

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-91-108



Ссылки для цитирования:

Шопина О.В., Семенов И.Н., Парамонова Т.А., Комиссарова О.Л. Баланс элементов в системе “агрочернозем глинисто-иллювиальный – сельскохозяйственные растения” на Плавском плато (Тульская область России) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 91-108. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-91-108

Cite this article as:

Shopina O.V., Semenov I.N., Paramonova T.A., Komissarova O.L., The balance of elements in the system “Luvic Chernozems – agricultural plants” on the Plavsk upland (Tula region of Russia), Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 91-108, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-91-108

Благодарность:

Полевые работы выполнены в рамках исследований кафедры радиозэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова “Биогеохимия радионуклидов и экотоксикантов”. Элементный состав растений и содержание подвижных форм в почвах определены в рамках проекта РФФ № 17-77-20072.

Acknowledgments:

Field work was carried out as a part of research by the Department of Radioecology and Ecotoxicology, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, “Biogeochemistry of Radionuclides and Ecotoxicants”. The elemental composition of plants and the content of mobile forms in soils were determined in the framework of the project No. 17-77-20072 of the Russian Science Foundation.

**¹Баланс элементов в системе
“агрочернозем глинисто-иллювиальный –
сельскохозяйственные растения” на Плавском
плато (Тульская область России)**

© 2020 г. О. В. Шопина^{*}, И. Н. Семенов^{**},
Т. А. Парамонова^{***}, О. Л. Комиссарова^{****}

¹ Статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,*

** <https://orcid.org/0000-0001-7094-7230>, e-mail: olashopina@gmail.com,*

*** <https://orcid.org/0000-0003-4309-2809>, e-mail: semenkov@geogr.msu.ru,*

**** <https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>,*

e-mail: tparamono-va@soil.msu.ru,

***** <https://orcid.org/0000-0002-0511-2269>,*

e-mail: komissarova-olga93@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 14.05.2020, после доработки 15.11.2020,
принята к публикации 17.12.2020*

Резюме: На территории Плавского плато (Тульская область), подверженного интенсивному воздействию промышленности (в 40 км находится г. Щекино с заводом по производству азотных удобрений и ТЭЦ, в 60 км – г. Тула с крупными металлургическими предприятиями, в 70 км – г. Новомосковск с несколькими химическими предприятиями и ГРЭС) и сельского хозяйства, исследованы запасы химических элементов в трех агроценозах (пшеницы, сои, козлятниково-кострецовой травосмеси) для оценки интенсивности перехода элементов (K, P, S, Mg, Ca, Si, Na, Fe, Al, Mn, Zn, Ba, Cu, Sr, Ti, Mo, As, Zr, Pb, Co, Ni, V, Cr) из агрочерноземов глинисто-иллювиальных в сельскохозяйственные растения. Валовое содержание элементов в почвах определено рентген-флуоресцентным методом. Элементный состав растений (после автоклавного разложения смесью концентрированных азотной кислоты и перекиси водорода) и содержание подвижных форм (извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с рН 4.8) элементов в почве оценено атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой. Общие запасы элементов в 10-сантиметровом слое почв максимальны для Si (40 ± 4 кг/м²), Al (7.0 ± 0.8 кг/м²) и Fe (3.4 ± 0.3 кг/м²), подвижных форм – для Ca (570 ± 48 г/м²), Mg (43 ± 4 г/м²), K (22 ± 6 г/м²). В растениях основные запасы (г/м²) элементов (K, P, S, Mg, Si, Mn, Zn, Ba, Cu, Mo) сконцентрированы в надземной части. Наиболее активно растения поглощают подвижные формы K, P, Ti, Mo, As, Zr, V. На основе ресурсного метода оценки качества почв изученные агрочерноземы характеризуются низким уровнем загрязнения Ni, умеренным запасом подвижных форм K при недостатке подвижного P.

Ключевые слова: биогеохимия, загрязнение почв, потенциально токсичные элементы, тяжелые металлы и металлоиды, качество сельскохозяйственной продукции, биологическое поглощение, Среднерусская возвышенность.

²The balance of elements in the system “Luvic Chernozems – agricultural plants” on the Plavsk upland (Tula region of Russia)

O. V. Shopina^{*}, I. N. Semenov^{**},
T. A. Paramonova^{***}, O. L. Komissarova^{****}

Lomonosov Moscow State University,

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

^{*}<https://orcid.org/0000-0001-7094-7230>, e-mail: olashopina@gmail.com,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-4309-2809>, e-mail: semenkov@geogr.msu.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>,

e-mail: tparamono-va@soil.msu.ru,

^{****}<https://orcid.org/0000-0002-0511-2269>,

e-mail: komissarova-olga93@yandex.ru.

