

DOI: 10.19112/2413-6174-2024-25-3-36

**ХАРАКТЕР ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ Cs-137
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ**

А.Е. Побилат¹, Н.Н. Рахимова², Т.И. Бурцева², А.И. Байтелова²

¹ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6

² ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,
Российская Федерация, 460000, Оренбург, пр-кт Победы, 13

РЕЗЮМЕ. Рассмотрен характер вертикальной миграции цезия-137 в пяти типах почв степных экосистем Оренбургской области. С учетом полученных результатов разработана методика оценки и прогноза интенсивности миграции цезия-137, определены агрохимические свойства почв, оказывающие значимое влияние на динамику распределение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цезий-137, загрязнения радионуклидами, почва, растение, техногенные выбросы, миграция в почве, содержание в растениях.

Для цитирования: Побилат А.Е., Рахимова Н.Н., Бурцева Т.И., Байтелова А.И. Характер вертикальной миграции Cs-137 в зависимости от агрохимических свойств почв. Микроэлементы в медицине. 2024;25(3):86–89. DOI: 10.19112/2413-6174-2024-25-3-36.

ВВЕДЕНИЕ

Радионуклиды выпадают на земную поверхность в результате ядерных взрывов, при работе и внештатных ситуациях на АЭС. Цезий-137 является высокорadioактивным элементом, представляющий серьезную угрозу жизни и здоровью человека. Попадая на земную поверхность, радионуклид включается в геохимические процессы миграции, через корневую систему попадает в растительность и по пищевых трофическим цепям в организм человека, представляя угрозу здоровью и жизни животных и человека. (Рахимова и др., 2015).

Ц е л ь и с с л е д о в а н и я – изучить вертикальное распределение цезия-137 в зависимости от агрохимических свойств почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование профильной миграции цезия-137 проводили на пяти типах почв со свойственным им агрохимическим составом. Исследование интенсивности вертикальной миграции цезия-137 осуществляли на глубину почвенного профиля 50 см, послойно, с шагом 10 см для целинных почв (Рахимова, 2014).

В табл. 1 представлены значения Cs-137 в различных типах целинных почв.

**Таблица 1. Распределение Cs-137 по вертикальному профилю
в почвах естественных экосистем, Бк/кг**

Почвенный срез, см	Чернозем обыкновенный	Чернозем типичный	Чернозем неполноразвитый щебневатый	Темно-каштановая	Чернозем южный
0–5	18,3±2,3	19,6±3,62	33,9±5,78	15,8±2,37	18,1±2,87
5–10	13,4±2,01	15,1±2,41	14,3±2,14	12,8±1,8	9,4±1,45
10–20	9,2±1,2	11,3±1,36	11,4±1,82	14,6±2,19	12,4±1,61
20–30	9,8±1,37	11,1±1,65	11,4±1,71	13,3±1,12	11,3±2,14
30–40	12,4±1,51	11,0±0,98	11,5±1,49	10,2±1,22	9,8±1,76
40–50	9,1±1,09	9,6±1,44	9,9±1,58	10,3±1,54	10,5±1,57

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный регрессионный анализ позволил получить уравнения регрессии экспоненциального вида, характеризующие концентрационные изменения Cs-137 по профилю:

$C(x) = 14,57 \cdot \exp(-0,06 \cdot x)$ – для чернозема обыкновенного;

$C(x) = 16,95 \cdot \exp(-0,08 \cdot x)$ – для темно-каштановой почвы;

$C(x) = 19,77 \cdot \exp(-0,13 \cdot x)$ – для чернозема типичного;

$C(x) = 15,20 \cdot \exp(-0,08 \cdot x)$ – для чернозема южного;

$C(x) = 40,00 \cdot \exp(-0,28 \cdot x)$ – для чернозема южного неполноразвитого щебневатого.

Концентрация цезия-137 экспоненциально убывает с глубиной в черноземе типичном ($\lambda=0,13$) и в черноземе южном неполноразвитом щебневатом ($\lambda=0,28$). В остальных обследованных типах почв концентрации по почвенному профилю цезия-137 меняются незначительно.

Результаты, полученные при нахождении корреляционной связи между агрохимическими свойствами почв и содержанием радионуклидов цезия-137 по профилю, приведены в табл. 2–8.

