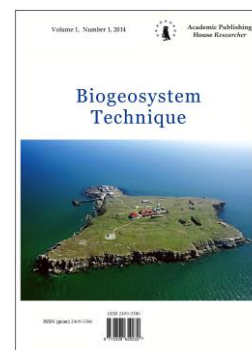




Published in the Slovak Republic  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
2017, 4(2): 122-139

DOI: 10.13187/bgt.2017.2.122  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



## Articles and Statements

### The Study of the Combined Effect of Soil Properties on the Rate of Diffusion of $^{60}\text{Co}$

Vyacheslav S. Anisimov <sup>a, \*</sup>, Dmitry V. Dikarev <sup>a</sup>, Valery V. Ivanov <sup>a</sup>, Tatyana V. Perevolotskaya <sup>a</sup>, Lydia N. Anisimova <sup>a</sup>, Ilya V. Kochetkov <sup>a</sup>, Andrey V. Tomson <sup>a</sup>, Larisa I. Ratnikova <sup>a</sup>, Andrey I. Sanzharov <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Russian Institute of Radiology and Agroecology, Russian Federation

#### Abstract

During the laboratory experiment, devoted to studying of the process of vertical migration  $^{60}\text{Co}$  radionuclide/in water-saturated soil samples of disturbed structure and the same initial bulk density, there were obtained the values of effective diffusion coefficients ( $D_{eff}^{60\text{Co}}$ ) for 8 different types, species and varieties of soils.

There was noted a significant variability of  $D_{eff}^{60\text{Co}}$  for investigated soils due to different soil characteristics. To assess this influence a statistical approach has been used, where edaphic factors representing the most important characteristics of the soils acted as independent variables (predictors), and the dependent (resulting) variable was  $D_{eff}^{60\text{Co}}$ .

Based on the study of the dependence between the main physico-chemical soil properties and the magnitude of effective diffusion coefficients ( $D_{eff}^{60\text{Co}}$ ) the selected physico-chemical characteristics of soils were ranked by degree of influence on the value of the dependent variable:  $\text{pH}_{\text{KCl}} > (\text{fr.} < 0.01) > C_{\text{org}}$ .

There was also identified the contribution of each of the selected indicators of soils state (independent variables) in varying of  $D_{eff}^{60\text{Co}}$ . The contribution for  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , ( $\text{fr.} < 0.01$ ), and  $C_{\text{org}}$  was, respectively, 36,32; 27,90 and 17,08 %. During the experiments revealed a particularly strong increase in the  $D_{eff}^{60\text{Co}}$  for soils with high content of humus in conditions of excessive moisture.

**Keywords:**  $^{60}\text{Co}$ , soil, physico-chemical properties, total water capacity, vertical migration, coefficient of effective diffusion.

#### 1. Введение

Для выработки стратегий, направленных на минимизацию последствий техногенного загрязнения земель сельскохозяйственного назначения, особый интерес представляют современные концепции обращения с земельными ресурсами в рамках экосистемного подхода, в частности, биогеосистемотехника. Последняя представляет «собой совокупность технических решений и технологий управления биогеохимическим циклом вещества биогеосистем в газообразной, жидкой, твердой фазе» (Калиниченко, 2012; Kalinichenko, 2015). Несмотря на то, что в биогеосистемотехнике используются технические средства, синтетические междисциплинарные методы и технологии, не имеющие прямых аналогов в

\* Corresponding author

E-mail addresses: [vsanisimov@list.ru](mailto:vsanisimov@list.ru) (V.S. Anisimov)

природе, они, тем не менее, обеспечивают «создание трансцендентальных, но природоподобных биogeосистем, имеющих более высокую биологическую продуктивность, устойчивость, обеспечивающих утилизацию отходов, деаплинг расходов и продукта производства, высокое качество окружающей среды по сравнению с ранее известными технологиями и природными биogeосистемами» (Glazko, Sister, 2016). В частности, биogeосистемотехника выгодно отличается от технологий индустриальной платформы (Ковальчук и др., 2013) тем, что «вместо накопления экологических проблем предлагает технические и технологические решения, которые позволяют непротиворечиво решать производственные и экологические проблемы ноосферы в едином технологическом цикле, причем с большим производственным результатом и меньшими затратами, как при краткосрочном планировании, так и в отдаленной перспективе» (Kalinichenko, 2015). Кроме того, применение биogeосистемных технологий способствует повышению устойчивости биogeоценозов, что, в свою очередь, обеспечивает долгосрочную экономическую выгоду благодаря производству экологически безопасной биологической продукции.

