

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА - СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСТЕНИЯ» НА ПРИМЕРЕ КОЭФФИЦИЕНТА НАКОПЛЕНИЯ CU, ZN, PB, CD В ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУРАХ (ЗЕРНО ПШЕНИЦЫ И ЯЧМЕНЯ)

Переволоцкая Т.В.¹, Анисимов В.С.² Email: Perevolotskaya1792@scientifictext.ru

¹Переволоцкая Татьяна Витальевна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория математического моделирования;

²Анисимов Вячеслав Сергеевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, лаборатория радиохимии и аналитической химии,

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, г. Обнинск

Аннотация: анализ миграции тяжёлых металлов (ТМ) в системе «почва - сельскохозяйственные растения» проводился на основе накопленных литературных данных, представленных коэффициентами накопления Cu, Zn, Pb, Cd в зерновых культурах (зерно пшеницы и ячменя) с применением методов статистического анализа. Выявлено, что распределения коэффициентов накопления Cu, Pb, Zn, Cd в зерновых культурах (зерно пшеницы и ячменя) в большинстве своем подчиняются закону нормального распределения. Установлено, что одним из факторов, оказывающих на процессы накопления микроэлементов в зерне пшеницы и ячменя существенное влияние, является тип почвы.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, коэффициент накопления, зерно, ячмень, пшеница, концентрация, сельскохозяйственные растения.

REGULARITIES OF MIGRATORY PROCESSES OF HEAVY METALS IN THE SYSTEM "SOIL - AGRICULTURAL PLANT" ON THE EXAMPLE OF THE COEFFICIENT OF ACCUMULATION OF CU, ZN, PB, CD IN GRAIN CROPS (GRAIN OF WHEAT AND BARLEY)

Perevolotskaya T.V.¹, Anisimov V.S.²

¹Perevolotskaya Tatiana Vitalyevna – PhD in Biology, Associate professor, senior researcher, LABORATORY OF THE MATHEMATIC MODELING;

²Anisimov Vyacheslav Sergeevich – PhD in Biology, head of the laboratory, LABORATORY OF ANALYTICAL CHEMISTRY AND RADIOCHEMISTRY, RUSSIAN INSTITUTE OF RADIOLOGY AND AGROECOLOGY, OBNINSK

Abstract: analysis of migration of heavy metals in system "soil - agricultural plant" was held on the basis of the accumulated data in the literature provided by the coefficient of accumulation of Cu, Zn, Pb, Cd in grain crops (grains of wheat and barley) with the use of statistical analysis techniques It was discovered that the distributions of accumulation factors for Cu, Pb, Zn, Cd in cereals (wheat and barley) are mostly subject to the law of normal distribution. It is established that one of the factors influencing the processes of accumulation of trace elements in wheat and barley grain is significantly influenced by the soil type.

Keywords: heavy metals, grain, barley, wheat, accumulation coefficient, concentration, agricultural plant.

УДК 581.5:633:11:546.47/49

Введение

Важнейшим звеном биохимического круговорота веществ являются растения, обладающие способностью поглощать из окружающей среды в больших или меньших количествах практически все известные химические элементы [1 - 3]. По этой причине изучение закономерностей поведения ТМ в компонентах почва – растение природных, полуприродных и, особенно, антропогенных экосистем особенно актуально, поскольку позволяет разработать методологические подходы для решения проблем контроля содержания химических элементов в растительной продукции, зависимости этого содержания от биохимических условий среды в системе «почва – растение – животное - человек» и его регулирования. Разные виды растений, в соответствии с уровнем техногенной нагрузки и физиологическими особенностями, накапливают в своей надземной части и корневой системе различные количества ТМ [4-6]. Согласно результатам исследований фоновое содержание тяжелых металлов в биомассе даже одной культуры варьирует в зависимости от условий произрастания и фазы развития, особенно это характерно для зерновых культур, в меньшей мере свойственно травам [7, 8]. Данное обстоятельство косвенно указывает на другие факторы, оказывающие влияние в накоплении ТМ сельскохозяйственными растениями. Таким образом, целью выполнения настоящей работы являлось выявление закономерностей миграционных процессов тяжелых металлов в системе «почва - сельскохозяйственные растения» на

примере накопленных литературных данных [8], представленных коэффициентами накопления (КН) Cu, Zn, Pb, Cd в зерновых культурах (зерне пшеницы и ячменя), произрастающих в условиях умеренной климатической зоны, с применением методов статистического анализа.

