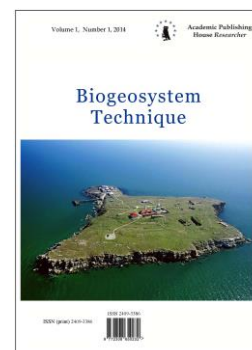


Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation
Biogeosystem Technique
Has been issued since 2014.
ISSN: 2409-3386
E-ISSN: 2413-7316
Vol. 6, Is. 4, pp. 327-344, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.6.327
www.ejournal19.com



Articles and Statements

UDC 544.582 546.73 631.412 633.16

The Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on Bioavailability of ^{60}Co

¹ Vyacheslav S. Anisimov
² Dmitry V. Dikarev
³ Lidia N. Anisimova
⁴ Yury N. Korneev
⁵ Ilja V. Kochetkov

¹⁻⁵ Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Russian Federation
Kievskoe shosse, 109 km, Obninsk, Kaluzhskaya oblast', 249032

¹ PhD (Biology), Head of Laboratory

E-mail: vsanisimov@list.ru

² Researcher

³ PhD (Biology), researcher

E-mail: lanisimovan@list.ru

⁴ Researcher

E-mail: yunkorneev@mail.com

⁵ PhD (Biology), senior researcher

E-mail: ikochetkoff@gmail.com

Abstract

Based on the study of the relationships between the physico-chemical characteristics of different mineral soils that have previously spiked with the same amounts of ^{60}Co , and the uptake of this radionuclide in the above-ground parts of test plants, there were estimated the abilities of the soils to limit the mobility of the radionuclide in the soil – plant system (soils inactivating abilities – SIA). To evaluate the latter in relation to ^{60}Co , the model vegetation pot experiment was carried out in controlled conditions, using as test plant barley (*Hordeum vulgare* L.). With the aim of providing a wide range of variation of the studied physico-chemical parameters, there were selected soil samples from arable and humus-accumulative horizons of the 16 types, species and varieties of soils belonging to different climatic zones of the European part of the Russian Federation in the quantities sufficient for the determination of physical and chemical characteristics of the soils and for the vegetation experiment conducting. Based on the obtained experimental results the effect of each of the selected indicators of soil condition on the radionuclide uptake by test plants was determined. To do this, the methods of principal components and multiple regression analysis were used. At first, the independent variables (physical and chemical indicators of soil condition), which, as supposed, rendered the influence on the uptake of ^{60}Co by plants were selected with use the principal components method. Further, on

the basis of private correlation coefficients, calculated using the linear regression model, the contribution of soil characteristics in SIA was estimated and their ranking was produced. Directly the values of the SIA in relation to the investigated radionuclide, expressed in scores, for each soil were calculated as the sum of products of contributions corresponding soil characteristics in the variation of resultant (concentration ratio – CR ^{60}Co) on a dimensionless quantity, equal to the difference between the specific and minimum values of the soil characteristics (variables) in the sampling to the scale of variation of the relevant variables in the sampling.

Key words: ^{60}Co , natural cobalt, soil, physico-chemical characteristics, barley, factor accumulation, speciation, factor analysis, regression, inactivating the ability.

Введение

Вопросы, связанные с влиянием почвенных свойств на миграционную способность радионуклидов и тяжелых металлов в сопредельные среды и в растительно-животные компоненты экосистем имеют важное практическое значение (особенно применительно к агроэкосистемам – источникам продовольствия и промышленного сырья для человека). Соответственно, поиск наиболее значимых физико-химических характеристик почв, оказывающих влияние на миграцию вышеуказанных поллютантов в системе почва – растение с целью совершенствования прогностических моделей их поведения в агроэкосистемах является актуальной проблемой современной радио- и агроэкологии.

Для системы почва – растение характерны те же виды устойчивости, что и для экосистемы в целом: упругая и неупругая. С точки зрения последней, устойчивость к воздействию загрязняющих веществ (ЗВ) определяется, в частности, способностью почв инактивировать поллютанты. Под этим термином в рамках данной работы подразумевается снижение подвижности ЗВ в системе почва – почвенный раствор – растение. Повышение миграционной способности поллютантов является симптомом экологического неблагополучия, обусловленного переходом почв в неустойчивое состояние. Таким образом, проблема устойчивости почв является одной из фундаментальных проблем современного естествознания.

Целью работы являлась оценка инактивирующей способности почв как важнейшего фактора их эколого-геохимической устойчивости по отношению к «природному» Со и радиологически значимому долгоживущему радионуклиду ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,272$ года, β - и γ -излучатель с максимальной энергией β -излучения 1,33 МэВ), представляющему радиологическую опасность в местах расположения ядерных объектов, и разработка методических подходов для оценки влияния эдафических факторов на подвижность ^{60}Co в системе почва – растение.

Материалы и методы

Была составлена представительная выборка (из 16 типов, видов, разновидностей почв, относящихся к разным климатическим зонам европейской части РФ), обеспечив тем самым широкий диапазон варьирования изучаемых физико-химических показателей, и проведены модельные вегетационные опыты с внесением ^{60}Co .

Для экспериментальных исследований были отобраны образцы из пахотных горизонтов следующих почв: дерново-подзолистая среднесуглинистая, Калужская обл., Боровский р-н, д. Кривское – П^д(К); дерново-подзолистая супесчаная, Калужская обл., Жуковский р-н, д. Передоль – П^д(П); дерново-подзолистая среднесуглинистая, Калужская обл., Жуковский р-н, с. Тарутино – П^д(Т); дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, Калужская обл., Малоярославецкий р-н, с. Недельное – П^д(Н); дерново-подзолистая среднесуглинистая, Калужская обл., городской округ г. Калуга, д. Жерело – П^д(Ж); чернозем выщелоченный, г. Курск – Ч^в(К); чернозем оподзоленный, Тульская обл., г. Ефремов – Ч^о(Еф); светло-серая лесная почва, Калужский р-н, Калужская обл., д. Дронино – Л^{св}(Д); серая лесная почва, Калужская обл., Воротынский р-н, п. Опытное поле – Л^с(В); чернозем выщелоченный, окрестности г. Ельца Липецкой области – Ч^в(Ел); чернозем типичный, окрестности г. Воронежа – Ч^т(В); чернозем типичный, Воронежская обл., с. Рогачевка – Ч^т(Р); чернозем обыкновенный, окрестности г. Ставрополя – Ч^о(Ст); чернозем южный, Ставропольский край, Андроповский р-н, с. Дубовая Балка – Ч^ю(А); чернозем выщелоченный, Ставропольский край, ст. Эссентукская – Ч^в(Ес); дерново-карбонатная,

Ставропольский край, гора Б. Седло, окрестности г. Кисловодска – ДК(Ки), (гумусово-аккумулятивный горизонт).

Исследование проводилось на основе модельного вегетационного опыта, который предусматривал выращивание в контролируемых условиях двухнедельных растений ячменя сорта Зазерский-85 на почвах, искусственно загрязненных ^{60}Co . Уровни загрязнения выбирались с учетом возможностей используемых аналитических методов и надежного измерения радионуклидов в ограниченной биомассе 14-суточных растений. Условия проведения модельного опыта были следующими:

- предварительная подготовка почв к эксперименту включала доведение их до воздушно-сухого состояния, просеивание через сито с диаметром отверстий 2 мм и определение исходных физико-химических характеристик;

- в различные почвы (всего 16 типов, видов и разновидностей) было внесено одинаковое количество радиоизотопа ^{60}Co (в пересчете на дату внесения – 150 кБк/кг). Для этого в просеянную через сито 2 мм воздушно-сухую почву, добавляли деионизированную воду влажности, соответствующей полной влагоемкости (ПВ), после чего в почву вносили растворы $^{60}\text{CoCl}_3$ с расчетной активностью при тщательном перемешивании образовавшейся суспензии. Общая масса почвенной суспензии затем подразделялась на части соответственно числу повторностей опыта, которые помещались в полиэтиленовые вегетационные сосуды. Сосуды с почвой выдерживали при комнатной температуре в течение месяца, в этот период дважды увлажняли дистиллированной водой до 60 % ПВ и подсушивали. Затем образцы почвы еще раз разминали, просеивали через 2 мм сито и отбирали из них пробы для радиометрического анализа. Равномерность распределения ^{60}Co оценивали по результатам γ -спектрометрического анализа образцов почв, подготовленных для разных вариантов опыта. Подготовленные таким образом почвы в дальнейшем использовались для выращивания ячменя;

- в вегетационные сосуды было высеяно одинаковое количество семян тест-культуры – ячменя (*Hordeum vulgare* L.). Перед посевом ячменя почвы увлажняли дистиллированной водой до 60 % от ПВ и высевали семена в количестве 15 штук на сосуд, содержащий 500 г воздушно-сухой почвы. Семена предварительно проращивались в течение двух дней на фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой.