Безусловно, для эффективного использования современных биogeосистемных технических подходов к решению проблем агроценозов, необходимо знать закономерности и механизмы, лежащие в основе движения и трансформации вещества и энергии в биogeоценозах, которые обеспечивают их устойчивое функционирование. В частности, в условиях техногенного загрязнения окружающей среды персистентными поллютантами типа тяжелых металлов (ТМ) и радионуклидов эффективное использование мелиоративных приемов и защитных мероприятий возможно лишь при глубоком понимании механизмов взаимодействия этих загрязняющих веществ (ЗВ) с почвенным поглощающим комплексом, перехода их в жидкую фазу почв и передвижения в ней, поглощения корнями растений. В данном аспекте проблемы большое значение имеет понятие устойчивости системы почва – почвенный раствор к повышенным уровням содержания ЗВ.

Для системы почва – почвенный раствор – растение характерны те же виды устойчивости, что и для экосистемы в целом: упругая и неупругая. С точки зрения последней, устойчивость системы почва–почвенный раствор к воздействию ЗВ определяется способностью почв к их инактивации. Под этим термином в рамках данной работы подразумевается снижение подвижности ЗВ (например, радионуклидов) в системе почва – почвенный раствор, т.е., способность почв (вследствие присущих им буферных способностей) иммобилизовывать попавшие в почву ЗВ, снижая их подвижность в почвах и миграционную способность в системе почва – растение.

Повышение миграционной способности ЗВ является симптомом экологического неблагополучия, обусловленного переходом почв в неустойчивое состояние. Таким образом, оценка устойчивости почв является одной из фундаментальных проблем современного естествознания.

Вопросы, связанные с влиянием почвенных свойств на способность к миграции радионуклидов в природные воды и растительно-животные компоненты агроэкосистем (источников продовольствия и промышленного сырья для человека) имеют важное практическое значение. Соответственно, поиск наиболее значимых физико-химических характеристик почв, оказывающих влияние на миграцию ЗВ в системе почва – почвенный раствор – растение, с целью совершенствования прогностических моделей их поведения в агроэкосистемах является важной проблемой современной радио- и агроэкологии.

Необходимо отметить, что проблемам, связанным с миграцией основных дозообразующих радионуклидов радиоактивных выпадений и сбросов –  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  посвящено достаточно много работ (Прохоров, 1981; Булгаков и др., 1990; Тихомиров и др., 1990; Анисимов и др., 1991; Алексахин и Корнеев (ред.), 1992; Putyrskaya & Klemt, 2007; Кузнецов и др., 2009; Мамихин и др., 2016; Коноплев и др., 2016; Переволоцкий, Переволоцкая, 2012; Корчагина и др., 2014; Липатов и др., 2014; Takahashi et al., 2015) и др. В то же время вопросам вертикальной миграции в почвах других радионуклидов – продуктов деления и активации ядерного топлива, в частности,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  и, а также выяснению вклада в этот процесс отдельных эдафических факторов, уделялось значительно меньше внимания (Дергунов и др., 1990; Булгаков и др., 1990; Shinonaga et al., 2005; Standinga et al., 2009; Dong et al., 2010; Bondarkov et al., 2011; Ramzaev et al., 2012; Паницкий и др., 2016).

Существует много работ, посвященных поиску и ранжированию по степени значимости почвенных характеристик, влияющих на подвижность в почвах и транслокацию ТМ и радионуклидов в растения. В этой связи можно упомянуть исследования Ф.М. Тихомирова (1978), В.Б. Ильина (1995), Г.В. Мотузовой (1999), В.Д. Васильевской (1994), Т.А. Романовой (2003), В.С. Анисимова (2013, 2015a, 2015b, 2016; М.А. Wasserman et al. (2008) и др. Однако, как признают и сами авторы, предлагаемый перечень основных показателей состояния почв и оценка их вклада в регулирование миграционной способности ТМ в системе почва – растение требуют серьезной доработки.