Материалы и методы

Применение системного подхода при исследовании миграции ТМ Cu, Pb, Zn, Cd в системе «почва - сельскохозяйственные растения» методами статистического анализа позволило на основе систематизации накопленных литературных данных и их количественного описания посредством основных статистических показателей, а также сопоставления значимости и характеру влияния факторов выявить закономерности накопления микроэлементов зерновыми культурами (зерно пшеницы и ячменя). В качестве главного контролируемого показателя миграции использовались коэффициенты накопления (КН) ТМ зерновыми культурами (зерно пшеницы и ячменя) [8], представляющие собой отношение массовой доли металла в растении (зерне) к массовой доле его в почве: $KH = C_{TM,раст.} / C_{TM,почва}$. В качестве независимого показателя использовались массовые доли валового или общего содержания ТМ (Cu, Pb, Zn, Cd) в почвах.

Результаты и обсуждения

На предварительном этапе выполнена проверка на нормальность распределения КН (мг/кг зерна)/(мг/кг почвы) Cu, Pb, Zn, Cd по пшенице (зерно), произрастающей на дерново-подзолистой (ДПЗ) почве и черноземе выщелоченном (ЧВ).

Согласно результатам проверки распределение КН Zn, Cu и Pb по пшенице (зерно) можно охарактеризовать как близкое к нормальному ($p > 0,05$ по критерию Шапиро-Уилка) (табл. 1).

Таблица 1. Результаты описательной статистики

| Тип почвы | Среднее | Медиана | Стд. откл. | Нижняя квартиль | Верхняя квартиль | As | Ex |
|--|---------|---------|------------|-----------------|------------------|---------|---------|
| коэффициент накопления Zn | | | | | | | |
| для распределения КН Zn (ДПЗ) критерий Шапиро-Уилка W=,8897, p=,1686 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,6760 | 0,6400 | 0,2236 | 0,5257 | 0,9429 | 0,3992 | -1,3481 |
| для распределения КН Zn (ЧВ) критерий Шапиро-Уилка W=,9427, p=,5359 | | | | | | | |
| ЧВ | 0,4354 | 0,3776 | 0,1855 | 0,28151 | 0,60442 | 0,7716 | 0,0406 |
| коэффициент накопления Cu | | | | | | | |
| для распределения КН Cu (ДПЗ) Шапиро-Уилка W=,9065, p=,2582 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,3141 | 0,3141 | 0,0138 | 0,3076 | 0,3205 | 0 | -1,0321 |
| для распределения КН Cu (ЧВ) Шапиро-Уилка W=,9807, p=,9864 | | | | | | | |
| ЧВ | 0,4546 | 0,4525 | 0,0212 | 0,4430 | 0,4715 | 0,1039 | -0,1943 |
| коэффициент накопления Cd | | | | | | | |
| для распределения КН Cd (ДПЗ) Шапиро-Уилка W=,8193, p=,0017 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,3214 | 0,2004 | 0,2465 | 0,1364 | 0,4686 | 1,2503 | 0,5888 |
| для распределения КН Cd (ЧВ) Шапиро-Уилка W=,6230, p<0,00001 | | | | | | | |
| ЧВ | 0,1806 | 0,0651 | 0,2934 | 0,0114 | 0,1466 | 2,1763 | 3,8377 |
| коэффициент накопления Pb | | | | | | | |
| для распределения КН Pb (ДПЗ) Шапиро-Уилка W=,9227, p=,4521 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,2167 | 0,2221 | 0,0286 | 0,1906 | 0,2415 | -0,2932 | -1,652 |
| для распределения КН Pb (ЧВ) Шапиро-Уилка W=,8956, p=,0406 | | | | | | | |
| ЧВ | 0,0173 | 0,0143 | 0,0099 | 0,0089 | 0,0250 | -0,0263 | -1,495 |

Наибольшее среднее значение (СО – стандартное отклонение) КН Zn по пшенице (зерно) наблюдается на дерново-подзолистой почве – 0,6760 (0,2236), несколько ниже на черноземе выщелоченном – 0,4354 (0,1855). Среднее значение (СО) КН Cu несколько ниже на дерново-подзолистой почве 0,3141 (0,0138), относительно чернозема выщелоченного – 0,4546 (0,0212). В целом, наименьшие средние значения наблюдаются по КН Pb по пшенице (зерно), при этом не только в разрезе исследованных типов почв, но и между всеми исследованными элементами (табл. 1).