Received 14.05.2020, Revised 15.11.2020, Accepted 17.12.2020

Abstract: To assess the transfer of macro (K, P, S, Mg, Ca, as well as Si, Na, Fe, Al, Mn and Ti) and microelements (Zn, Ba, Cu, Sr, Mo, as well as As, Zr, Pb, Co, Ni, V and Cr) from Luvic Chernozems (Aric, Loamic, Pachic) into agricultural plants, we studied the inventories of chemical elements in three agrocenoses (wheat, soybean, *Galega orientalis* Lam. and *Bromopsis inermis* Leyss grass mixtures) from the Plavsk upland (Tula Region). This territory is subjected to intensive industrial and agricultural impacts: it is 40 km away from the town of Shchekino with a nitrogen fertilizer plant and a thermal power plant, 60 km away from Tula with large metallurgical enterprises, 70 km away from the town of Novomoskovsk with several chemical enterprises and state district power plant. In soils, the total content of elements was determined by the X-ray fluorescence spectrometry. The elemental composition of plants after autoclave decomposition with a mixture of concentrated nitric acid and hydrogen peroxide and the content of the bioavailable fraction (extracted by an ammonium acetate buffer with pH 4.8) of elements in soil were estimated by the atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. In topsoil (a 10-cm layer), maximal inventories are typical for total Si ($40 \pm 4 \text{ kg/m}^2$), Al ($7.0 \pm 0.8 \text{ kg/m}^2$) and Fe ($3.4 \pm 0.3 \text{ kg/m}^2$) and for bioavailable Ca ($570 \pm 48 \text{ g/m}^2$), Mg ($43 \pm 4 \text{ g/m}^2$), K (22 ± 6

² The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

g/m²). In plants, the main inventories (g/m²) of K, P, S, Mg, Si, Mn, Zn, Ba, Cu, Mo occur in the above ground phytomass. The most effectively plants assimilate bioavailable fractions of K, P, Ti, Mo, As, Zr, V. Based on the resource method for soil quality assessment, the studied Chernozems are characterized by a low level of Ni contamination, a moderate supply of bioavailable K with a lack of bioavailable P.

Keywords: biogeochemistry, soil pollution, potentially toxic elements, heavy metals and metalloids, quality of agricultural products, biological absorption, Central Russian Upland.

ВВЕДЕНИЕ

На дифференцированной оценке запасов загрязняющих и потенциально полезных веществ в почвах основан ресурсный подход к оценке их качества ([Смагин и др., 2008](#)). В пахотные почвы поллютанты поступают в составе аэрогенных выпадений, а также за счет прямого внесения агрохимикатов и мелиорантов. В условиях нарастающего антропогенного прессинга необходимо четко знать биогеохимическую специализацию культурных растений, чтобы снизить риск получения некачественной сельскохозяйственной продукции ([Ильин, 1973](#)). Интенсивность поглощения химических элементов (ХЭ) растениями из почв определяется множеством факторов: концентрацией и формами нахождения в почве, рН, Eh, содержанием органического вещества (C_{орг}), биогенных конкурирующих ХЭ и элементов питания (N, P, K) и др. ([Баргальи, 2005](#)).

Тульская область остается важным производителем промышленной и аграрной продукции в Центральной России, что определяет поступление разнообразных поллютантов в связи с высокой концентрацией предприятий химической, металлургической промышленности и применением минеральных удобрений и гербицидов ([Арляпов и др., 2015](#)). Содержание тяжелых металлов в культурных растениях, выращиваемых на загрязненных территориях, стало предметом многих исследований ([Wang et al., 2020](#); [Zhang et al., 2019](#); [Liu et al., 2014](#)). Исследования запасов элементов в почвах и растениях ([Судейманов, Низамов, 2015](#); [Рамазанова, Ахмедова, 2010](#); [Overesch et al., 2007](#)) встречаются намного реже и до настоящего момента не проводились на терри-

тории Тульской области.

Целью настоящей работы является оценка интенсивности геохимических потоков ХЭ из агрочерноземных почв в сельскохозяйственные растения, произрастающие на территории одного из наиболее возвышенных участков Среднерусской возвышенности – Плавском плато.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для изучения общих объемов годовичного потребления и перераспределения ХЭ по органам растений семейств Злаковые и Бобовые на территории Плавского плато (южная часть Тульской области) было исследовано три площадки с агрочерноземами глинисто-иллювиальными (Luvic Chernozems (Aric, Loamic, Pachic)) под агроценозами пшеницы (*Triticum aestivum* L.), сои (*Glycine max* L.) и козлятниково-кострецовой (*Galega orientalis* Lam. и *Bromopsis inermis* Leyss.) травосмеси с отбором 16 образцов надземной фитомассы и 4 – подземной (рис. 1). Почвенные образцы (совместно с подземной фитомассой) отбирали монолитами ненарушенного сложения с помощью кольцевого пробоотборника с площади 300 см² послойно с шагом по 10 см до глубины 30 см в трехкратной повторности (всего 27 образцов). Надземная растительность опробована методом сплошного укоса с площади 2 500 см² в трехкратной повторности над местом отбора почв. Листья со стеблями и зерно анализировались отдельно. Растения отмывали от почвенного мелкозема под проточной водой до полного осветления промывных вод на системе сит с ячейками 1 и 0.5 мм. Качество отмывки корней контролировали с помощью оптической микроскопии при 10-кратном увеличении. Растения высушивали при комнатной температуре и измельчали для дальнейших химических анализов.