Особенно интересным, на наш взгляд, является метод оценки инактивирующей способности почв (Ильин, 1995; Кирейчева, Глазунов, 1995; Дмитраков и др., 2012) в отношении миграционной способности ТМ в системе почва – растение, предложенный В.Б. Ильиным (1995). В основе его лежат принципы, заложенные Г.Я. Ринькисом в разработанной им системе оптимизации минерального питания растений (Ринькис и др., 1989). Для оценки вклада различных почвенных свойств в формирование инактивирующей способности почв в отношении ТМ В.Б. Ильиным с сотрудниками были собраны данные об инактивирующем влиянии на ТМ (Zn, Cd, Pb, Cu, Co) различных почвенных характеристик и выявлено, что наибольшее влияние на снижение подвижности (и биологической доступности) оказывали: гумус, содержание физической глины,  $R_2O_3$ , карбонатов и рН. На базе этих показателей (почвенных характеристик) была разработана шкала буферности. При этом сделано допущение, что выявленные в опытах количественные закономерности для перечисленных 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 (инактивирующей способности) почв в отношении ТМ и рассчитал их вклад (в баллах) в формирование инактивирующей способности почв с применением специальных поправочных коэффициентов относительно содержания гумуса.

В настоящем исследовании мы попытались, применив подходы Ильина–Ринькиса, но, исходя из природного разнообразия физико-химических характеристик разных типов и видов некарбонатных и карбонатных почв европейской части России, установить количественные связи между показателями, отражающими физико-химические свойства почв и, показателем, характеризующим подвижность ионов  $^{60}Co$  во влагонасыщенной почве, – эффективным коэффициентом диффузии ( $D_{эф}^{60Co}$ ).

Цель работы – оценка роли почвенных характеристик в формировании инактивирующей способности как важнейшего фактора эколого-геохимической устойчивости почв по отношению к долгоживущему радионуклиду  $^{60}Co$  ( $T_{1/2} = 5.272$  года), представляющему радиологическую опасность в местах расположения ядерных объектов, и разработка методических подходов к оценке влияния эдафических факторов на подвижность  $^{60}Co$  в системе почва – почвенный раствор.

## 2. Объекты и методы

Была составлена выборка из 8 минеральных почв, относящихся к 4-м типам, представляющим разные климатические зоны европейской части России и Урала, что обеспечило достаточно широкий диапазон варьирования изучаемых физико-химических показателей, и проведены модельные опыты с внесением  $^{60}Co$ .

Для экспериментальных исследований отобрали образцы из пахотных (гумусовых) горизонтов следующих почв: дерново-подзолистой среднесуглинистой ( $П^A(K)$ ) – д. Кривское Боровского района Калужской области; дерново-подзолистой супесчаной ( $П^A(П)$ ) – д. Передоль Жуковского района Калужской области; дерново-подзолистой тяжелосуглинистой ( $П^A(H)$ ) – с. Недельное Малоярославецкого района Калужской области; чернозема выщелоченного ( $Ч^B(K)$ ) – д. Николаевка Медвенского района Курской области; светло-серой лесной почвы ( $Л^{CB}(H)$ ) – д. Николаевка Перемышльского района Калужская области; дерново-неглубокоподзолистой грунтово-глеевой ( $П^A_7$ ) – д. Лашковицы Волосовского района Ленинградской области; дерново-подзолистой легкосуглинистой ( $П^A(B)$ ) – п. Богданово, Рославльского района Смоленской области; бурой лесной (БЗ) – п. Режик Белоярского района Свердловской области.

Исследования проводили на основе модельного лабораторного опыта, который предусматривал изучение вертикальной миграции радионуклида  $^{60}\text{Co}$ , в контролируемых условиях при полной влагоемкости (ПВ) почв. Уровни загрязнения выбирали с учетом возможностей используемых аналитических методов и надежного измерения удельной активности радионуклида в ограниченной массе послойных образцов почв из цилиндрических колонок. Условия проведения модельного опыта были следующими:

– предварительная подготовка почв к эксперименту включала доведение их до воздушно-сухого состояния, просеивание через сито с диаметром отверстий 1 мм и определение исходных физико-химических характеристик;

– исследуемые почвы, пропущенные через сито 1 мм, помещали в цилиндрические пластиковые колонки высотой 70 мм и диаметром 35 мм, добиваясь одинаковой плотности насыпных образцов – 1.25 г/см<sup>3</sup>. Высота слоя почвы в колонках составляла 60 мм. Далее почву в колонках насыщали дистиллированной водой до полной влагоемкости (ПВ) в больших полипропиленовых стаканах. Затем вносили на поверхность почвы одинаковые количества радионуклида  $^{60}\text{Co}$  (в пересчете на дату внесения – 4 кБк), после чего колонки с почвой оставляли в течение около полугода при температуре  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  в полипропиленовых стаканах, которые закрывали для предотвращения испарения. Уровень воды в полипропиленовых стаканах в течение всего эксперимента поддерживался на уровне поверхности почвы в колонках;

– по окончании вышеуказанного периода времени, почвы доставали из цилиндров, позволяли стечь гравитационной влаге, затем разделяли на слои, высушивали и определяли удельную активность  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -спектрометрическим методом (спектрометр Гамма-1П с полупроводниковым детектором из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 35 %).