- растения выращивали в течение одинакового периода времени (14 дней) в одинаковых условиях (температура 18-20°C, постоянная влажность почвы 60 % ПВ, освещенность 7000 Лк). Влажность контролировалась ежедневным взвешиванием сосудов. Полив проводили таким образом, чтобы избежать загрязнения растений почвенными частицами в результате разбрызгивания. Размещение поддонов с вегетационными сосудами меняли ежедневно по определенной схеме, чтобы обеспечить более равномерную освещенность растений. На пятнадцатые сутки растения срезали на высоте 0,5 см от поверхности почвы. При уборке регистрировались сырая, воздушно-сухая и абсолютно-сухая (после высушивания растительного материала при 105°C в течение шести часов) массы. В подготовленном к анализу растительном материале определяли удельную активность ^{60}Co (в расчете на абсолютно-сухую массу). Повторность опытов трехкратная. Удельную активность ^{60}Co определяли гамма-спектрометрическим методом (спектрометр ГАММА-1П с полупроводниковым детектором из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 35 %).

Биологическую доступность стабильных «природного» Co, представляющему собой совокупность 2-х стабильных изотопов - ^{57}Co и ^{59}Co , и радионуклида ^{60}Co определяли с помощью коэффициентов накопления (*КН*) – отношения концентрации (удельной активности) металла в абсолютно-сухом растительном материале к его концентрации (удельной активности) в абсолютно-сухой почве.

Физико-химические показатели состояния почв, содержание подвижных, кислоторастворимых форм элементов (табл. 1, 2), определялись общепринятыми методами [1, 2, 3]: рН_{сол.}; содержание фракции физической глины (< 0,01 мм, %); железо подвижное (вытяжка Тамма); $\text{P}_2\text{O}_{5\text{подв.}}$, K_2O (для всех почв, включая дерново-подзолистые, – по Чирикову); содержание подвижных форм Co в почвах; содержание гумуса (по методу Тюрина); состав гумуса в щелочных вытяжках из минеральных почв по методу Кононовой – Бельчиковой, соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул

(E_4/E_6) в гуматах, полученных из щелочных вытяжек из минеральных почв [3, 4]. Содержание кислоторастворимого (потенциально доступного растениям) и валового Со в почве определяли в соответствии [5, 6]. Концентрацию Fe, Со в почвенных вытяжках определяли после соответствующей пробоподготовки оптическим эмиссионным методом (ИСП-ОЭ спектрометр Liberty II фирмы Varian) [5, 7].

Таблица 1

Показатели, характеризующие химические и физические свойства почв

Шифр пробы	Сорг. в почве, %	СЕС, (смоль /kg)	K ₂ O подв., мг/кг	P ₂ O ₅ подв., мг/кг	CaCO ₃ , %	Fe _{подв.} , мг/кг	pH(KCl)	C(ГК)/C(ФК)	E ₄ /E ₆	Фракция <0,01мм, %
Ч ^о (Еф)	3,92±0,02	40,2±0,7	99,9±5,2	57±1	0,28±0,02	1435±131	5,03±0,01	2,05	4,17±0,00	62,3
Ч ^в (Ел)	3,94±0,03	38,4±2,5	127±1	325±74	0,68±0,02	2250±93	6,80±0,01	1,67	3,64±0,01	59,8
ДК(Ки)	5,65±0,06	69,6±9,6	230±8	103±13	5,00±0,13	2990±75	7,02±0,01	0,86	4,45±0,02	51,8
Ч ^о (Ст)	3,32±0,02	38,1±2,6	152±1	109±3	6,79±0,63	2558±13	7,16±0,01	1,58	4,23±0,01	60,9
Ч ^ю (А)	2,39±0,05	34,6±4,8	167±1	121±5	0,51±0,03	5973±45	7,27±0,01	1,43	3,74±0,02	81,6
Ч ^в (Ес)	4,34±0,02	41,4±1,4	279±5	139±6	0,39±0,05	2120±95	6,42±0,02	1,42	3,72±0,02	80,7
Ч ^т (В)	4,29±0,04	47,3±0,1	155±1	202±21	0,14±0,01	2296±119	5,56±0,02	1,84	3,64±0,00	75,5
Ч ^в (К)	2,98±0,11	41,2±0,2	91,9±12,3	164±4	0,13±0,05	621±5	6,01±0,10	0,81	3,66±0,02	48,1
Ч ^т (Р)	4,29±0,07	47,2±1,0	158±2	233±4	0,18±0,04	1731±65	6,05±0,05	3,60	3,62±0,02	72,5
Л ^с (В)	1,65±0,02	15,2±0,9	87±2	165±27	0,32±0,02	1840±33	7,55±0,01	1,24	3,82±0,09	36,6
П ^д (К)	0,77±0,02	10,1±0,2	77,5±5	59±1	0,12±0,02	2618±268	5,97±0,01	0,36	3,99±0,01	42,2
П ^д (Ж)	2,89±0,05	10,3±0,5	60,6±3,4	29±1	0,08±0,11	3322±28	4,77±0,01	0,46	4,93±0,15	34,5
П ^д (Т)	1,16±0,01	12,6±1,4	53,7±0,8	244±4	0,10±0,02	2608±230	5,19±0,05	0,71	5,14±0,01	38,9
Л ^{св} (Д)	2,19±0,19	19,8±1,9	93,4±3,3	199±23	0,18±0,03	6635±472	5,66±0,01	0,99	4,71±0,27	37,9
П ^д (Н)	1,18±0,06	18,1±2,3	109±12	473±13	0,31±0,00	2495±7	5,90±0,01	0,55	4,30±0,20	47,2
П ^д (П)	0,85±0,02	6,8±0,3	74,1±1,7	97±3	0,08±0,02	1543±156	5,74±0,06	0,63	4,70±0,11	18,4

Математическая обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью программ MS Excel и Statistica 6.

Результаты и их обсуждение

Определение вклада физико-химических характеристик в регулирование подвижности ⁶⁰Со в системе почва – растение. Существует достаточно много работ, посвященных поиску и ранжированию по степени значимости почвенных характеристик, отвечающих за транслокацию радионуклидов и ТМ в растения. В этой связи можно упомянуть известные исследования [8-10] и др. Однако, как признают и сами авторы, предлагаемый ими перечень основных показателей состояния почв, их вклад в миграционную способность ТМ в системе «почва – растение» (представленный в виде взвешивающих коэффициентов) не является исчерпывающим и требует серьезной доработки.

Особенно интересным, на наш взгляд, является метод оценки инактивирующей способности почв в отношении миграционной способности ТМ в системе «почва –

растение», предложенный В.Б. Ильиным [8]. В основе его лежат принципы, заложенные Г.Я. Ринькисом в разработанной им системе оптимизации минерального питания растений [12]. С целью оценки вклада различных почвенных свойств в формирование буферной способности почв в отношении тяжелых металлов В.Б. Ильиным были творчески использованы результаты классических работ в области агрохимии микроэлементов, проведенных Г.Я. Ринькисом с сотрудниками [12]. Конкретно, В.Б. Ильиным с сотрудниками были отобраны данные об инактивирующем влиянии на тяжелые металлы (Zn, Cd, Pb, Cu, Co) гумуса, физической глины, полугорных оксидов, карбонатов и реакции среды. На базе их была разработана шкала буферности. При этом было сделано допущение, что выявленные в опытах количественные закономерности для перечисленных выше химических элементов распространяются на остальные ТМ, относящиеся к группе металлов, повышающих свою подвижность в кислой среде. В.Б. Ильин произвел ранжирование вышеуказанных показателей в соответствии с предложенной им шкалой буферности и рассчитал их вклад (в баллах) в формирование буферности почв в отношении ТМ с применением специальных поправочных коэффициентов относительно содержания гумуса.

В.Б. Ильин [8] отмечал, что такая информация имеет прямое отношение к экологическому мониторингу и нормированию, поскольку многие из микроэлементов, накапливаясь в почве в избыточном количестве, становятся токсичными для живых организмов и известны как «тяжелые металлы».

В настоящем исследовании мы попытались, применив подходы Ильина – Ринькиса, но, исходя из природного разнообразия физико-химических свойств разных типов и видов некарбонатных и карбонатных почв Европейской части России, установить количественные связи между показателями, отражающими физико-химические свойства почв и, показателем, характеризующим биологическую доступность ^{60}Co (коэффициентом накопления – КН) с использованием тест-культуры ячменя.