В почвах определяли рН водной вытяжки потенциометрически (прибор “Эксперт-01”, Россия), $C_{орг}$ – титриметрически по И.В. Тюрину с фенилантраниловой кислотой ([Аринушкина, 1970](#)), гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии (прибор “Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus”, Германия), элементный состав – рентген-флуоресцентным методом (прибор “Спектроскан Макс-GV”, Россия) и содержание подвижных форм ХЭ в

вытяжке ацетатно-аммонийного буфера с pH 4.8 – атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой (приборы “iCAP-6500” фирмы “Thermo Scientific” и “X-7” – “Thermo Elemental”, США). Анализ элементного состава растений также проводился атомно-эмиссионным методом на тех же приборах после автоклавного разложения растительных образцов смесью концентрированных HNO_3 и H_2O_2 .



Рис. 1. Район исследований.
Fig. 1. Sampling Area.

Обработка данных включала определение запасов ХЭ в 30-сантиметровом слое почв (общая концентрация/концентрация подвижных форм \times плотность почвы \times площадь \times мощность слоя) и в растениях по органам (концентрация в органе \times запас фитомассы), расчет коэффициента относительного содержания в органе

растения (ОСОР) $\left(\frac{\text{концентрация ХЭ в органе}}{\text{концентрация ХЭ в корнях}} \right)$ ([Ковалевский, 1969](#)) и коэффициента использования элемента растениями из почв $\left(\frac{\text{запас ХЭ в растении}}{\text{запас подвижных форм в почве}} \right)$ ([Радов и др., 1971](#)). Также рассчитана доля отчуждения ХЭ из почвы $\left(\frac{\text{запас ХЭ в наземной части}}{\text{общий запас ХЭ в растении}} \right)$ ([Рамазанова, Ахмедова, 2010](#)). Для оценки значимости различий среднего независимых переменных проводился тест Манна – Уитни в пакете STATISTICA 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства почв. Все изучаемые площадки в агроценозах опробованных культур расположены в схожих условиях (транс-)элювиальных ландшафтов и по физико-химическим свойствам почв значимо не отличаются ([Шопина и др., 2020](#)): рН верхних горизонтов – 6.3 ± 0.4 ($n = 14$), $S_{\text{орг}}$ – 4.6 ± 0.8 ($n = 27$), в гранулометрическом составе преобладают пылеватые фракции: крупная ($44 \pm 4\%$, $n = 27$), мелкая ($25 \pm 4\%$) и средняя ($15 \pm 3\%$) при подчиненной роли песчаных ($4 \pm 4\%$) и илистой ($6 \pm 3\%$).

Общие запасы ХЭ в почвах. Элементный состав верхних 30 см почвы изученных площадок значимо не отличается. Наиболее высокие значения запасов в почве характерны для Si (40 ± 4 кг/м², для 10-сантиметрового слоя), затем идут Al и Fe с 7.0 ± 0.8 и 3.4 ± 0.3 кг/м² соответственно. Высокие содержания этих ХЭ связаны с их конституционной ролью в минеральной матрице почв. Запасы биогенных K, P, Mg и Ca в изученных черноземах также значительны. Минимальны запасы микроэлементов – As, Pb, Co, Ni (табл. 1).

Нормативы общих запасов ХЭ, разработанные Смагиным с соавторами ([Смагин и др., 2008](#)) на основе значений допустимых концентраций, по Pb, Zn, Cu, As не превышены, а запасы Ni (> 90 г/м² в метровом слое) соответствуют слабой степени загрязнения почв. Вероятными причинами повышенного содержания Ni в почвах может быть принос с удобрениями и аэрогенное поступление с выбросами промышленности и транспорта.

Таблица 1. Общие запасы и запасы подвижных форм ХЭ по глубинам (в см) гумусового горизонта черноземов Плавского плато, изученных на трех площадках, г/м²

Table 1. Total and bioavailable inventories of chemical elements in Chernozem topsoils (cm) studied on 3 sampling areas at the Plavsk upland