Таблица 2. **Корреляционная зависимость между содержанием Cs-137 и агрохимическими показателями чернозема обыкновенного ($p < 0,05$)**

Радионуклид	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	S анион	% солей	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S _{кат}	P ₂ O ₅	K ₂ O
Cs-137	<u>0,99</u>	-0,56	-0,63	0,50	0,58	-0,58	0,02	0,55	<u>0,87</u>	0,05	0,50	<u>0,85</u>	<u>0,89</u>
Радионуклид	гумус	Cu	Zn	S	F	Cr	Mn	Co	Ni	Pb	Cd	As	Hg
Cs-137	<u>0,83</u>	<u>-0,72</u>	-0,30	<u>0,87</u>	-0,31	-0,35	<u>0,81</u>	-0,41	-0,38	<u>-0,77</u>	-0,66	0,32	0,38

Чернозем обыкновенный. На основании данных корреляционного анализа можно отметить, что к числу свойств почв, имеющих сильную положительную корреляционную связь с содержанием цезия-137 в почвенном профиле чернозема обыкновенного следует отнести содержание сульфатов ($r = 0,99$), валового K₂O ($r = 0,89$) и P₂O₅ ($r = 0,85$), обменного калия ($r = 0,87$), гумуса ($r = 0,83$), серы ($r = 0,87$), марганца ($r = 0,81$), стронция-90 ($r = 0,95$). Цезий-137 имеет сильную отрицательную корреляционную связь с медью ($r = -0,72$) и свинцом ($r = -0,77$).

Таблица 3. **Корреляционная зависимость между содержанием Cs-137 и агрохимическими показателями чернозема типичного ($p < 0,05$)**

Радионуклид	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	S анион	% солей	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S _{кат}	P ₂ O ₅	K ₂ O
Cs-137	<u>0,70</u>	0,37	0,41	0,73	0,78	-0,01	-0,04	<u>0,75</u>	0,00	-0,45	0,72	<u>0,88</u>	<u>0,70</u>
Радионуклид	гумус	Cu	Zn	S	F	Cr	Mn	Co	Ni	Pb	Cd	As	Hg
Cs-137	<u>0,98</u>	<u>0,85</u>	0,68	<u>0,97</u>	<u>0,97</u>	0,01	-0,27	<u>0,73</u>	-0,028	0,44	0,06	0,35	0,38

Чернозем типичный. Цезий-137 статистически значимо коррелирует с содержанием сульфатов ($r = 0,70$), катионов магния ($r = 0,75$), валового P₂O₅ ($r = 0,88$) и K₂O ($r = 0,98$), гумуса ($r = 0,85$), цинка и серы ($r = 0,97$), марганца ($r = 0,73$).

Темно-каштановая почва. Цезий-137 статистически значимо коррелирует с такими агрохимическими характеристиками почвы, как содержание сульфатов ($r = 0,71$), pH ($r = -0,89$), HCO₃ ($r = -0,83$), катионов калия ($r = 0,76$), валового P₂O₅ ($r = 0,80$) и K₂O ($r = 0,76$), гумуса ($r = 0,89$) и такими элементами, как медь ($r = -0,73$), марганец ($r = 0,77$), свинец ($r = -0,83$), ртуть ($r = 0,71$) и кадмий ($r = -0,76$).

Таблица 4. Корреляционная зависимость между содержанием Cs-137 и агрохимическими показателями темно-каштановой почвы ($p < 0,05$)

Радионуклид	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	S анион	% солей	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S _{кит}	P ₂ O ₅	K ₂ O
Cs-137	<u>0,71</u>	<u>-0,83</u>	0,08	-0,034	-0,25	<u>-0,89</u>	-0,55	-0,12	<u>0,76</u>	0,11	-0,40	<u>0,80</u>	<u>0,79</u>
Радионуклид	гумус	Cu	Zn	S	F	Cr	Mn	Co	Ni	Pb	Cd	As	Hg
Cs-137	<u>0,89</u>	<u>-0,73</u>	0,64		0,01	-0,47	-0,34	<u>0,77</u>	-0,27	-0,68	<u>-0,83</u>	<u>-0,76</u>	-0,02

Чернозем южный. Между содержанием цезия-137 и содержания валового P₂O₅ ($r = 0,85$) и обменного калия ($r = 0,91$) в почвенном профиле естественных экосистем чернозема южного наблюдается сильная положительная корреляционная связь.