В радиозоологии основополагающей является концепция утверждающая прямо пропорциональную зависимость между удельной активностью радионуклидов в растениях ($A_{\text{раст.}}$) и в почве ($A_{\text{почва}}$) в очень широком диапазоне уровней радиоактивного загрязнения [13, 14, 15]:

$$A_{\text{раст.}} = KH \times A_{\text{почва}} \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности KH является функцией как различных свойств почв (кислотности, дисперсности, содержания гумуса, содержания в доступных растениям формах микро- или макроколичеств изотопных и неизотопных носителей и т.д.), так и индивидуальных особенностей растений. Его принято называть «коэффициентом накопления радионуклида – (КН)». Подобное соотношение возможно ввиду чрезвычайно низких (ультрамикро- и наноконцентраций) радионуклидов в почве. В связи с вышесказанным необходимо сделать уточнение применительно к ^{60}Co . Внесенный радионуклид, действительно, находится в исследуемых почвах в чрезвычайно низких концентрациях, однако, в почвах также присутствует в микроколичествах стабильный кобальт (табл. 2). Тем не менее, значительная часть стабильного кобальта в почвах зафиксирована в недоступном растениям состоянии, а потенциально доступные его количества (извлекаемые с помощью 1 М HCl вытяжки) составляют, в среднем, всего лишь около 35 % от валового количества (табл. 2).

**Удельные активности, концентрации и коэффициенты
накопления ^{60}Co ячменем (n=3)**

Шифр пробы	Со (валовый), мг/кг	Со (вытяжка 1М HCl), мг/кг	Удельная активность ^{60}Co , кБк/кг		КН(^{60}Co)
			Почвы	Растения	
Ч ^о (Еф)	13,00±1,28	5,16±0,20	151,0±4,6	3,65±0,21	0,024±0,002
Ч ^в (Ел)	14,74±1,65	5,37±0,04	159,6±15,7	2,05±0,35	0,013±0,003
ДК(Ки)	11,92±0,82	4,57±0,14	154,0±0,7	1,40±0,14	0,009±0,001
Ч ^о (Ст)	13,17±0,14	5,58±0,10	150,5±7,8	2,00±0,71	0,013±0,005
Ч ^ю (А)	17,75±0,24	7,74±0,14	141,9±0,5	2,00±0,71	0,014±0,005
Ч ^в (Ес)	9,16±0,21	3,83±0,11	149,5±4,4	2,25±0,35	0,015±0,002
Ч ^т (В)	17,60±0,62	5,75±0,00	165,4±19,9	2,00±0,00	0,012±0,001
Ч ^в (К)	11,93±0,21	4,01±0,03	149,5±9,7	1,87±0,89	0,013±0,007
Ч ^т (Р)	14,17±0,17	5,88±0,01	151,3±5,8	1,75±0,35	0,012±0,002
Л ^с (В)	10,18±0,09	3,46±0,02	141,1±3,4	5,04±5,11	0,036±0,037
П ^д (К)	12,15±1,78	3,23±0,09	137,0±5,4	10,93±3,93	0,079±0,026
П ^д (Ж)	16,30±0,37	3,10±0,06	141,7±5,7	9,37±1,72	0,066±0,015
П ^д (Т)	16,08±0,63	3,67±0,08	140,1±1,7	12,59±11,56	0,089±0,081
Л ^{св} (Д)	13,45±0,83	5,14±0,49	140,3±11,8	4,60±2,98	0,034±0,024
П ^д (Н)	12,37±0,22	3,55±0,09	139,0±1,7	2,60±0,13	0,019±0,001
П ^д (П)	8,18±0,23	2,08±0,00	152,6±0,8	50,27±8,68	0,330±0,059

При этом, одновременное действие большого числа взаимосвязанных и независимых факторов, как на эдафическом, так и на биологическом уровнях, оказывает влияние на поглощение радионуклида. Это проявляется в виде варибельности значений КН для разных почв и видов растений. Естественно, что свойства почв и видовые особенности растений оказывают модифицирующее воздействие на значение КН. Для выяснения роли эдафических факторов в регулировании накопления ^{60}Co растениями был выбран ряд показателей, характеризующих состояние почв (табл. 1). Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что разброс значений физических и химических показателей состояния, установленных с использованием общепринятых методик [1, 2, 3] для исследуемых почв весьма значителен.

При выборе показателей в расчет были приняты следующие рассуждения:

- практически все физико-химические процессы в почвах на границе раздела твердой и жидкой фаз сосредоточены в пределах фракции физической глины. Это относится и к ионам исследуемого радионуклида – ^{60}Co ;

- подвижные соединения Fe и Mn, также как и органические вещества являются природным концентраторами ионов ТМ (включая исследуемый радионуклид);

- кислотность почвы обусловлена качественным и количественным соотношением присутствующих в ППК катионов H^+ , Al^{3+} , с одной стороны и катионов оснований, с другой стороны, характеризуется рН солевой вытяжки (или обменной кислотностью), гидролитической кислотностью;

- содержание и качественный состав органического вещества почв непосредственно связано со способностью последних ингибировать мобильность ТМ;

- содержащиеся в почвах свободные карбонаты (в основном кальция и магния), а также фосфаты традиционно считаются одним из ключевых факторов в регулировании миграционной способности ТМ и радионуклидов;

- в системе почва – растения, как в процессах сорбции-десорбции в почвах, так и корневого поглощения присутствует прямая конкуренция между внесенным в почву ^{60}Co и природным кобальтом: радионуклид конкурирует с содержащимися в почвах стабильными изотопами Со за энергетически наиболее выгодные места связывания как в почвенном, так и в корневом поглощающем комплексе. Таким образом, между содержанием доступного Со

в почвах и переходом в растения ^{60}Co логично предположить наличие обратно-пропорциональной зависимости. Однако, количество доступного растениям стабильного кобальта очень мало, а переход его в почвенный раствор существенно ниже, чем, например, такого микроэлемента, как Zn. В наших опытах концентрация стабильного Co в центрифужных почвенных растворах, извлеченных из нативной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (ПД(К)) после инкубации ее в течение месяца при $W=60\%$ ПВ не превышала $0.2\ \mu\text{M}$, а Zn составляла $7.0\ \mu\text{M}$, т.е., была в 35 раз больше. Поэтому ожидать существенного вклада стабильного кобальта в миграцию его радиоактивного аналога в системе почва – растение не следует.

Тем не менее, показатель «содержание подвижного кислоторастворимого (потенциально доступного растениям) Co в почве» (табл. 2) был включен в исходную матрицу в качестве независимой переменной. К сожалению, не удалось получить достоверных данных по содержанию в почвах доступных растениям форм стабильного кобальта из-за чрезвычайно низких концентраций и высокой вариабельности его в вытяжках $1\ \text{M}\ \text{CH}_3\text{COONH}_4$ (рН 4.8).

Поскольку присутствующие в почвах элементы питания (NPK) влияют на физиологическое состояние растений, и, соответственно, на процесс корневого поглощения Co, в перечень независимых показателей были включены содержания подвижных P и K в почвах. При этом, как было отмечено ранее, содержащиеся в почвах свободные фосфаты целесообразно рассматривать все-таки в качестве эдафического фактора, поскольку они образуют с ионами кобальта нерастворимые соединения [16]. Роль азотного питания в регулировании корневого поглощения Co сводится к вторичному эффекту «разбавления» при больших дозах азотных удобрений [17]. Поскольку в данном исследовании подобные варианты не рассматривались, содержание азота в почвах было исключено из перечня показателей, регулирующих поступление Co в растения.

Далее, с использованием показателей, характеризующих свойства почв в качестве входных переменных, была проведена параметризация регрессионных моделей, связывающих эти показатели с доступностью растениям ^{60}Co для разных почв, а также произведено их ранжирование по степени вклада в инактивирующую способность почв в отношении радионуклида.

Для этого производилась многоэтапная процедура. Поскольку все определенные физико-химические показатели состояния почв (наблюдаемые, или входные переменные) измерялись в разных единицах, они были подвергнуты процедуре стандартизации. Это означает, что из значений каждой переменной по совокупности наблюдений были вычтены соответствующие средние, а полученная разность нормирована на среднеквадратичное отклонение [18, 19]. Данная процедура включена в пакеты статистической обработки данных, такие как Statistica и др. Затем, с помощью факторного анализа (метода главных компонент) количество входных переменных было редуцировано: взаимозависимые переменные были представлены в виде ортогональных факторов, представляющих собой их линейные комбинации.

Согласно выводам, полученным некоторыми авторами [20, 21, 22], лучшим критерием для определения количества выделяемых факторов при структурном анализе сложных систем является отклонение от линейного хода кривой объяснимой дисперсии, свидетельствующее об изменении вклада очередного фактора в величину объяснимой дисперсии по сравнению с величиной, соответствующей гипотезе об однородной структуре корреляционной матрицы анализируемых признаков. Часто это критерий также называют «критерием Кеттеля» или критерием «каменистой осыпи» [22].