Среднее значение (СО) КН Cd по пшенице (зерно) при ее выращивании на дерново-подзолистой почве составило 0,3114 (0,2465), на черноземе выщелоченном – 0,1806 (0,2934). Согласно определению,

95% выборки из нормально распределенных данных попадает в интервал, ограниченный примерно двумя СО выше и ниже среднего значения. В данном случае СО превышает половину среднего значения, что говорит о том, что значения КН Cd распределены не по нормальному закону (табл. 1). В данной ситуации, для характеристики распределения КН Cd по пшенице (зерно) рекомендуется применение медианы и интерквартильной ширины. Небольшой объем анализируемого распределения КН Cd (n=10) определил проведение оценки объема выборки, согласно результатам которой, минимально допустимый уровень мощности t-критерия (0,8) достигается на выборке, состоящей из 35 наблюдений (рис. 1).

По мере того, как увеличивается объем выборки, происходит увеличение мощности одностороннего t-критерия, и тем больше вероятность получения надежных оценок при статистическом описании элементов.

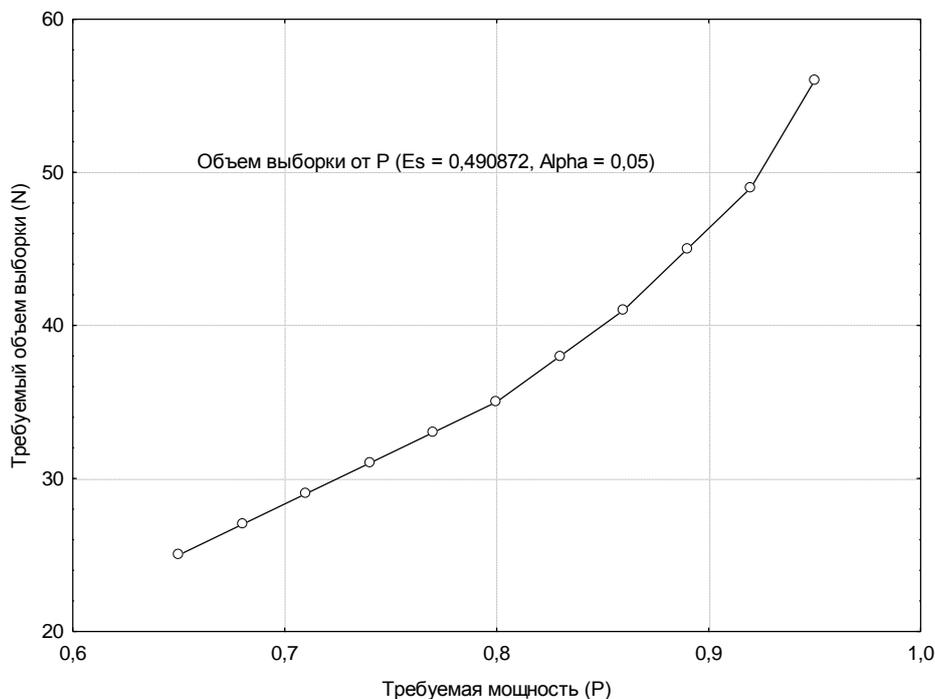


Рис. 1 Взаимосвязь мощности одностороннего критерия и объема выборки КН Cd по пшенице (зерно)

Результаты оценки степени влияния типа почвы на КН Cu, Pb, Zn, Cd по пшенице (зерно) с применением метода дисперсионного анализа представлены в табл. 2.

Установлено, что такой фактор как тип почвы оказывает существенное влияние на величину КН Zn, Cu, Pb по пшенице (зерно), произрастающей на исследованных типах почвы ($p < 0,001$). Несмотря на то, что большее варьирование КН Cd определено неучтенными факторами и ошибкой, влияние исследуемого фактора на величину КН Cd достоверно, F-критерий=5,863, $p < 0,001$ (табл. 2).