Таблица 5. Корреляционная зависимость между содержанием Cs-137 и агрохимическими показателями чернозема южного ($p < 0,05$)

Радионуклид	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	S анион	% солей	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S _{кит}	P ₂ O ₅	K ₂ O
Cs-137	-0,55	-0,13	-0,17	-0,60	-0,55	0,21	0,15	-0,62	0,91	-0,67	-0,59	0,63	-0,55
Радионуклид	гумус	Cu	Zn	S	F	Cr	Mn	Co	Ni	Pb	Cd	As	Hg
Cs-137	<u>0,85</u>	0,57	-0,19	-0,14	-0,43	-0,47	-0,07	-0,07	-0,35	-0,41	-0,32	-0,25	-0,12

Чернозем южный неполноразвитый щебневатый. К числу свойств почв, имеющих очень сильную положительную корреляционную связь с содержанием Cs-137 в почвенном профиле чернозема южного неполноразвитого щебневатого, следует отнести содержание сульфатов ($r = 0,93$), сумму анионов ($r = 0,79$) и катионов ($r = 0,79$), катионов калия ($r = 0,99$), валового K₂O ($r = 0,98$) и P₂O₅ ($r = 0,89$) гумуса ($r = 0,80$), а также с содержанием элементов меди ($r = 0,73$), цинка ($r = 0,87$), кобальта ($r = 0,71$) и свинца ($r = 0,78$).

Таблица 6. Корреляционная зависимость между содержанием Cs-137 и агрохимическими показателями чернозема южного неполноразвитого щебневатого ($p < 0,05$)

Радионуклид	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	S анион	% солей	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S _{кит}	P ₂ O ₅	K ₂ O
Cs-137	<u>0,93</u>	-0,66	0,55	<u>0,79</u>	0,03	-0,42	0,23	0,58	<u>0,99</u>	-0,40	<u>0,79</u>	<u>0,89</u>	<u>0,93</u>
Радионуклид	гумус	Cu	Zn	S	F	Cr	Mn	Co	Ni	Pb	Cd	As	Hg
Cs-137	<u>0,98</u>	<u>0,80</u>	<u>0,73</u>	<u>0,87</u>	-0,24	-0,59	-0,31	0,49	0,71	0,58	<u>0,78</u>	0,06	-0,34

По результатам проведенных исследований разработана методика оценки и прогноза интенсивности миграции цезия-137 (Rahimova, et al., 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам корреляционного анализа между агрохимическими свойствами почв и содержанием цезия-137 определены характеристики почв, оказывающие максимальное влияние на миграцию радионуклида по почвенному профилю.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Рахимова Н.Н., Ефремов И.В., Горшенина Е.Л. Миграционные способности радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в различных типах почв. Вестник Оренбургского государственного университета. 2015; 10: 412–415. [Rakhimova N.N., Efremov I.V., Gorshenina E.L. Migration abilities of CS-137 and SR-90 radionuclides in various types of soils. Bulletin of Orenburg State University. 2015; 10: 412–415. (In Russ.)].

Рахимова Н.Н. Изучение миграции радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в системе почва – растение. В сб.: Природно-ресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России. сборник статей XII Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией В.А. Селезнева; И.А. Лушкина. 2014; 68–73. [Rakhimova N.N. The study of migration of Cs-137 radionuclides and Sr-90 in the soil–plant system in the collection: Natural resource potential, ecology and sustainable development of Russian regions. collection of articles of the XII International Scientific and Practical Conference. Under the general editorship of V.A. Seleznev; I.A. Pushkin. 2014; 68–73. (In Russ.)].

Rakhimova N., Baitelova A., Solopova V., et al. Recultivation of soils contaminated with radionuclides by phytomelioration. E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering" (ERSME-2023), 31 March 2023. 2023; 376: 1–5.

THE NATURE OF VERTICAL MIGRATION OF Cs-137 DEPENDING ON THE AGROCHEMICAL PROPERTIES OF SOILS

A.E. Pobilat¹, N.N. Rakhimova², T.I. Burtseva², A.I. Baitelova²

¹ Peoples Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
6 Miklukho-Maklaya St. Moscow, 117198, Russian Federation

² Orenburg State University
13 Pobedy Ave., Orenburg, 460000, Russian Federation

ABSTRACT. The article examines the nature of vertical migration of caesium-137 in five types of soils of steppe ecosystems of the Orenburg region. The results obtained made it possible to develop a methodology for assessing and predicting the intensity of vertical migration of Cs-137 along the soil profile, and the physico-chemical characteristics of soils that have the greatest impact on the dynamics of distribution were determined.

KEYWORDS: cesium-137, radionuclide pollution, soil, plant, man-made emissions, migration in soil, content in plants.