

## АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТЕНИЕВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ ЗОНЫ ТЕХНОГЕНЕЗА

Предложена система ландшафтно-экологического мониторинга агроценозов с учетом почвенно-геохимической и позиционно-динамической структуры ландшафтов. Изучены закономерности распределения микроэлементов в системе «почва - растение». Установлены границы зоны экологической ответственности горнорудных предприятий с последующим составлением прогноза по разработанным электронным картам с привязкой базы данных. Даны рекомендации по повышению экологической безопасности землепользования в районах железорудного производства.

### Введение

В данной работе предпринята попытка оценить интенсивность аккумуляции тяжелых металлов (ТМ) в растениеводческой продукции, произведенной в зоне влияния предприятий горнодобывающей (железорудной) промышленности. Актуальность исследования обусловлена интенсивным количественным и качественным истощением почвенных ресурсов в районах промышленного освоения Центрально-Черноземного региона. Практическая значимость исследования связана с возможностью обоснования границ зоны экологической ответственности горнорудных предприятий.

Старооскольско-Губкинский промышленный район Белгородской области является основным горнопромышленным узлом Курской магнитной аномалии (КМА), в недрах которой сосредоточено до 60% запасов железных руд России. Основными источниками загрязнения природных сред, включая земли сельскохозяйственного назначения и населенных пунктов, являются Лебединский и Стойленский горно-обогатительные комбинаты (ГОКи), Оскольский электрометаллургический комбинат и завод металлургического машиностроения, под влиянием которых происходит глубокая трансформация окружающей среды. По данным НИИКМА им. Л.Д. Шевякова, зона максимального воздействия на агроландшафты (радиус 3-5 км) характеризуется высоким пылевым загрязнением земель (1000-1500 кг на 1 га в год), что определяет несомненную значимость проведения мониторинговых исследований на территориях, подверженных техногенному прессингу.

Область нарастающих негативных воздействий в Старооскольско-Губкинском регионе включает земли 23 сельскохозяйствен-

ных предприятий. Важно подчеркнуть, что в структуре почвенного покрова периферийной зоны исследуемого района доминируют наиболее высокобонитетные подтипы черноземов лесостепной зоны.

Таким образом, своевременное снижение риска загрязнения растениеводческой продукции ТМ с последующим устранением передачи ТМ по трофической цепи является важной задачей при проведении подобных исследований.

Цель настоящей работы состояла в исследовании процесса аккумуляции тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах и его взаимосвязи с почвенными условиями.

В рамках исследования были поставлены следующие задачи: оценить количественные показатели накопления в растениеводческой продукции основных тяжелых металлов, таких как кадмий, свинец, медь и цинк (Cd, Pb, Cu и Zn); выявить корреляционные зависимости в системе «почва - растение» по содержанию указанных металлов; определить уровни избирательной поглотительной способности различных видов сельскохозяйственных культур по отношению к ТМ; установить качество растениеводческой продукции в соответствии с действующими нормативами.

### Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследования выбраны: 1) сельскохозяйственные культуры, попадающие в зону техногенного давления: пшеница (*Triticum L.*), ячмень (*Hordeum L.*), овес (*Avena L.*), подсолнечник (*Heliantus S.*), кукуруза (*Zea L.*), люцерна (*Medicago S.*), гречиха (*Fagopyrum Mill.*), горох (*Pisum S.*), горчица (*Sinapis A.*), соя (*Glycine H.*), разнотравье; 2) почвенный покров, представ-

ленный преимущественно черноземами типичными и черноземами выщелоченными; 3) тяжелые металлы, входящие в группу приоритетных загрязнителей, но обладаю-

щие различной биофильностью, такие как Cd, Pb, Cu и Zn.

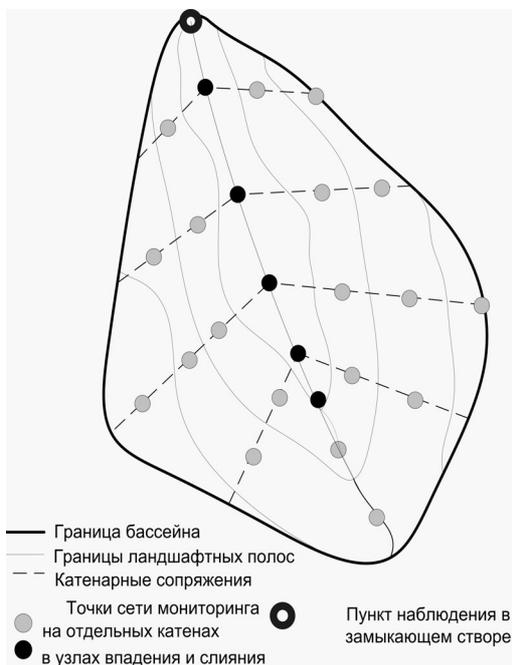
Использованы следующие основные методы исследования: полевое обследование с



