На рис. 3 хорошо видно, что концентрация меди в личинках насекомых не зависит от ее содержания в пище. И в опыте и в контроле получены практически одинаковые значения концентрации этого элемента. При этом КБП для зеленой дубовой листовертки составил в контроле 3.7, а в опыте 1.6. Для непарного шелкопряда этот показатель составил соответственно 2.6 и 1.1.

Изучение концентрации меди в организме насекомых в различных биогеохимических условиях ранее проводилось Томшиным А.Т. [10]. В его исследованиях отмечено, что независимо от содержания этого элемента в окружающей среде ее уровень у одних и тех же видов остается приблизительно постоянным. Хорошо известно, что в крови многих беспозвоночных медь является простетической группой основного дыхательного пигмента – гемоцианина [18]. Таким образом, медь как компонент гемолимфы, относится к элементам, концентрация которых поддерживается гомеостатическими механизмами насекомых на постоянном уровне.

Из числа исследуемых микроэлементов алюминий присутствует в личинках обоих видов в самых высоких концентрациях – порядка 200 – 300 мг/кг воздушно-сухого вещества (рис. 4).

Наибольшее его содержание – 252,8 мг/кг обнаружено в организме личинок зеленой дубовой листовертки выкормленных на обработанной листве. В целом для алюминия

НАКОПЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ Cd, ZN, CU, AL В ЛИСТЬЯХ ДУБА,

характерен более низкий КБП. Так для зеленой дубовой листовертки он составил в контроле – 1,6 и в опыте – 1,3; для непарного шелкопряда соответственно 1,5 и 1,3. Вместе с этим, обнаруживается сравнительно большая концентрация алюминия в экскрементах, примерно соответствующая его содержанию в гусеницах, а не в листве, как это наблюдалось в случае Cd, Zn и Cu. Так у листовертки содержание алюминия в экскрементах в контроле на 34% выше, чем в листве, в контроле это значение составило 20%. Однако при этом отмечена достоверность разницы содержания алюминия в теле насекомых и их экскрементах для обоих видов как в опыте так и в контроле. Возможно, что в связи с довольно высокой концентрацией алюминия в листве (порядка 100-200 мг/кг), а также его токсичностью для организмов, у гусениц срабатывают механизмы, препятствующие накоплению его в теле и способствующие его выведению с экскрементами.

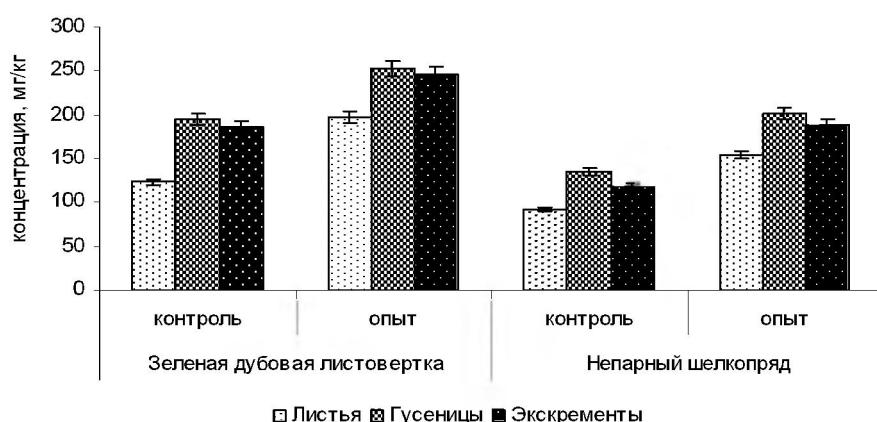


Рис. 4. Изменение содержания алюминия в кормовых листьях дуба, теле гусениц зеленой дубовой листовертки и непарного шелкопряда и их экскрементах.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о происходящей аккумуляции металлов в теле насекомых. Тем самым подтверждаются имеющиеся многочисленные литературные данные от том, что внесение тяжелых металлов в окружающую среду приводит к значительному концентрированию их в организме животных. В нашем случае в личинках как зеленой дубовой листовертки так и непарного шелкопряда наиболее активно аккумулируется цинк: в обоих вариантах эксперимента его содержание в теле насекомого в 2,5-6 раз выше чем в листве. Следующим по степени аккумуляции является кадмий. Для него отмечено увеличение концентрации в гусеницах по сравнению с кормом в 2,5 раза. В значительно меньшей степени насекомыми аккумулируется алюминий. Что касается меди, то независимо от уровня ее содержания в корме, насекомые поддерживают концентрацию этого элемента в своем теле на постоянном уровне. В экскрементах же содержание цинка, меди и кадмия и в опыте и в контроле близкое к их содержанию в листве. Только для алюминия отмечено значительное

увеличение содержания в экскрементах по сравнению с кормом на 18-34%. Таким образом оба вида насекомых независимо от их уровня трофической специализации избавляются от избыточного содержания этого элемента в своем теле.