Применение предложенного критерия к матрицам экспериментальных значений позволяет на основании формы кривой объяснимой дисперсии сделать вывод о количестве значимых факторов. С того момента, когда кривая объяснимой дисперсии перестает отклоняться от линейного хода, можно утверждать, что внутренняя структура матрицы остаточных значений исчезает, и главную роль начинают играть не общие факторы, а случайные помехи, часто называемые характерными факторами.

Применительно к полученным экспериментальным данным для начала был построен график вкладов (собственных значений) факторов в объяснимую дисперсию в виде долей от общей дисперсии всех факторов – график «каменистой осыпи» (рис. 1).

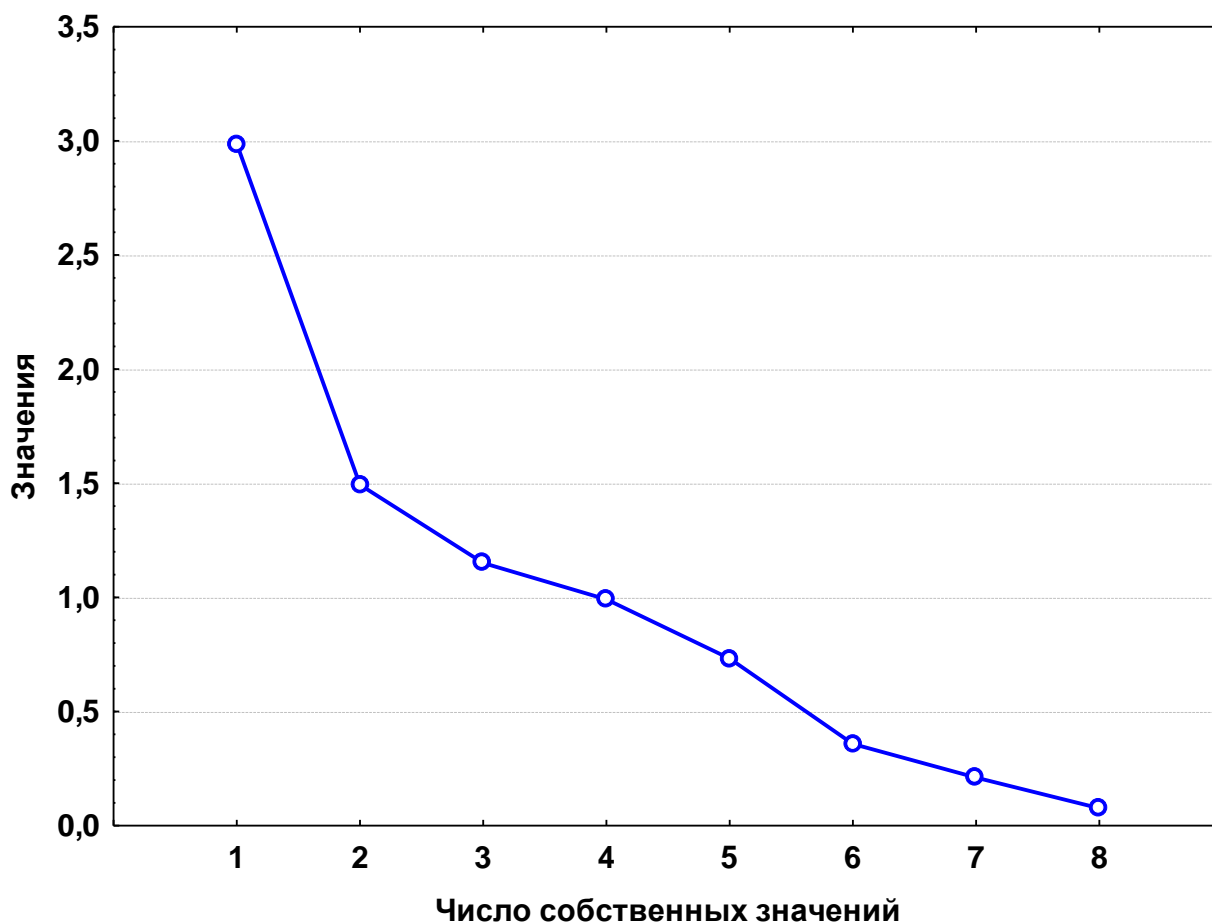


Рис. 1. График «каменистой осыпи» собственных значений всех факторов

На основании критерия «каменистой» осыпи Кэттеля были выбраны 5 факторов с собственными значениями (вкладом в общую дисперсию) превышающим 0.5. В дальнейшем использовался метод главных компонент именно для этих 5-ти факторов. Были получены собственные значения и матрица факторных нагрузок (корреляций выделенных факторов) с независимыми переменными. Матрица была подвергнута вращению на 45° по методу «варимакс» с целью получения более понятной или «интерпретируемой» матрицы факторных нагрузок (табл. 3).

Из таблицы 3 следует, что новая стандартизованная переменная, обозначенная как *Фактор 1* (табл. 4), сильно коррелирует с 3-мя исходными переменными: *Сорг. в почве, %*, *С ГК/С ФК* и *Фракция <0.01 мм, %* (коэффициент множественной корреляции $R=0.98$, коэффициент детерминации $R^2=0.96$, $F(3,12)=95.6$, $p=0$; частный $r^2_{Сорг} = 0.61$; частный $r^2_{СГК/СФК} = 0.69$; частный $r^2_{Фр<0.01} = 0.64$):

$$\text{Фактор1} = f(\text{Сорг.}, \text{С(ГК)/С(ФК)}, \text{Фракция } <0.01 \text{ мм}) = (0.33 \pm 0.08) \times \text{Сорг.} + (0.41 \pm 0.08) \times \text{С(ГК)/С(ФК)} + (0.39 \pm 0.08) \times \text{Фр. } <0.01 \text{ мм} \quad (2)$$

Новая переменная (обозначенная как *Фактор 2*) сильно коррелирует с 2-мя исходными переменными: *pH(KCl)* и *E₄/E₆* (коэффициент множественной корреляции $R=0.93$, коэффициент детерминации $R^2=0.87$, $F(2,13)=45.0$, $p=0$; частный $r^2_{pH(KCl)} = 0.75$; частный $r^2_{E_4/E_6} = 0.41$):

$$\text{Фактор2} = f(\text{pH(KCl)}, \text{E}_4/\text{E}_6) = (0.72 \pm 0.11) \times \text{pH(KCl)} - (0.34 \pm 0.11) \times \text{E}_4/\text{E}_6 \quad (3)$$

Остальные представленные факторы (3–5) сильно коррелируют только с одной переменной каждый (соответственно, с *P₂O₅ подв.*, *Fe подв.* и *CaCO₃*). В дальнейшем множественном регрессионном анализе вместо них были использованы значения самих стандартизованных переменных.

Таблица 3

Факторные нагрузки при вращении варимакс исходных данных (жирным шрифтом отмечены нагрузки > 0,7; 18 наблюдений)

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
С _{орг.} в почве, %	0,81	-0,04	-0,13	-0,11	0,42
P ₂ O ₅ подв. мг/1000 г.п.	0,02	0,06	0,99	-0,02	-0,09
CaCO ₃ , %	0,06	0,17	-0,11	0,02	0,95
Fe _{подв.} , мг/кг	-0,04	-0,00	-0,02	0,99	0,01
pH(KCl)	0,06	0,89	0,06	0,10	0,39
C(ГК)/C(ФК)	0,85	0,08	0,10	-0,13	-0,05
E ₄ /E ₆	-0,58	-0,70	-0,05	0,25	0,25
Фракция <0.01 мм	0,87	0,30	0,04	0,14	-0,01
Общ.дис.	2,49	1,41	1,03	1,11	1,32
Доля общ	0,31	0,18	0,13	0,14	0,16

В итоге, мы имеем дело с 5-ю независимыми (ортогональными) переменными, две из которых являются сложными. Таким образом, зависимая переменная КН ⁶⁰Со является функцией от переменных, которые можно рассматривать в качестве независимых при расчете множественной корреляции между физико-химическими показателями состояния почв и КН ⁶⁰Со.

Теперь, после устранения неортогональности исходных переменных (объединения взаимозависимых переменных) можно приступить к оценке влияния физико-химических свойств почв (выраженных через показатели состояния) на биологическую доступность ⁶⁰Со.

Суть методики заключалась в оценке вклада отдельных характеристик почвенного состояния, играющих наиболее важную роль в регулировании подвижности (и биологической доступности) радионуклидов с использованием метода пошагового множественного регрессионного анализа.