ХЭ	Пшеница			Соя			Травосмесь		
	0–10	10–20	20–30	0–10	10–20	20–30	0–10	10–20	20–30
K*	2.3/25	2.6/33	2.5/26	2.3/17	2.5/24	2.4/25	1.8/22	2.3/16	2.1/13
P*	0.12/2.2	0.14/2.5	0.13/2.4	0.09/1.7	0.11/1.8	0.1/2	0.09/2.2	0.1/1.3	0.1/1.6
S*	-1.4	-1.6	-1.3	-1.2	-1.1	-1.4	-1.3	-1	-0.9
Mg*	0.56/42	0.64/50	0.61/44	0.58/39	0.65/45	0.65/43	0.49/45	0.62/42	0.58/36
Ca*	1.1/495	1.2/583	1.2/517	1.1/564	1.2/630	1.3/590	1.1/529	1.3/632	1.2/595
Si*	41/6.0	46/6.7	44/6.0	39/10	44/13	41/12	32/9.2	40/11	38/10
Na*	-2.3	-3.1	-2.1	-2.9	-3.4	-3.5	-2.6	-3.1	-1.7
Fe*	3.4/1.2	3.9/1.5	3.7/1.6	3.5/0.87	4/0.41	3.6/0.46	2.8/0.27	3.4/0.45	3.3/0.49
Al*	7.1/9.1	8/11	7.8/10	7.3/5.6	8.4/3.5	7.8/3.8	5.7/2.2	7.3/3.6	7/4.1
Mn	91/10	104/12	99/11	85/7.6	97/5.2	90/6.1	73/9.0	84/6.7	84/6.5
Zn	9.9/0.34	11/0.31	11/0.26	11/0.26	13/0.25	10/0.31	7.9/0.09	9.2/0.05	9.1/0.17
Ba	-5.4	-6.3	-5.69	-5.0	-5.2	-5.1	-3.9	-5.1	-4.9
Cu	7.1/0.01	7.7/0.01	7.7/0.01	7.8/0.01	9.2/0.01	7.5/0.01	5.7/0.01	7.1/0.01	7/0.01
Sr	19/3.3	21/3.8	20/3.4	17/2.8	19/2.5	18/2.4	15/2.3	17/2.5	17/2.8
Ti	632/ 0.06	715/ <0.05	689/ <0.05	657/ <0.05	752/ <0.05	669/ <0.05	520/ <0.05	636/ <0.05	614/ <0.05
As	0.80/ <0.1	0.88/ <0.1	0.85/ <0.1	0.89/ <0.1	1.11/ <0.1	0.81/ <0.1	0.66/ <0.1	0.73/ <0.1	0.68/ <0.1
Pb	2/<0.01	1.9/<0.01	1.8/<0.01	2.6/<0.01	3.3/<0.01	1.9/<0.01	1.5/<0.01	1.3/<0.01	1.4/<0.01
Co	3.6/0.03	4/0.03	4/0.03	3.8/0.02	4.4/0.03	3.9/0.02	2.8/0.01	3.6/<0.01	3.6/<0.01
Ni	8.2/0.09	8.8/0.1	8.8/0.1	8.2/0.07	9.3/0.07	8.6/0.06	6.8/0.04	8.0/0.06	8.0/0.06
V	14/<0.01	15/<0.01	15/<0.01	14/<0.01	16/<0.01	15/<0.01	11/<0.01	14/<0.01	13/<0.01
Cr	12/0.03	13/0.04	13/0.06	12/0.05	13/0.04	13/0.04	9/0.02	12/0.03	11/0.02

Примечание. Числитель – общие запасы, знаменатель – запасы подвижных форм; * – в кг/м² для общих запасов; “-” – не определялся.

Запасы подвижных форм ХЭ в почвах. По содержанию подвижных форм ХЭ почвы трех площадок также значительно отличаются между собой.

Запасы подвижных форм элементов образуют ряд: Ca (570 ± 48 г/м²) >> Mg (43 ± 4) > K (22 ± 6) >> Zn (0.2 ± 0.1), Ni, (0.07 ± 0.02) > Cr (0.04 ± 0.01), Co (0.02 ± 0.01) > Cu (0.01 ± 0.003) и Pb (0.01 ± 0.001) (см. табл. 1).

По сравнению с запасами элементов в пахотном слое типичных черноземов Оренбургской области, в 20-сантиметровом слое почв Плавского плато общие запасы P были сопоставимы, K, Zn, Ni, Cr содержалось больше, а Cu – меньше ([Ряховский, Ярцев, 2006](#)). Запасы подвижного K превышали данные по 25-сантиметровому слою пахотных серых лесных почв Татарстана ([Сулейманов, Низамов, 2015](#)), но запасы подвижного P были в 10 раз меньше в черноземах Плавского плато. По сравнению с аллювиальными почвами долины Эльбы, которые также подвержены большой антропогенной нагрузке ([Overesch et al., 2007](#)), запасы подвижных Cu и Ni были ниже в изученных почвах, Cr – выше, а Zn и Pb – сопоставимы.

Согласно требованиям к качеству почв ([Смагин и др., 2008](#)), для изученных агрочерноземов характерен недостаток подвижного P (< 160 г/м² в метровом слое) и умеренное содержание K (> 200 г/м², но < 600 г/м²).

Запасы ХЭ в растениях. В надземной части всех изученных растений максимальны содержания биогенных P_{1.5-5}, K₂₋₃, Zn₂₋₄ и Mg_{1.5-3} (подстрочный индекс – значения OCOP). В корнях в большей мере накапливаются элементы, не относящиеся к необходимым для растений – Fe_{0.1-0.7}, Al_{0.1-0.5}, As_{0.1}, V_{0.1}, Cr_{0.1}, Co_{0.1-0.4}, Na_{0.3-0.6}, Zr_{0.02-0.1}. В подземных и надземных органах содержание Cu_{0.9-1.3} и Ba_{1-1.5} близко. В надземной части Бобовых, кроме перечисленных ХЭ, по безбарьерному типу накапливаются необходимые им Ca₄, Ni₂₋₈, S₂₋₃ и Mn₃₋₄ ([Kabata-Pendias, Szteke, 2015](#)). В надземной части Злаковых повышено содержание Si₂₋₇, выполняющего скелетную функцию ([Колесников, 2001](#)).

Во всех изученных культурных растениях в структуре фитомассы преобладает надземная фракция.