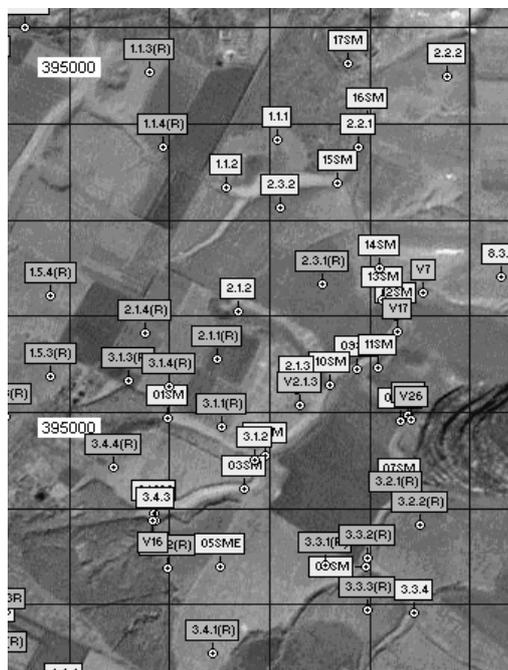
а



б



в



г

а – бассейновые структуры, б – выделение позиционно-динамических структур внутри бассейнов, в – принцип размещения точек опробования в катенарных сопряжениях, г – точки полученной сети мониторинга на космическом снимке.

Рисунок 1. Принцип пространственной организации сети ландшафтно-экологического мониторинга

отбором проб растениеводческой продукции и почвенных образцов, методы химического анализа, статистический и картографический методы.

Система ландшафтно-экологического мониторинга организована на основе совмещения различных принципов ландшафтной декомпозиции территории. Базовый каркас системы мониторинга создан по бассейновому принципу с выделением замыкающих створов разнопорядковых бассейнов в качестве индикационных объектов (рис. 1-а). С целью контроля экологического состояния почв и растительности в различных частях отдельных склонов площадь бассейнов была дифференцирована с использованием позиционно-динамического подхода (рис. 1-б). На этом этапе объектами мониторинга стали отдельные ландшафтные полосы. Для изучения латеральной миграции загрязнителей точки опробования были размещены по профилям катенарных сопряжений (рис. 1-в). Таким образом, за счет комбинирования двух способов ландшафтной декомпозиции территории была создана иерархическая пространственная структура ландшафтно-экологического мониторинга: ландшафтные полосы – катенарные сопряжения – бассейновые структуры (рис. 1-г). Такая система мониторинга позволяет дать объективную, обоснованную с точки зрения современных ландшафтно-геохимических представлений оценку экологического состояния почв и растительности в зоне влияния горнорудного производства.

Отбор растительных и почвенных образцов сопровождался координатной привязкой точек с помощью системы глобального позиционирования (GPS). Выполнено обоснование величин фонового содержания элементов в почвах и растениях, в том числе найдены региональные эталоны. Исследования проводили в 2005 г., на момент окончания активной вегетации сельскохозяйственных культур.

В период проведения эколого-геохимического обследования территории было отобрано 337 почвенных и 120 растительных образцов, представленных 11 культурами. Площадной отбор проб в слое 0-10 см осуществляли методом конверта. Кроме того, отобра-

ны образцы почв по профилю, включая горизонт С (почвообразующая порода).

Содержание валовых форм ТМ определяли в ФГУ «Центр агрохимической службы «Белгородский»» атомно-абсорбционным методом по принятой в агрохимии и агроэкологии методике ЦИНАО [3]. Также были установлены общее содержание гумуса и потенциальная кислотность ( $pH_{KCl}$ ) почвенного раствора.

### **Результаты и обсуждение**

Сводные результаты статистической обработки мониторинговых данных представлены в табл. 1. Уровень концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в почвах Старооскольско-Губкинского промышленного района оценивали относительно ориентировочных допустимых концентраций (ОДК), среднего содержания ТМ в почвообразующей породе (табл. 2) и фоновых значений [Красная книга почв..., 2007].