Таблица 4

Значения факторов (новых переменных)

Почва	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Ч ⁰ (Еф)	1,05	-1,18	-0,99	-0,74	-0,42
Ч ^В (Ел)	0,52	0,68	1,29	-0,33	0,07
ДК(Ки)	0,17	-0,07	-0,46	0,12	2,48
Ч ⁰ (Ст)	0,03	0,62	-0,26	-0,08	2,47
Ч ^Ю (А)	0,52	1,59	-0,54	2,26	-0,70
Ч ^В (Ес)	1,00	0,46	-0,42	-0,15	-0,29
Ч ^Т (В)	1,32	-0,32	0,15	-0,20	-0,55
Ч ^В (К)	-0,26	0,48	-0,24	-1,41	-0,51
Ч ^Т (Р)	1,96	-0,25	0,62	-0,61	-0,49
Л ^С (В)	-0,98	1,78	-0,10	-0,65	-0,33
П ^Д (К)	-1,12	0,73	-1,12	-0,11	-0,94
П ^Д (Ж)	-0,50	-1,72	-1,22	0,35	-0,14
П ^Д (Т)	-0,92	-1,45	0,84	0,12	-0,02
Л ^{СВ} (Д)	-0,36	-0,84	0,33	2,34	-0,22
П ^Д (Н)	-0,86	-0,14	2,69	-0,06	-0,11
П ^Д (П)	-1,57	-0,37	-0,58	-0,84	-0,30

При этом была использована линейная модель, связывающая между собой независимые и зависимую (КН ^{60}Co) переменные:

$$Y = b_0 + b_1 \times X_1 + \dots + b_n \times X_n \quad (4)$$

Результаты регрессионного анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5

Итоги множественного регрессионного анализа (зависимая переменная – КН ^{60}Co ($R=0.86$; $R^2=0.73$; $F(7,7)=2.76$, $p<0.102$))

Показатель	БЕТА	Станд. ош. БЕТА	B	Станд. ош. B	t(7)	p-уров.
Св.член			0,033	0,005	6,42	0,000
Со _{кисл.} , МГ/КГ	-0,036	0,642	-0,001	0,019	-0,06	0,956
P ₂ O ₅ подв. МГ/КГ	-0,311	0,215	-0,008	0,006	-1,45	0,192
K ₂ O _{подв.} МГ/КГ	-0,112	0,471	-0,003	0,012	-0,24	0,818
CaCO ₃ , %	-0,273	0,316	-0,007	0,008	-0,87	0,416
Fe, МГ/КГ	0,000	0,421	0,000	0,011	0,00	1,000
Фактор 1	-0,576	0,745	-0,016	0,021	-0,77	0,465
Фактор 2	-0,308	0,350	-0,008	0,009	-0,88	0,409

При обработке данных была произведена выбраковка сомнительного значения КН ^{60}Co , соответствующего дерново-подзолистой супесчаной почве – ПД(П). Поскольку $n \geq 10$, использовалось «правило трех сигм»: если $X_{\text{экстр}}$ лежит вне области, оно может быть отброшено как выброс (среднее значение и стандартное отклонение рассчитываются без учета $X_{\text{экстр}}$).

Квадрат множественного коэффициента корреляции (коэффициент детерминации) составляет 0.73. Таким образом, с помощью выбранных модели и набора переменных можно объяснить 73 % вариабельности результативного признака. Данный результат свидетельствует о корректности предложенных подходов для оценки роли эдафических факторов в биологической доступности ^{60}Co .

В таблице 5 приведены коэффициенты B регрессионного уравнения (4). Если их подставить в формулу (4), то получим линейное регрессионное уравнение, связывающее физико-химические показатели состояния почв с накоплением ^{60}Co в вегетативной массе ячменя:

$$\begin{aligned} \text{КН } ^{60}\text{Co} = & (0.033 \pm 0.005) - (0.016 \pm 0.021) \times \text{Фактор1} - (0.008 \pm 0.009) \times \text{Фактор2} - \\ & (0.008 \pm 0.006) \times P_2O_5 \text{ подв} - (0.007 \pm 0.008) \times CaCO_3 - (0.003 \pm 0.012) \times K_2O \text{ подв} - (0.001 \pm 0.019) \times \\ & Co_{\text{кисл.}} \end{aligned} \quad (5)$$

В результате анализа полученных данных установлено (табл. 6), что наибольший вклад в варьирование результативного признака (КН ^{60}Co) вносит показатель «содержание подвижного фосфора» (частный $r^2_P = 0.23$), далее, в порядке убывания следуют: группа показателей, объединенных под названием фактор 2 (частный $r^2_{\text{факт.2}} = 0.099$), содержание свободных карбонатов (частный $r^2_{CaCO_3} = 0.097$), группа показателей, объединенных под названием фактор 1 (частный $r^2_{\text{факт.1}} = 0.079$), содержание подвижного калия (частный $r^2_K = 0.008$).

**Оценка вклада независимых переменных
в варьирование величины КН ^{60}Co**

Показатель	Бета	Частная	Получаст	Толеран.	R-квадр.	t(9)	p-уров.
Со _{кисл.} , МГ/КГ	-0,04	-0,02	-0,01	0,09	0,91	-0,06	0,96
P ₂ O ₅ подв. МГ/КГ	-0,31	-0,48	-0,28	0,82	0,18	-1,45	0,19
K ₂ O подв. МГ/КГ	-0,11	-0,09	-0,05	0,17	0,83	-0,24	0,82
CaCO ₃ , %	-0,27	-0,31	-0,17	0,38	0,62	-0,87	0,42
Fe, МГ/КГ	0,00	0,00	0,00	0,21	0,79	0,00	1,00
Фактор 1	-0,58	-0,28	-0,15	0,07	0,93	-0,77	0,47
Фактор 2	-0,31	-0,32	-0,17	0,31	0,69	-0,88	0,41

Показатели «содержание подвижного железа и стабильного кобальта» практически не оказывают влияния на варьирование результивного признака: частные r^2_{Fe} , $r^2_{\text{Co}} \rightarrow 0$. Напомним, что квадрат частной корреляции между конкретной независимой переменной и результивным признаком (зависимой переменной), представляет собой долю остаточной дисперсии последнего после корректировки его значений относительно других независимых переменных.

Таким образом, содержание подвижного фосфора, кислотность почв + соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул в гуматах и содержание свободных карбонатов оказывают наибольшее влияние на снижение величины КН ^{60}Co . Количественный и качественный состав органического вещества почв, гранулометрический состав последних оказывают менее значимое воздействие на корневое поглощение ^{60}Co , а подвижный калий, присутствующий в почвах, – слабое. В то время содержание кислоторастворимого стабильного кобальта и подвижного железа не влияют на корневое поглощение ^{60}Co . Все вышеперечисленные показатели связаны с зависимой переменной обратно пропорциональной зависимостью.

Полученные результаты позволяют ранжировать выбранные физико-химические показатели состояния почв по степени влияния на величину коэффициента накопления ^{60}Co ячменем: содержание подвижного фосфора > кислотность почв + соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул в гуматах > свободные карбонаты (кальция и магния) > количественный и качественный состав органического вещества почв и их гранулометрический состав > подвижный калий (рис. 2).

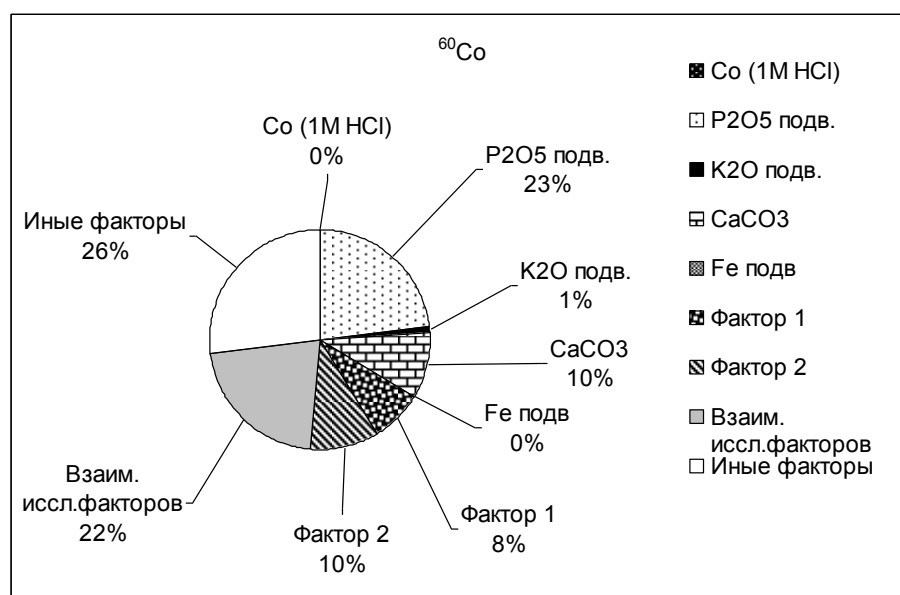


Рис. 2. Вклад эдафических факторов в вариабельность результивного признака – КН ^{60}Co

Общий их вклад в варьирование КН ^{60}Co составляет 51 %. Вклад неучтенных факторов в варьирование КН ^{60}Co равен 27 %. Оставшиеся 22 % можно интерпретировать взаимодействием исследуемых эдафических факторов.