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа

| Источник дисперсии | Степени свободы | Сумма квадратов | Средний квадрат | Критерий Фишера | Уровень значимости | Сила влияния фактора, % |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| коэффициент накопления Zn | | | | | | |
| Тип почвы | 1,0 | 0,3132 | 0,3132 | 13,700 | <0,001 | 41 |
| Ошибка | 20,0 | 0,4572 | 0,0229 | | | |
| Всего | 21,0 | 0,7704 | | | | |
| коэффициент накопления Cu | | | | | | |
| Тип почвы | 1,0 | 0,1222 | 0,1222 | 321,850 | <0,001 | 94 |
| Ошибка | 22,0 | 0,0083 | 0,0003 | | | |
| Всего | 23,0 | 0,1305 | | | | |
| коэффициент накопления Cd | | | | | | |
| Тип почвы | 1 | 0,3298 | 0,3298 | 5,853 | <0,001 | 14 |
| Ошибка | 37 | 2,0845 | 0,0563 | | | |

| | | | | | | |
|---------------------------|----|--------|--------|-------|--------|----|
| Всего | 38 | 2,4143 | | | | |
| коэффициент накопления Pb | | | | | | |
| Тип почвы | 1 | 0,2237 | 0,2237 | 748,1 | <0,001 | 96 |
| Ошибка | 25 | 0,0075 | 0,0003 | | | |
| Всего | 26 | 0,2312 | | | | |

Результаты проверки на нормальность распределения КН (мг/кг сухого растения)/(мг/кг почвы-валовое или общее содержание ТМ в почве) Cu, Pb, Zn, Cd по ячменю (зерно), произрастающему на дерново-подзолистой (ДПЗ) почве и черноземе (Ч) представлены в табл. 3.

Согласно результатам проверки на нормальность распределения КН Zn, Cu, Cd и Pb по ячменю (зерно) на дерново-подзолистой почве, а также распределения КН Cu на черноземах близки к закону нормального распределения ($p > 0,05$ по критерию Шапиро-Уилка) (табл. 3). В целом, при выращивании ячменя на дерново-подзолистой почве, среди исследуемых элементов наибольшее среднее значение (СО) наблюдается по цинку 0,5537 (0,2884), наименьшее среднее значение (СО) отмечается по свинцу – 0,0216 (0,0020), промежуточное положение занимают средние значения КН Cu и КН Cd. Среднее значение (СО) КН Cu по ячменю (зерно) на черноземах составило 0,1978 (0,0512).

Таблица 3. Результаты описательной статистики

| Тип почвы | Среднее | Медиа на | Стд.откл. | Нижняя квартиль | Верхняя квартиль | As | Ех |
|--|---------|----------|-----------|-----------------|------------------|--------|--------|
| коэффициент накопления Zn | | | | | | | |
| для распределения КН Zn (ДПЗ) критерий Шапиро-Уилка W=,9409, p=,3941 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,5537 | 0,5615 | 0,2884 | 0,3249 | 0,7187 | 0,2884 | 0,2672 |
| для распределения КН Zn (Ч) критерий Шапиро-Уилка W=,6791, p=,0005 | | | | | | | |
| Ч | 0,3550 | 0,4540 | 0,1483 | 0,1630 | 0,4540 | 0,9778 | 1,2293 |
| коэффициент накопления Cu | | | | | | | |
| для распределения КН Cu (ДПЗ) критерий Шапиро-Уилка W=,8873, p=,1583 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,2717 | 0,2692 | 0,0189 | 0,2564 | 0,2948 | 0,0933 | 1,5067 |
| для распределения КН Cu (Ч) критерий Шапиро-Уилка W=,8496, p=,0739 | | | | | | | |
| Ч | 0,1978 | 0,2200 | 0,0512 | 0,1939 | 0,2300 | 1,0661 | 0,0773 |
| коэффициент накопления Cd | | | | | | | |
| для распределения КН Cd (ДПЗ) критерий Шапиро-Уилка W=,7738, p=,0149 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,1477 | 0,1515 | 0,0300 | 0,1212 | 0,1515 | 1,4861 | 2,9731 |
| коэффициент накопления Pb | | | | | | | |
| для распределения КН Pb (ДПЗ) критерий Шапиро-Уилка W=,9827, p=,9751 | | | | | | | |
| ДПЗ | 0,0216 | 0,0216 | 0,0020 | 0,0204 | 0,0228 | 0 | 0,3111 |