Оценки коэффициента радиальной дифференциации (КРД), определяемого как отношение содержания химических элементов в почве к содержанию ТМ в почвообразующей породе, свидетельствуют о значительных различиях во внутрипрофильном распределении содержания ТМ (Кр варьирует от 0,7 до 2,6). Среднее значение КРД составляет  $1,36 \pm 0,02$ , что в целом указывает на повышенное содержание ТМ в почвах исследуемой территории по сравнению с почвообразующей породой. В склоновых ландшафтах тяжелые металлы преимущественно задерживаются в гумусовом горизонте почв, обладающем наибольшей биогеохимической сорбционной способностью. Распределение КРД имеет правостороннюю асимметрию (1,16) и положительный эксцесс (4,38), что указывает на преобладание значений, превышающих средние. На почвах супесчаного гранулометрического состава (территория левобережной части долины р. Оскол) с менее эффективным почвенно-поглощающим комплексом и промывным водным режимом происходит вымывание ТМ в глубокие горизонты почв (КРД < 1).

Статистический анализ распределений выборок данных содержания ТМ в растениеводческой продукции свидетельствует о

Таблица 1. Статистические характеристики данных сети ландшафтно-экологического мониторинга на территории воздействия предприятий КМА

Показатели	N	min	max	Среднее ( $x \pm t_{0,5} Sx$ )	V, %	E	A	P, %
<i>Содержание ТМ в почвах, мг/кг</i>								
кадмий	337	0,2	0,9	0,40±0,01	25	4,4	1,2	65,6
свинец	337	3	84,0	14,0±0,6	39	87	7,0	63,5
медь	337	0,9	30,0	12,6±0,3	23	5,3	-0,5	79,2
цинк	337	10	138,0	41,4±1,0	22	42,2	2,7	86,9
содержание гумуса, %	337	1,4	9,3	5,1±0,1	26	0	-0,2	-
pH <sub>KCl</sub>	292	4,0	7,4	6,4±0,09	12	-0,7	-0,8	-
<i>Содержание ТМ в растениях, мг/кг</i>								
кадмий	120	0,015	0,13	0,06±0,01	81	80,6	8,2	0,8
свинец	120	0,13	52,8	10,4±1,0	79	7,4	2,2	70,0
медь	120	1,1	10,1	3,1±0,2	63	1,6	1,4	0
цинк	120	1,58	42,7	17,2±1,0	50	0,6	1,0	0

Примечание: V – коэффициент вариации; E – коэффициент эксцесса; A – коэффициент асимметрии; P – частота превышения значений по отношению к уровню локального фона (для почв на суглинках) или к нормальной концентрации химических элементов в растениеводческой продукции [4].

Таблица 2. Содержание ТМ в почвообразующей породе, мг/кг

Гранулометрический состав	Кадмий	Свинец	Медь	Цинк
Суглинистый	0,30	10	9	39
Супесчаный	0,25	3	3	23

преобладании значений, близких к средним величинам. Гистограммы распределений данных по Cd, Pb и Cu оцениваются как нормальные, стремящиеся влево от нуля. Высокие значения эксцесса и асимметрии наблюдаются по Pb (7,39 и 2,21 соответственно), что свидетельствует о значительном разбросе данных относительно среднего. По остальным изученным элементам (Cd, Cu, Zn) отмечены невысокие значения показателя асимметрии (0,99-1,41), что также указывает на концентрацию данных относительно средних величин. Поэтому можно утверждать, что на обследованной территории преобладают фоновые значения концентрации ТМ в растениях. Бимодальное распределение отмечено только для цинка.

По данным средневзвешенных значений содержания ТМ в растениях составлены ранжированные ряды культур по степени накопления в них ТМ (в порядке убывания):

**Кадмий (Cd):** люцерна > соя > разнотравье > гречиха > горчица = кукуруза = ячмень > горох > пшеница > овес > подсолнечник;

**Свинец (Pb):** ячмень > подсолнечник > гречиха > горох > горчица > разнотравье > люцерна > овес > соя > пшеница > кукуруза;

**Медь (Cu):** подсолнечник > гречиха > соя > люцерна > горчица > кукуруза > разнотравье > горох > овес > ячмень > пшеница;

**Цинк (Zn):** подсолнечник > соя > люцерна > гречиха > горох > кукуруза > горчица > овес > разнотравье > пшеница > ячмень.