На рис. 3 показана диаграмма рассеяния предсказанных и наблюдаемых значений зависимой переменной – КН ^{60}Co .

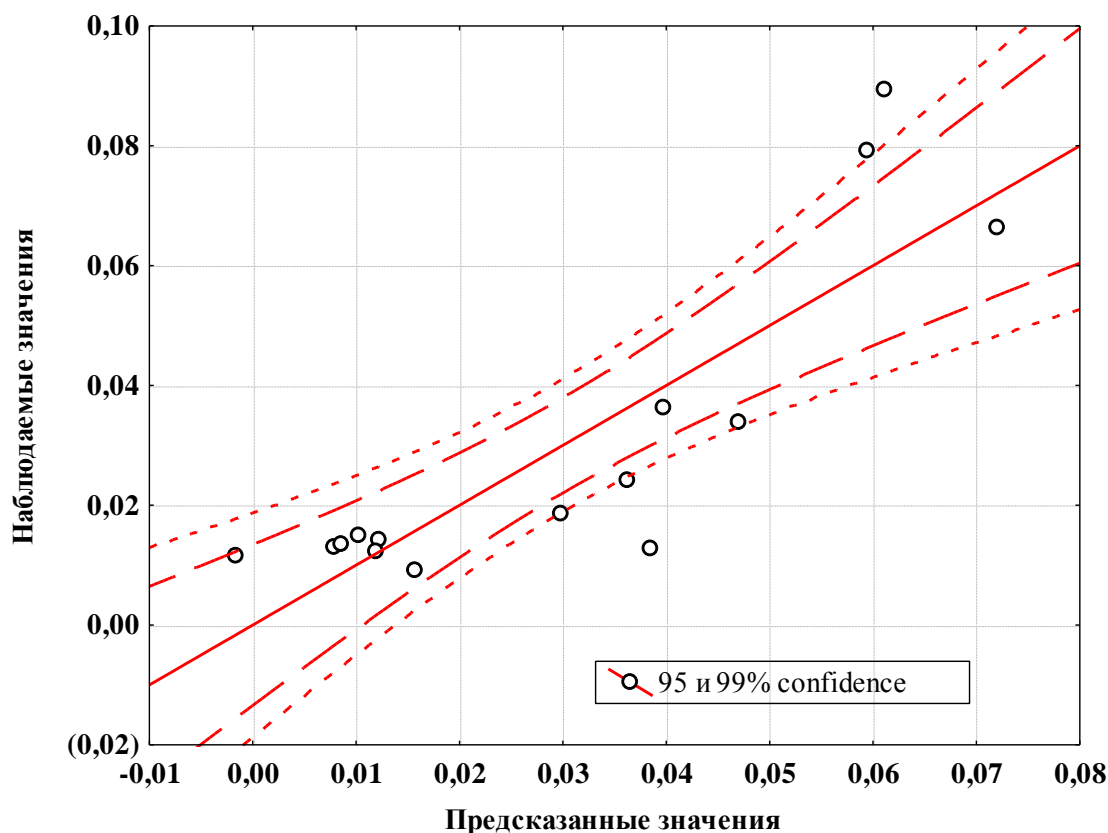


Рис. 3. Результаты множественного регрессионного анализа для зависимой переменной (КН ^{60}Co) – наблюдаемые и предсказанные моделью данные

Как видно из этого рисунка, 60 % экспериментально установленных значений зависимой переменной укладываются в диапазон вдоль линии регрессии, соответствующий 95 %-й доверительной вероятности. При расширении соответствующего диапазона до уровня доверительной вероятности 99 % в него попадает уже 80 % экспериментальных точек.

Проверку адекватности предложенной линейной регрессионной модели экспериментальным данным проводили визуально, с помощью построения нормального вероятностного графика остатков. В нашем случае распределение остатков (разности между экспериментальными и полученными при помощи уравнения регрессии значениями зависимой переменной) хорошо укладывалось на прямую линию, что свидетельствует о нормальном распределении остатков и линейности связи между независимыми и зависимой переменными.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о корректности и приемлемости предложенного подхода, включающего изначальный выбор показателей состояния почв, проведение факторного и множественного регрессионного анализов для выяснения влияния почвенных характеристик на подвижность ^{60}Co в системе почва – растение.

Как и ожидалось, влияние природного Co (присутствующего в подвижной кислоторастворимой форме) на снижение корневого поглощения ^{60}Co в результате конкурентного взаимодействия соответствующих ионов в системе почва – растение не выявлено. Однако, отсутствие связи между корневым поглощением тест-растениями ^{60}Co и

содержанием в почвах подвижного железа вызывает вопросы, которые требуют прояснения в том числе и с помощью дополнительных экспериментов на большей по объему выборке почв в более широком диапазоне изменения их кислотности и гранулометрического состава.

Определение инактивирующей способности (буферности) почв в отношении ^{60}Co с использованием тест-растений.

В рамках стратегий, направленных на минимизацию последствий техногенного загрязнения земель сельскохозяйственного назначения, особое значение имеет понятие устойчивости системы почва – сельскохозяйственные растения к повышенным уровням содержания поллютантов. Для радионуклидов и ТМ в соответствии с ранее изложенными соображениями, это означает способность данной системы, вследствие присущих почвам буферных свойств, ограничивать подвижность радионуклидов и ТМ, и таким образом контролировать транслокацию последних в хозяйственно ценные части урожая. Соответственно, представляется разумным сравнить способность различных почв ограничивать корневое поступление поллютантов в культурные растения) с помощью какого-либо унифицированного показателя, разработанного на основе единого методологического подхода.

Исходя из подхода, представленного выше и позволяющего оценить вклад различных эдафических факторов в миграционную способность ^{60}Co в системе почва – растение с использованием тест-растений, легко оценить и сравнить инактивирующую способность исследованных почв (ИСП) в отношении данного радионуклида. Для этого можно воспользоваться формулой:

$$ИСП_i = \sum_{j=1}^m (Q_j \times \frac{X_{i,j} - X_{i,\min}}{X_{i,\max} - X_{i,\min}}), \quad (6)$$

где $ИСП_i$ – инактивирующая способность i -ой почвы в отношении изучаемого радионуклида, Q_j – вклад соответствующего эдафического фактора (почвенной характеристики: $C_{орг.}$, $P_2O_5_{подв}$ и др.) в варьирование результивного признака ($КН^{60}\text{Co}$), выраженный через частный коэффициент детерминации, r^2_j (см. выше). Вклад каждой из взаимосвязанных между собой переменных ($C_{орг.}$, $C(ГК)/C(ФК)$, $Фракция < 0.01 \text{ мм}$, а также $pH(KCl)$ и E_4/E_6) в варьирование результивного признака должен помимо вклада соответствующего функционала (частного $r^2_{факт.1}$ или $r^2_{факт.2}$) также учитывать вклад каждого из вышеуказанных показателей в варьирование самих функционалов, т.е., частных $r^2_{C_{орг.}} = 0.61$, $r^2_{CГК/СФК} = 0.69$, $r^2_{Фр<0.01} = 0.64$ и частных $r^2_{pH(KCl)} = 0.75$, $r^2_{E_4/E_6} = 0.41$. Достигается это путем перемножения значений вкладов соответствующих факторов (Φ_1 , Φ_2) в варьирование $КН^{60}\text{Co}$ и вкладов соответствующих переменных в Φ_1 и Φ_2 . Знак вклада соответствующего показателя (эдафического фактора) в $ИСП_i$ определяется знаком соответствующего частного коэффициента корреляции: при отрицательном значении r_j , Q_j будет положительным, и наоборот.

Как и ожидалось, для черноземов величины $ИСП_i$ оказались выше, чем для дерново-подзолистых и серых лесных почв. Однако, ввиду того, что определяющим фактором в ограничении перехода ^{60}Co в растения оказалось содержание в почвах подвижного фосфора, а вовсе не количественный и качественный состав органического вещества и степень дисперсности минеральных частиц, то эти расхождения оказались не столь существенными, как ожидалось.

Значения соответствующих величин Q_j , а также рассчитанные в долях единицы значения $ИСП_i$ приведены в табл. 7.