Таблица 2. Запасы фитомассы и ХЭ в растениях на сухое вещество Плавского плато, изученных на трех площадках (мг/м²)

Table 2. Phytomass and inventories of chemical elements in plants (mg/m²)

ХЭ	Злаковые					Бобовые				
	Пшеница			Кострец		Соя			Козлятник	
	Зерно	Надземная	Корни	Надземная	Корни	Зерно	Надземная	Корни	Надземная	Корни
Фитомасса*	1816	1270	40	270	121	1724	738	83	290	227
K*	4.9	6.8	0.045	3.4	0.20	2.4	14	0.48	2.3	0.55
P*	4.9	2.1	0.021	0.6	0.1	6.9	2.2	0.1	0.9	0.5
S*	2.2	1.3	0.027	0.23	0.11	3.7	1.2	0.07	0.29	0.12
Mg*	0.16	0.96	0.02	0.26	0.07	4.7	2.9	0.13	1.2	0.32
Ca*	0.72	1.7	0.14	0.73	0.74	7.1	8.7	0.3	4.1	0.95
Si	203	218	3.0	52	3.3	224	15	34	8.6	18.8
Na	180	535	8.8	11	18	43	78	28	45	64
Fe	105	149	25	16	35	97	62	9.4	30	34
Al	78	135	32	11	37	38	49	11.7	24	36
Mn	69	48	1.36	11	4.1	33	21	0.50	16	3.6
Zn	40	20	0.33	3.8	2.2	47	14	0.58	4.8	2.3
Ba	8.5	28	0.56	1.7	1.6	5.9	8.9	0.91	3.4	1.79
Cu	4.4	2.3	0.10	1.0	0.91	6.4	2.2	0.20	2.1	1.18
Sr	4.0	9.14	0.76	2.7	3.5	17	23	2.0	14	6.1
Ti	2.2	5.3	0.68	<0.1	1.0	<0.1	3.1	0.37	1.1	0.25
Mo	0.33	0.15	0.003	0.15	0.04	0.88	0.15	0.04	0.07	0.08
As	0.24	<0.01	0.007	<0.01	0.004	<0.01	<0.01	0.004	<0.01	0.007
Zr	0.09	0.10	0.02	0.03	0.05	0.07	0.05	0.04	0.02	0.03
Pb	0.07	0.17	0.02	0.02	0.02	<0.01	0.08	0.01	0.04	0.02
Co	0.04	<0.01	0.01	<0.01	0.02	0.03	0.02	0.007	0.01	0.007
Ni	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	0.19	12	2.2	0.07	0.31	0.09
V	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	0.21	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	0.07
Cr	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.15

Примечание. Курсив – максимальные значения в растениях; * – в г/м².

Причем максимальные запасы фитомассы характерны для зерна пшеницы и бобов сои (табл. 2). Минимальные запасы фито-

массы приходится на корни. В зерне и бобах, по сравнению с другими органами, максимальны запасы биогенных P, Mg, S и эссенциальных Zn, Mn, Co, Cu, Si элементов. В зерне пшеницы, кроме перечисленных XЭ, также максимальны запасы As, а в бобах сои – Fe, K, Ni, Sr, Mo, Zr.

Во всех растениях токсичные для них V и Cr локализуются преимущественно в корнях. В надземной фитомассе Бобовых в отличие от Злаковых запасы участвующих в синтезе специфических белков Co и Ni больше, чем в подземной. Повышенное накопление Ni соей, выращиваемой на антропогенно-загрязненных почвах, выявлено в Китае и Аргентине ([Zhang, 2019](#); [Lavado, 2006](#)).

Из всех растений кострец имеет наибольшее число XЭ (Ti, Fe, Al, Co, As, V, Cr, Ni, Sr, Na, Zr) с максимальными значениями запасов в корнях, что объясняется более развитым биологическим барьером между корнями и надземной частью у Злаковых, и в целом большей абсолютной и относительной биомассой корней у костреца по сравнению с пшеницей.

Соя и козлятник как представители Бобовых отличаются от Злаковых распределением запасов Si, который сосредоточен преимущественно в корнях. Это объясняется тем, что у Злаковых Si играет большую роль в физиологических процессах, чем у Бобовых ([Колесников, 2001](#)).

В целом в данном исследовании у Бобовых запасы XЭ в надземной фитомассе были выше, чем у Злаковых. Таким образом, наиболее активно из корней в надземную часть растений Плавского плато переходят $P > K > Zn > Mg$. Концентрируются в корнях и слабо переходят в надземную часть $Fe > Na > Al > Co > Zr > As, V, Cr$. Наибольшие запасы большинства XЭ характерны для надземной части изученных растений, и особенно для зерна пшеницы и бобов сои. Только у костреца запасы фитомассы в корнях сопоставимы с запасами в надземной части.

По сравнению с пшеницей, произрастающей на каштановых почвах Дагестана, во всех органах пшеницы Плавского плато были меньше запасы Mo, больше – K и P в наземной части и корнях, причем в надземной части более чем в 100 раз ([Рамазанова, Ахмедова, 2010](#)). У всех изученных растений вынос P и K с

надземной фитомассой больше, чем у подсолнечника ([Сулейманов, Низамов, 2015](#)).