Величину загрязнения растениеводческой продукции определяли, сопоставляя с максимально допустимым уровнем (МДУ) содержания ТМ в растениеводческой продукции [5] и с отобранными на значительном удалении от источников воздействия растительными образцами, а также с учетом розы ветров.

Санитарно-гигиеническое состояние растениеводческой продукции представлено на рис. 2.

Для оценки относительной подвижности элементов на локальном уровне использовали коэффициент биологического поглощения (КБП):

$$КБП = \frac{N_p}{N_s}, \quad (1)$$

где  $N_p$  – содержание элемента в золе растений,  $N_s$  – содержание элемента в почве, на которой произрастает данное растение.

Характер накопления ТМ в растениях оценивали по классификации элементов относительно КБП [6].

Особенность минерального питания растений является основным фактором, влияющим на накопление ТМ в них. Наибольшее количество Zn и Cu накапливают подсолнечник, гречиха, соя, люцерна, кукуруза. Высокая степень накопления Cd отмечается в люцерне, сое, разнотравье. Содержание Pb в наибольших количествах обнаружено в ячмене, подсолнечнике, гречихе.

Установлено, что Cd, относящийся к группе очень слабого биологического поглощения, на территории КМА может быть отнесен к группе среднего биологического захвата.

Усиление биологического поглощения по Pb отмечено в люцерне, разнотравье, гречихе, горохе, горчице, ячмене, подсолнечнике, КБП = 0,51: 0,54: 0,69: 0,79: 0,83: 1,23: 1,18 (соответственно), что позволяет обосновать переход Pb в группу элементов сильного биологического захвата.

Для всех сельскохозяйственных культур не наблюдается усиления биологического поглощения Cu (КБП = 0,154-0,526), данный элемент относится к группе среднего накопления. Для Zn отмечено ослабление биологического поглощения (КБП = 0,3-0,85), что сви-

детельствует о переходе данного элемента из группы интенсивного накопления в группу слабого накопления и сильного захвата.

В настоящее время активно ведется работа по разработке нормативных показателей загрязнения ТМ почв, оценивают экологические риски. Для конкретного региона целесообразно провести оценку сопоставимости и применимости различных показателей нормирования.

С целью обоснования применения ОДК для почв изучаемого региона нами был рассчитан нормированный коэффициент биологического поглощения ( $K_{бн}$ ), предложенный В.Е. Закурткиным (1995):

$$K_{бн} = \left( C_p - ПДК \right) / C_{п}, \quad (2)$$

где  $K_{бн}$  – нормированный коэффициент биологического поглощения,  $C_p$  – концентрация элемента в растениях,  $C_n$  – концентрация элемента в почве, ПДК – предельная концентрация в почве.

Анализ графиков зависимости  $K_{бн}$  от содержания ТМ в почвах (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что ОДК можно использовать в качестве норматива для почв Старооскольско-Губкинского региона, так как существует тесная корреляционная