На черноземе, согласно результатам проверки, наблюдается несоответствие распределения КН Zn закону нормального распределения ($p < 0,05$ по критерию Шапиро-Уилка), что можно объяснить небольшим объемом выборки КН Zn ($n=8$). В связи с этим для данного распределения рекомендуется применение показателей медианы и интерквартильной широты (табл. 3). Оценка объема выборок для получения надежных оценок при статистическом описании КН исследуемого элемента свидетельствует, что минимально допустимый уровень мощности одностороннего критерия (0,8) достигается на выборке из 20 наблюдений (рис. 2).

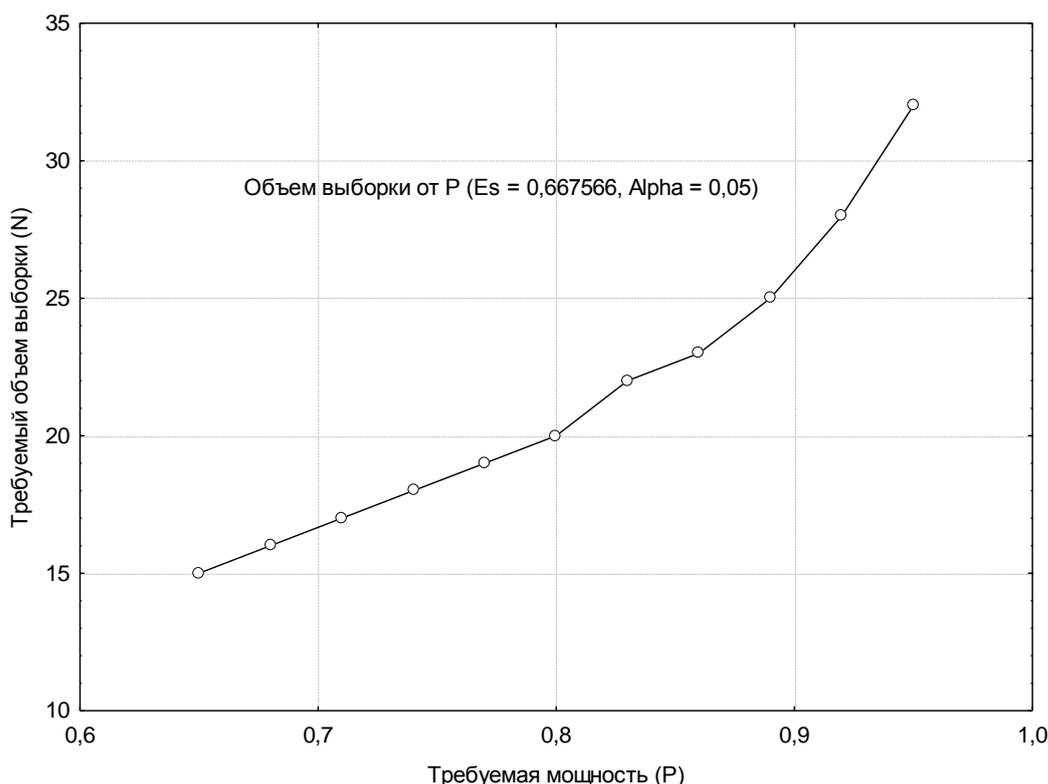


Рис. 2. Взаимосвязь мощности одностороннего критерия и объема выборки КН Zn по ячменю (зерно)

Результаты оценки степени влияния типа почвы на КН Zn и Cu по ячменю (зерно), произрастающему на исследованных типах почв представлены в табл. 4. Согласно результатам дисперсионного анализа, такой фактор как тип почвы определяет 52% вариации КН Cu ($p < 0,001$). Предположительно, что в большей степени варьирование КН Zn может быть обусловлено неучтенными факторами (85%), при этом следует указать, что влияние типа почвы имеет высокую вероятность (критерий Фишера составляет 4,003 при уровне значимости $p = 0,057$) (табл. 4).