При выращивании пшеницы практически все поглощенные растениями Ni, V и Cr ежегодно возвращаются в почву с минерализующимися остатками корней (доля отчуждения ~ 0%), 80% Co и 93% Al от общего поглощения выносятся из почвы вместе с урожаем, а также до 90–98% Ca, Fe, Sr, Ti, As, Zr, Pb. Доля отчуждения K, P, S, Mg, Si, Na, Mg, Zn, Ba, Cu превышает 99%. В агроценозе сои весь As, V и Cr остаются в почве вместе с корнями (доля отчуждения ~ 0%), 75–89% Si, Na, Al, Ti, Zr, Pb, Co, а также около 95% Fe и Ba выносятся с надземной частью. Кроме перечисленных ХЭ, в агроценозе сои высокой долей отчуждения отличается Ni (99.5%). Травосмесь характеризуется наибольшим обратным поступлением ХЭ в почву. Абсолютно все ХЭ имеют долю отчуждения < 90%, а As, V и Cr ~ 0%.

Уровень поглощения ХЭ растениями. По результатам расчета K_i , наиболее активно растения поглощают подвижные формы K, P, Ti, Mo, As, Zr, V. Первые два ХЭ относятся к биогенным ([Kabata-Pendias, 2011](#)), а оставшиеся содержатся в растениях, но их подвижные формы не обнаружены в черноземах Плавского плато (табл. 3). Крайне низкие значения K_i свойственны Sr, Ca с высоким содержанием подвижных форм в почвах и фитотоксичным Co и Cr. Все растения, кроме костреца, активно поглощают S. Для козлятника характерно самое высокое значение использования Cu. Соя поглощает Ni активнее других растений, что, вероятно, связано с его участием в формировании особых ферментов у Бобовых – уреазы, дегидрогеназы и др. ([Boer et al., 2014](#)).

Полученные на Плавском плато значения K_i K и P для пшеницы и сои в несколько раз превышают средние значения для данных культур по литературным данным, возможно, это объясняется более благоприятными почвенно-биоклиматическими условиями территории и минеральным составом почвообразующих пород. Значения K_i для костреца по этим ХЭ в целом соответствуют литературным данным ([Рыжих, Липатников, 2018](#)). Значения K_i P у всех растений в десятки раз превосходят максимальное значение для подсолнечника ([Сулейманов, Низамов, 2015](#)).

Естественная луговая растительность поймы Эльбы погло-

щает сопоставимое количество Ni и больше подвижных Cu и Zn из почв, вероятно, за счет более высоких концентраций в почвах при безбарьерном накоплении ([Overesch et al., 2007](#)).

Таблица 3. Коэффициенты использования элементов из почвы растениями

Table 3. Coefficients of use of elements from soils by plants

ХЭ	Пшеница	Соя	Кострец	Козлятник
К	0.48	2.3	0.02	0.02
Р	3.3	5.4	1.6	1.3
S	2.4	4.2	0.59	1.1
Mg	0.06	0.20	0.01	0.01
Ca	0.01	0.03	0.001	0.003
Si	0.07	0.03	0.16	0.55
Na	0.32	0.05	0.02	0.01
Fe	0.23	0.19	0.11	0.40
Al	0.03	0.02	0.02	0.03
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01
Zn	0.18	0.23	0.18	0.23
Ba	0.01	0.003	0.002	0.002
Cu	0.97	0.85	0.84	1.31
Sr	0.004	0.02	0.001	0.001
Ti	>1	>1	>1	>1
Mo	>1	>1	>1	>1
As	>1	>1	>1	>1
Zr	>1	>1	>1	>1
Pb	0.004	>1	>1	>1
Co	0.002	0.003	0.001	0.001
Ni	0.001	0.219	0.0043	0.0089
V	>1	>1	>1	>1
Cr	0.003	0.0004	0.0024	0.0071

Примечание. Курсивом выделены элементы с $K_i > 1$.

ВЫВОДЫ

Максимальный вынос ХЭ из изученных почв происходит при выращивании пшеницы и сои: К (общим объем выноса с запасами в растениях – $25 \pm 19 \text{ кг/м}^2$) > Р (8 ± 1.4), Са (9 ± 6) > Mg ($5 \pm$

3), $S (4 \pm 1) > Fe (223 \pm 83 \text{ г/м}^2) > Mn (86 \pm 43 \text{ г/м}^2)$ и $Zn (60 \pm 0.8 \text{ г/м}^2)$. Эти же элементы, но в меньшей степени, выносятся при укосе травосмеси из козлятника и костреца. Для компонентов травосмеси минимальна и доля отчуждения ХЭ с урожаем по сравнению с другими агроценозами. Только для изученных представителей семейства Бобовых доля Ni, выносящегося с надземной фитомассой, превышает долю, остающуюся в корнях.

Наиболее активно растения поглощают подвижные формы K, P, Ti, Mo, As, Zr, V. Крайне низкие значения Ки свойственны Sr, Ca, Co и Cr.