Таблица 7

Показатели, характеризующие ИСП исследуемых почв

Почва	Сорг. В почве, %	K ₂ O подв., мг/кг	P ₂ O ₅ подв., мг/кг	CaCO ₃ , %	Fe подв., мг/кг	pH(KCl)	C(ГК)/C(ФК)	E4/E6	Фракция <0,01 мм, %	Co (1M HCl), мг/кг	ИСП _i
Q_j	0,048	0,008	0,230	0,097	0,000	0,075	0,054	-0,041	0,050	0,000	
Ч ^о (Еф)	0,65	0,26	0,06	0,03	0,14	0,09	0,52	0,36	0,69	0,54	10,6
Ч ^в (Ел)	0,65	0,42	0,67	0,09	0,27	0,73	0,40	0,01	0,66	0,58	30,6
ДК(Ки)	1,00	1,00	0,17	0,73	0,39	0,81	0,15	0,55	0,53	0,44	23,9
Ч ^о (Ст)	0,52	0,56	0,18	1,00	0,32	0,86	0,38	0,40	0,67	0,62	27,0
Ч ^ю (А)	0,33	0,64	0,21	0,06	0,89	0,90	0,33	0,08	1,00	1,00	20,8
Ч ^в (Ес)	0,73	1,28	0,25	0,05	0,25	0,59	0,33	0,07	0,99	0,31	21,6
Ч ^т (В)	0,72	0,57	0,39	0,01	0,28	0,28	0,46	0,01	0,90	0,65	22,1
Ч ^в (К)	0,45	0,22	0,30	0,01	0,00	0,45	0,14	0,03	0,47	0,34	15,8
Ч ^т (Р)	0,72	0,59	0,46	0,01	0,18	0,46	1,00	0,00	0,86	0,67	27,8
Л ^с (В)	0,18	0,19	0,31	0,04	0,20	1,00	0,27	0,13	0,29	0,24	18,3
П ^д (К)	0,00	0,13	0,07	0,01	0,33	0,43	0,00	0,24	0,38	0,20	5,9
П ^д (Ж)	0,43	0,04	0,00	0,00	0,45	0,00	0,03	0,86	0,25	0,18	0,1
П ^д (Т)	0,08	0,00	0,48	0,00	0,33	0,15	0,11	1,00	0,32	0,28	10,9
Л ^{св} (Д)	0,29	0,23	0,38	0,01	1,00	0,32	0,19	0,72	0,31	0,54	12,6
П ^д (Н)	0,08	0,31	1,00	0,03	0,31	0,41	0,06	0,45	0,46	0,26	27,8
П ^д (П)	0,02	0,12	0,15	0,00	0,15	0,35	0,08	0,71	0,00	0,00	3,9
X_{min}	0,77	53,70	29,00	0,08	621	4,77	0,36	3,62	18,40	2,08	
X_{max}	5,65	230,0 0	473,00	6,79	6635	7,55	3,60	5,14	81,60	7,74	

Заключение

В настоящей работе приводится попытка установления количественного вклада различных эдафических факторов (точнее, показателей, отражающих физико-химические свойства почв) в снижение биологической доступности радиоактивного ⁶⁰Со, выраженной через коэффициент накопления радионуклида тест-растениями с использованием подходов, предложенных В.Б. Ильиным и Г.Я. Ринькисом, анализа результатов собственных [23–29] и литературных [30] данных с учетом природного разнообразия физико-химических свойств разных типов, видов и разновидностей минеральных почв Европейской части России, для этого была проведена многоэтапная процедура. Сначала с помощью факторного анализа (метода главных компонент) количество входных переменных (физико-химических показателей состояния почв) было редуцировано: взаимозависимые переменные были представлены в виде ортогональных факторов, представляющих собой их линейные комбинации. В итоге было отобрано пять независимых (ортогональных) переменными, две из которых являлись сложными и были обозначены как фактор 1 и фактор 2. Это позволило использовать модель множественной линейной корреляции между физико-химическими показателями состояния почв и КН ⁶⁰Со. После параметризации и проверки адекватности регрессионных моделей, полученные с их помощью результаты, были использованы для ранжирования выбранных физико-химических показателей состояния почв по степени

влияния на величину коэффициента накопления радионуклида ячменем: содержание подвижного фосфора > кислотность почв + соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул в гуматах > свободные карбонаты (кальция и магния) > количественный и качественный состав органического вещества почв и их гранулометрический состав > подвижный калий. Общий их вклад в варьирование КН ^{60}Co составляет 51 %.

Влияние природного Со на снижение корневого поглощения ^{60}Co в результате конкурентного взаимодействия соответствующих ионов в системе почва – растение не выявлено. Кроме того, установлено, что значительная часть стабильного кобальта в почвах зафиксирована в недоступном растениям состоянии, а потенциально доступные его количества (извлекаемые с помощью 1 М HCl вытяжки) составляют, в среднем, всего лишь около 35 % от валового количества. Однако, отсутствие связи между корневым поглощением тест-растениями ^{60}Co и содержанием в почвах подвижного железа вызывает вопросы, которые требуют прояснения в том числе и с помощью дополнительных экспериментов на большей по объему выборке почв в более широком диапазоне изменения их кислотности и гранулометрического состава.

Значения величин $ИСП_i$ исследованных почв, рассчитанные в долях единицы, варьировали в диапазоне 0.001÷0.306.

Как и ожидалось, для черноземов величины $ИСП_i$ оказались выше, чем для дерново-подзолистых и серых лесных почв. Однако, ввиду того, что определяющим фактором в ограничении перехода ^{60}Co в растения оказалось содержание в почвах подвижного фосфора, а вовсе не количественный и качественный состав органического вещества и степень дисперсности минеральных частиц, то эти расхождения, вопреки первоначальным предположениям, оказались не столь существенными.

Примечания:

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Практикум по агрохимии. / Под ред. В.Г. Минеева. М.: МГУ, 2001. 689 с.
3. Практикум по почвоведению / под ред. И.С. Кауричева. М.: Колос, 1980. 272 с.
4. Kononovova M.M. Soil organic Matter; Its nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility. Oxford. Pergamon Press, 1966. 544 p.
5. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (изд. 2-е, перераб. и дополненное). М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
6. Обухов А.И., Плеханова И.О. Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. М.: Изд-во Московского университета, 1991. 184 с.
7. ISO 22036-2008. Soil quality – Determination of trace elements in extracts of soil by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES)
8. Ильин В.Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // Агрехимия. 1995. № 10. С. 109–113.
9. Васильевская В.Д. Устойчивость почв к антропогенным воздействиям / Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв. / Под ред. Д.С. Орлова, В.Д. Васильевской. М.: МГУ, 1994. С. 61–79.
10. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Эдиторал УРСС, 1999. 168 с.
11. Романова Т.А., Ивахненко Н.Н. Устойчивость пахотных почв Белоруссии к химическому загрязнению // Почвоведение. 2003. № 6. С. 754–763.
12. Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Паэгле Г.В., Куницкая Т.А. Система оптимизации и методы диагностики минерального питания растений. Рига: Зинатне, 1989. 196 с.
13. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 132 с.
14. Радиоактивность и пища человека / Под ред. Рассела Р.С. Пер. с англ. под ред. Ключковского В.М. М.: Атомиздат, 1971. 375 с.
15. Тихомиров Ф.А., Прохоров В.М., Моисеев А.А. и др. Нахождение связи между поступлением цезия-137 в растения и свойствами почвы // Агрехимия. 1978. № 8. С. 116–124.

16. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. Изд-е 4-е перераб. и доп. М.: Изд-во «Химия», 1971. 454 с.
17. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
18. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
19. Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели / В.Д. Мятлев, Л.А. Панченко, Г.Ю. Ризниченко, А.Т. Терехин. М.: Изд. Центр «Академия», 2009. 320 с.
20. Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
21. Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Применение факторного анализа для выявления структурной организации генетических систем биосинтеза запанных белков и изоферментов // Генетика. 1990. т.26. №2. С 341–348.
22. Cattell, R.V. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*. Vol. 1. Is. 2. pp. 245–276.
23. Лаврентьева Г.В., Круглов С.В., Анисимов В.С. Динамика катионного состава почвенного раствора известкованной дерново-подзолистой почвы при загрязнении Со и Сд и изменении рН // Почвоведение. 2008. №9. С. 1092–1100.
24. Круглов С.В., Анисимов В.С., Лаврентьева Г.В., Анисимова Л.Н. Параметры селективной сорбции Со, Си, Zn и Сд дерново-подзолистой почвой и черноземом // Почвоведение 2009. № 4. С. 419–428
25. Фригидов Р.А., Анисимов В.С., Фригидова Л.М. Изучение динамики форм нахождения Zn⁶⁵, Со⁶⁰, Cs¹³⁷ в почвах и накопления их проростками ячменя //Мат. III Межд. конф. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». 23–27.06.2009 г. Томск: STT. С. 622–626.
26. Анисимов В.С., Кочетков И.В., Круглов С.В. и др. Влияние органического вещества на параметры селективной сорбции кобальта и цинка почвами и выделенными из них илистыми фракциями. // Почвоведение. 2011. № 6. С. 675–684.
27. Кочетков И.В., Анисимов В.С., Крикунов И.А., Еремин М.В. Влияние физико-химических свойств почв на биологическую доступность Со⁶⁰. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. №4 С. 50–58.
28. Анисимов В.С., Кочетков И.В., Анисимова Л.Н., Дикарев Д.В. Влияние физических и химических показателей состояния почв на подвижность и биологическую доступность ⁶⁵Zn. // Материалы IV международной конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. С. 53–55.
29. Спирин Е.В., Анисимов В.С., Дикарев Д.В., Кочетков И.В., Крыленкин Д.В. Модель прогноза коэффициентов накопления ¹³⁷Cs в растениях. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2013, том 53, № 2. С. 1-8.
30. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва- растение /Отв. редактор А.И. Сысо. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.