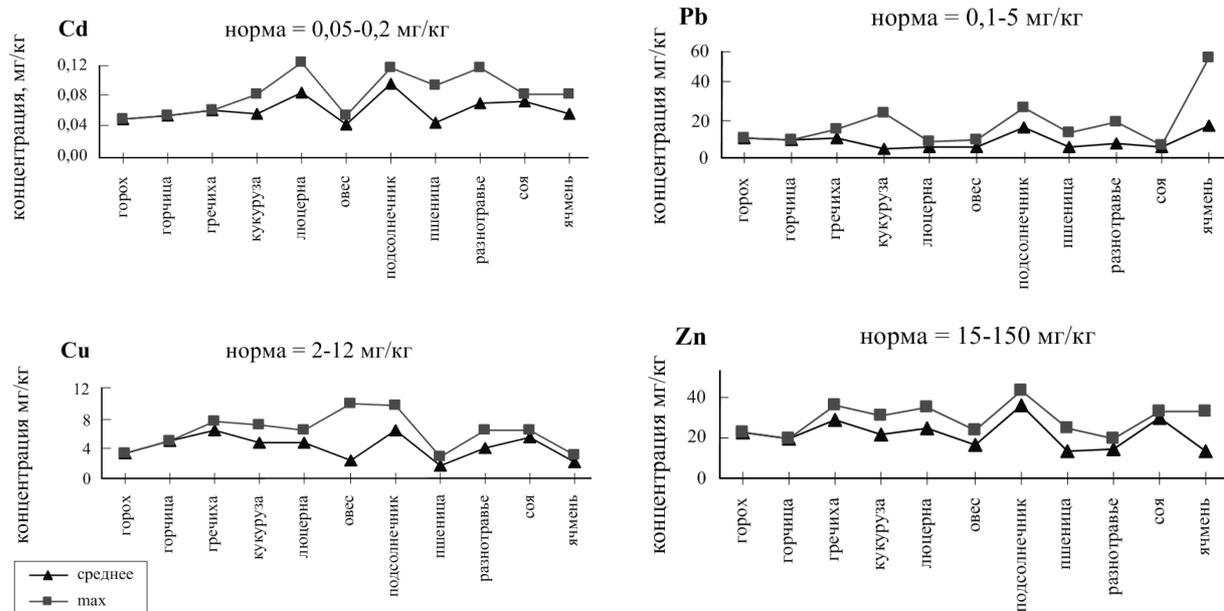


Рисунок 2. Среднее и максимальное содержание ТМ в растениеводческой продукции Старооскольско-Губкинского промышленного района

связь между  $K_{\text{он}}$  и содержанием Cd, Pb, Cu и Zn (значения  $r = 0,984; 0,94; 0,98; 0,88$  соответственно).

На основе расчетов показателей активного загрязнения и коэффициентов концентрации элементов в растениях ТМ были проанжированы по степени интенсивности их накопления в сельскохозяйственной продукции. Установлено, что накопление химических элементов в растениях происходит в такой последовательности:  $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu}$ .

По результатам обработки геоинформационных данных была создана серия электронных карт пространственного распределения ТМ с привязкой базы данных эколого-геохимического обследования Старооскольско-Губкинского промышленного региона. Для этого использованы средства ГИС, в частности методы автоматизированного построения в программных продуктах БелГИС и *Surfer 8*. На рис. 4 представлены картограммы распределения ТМ в растениеводческой продукции в зоне влияния действующего горнопромышленного комплекса. Картограммы составлены без учета различий культур, поэтому отражают текущую ситуацию пространственных схем севооборотов хозяйств на момент исследования.

Ранее было установлено [2], что в зону сверхнормативного (сверхфонового) превы-

шения уровня загрязнения почв тяжелыми металлами попадает семь сельскохозяйственных предприятий общей площадью 5036 га. Анализ картосхем распределения ТМ в растениеводческой продукции исследуемого района свидетельствует о меньшем распространении ореолов ее загрязнения по сравнению с ореолами накопления этих микроэлементов в почвах. Это можно объяснить буферной способностью почв (иммобилизацией ТМ), а также барьерной функцией сельскохозяйственных растений в отношении поступления в них ТМ из почв.

Анализ пространственного распределения ТМ в растениях позволил выявить следующие закономерности: локализация максимального загрязнения продукции отмечается на землях сельскохозяйственного назначения, расположенных в непосредственной близости от предприятий горнорудного производства; несмотря на выявленные зоны нарастания концентраций металлов, основная масса растениеводческой продукции не имеет показаний выше МДУ за исключением содержания Pb. Частота превышения его значений по отношению к нормальной концентрации элемента в исследуемых растениях составляет 70%. Наибольшее количество Pb содержится в ячмене ( $\text{Pb}_{\text{cp}} = 17,1 \text{ мг/кг}$ ), подсолнеч-