На основе ресурсного метода оценки качества почв можно утверждать, что черноземы Плавского плато характеризуются низким уровнем загрязнения Cu и Ni, умеренной обеспеченностью подвижными формами K при недостатке P.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970, 488 с.
2. *Арлянов В.А., Волкова Е.М., Нечаева И.А., Скворцова Л.С.* Содержание тяжелых металлов в почве как индикатор антропогенного загрязнения Тульской области // Известия Тульского гос. университета. Естественные науки. 2015. № 4. С. 194–204.
3. *Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений. М: ГЕОС, 2005. 457 с.
4. *Ильин В.Б.* Биогеохимия и агрохимия микроэлементов (Mn, Cu, Mo) в южной части Западной Сибири. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 1973. 401 с.
5. *Ковалевский А.Л.* Основные закономерности формирования химического состава растений // Биогеохимия растений: тр. Бурят. ин-та ест. наук. Улан-Удэ: Бурятское книжное изд-во, 1969. С. 6–28.
6. *Колесников М.П.* Формы кремния в растениях // Успехи биологической химии. 2001. №. 41. С. 331–332.
7. *Радов А.С., Пустовой И.В., Корольков А.В.* Практикум по агрохимии. М: Колос, 1971. 335 с.
8. *Рамазанова Н.И., Ахмедова З.Н.* Круговорот микроэлементов в посевах пшеницы на лугово-каштановой почве // Вестник Дагестанского государственного университета. 2010. № 6. С. 63–67.
9. *Рыжих Л.Ю., Липатников А.И.* Расчеты доз применения минеральных удобрений в севооборотах. Казань: Казанский университет, 2018. 19 с.

10. *Ряховский А.В., Ярцев Г.Ф.* Содержание и запасы химических элементов в пахотном слое основных типов и подтипов почв Оренбургской области // Известия Оренбургского государственного университета. 2006. Т. 2. № 10. С. 108–109.
11. *Смагин А.В., Шоба С.А., Макаров О.А.* Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологий их воспроизводства (на примере г. Москвы). М: Издательство Московского университета, 2008. 360 с.
12. *Сулейманов С.Р., Низамов Р.М.* Хозяйственный вынос, коэффициенты использования элементов питания подсолнечником в зависимости от применения биопрепаратов // Вестник Казанского ГАУ. 2015. Т. 2. № 36. С. 151–155.
13. *Шопина О.В., Семенов И.Н., Парамонова Т.А.* Накопление тяжелых металлов и ^{137}Cs в растительной продукции, выращиваемой на радиоактивно загрязненных черноземах Тульской области // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 6. С. 48–53. DOI: [10.18412/1816-0395-2020-6-48-53](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-48-53).
14. *Boer J.L., Mulrooney S.B., Hausinger R.P.* Nickel-dependent metalloenzymes // Arch. Biochem. Biophys. 2014. No. 544. P. 142–152. DOI: [10.1016/j.abb.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.abb.2013.09.002).
15. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. New York: CRC Press, 2011. 467 p.
16. *Kabata-Pendias A., Szteke B.* Trace elements in abiotic and biotic environments. New York: CRC Press, 2015. 391 p.
17. *Lavado R.S.* Concentration of potentially toxic elements in field crops grown near and far from cities of the Pampas (Argentina) // Journal of Environmental Management. 2006. Vol. 80. No. 2. P. 116–119. DOI: [10.1016/j.jenvman.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.003).
18. *Liu G., Yu Y., Hou J., Xue W., Liu X., Liu Y., Wanhua W., Ahmed A., Tasawar H., Zhengtao L.* An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-acid battery factory // Ecol. Indic. 2014. No. 47. P. 210–218. DOI: [10.1016/j.ecolind.2014.04.040](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.040).
19. *Overesch M., Rinklebe J., Broll G., Neue H.U.* Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany) // Environ. Pollut. 2007. Vol. 145. No. 3. P. 800–812. DOI: [10.1016/j.envpol.2006.05.016](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.016).
20. *Wang L., Yin X., Gao S., Jiang T., Ma C.* In vitro oral bioaccessibility investigation and human health risk assessment of heavy metals in wheat grains grown near the mines in North China // Chemosphere. 2020. No. 252. P. 1–6. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.126522](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126522).

21. Zhang T., Xu W., Lin X., Yan H., Ma M., He Z. Assessment of heavy metals pollution of soybean grains in North Anhui of China // *Sci. Total Environ.* 2019. No. 646. P. 914–922. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.07.335](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.335).