Таблица 4. Результаты дисперсионного анализа

| Источник дисперсии | Степень свободы | Сумма квадратов | Средний квадрат | Критерий Фишера | Уровень значимости | Сила влияния фактора, % |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| коэффициент накопления Zn | | | | | | |
| Тип почвы | 1 | 0,2371 | 0,2371 | 4,003 | 0,0574 | 15 |
| Ошибка | 23 | 1,3623 | 0,0592 | | | |
| Всего | 24 | 1,5994 | | | | |
| коэффициент накопления Cu | | | | | | |
| Тип почвы | 1 | 0,0260 | 0,0260 | 18,267 | <0,001 | 52 |
| Ошибка | 17 | 0,0242 | 0,0014 | | | |
| Всего | 18 | 0,0501 | | | | |

Таким образом, результаты анализа миграции тяжёлых металлов в системе «почва - сельскохозяйственные растения» на основе накопленных литературных данных [8], представленных КН, Cu, Zn, Pb, Cd в зерновых культурах (зерно пшеницы и ячменя), с применением методов статистического анализа позволяют констатировать, что:

по пшенице (зерно):

- распределения КН Cu, Pb, Zn, Cd в большинстве своем подчиняются закону нормального распределения;
- наибольшее среднее значение (СО – стандартное отклонение) КН Zn по пшенице (зерно) наблюдается на дерново-подзолистой почве – 0,6760 (0,2236), несколько ниже – на черноземе выщелоченном – 0,4354 (0,1855);
- среднее значение (СО) КН Cu по пшенице (зерно) несколько ниже на дерново-подзолистой почве

0,3141 (0,0138), относительно чернозема выщелоченного – 0,4546 (0,0212);

– среднее значение (СО) КН Cd по пшенице (зерно) при ее выращивании на дерново-подзолистой почве составило 0,3114 (0,2465), на черноземе выщелоченном – 0,1806 (0,2934);

– наименьшие средние величины наблюдаются по КН Pb, при этом не только в разрезе исследованных типов почв, но и между всеми исследованными элементами;

– тип почвы оказывает достоверное влияние на величину КН Zn, Cu, Pb по пшенице (зерно), произрастающей на исследованных типах почвы ($p < 0,001$). Несмотря на то, что большее варьирование КН Cd определено неучтенными факторами и ошибкой, влияние исследуемого фактора величину на КН Cd достоверно, F-критерий=5,863, $p < 0,001$.

по ячменю (зерно):

– распределения КН Cu, Pb, Zn, Cd близки к закону нормального распределения ($p > 0,05$ по критерию Шапиро-Уилка);

– по ячменю (зерно) на дерново-подзолистой почве наибольшее среднее значение (СО) наблюдается по цинку 0,5537 (0,2884), наименьшее среднее значение (СО) отмечается по свинцу – 0,0216 (0,0020), промежуточное положение занимают средние значения КН Cu и КН Cd;

– среднее значение (СО) КН Cu по ячменю (зерно) на черноземах составило 0,1978 (0,0512);

– тип почвы оказывает существенное влияние ($p < 0,001$) на КН Cu по ячменю (зерно), сила влияния данного фактора составляет 52%, меньшее воздействие данный фактор оказывает на КН Zn, составляя 15% (F-критерий равен 4,003 при уровне значимости $p = 0,057$).

Список литературы / References

1. Прохорова Н.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза / Н.В. Прохорова, Н.М. Матвеев // Вестник СамГУ, 1996. 3. С. 125 – 148.
2. Ильин В.Б. Элементарный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985.
3. Полевой В.В. Физиология растений. М.: Высшая школа, 1989.
4. Демедчик В.В., Соколик А.И., Юрин В.М. Поступление меди в растения и распределение в клетках, тканях и органах // Успехи современной биологии, 2001. Т. 121. № 2. С. 190 - 197.
5. Ильин В.Б., Сысо А.И. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение / РАН, Сибирское отделение. Ин-т почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
6. Кашин В.К., Убузунов Л.Л. Особенности накопления микроэлементов в зерне пшеницы в западном Забайкалье // Агрохимия, 2012. № 4. С. 68 - 76.
7. Агроэкологическая характеристика пахотных почв Российской Федерации по содержанию тяжелых металлов, мышьяка и фтора // Максимов П.Г., Васильев Н.М., Кузнецов А.В. [и др]. М.: Агроконсалт, 2002. 50 с.
8. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. London: CRC Press, 2011. 505 p.