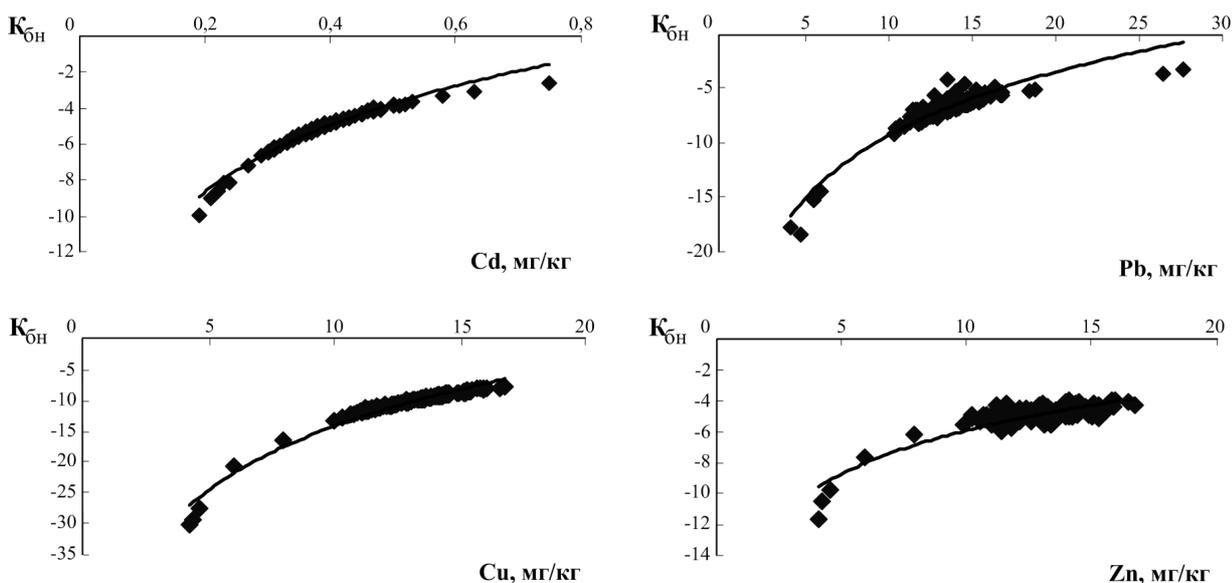


Рисунок 3. Зависимость между  $K_{\text{он}}$  в сельскохозяйственной продукции и содержанием ТМ в почвах Старооскольско-Губкинского промышленного района