REFERENCES

1. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv* (A manual on chemical analysis of soils), Moscow: Moscow State University, 1970, 488 p.
2. Arlyapov V.A., Volkova Ye.M., Nechayeva I.A., Skvortsova L.S., Soderzhaniye tyazholykh metallov v pochve kak indikator antropogennoho zagryaz-neniya Tul'skoy oblasti (The content of heavy metals in the soil as an indicator of anthropogenic pollution of the Tula region), *Izvestiya Tul'skogo Gos. Universiteta*, Yestestvennyye nauki, 2015, No. 4, pp. 194–204.
3. Bargal'i R., *Biogeokhimiya nazemnykh rastenii* (Biogeochemistry of terrestrial plants), Moscow: GEOS, 2005, 457 p.
4. Il'in V.B., *Biogeokhimiya i agrokhimiya mikroelementov (Mn, Cu, Mo, v) v yuzhnoi chasti Zapadnoi Sibiri* (Biogeochemistry and agrochemistry of trace elements (Mn, Cu, Mo) in the southern part of Western Siberia), Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie RAN, 1973, 401 p.
5. Kovalevskii A.L., Osnovnye zakonomernosti formirovaniya khimicheskogo sostava rastenii (The main laws of the formation of the chemical composition of plants), In: *Biogeokhimiya rastenii* (Biogeochemistry of plants): tr. Buryat. in-ta est. nauk, Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izd-vo, 1969, pp. 6–28.
6. Kolesnikov M.P., Formy kremniya v rasteniyakh (Forms of silicon in plants), *Uspekhi biologicheskoi khimii*, 2001, No. 41, pp. 331–332.
7. Radov A.S., Pustovoi I.V., Korol'kov A.V., *Praktikum po agrokhimii* (Workshop on agrochemistry), Moscow: Kolos, 1971, 335 p.
8. Ramazanova N.I., Akhmedova Z.N., Krugovorot mikroelementov v posevakh pshenitsy na lugovo-kashtanovoi pochve (The microelements cycle in wheat crops on kastanozems), *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, No. 6, pp. 63–67.
9. Ryzhikh L.Yu., Lipatnikov A.I., *Raschety doz primeneniya mineral'nykh udobrenii v sevooborotakh* (Calculations of the doses of mineral fertilizers in crop rotation), Kazan: Kazan University, 2018, 19 p.
10. Ryakhovskiy A.V., Yartsev G.F., Soderzhaniye i zapasy khimicheskikh elementov v pakhotnom sloye osnovnykh tipov i podtipov pochv Orenburgskoy oblasti (Content and stocks of chemical elements in the arable layer of the main types and subtypes of soils in the Orenburg region), *Izvestiya*

Oriensburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006, Vol. 2, No. 10, pp. 108–109.

11. Smagin A.V., Shoba S.A., Makarov O.A., *Ekologicheskaya otsenka pochvennykh resursov i tekhnologii ikh vosproizvodstva (na primere g. Moskvy)* (Environmental assessment of soil resources and technologies for their reproduction (on example of Moscow), Moscow: Moscow state university, 2008, 360 p.

12. Suleimanov S.R., Nizamov R.M., Khozhaistvennyi vynos, koeffitsinty ispol'zovaniya elementov pitaniya podsolnechnikom v zavisimosti ot primeneniya biopreparatov (Household take-out, coefficients of using sunflower nutrition elements depending on the use of biological products), *Vestnik Kazanskogo GAU*, 2015, Vol. 2, No. 36, pp. 151–155.

13. Shopina O.V., Semenkov I.N., Paramonova T.A., Nakoplenie tyazhelykh metallov i ¹³⁷Cs v rastitel'noi produktsii, vyrashchivaemoi na radioaktivno zagryaznennykh chernozemakh Tul'skoi oblasti (The accumulation of heavy metals and ¹³⁷Cs in plant products grown on radioactive contaminated chernozems of the Tula region), *Ecology and Industry of Russia*, 2020, Vol. 24, No. 6, DOI: [10.18412/1816-0395-2020-6-48-53](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-48-53).

14. Boer J.L., Mulrooney S.B., Hausinger R.P., Nickel-dependent metalloenzymes, *Arch. Biochem. Biophys.*, 2014, No. 544, pp. 142–152, DOI: [10.1016/j.abb.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.abb.2013.09.002).

15. Kabata-Pendias A., *Trace elements in soils and plants*, New York: CRC Press, 2011, 467 p.

16. Kabata-Pendias A., Szeke B., *Trace elements in abiotic and biotic environments*, New York: CRC Press, 2015, 391 p.

17. Lavado R.S., Concentration of potentially toxic elements in field crops grown near and far from cities of the Pampas (Argentina), *Journal of Environmental Management*, 2006, Vol. 80, No. 2, pp. 116–119, DOI: [10.1016/j.jenvman.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.003).

18. Liu G., Yu Y., Hou J., Xue W., Liu X., Liu Y., Wanhua W., Ahmed A., Tasawar H., Zhengtao L., An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-acid battery factory, *Ecol. Indic.*, 2014, No. 47, pp. 210–218, DOI: [10.1016/j.ecolind.2014.04.040](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.040).

19. Overesch M., Rinklebe J., Broll G., Neue H.U., Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany), *Environ. Pollut.*, 2007, Vol. 145, No. 3, pp. 800–812, DOI: [10.1016/j.envpol.2006.05.016](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.016).

20. Wang L., Yin X., Gao S., Jiang T., Ma C., In vitro oral bioaccessibility investigation and human health risk assessment of heavy metals in wheat grains grown near the mines in North China, *Chemosphere*, 2020, No. 252, pp. 1–6, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.126522](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126522).

21. Zhang T., Xu W., Lin X., Yan H., Ma M., He Z., Assessment of heavy metals pollution of soybean grains in North Anhui of China, *Sci. Total Environ.*, 2019, No. 646, pp. 914–922, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.07.335](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.335).