References:

1. Methods for agrochemical soil survey. М.: Nauka, 1975. 656 p.
2. Mineev V.G. (Ed) Practical course on agrochemistry. М.: MSU, 2001. 689 p.
3. Kaurichev I.S. (ed) Practical course on soil science. М.: Kolos, 1980. 272 p.
4. Kononovova M.M. Soil organic Matter; Its nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility. Oxford. Pergamon Press, 1966. 544 p.
5. Methodological guides for HM determination in farm soils and plant products (edition 2 revised and enlarged). М.: CINAО, 1992. 61 p. Obukhov A.I., Plekhanova I.O. Atomic absorption analysis in soil-biological investigations. М.: Moscow University Press, 1991. 184 p.
6. ISO 22036-2008. Soil quality – Determination of trace elements in extracts of soil by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES)

7. Ilyin V.B. Estimation of soil buffering with respect to heavy metals // *Agrokhimia*. 1995. No 10. pp. 109-113.
8. Vasilievskaya V.D. Soil resistance to anthropogenic effects / Soil-environmental monitoring and soil conservation. M.: MSU, 1994. pp. 61-79.
9. Motuzova G.V. Compounds of microelements in soils: systemic organization, ecological importance, monitoring. M.: Editorial URSS, 1999. 168 p.
10. Romanova T.A., Ivakhnenko N.N. Resistance of arable soils of Belorussia to chemical pollution // *Pochvovedenie*. 2003. No 6. pp. 754-763.
11. Rinkis G.Y., Ramane H.K., Paegle G.V., Kunitskaya T.A. An optimization system and diagnostic methods of plant mineral nutrition. Riga. Zinatne, 1989. 196 p.
12. Alexakhin R.M. Radioactive contamination of soil and plants. M.: USSR Acad. Sci. Publisher, 1963. 132 p.
13. Rassel R.S. (Ed) radioactivity and human food (translation from English). M.: Atomizdat, 1971. 375 p.
14. Tikhomirov F.A., Prokhorov V.M., Moiseev A.A., et al. Finding the relation between ^{137}Cs uptake by plants and soil properties // *Agrokhimia*. No 8. 1978. pp. 116-124.
15. Lurie Yu. Yu. Handbook of analytical chemistry. Edition 4 revised and enlarged. M.: «Chimia», 1971. 454 p.
16. Barber S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York, 1995. 376 p.
17. Aivazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Applied statistics: relationships study. M.: Financy i Statistika, 1985. 487 p.
18. Myatlev V.D., Panchenko L.A., Riznichenko G.Y., Terekhin A.T. The theory of probability and mathematical statistics. Mathematical models. M.: Publ. Center "Akademia", 2009. 320 p.
19. Sarapultsev B.I., Geraskin S.A. Genetic principles of radioresistance and evolution. M.: Energoatomizdat, 1993. 208 p.
20. Sarapultsev B.I., Geraskin S.A. The use of factor analysis to identify structural organization of genetic systems of biosynthesis of reserve proteins and izoenzymes // *Genetika*. 1990. Vol. 26. No.2. pp. 341-348.
21. Cattell R.B. The scree test for the number of factors // *Multivariate Behavioral Research*. 1966. Vol. 1. Is. 2. pp. 245-276.
22. Lavrent'eva G.V., Kruglov S.V., Anisimov V.S. Dynamics of the Soil Solution Cationic Composition in a Limed Soddy-Podzolic Soil Contaminated with Co and Cd at Variable pH // *Eurasian Soil Science*. 2008. Vol. 41. No 9. pp. 965-972.
23. Kruglov S.V., Anisimov V.S., Lavrent'eva G.V., Anisimova L.N. Parameters of Selective Sorption of Co, Cu, Zn and Cd by a Soddy-Podzolic Soil and a Chernozem // *Eurasian Soil Science*. 2009. Vol. 42. No 4. pp. 385-393.
24. Frigidov R.A., Anisimov V.S., Frigidova L.M. The Study of ^{65}Zn , ^{60}Co , ^{137}Cs Soil Forms Dynamics and Bioavailability in Different Soils // *Proceedings of III International Conference "Radioactivity and Radioactive Elements in Environment"*. (Tomsk Polytechnic University, June 23-27, 2009). Tomsk. STT Publ. 2009. P. 622-626. (in Russian)
25. Anisimov V.S., Kochetkov I.V., Kruglov S.V., Alexakhin R.M. Effect of Organic Matter on the Parameters of the Selective Sorption of Cobalt and Zinc by Soils and Their Clay Fractions// *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. No 6. pp. 618-627.
26. Kochetkov I.V., Anisimov V.S., Krikunov I.A., Eremin M.V. The Influence of Physico-Chemical Properties of Soils on the Bioavailability of ^{60}Co // *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering*. 2011. No 4. P.50-58. (in Russian)
27. Anisimov V.S., Kochetkov I.V., Anisimova L.N., Dikarev D.V. The Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on ^{65}Zn Bioaccessibility // *Proceedings of IV International Conference "Radioactivity and Radioactive Elements in Environment"* (Tomsk Polytechnic University, June 4-8, 2013). TPU Publishing. 2013. pp. 53-55 (in Russian)
28. Spirin E. V., Anisimov V. S., Dikarev D. V., Kochetkov I. V., Krylenkin D. V. Forecasting Model of Transfer of ^{137}Cs to the Plants // *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2013. Vol. 53. No 2. pp. 1-8 (in Russian)
29. Il'in V.B. Heavy metals and non-metals in the system soil – plant / Executive editor A. I. Syso. Novosibirsk. Publishing House SB RAS 2012. 220 p. (in Russian)

УДК 544.582 546.73 631.412 633.16

Влияние физико-химических характеристик почв на биологическую доступность ^{60}Co ¹ Вячеслав Сергеевич Анисимов² Дмитрий Владимирович Дикарев³ Лидия Николаевна Анисимова⁴ Юрий Николаевич Корнеев⁵ Илья Владимирович Кочетков

¹⁻⁵ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», Российская Федерация

249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе,

¹ Кандидат биологических наук, заведующий лабораторией

E-mail: vsanisimov@list.ru

² Научный сотрудник

³ Кандидат биологических наук, научный сотрудник

E-mail: lanisimovan@list.ru

⁴ Научный сотрудник

E-mail: yunkorneev@mail.com

⁵ Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

E-mail: ikochetkoff@gmail.com

Аннотация. На основании исследования зависимости между физико-химическими характеристиками различных минеральных почв, в которые предварительно было внесено одинаковое количество ^{60}Co , и накоплением этого радионуклида в надземных частях тест-растений была оценена способность почв ограничивать подвижность радионуклида в системе почва – растение (инактивирующая способность почв – ИСП). Для оценки последней в отношении ^{60}Co был проведен в контролируемых условиях модельный вегетационный эксперимент с использованием в качестве тест-растения ячменя (*Hordeum vulgare* L.). С целью обеспечения широкого диапазона варьирования изучаемых физико-химических показателей были отобраны почвенные образцы из пахотных и гумусово-аккумулятивных горизонтов 16 типов, видов и разновидностей почв, относящихся к разным климатическим зонам европейской части РФ в количестве достаточном для проведения вегетационных опытов и определения физико-химических характеристик почв. На основании полученных экспериментальных результатов было определено влияние каждого из выбранных показателей состояния почв на процесс накопления радионуклида растениями. Для этого, с использованием метода главных компонент были отобраны независимые переменные (физико-химические показатели состояния почв), которые, как предполагалось, оказывают влияние на поглощение ^{60}Co растениями. Далее, на основании частных коэффициентов корреляции, рассчитанных с помощью линейной регрессионной модели, был оценен вклад почвенных характеристик в ИСП и произведено их ранжирование. Непосредственно значения ИСП в отношении исследуемого радионуклида, выраженные в баллах, для каждой почвы были получены расчетным путем в виде суммы произведений вкладов соответствующих почвенных характеристик в варьирование результативного признака (КН ^{60}Co) на безразмерную величину, равную отношению разности конкретных и минимальных значений почвенных характеристик в выборке к размаху варьирования соответствующих переменных в выборке.

Ключевые слова: ^{60}Co , природный кобальт, почвы, физико-химические характеристики, ячмень, коэффициент накопления, формы нахождения, факторный анализ, регрессия, инактивирующая способность.