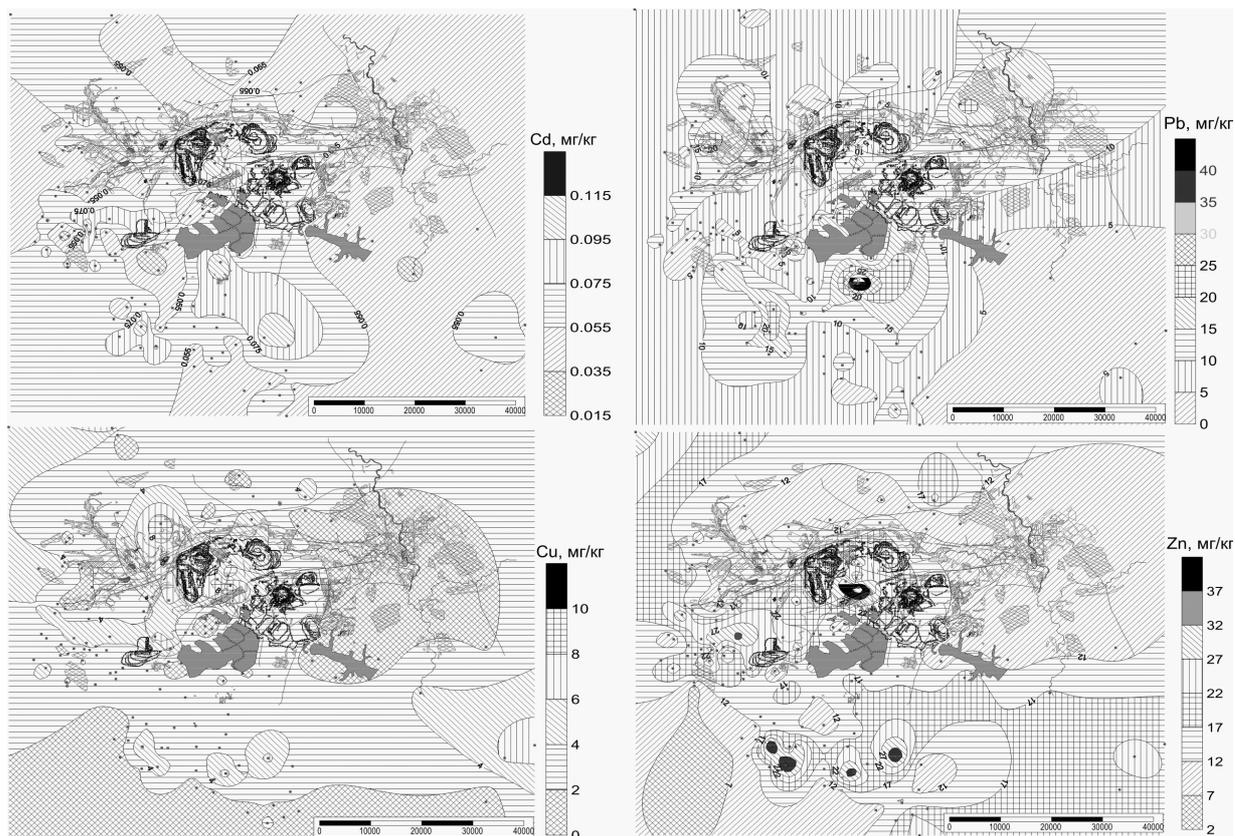


Рисунок 4. Картограммы распределения ТМ (Cd, Pb, Cu, Zn) в растениеводческой продукции Старооскольско-Губкинского промышленного узла

нике ( $Pb_{cp} = 16,3$  мг/кг). Максимальная концентрация элемента зафиксирована в ячмене ( $Pb_{max} = 52,8$  мг/кг), что в 10,6 раза выше нормы.

Высокое содержание Pb в растениеводческой продукции можно объяснить поступлением элемента не только через почву, но и аэральным путем из природно-технических геосистем предприятий горнодобывающей промышленности.

Содержание Cd в сельскохозяйственных культурах находится в пределах нормы. В юго-западной (6-10 км от ГОКов) и южной частях Старооскольско-Губкинского промышленного района (5-10 км от источников), где выращивают люцерну, подсолнечник, сою, разнотравье, наблюдается процесс аккумуляции Cd.

Наибольшая концентрация Cu (10,1 мг/кг) зафиксирована на посевах овса, которые размещены по направлению к карьере Лебединского ГОКа.

В продукции, произрастающей в южной части Старооскольско-Губкинского про-

мышленного района на расстоянии 5-10 км от ГОКов, отмечено наибольшее содержание по Zn (в подсолнечнике – 35,7 мг/кг, сое – 29,9 мг/кг, гречихе – 28,2 мг/кг).

### Выводы

1. При обосновании нормативов для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами на локальном уровне необходимо учитывать фоновый уровень содержания ТМ и тип почвообразующей породы.

2. Существует достаточно тесная корреляционная связь между нормированным коэффициентом биологического поглощения и содержанием ТМ в почвах, что позволяет использовать ОДК на исследуемой территории в качестве нормативного показателя.

3. Наибольшее количество тяжелых металлов накапливается в растениях с более крупными, сильно опушенными листьями. Установлен ряд бионакопления тяжелых металлов в сельскохозяйственных растениях, культивируемых в хозяйствах региона:  $Pb > Cd > Zn > Cu$ .

4. Внешняя граница зоны влияния горнорудных предприятий, отражающаяся на качестве выращиваемых сельскохозяйственных культур, находится на удалении 5-6 км от промышленной площадки.

5. Необходимо провести ряд мероприятий по предотвращению загрязнения растительной продукции, в частности введение ограничений на использование севооборотов с участием кормовых и пропашных культур в 6-км зоне сверхнормативного (сверхфонового) превышения уровня загрязнения земель ТМ вокруг горнодобыва-

ющих предприятий на общей площади 5036 га (7 хозяйств); переход на короткопольные севообороты с участием зерновых, технических культур (например, эфирномасличных) и многолетних трав (без использования их в кормовых целях, допускается выращивание на семена) или однолетних сидератов (горчица, рапс); введение запретов на размещение полей севооборотов в днищах балок, примыкающих к карьерно-отвальным комплексам, в связи с концентрацией поллютантов в данных элементах ландшафта.

**Список использованной литературы:**

1. Закруткин В.Е., Шишкина Д.Ю., Шкафенко Р.П. Проблемы нормирования тяжелых металлов в почвах агроландшафтов // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. 1995. №3. С. 76-81.
2. Лисецкий Ф.Н., Голусов П.В., Кухарук Н.С., Марциневская Л.В., Чепелев О.А., Свиридова А.В. Почвенно-экологический мониторинг в зоне влияния крупных промышленных центров // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах: Материалы II Междунар. науч. конф. Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. С. 232-238.
3. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
4. Минеев В.Г., Ремпе, Е.Х. Агрохимия, биология и экология почвы. – Москва: Росагропромиздат, 1990. 206 с.
5. Покровская С.Ф., Таланов Г.А., Хмелевский Б.Н. Санитария кормов. М, 1991. 272 с.
6. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.

**Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №06-05-96306**