ВЫВОДЫ

1. Личинки зеленой дубовой листовертки и непарного шелкопряда при питании листьями дуба пушистого концентрируют кадмий, цинк, медь и алюминий. При этом наиболее активно в теле насекомых аккумулируется цинк, наименее – алюминий.
2. Содержание кадмия, цинка и алюминия в теле обоих видов насекомых возрастает пропорционально их содержанию в кормовой листве. Содержание меди в личинках насекомых не зависит от содержания данного элемента в корме.
3. В экскрементах насекомых только для алюминия отмечена концентрация, превышающая содержание этого элемента в листве. Содержание остальных элементов в экскрементах соответствует содержанию их в корме.

Список литературы

1. Рафес П.М. Массовые размножения вредных насекомых, как особые случаи круговорота вещества и энергии в лесном биогеоценозе // Сб. Защита леса от вредных насекомых. Лаб. Лесоведения АН СССР. – М.: Наука, 1964. – С. 3-57.
2. Злотин Р.П. Массовые размножения зеленой дубовой листовертки как стимуляторы биологического круговорота в лесостепных дубравах // Сб. Структура и функционально-биогеоценотическая роль животного населения сушки. – М., 1967. – С. 76-79.
3. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.
4. Козьякова Н.О. Екотоксичний вплив важких металів (Cd, Pb, Cu, Zn) на систему “грунт – рослина” в умовах Полісся та Лісостепу України // Автореф. дис... канд. с.-г. наук: 03 00.16 УААН. Ін-т агроекол. і біотехнології. – К., 2002. – 17 с.
5. Бутовский Р.О. Тяжелые металлы и энтомофауна // Агрочимия. – 1984. – № 5. – С. 142-150.
6. Esenin A.V., Ma W.C. Heavy metal (Cd, Cu, Zn) in wood and wood-feeding insects and other invertebrates associated with decaying pine trees // Bull. Environ. Contam. and Toxicol. – 2000. – Vol. 64, № 2. – P. 242-249.
7. Swaileh K. M., Rabay'a N., Salim R., Ezzughayyar A., Rabbo A. Concentration of heavy metals in roadside soils, plants, and landsnails from the West Bank, Palestine // Abed. J. Environ. Sci. and Health. A. – 2001. – Vol. 36, № 5. – P. 765-778.
8. Пелецкая И.Г., Бойко Г.Е. Содержание тяжелых металлов на различных фенологических этапах развития листьев дуба пушистого // Экосистемы Крыма их оптимизация и охрана. – Симферополь. 2002. – Вып. 12. – С. 94-98.
9. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – М., 1989. – 64 с.
10. Томшин А.Т. Содержание микроэлементов у насекомых отряда чешуекрылых (Lepidoptera), обитающих в различных экологических условиях. – Дисс.... канд. биол. наук. – Красноярск, 1973. – 153 с.
11. Переельман А.П. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1975. – 341 с.
12. Murko D., Alibalić Š., Purič V. Istraživanje dinamike sadržaja mikroelemenata u lišču i četinama nekih vrsta drveća tokom vegetacijskog perioda // Agrohemija. – 1983. – № 3-4. – P. 135-139.
13. Цветкова Н.Н. Особенности миграции органо-минеральных веществ и микроэлементов в лесных биогеоценозах степной Украины. – Днепропетровск: ДГУ, 1992. – 238 с.
14. Овчаренко М.М., Бабкин В.В., Кирпичников Н.А. Факторы почвенного плодородия и загрязнение продукции тяжелыми металлами // Химия в сельском хозяйстве. – 1998. – № 3. – С. 31-34.

НАКОПЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ СD, ZN, CU, AL В ЛИСТЬЯХ ДУБА,

15. Смирнов Ю.Б. Почвенная мезофауна естественных и искусственных биогеоценозов находящихся под влиянием угледобывающей промышленности // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. -- 2001. – Вип. 9. т. 2. – С. 67-71.
16. Коломийцева М.Г., Габович Р.Д. Микроэлементы в медицине. – М.: Медицина. – 1970. – 170 с.
17. Агрочімічний аналіз: Підручник / М.М. Городній, А.П. Лісовал, А.В. Бикін та ін. / За ред. М.М. Городнього. – К.: Арістей, 2005. – 468 с.
18. Войнар В.О. Биологическая роль микроэлементов в организме животных человека. – М.: Высшая школа, 1960. – 86 с.

Поступила в редакцию 11.06.2006 г.