Для описания формирования вертикального почвенного профиля ионов радионуклида  $^{60}\text{Co}$  предполагалось, что моделью этого процесса может служить одномерная квазидиффузия, временные и пространственные характеристики которой являются решением линейного однородного дифференциального уравнения относительно функции распределения объемной активности радионуклида  $A_v(x,t)$  с начальным условием в виде  $\delta$ -функции Дирака  $A_v(x,0) = Q$ . В эксперименте количество  $Q$  радионуклида вносилось в верхнюю часть колонки с сорбентом (почвой), соответствующую значению координаты  $x=0$ . Поскольку за все время эксперимента в профиль образца почвы мигрировала лишь незначительная часть общей внесенной активности радионуклида, то это привело к следующей формулировке граничного условия для вышеуказанного уравнения в виде  $A_v(0,t) = Q$ . Решение уравнения диффузии для указанных выше условий имеет следующий вид:

$$A_v(x,t) = Q \exp(-x^2/4D_{эф} t) \quad (1)$$

Следует отметить, что специфика миграции радионуклида в почвенном слое обусловлена наличием ряда разнородных факторов, вызванных гетерогенностью среды распространения – неоднородные гранулометрический, фазовый, химический и молекулярный составы почвы. В таком приближении этот процесс может быть описан как и диффузия в модельной однородной среде с использованием эффективной величины  $D_{эф}$  (коэффициента эффективной диффузии  $^{60}\text{Co}$ ), см<sup>2</sup>×с<sup>-1</sup>.

Оценка величины  $D_{эф}$  проводилась методом линейного регрессионного анализа экспериментальных данных с помощью модельной функции (1). Для преобразования её в удобный для регрессионного анализа вид, была введена новая переменная  $r$ , связанная с координатой и временем  $r = x^2/(4t)$ .

Логарифмируя (1) получим:

$$\ln(A_v(r)) = \ln(Q) + B r, \quad (2)$$

где  $B = -1/D_{эф}$

Из (2) следует, что экспериментальные значения величины  $\ln(A_v(r))$  линейно зависят от  $r$ . Тангенс угла наклона регрессионной прямой равен обратному значению коэффициента квазидиффузии  $D_{эф}$ , а свободный член регрессии  $\ln(Q)$ , ордината для  $r=0$ , равен значению общей активности (количеству радионуклида на единицу площади), которая формирует вертикальный профиль объемной активности радионуклида  $^{60}\text{Co}$  колонки. Близость полученного значения  $Q$  к количеству радионуклида, внесенного в колонку в начале эксперимента, служит дополнительным критерием корректности выбора регрессионной прямой.

Физико-химические показатели состояния почв, содержание подвижных форм элементов (табл. 1), определяли общепринятыми методами (Соколов (ред.), 1975; Кауричев (ред.), 1980, Минеев (ред.), 2001):  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ; содержание фракции физической глины ( $<0.01$  мм, %);  $\text{Fe}_{\text{подв}}$  (вытяжка Тамма);  $\text{P}_{\text{подв}}$  (для всех почв по Чирикову); гумуса (методом Тюрина). Повторность опытов трехкратная. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программе Statistica в соответствии с требованиями, изложенными в литературных источниках (Айвазян и др., 1985; Соколов (ред.), 1975; Доспехов, 1985; Мятлев и др., 2009).

### 3. Результаты и их обсуждение

Исследования в рамках эксперимента по определению коэффициентов эффективной диффузии ( $D_{эф}$   $^{60}\text{Co}$ ) в различных типах, видах и разновидностях почв европейской части России и Урала показали, что процесс диффузионного распространения радионуклида в профиле почв происходит с различной интенсивностью (Табл. 1, 2).

**Таблица 1.** Показатели, характеризующие химические и физические свойства почв

Почва	$C_{\text{орг}}$ , %	$\text{P}_2\text{O}_{5\text{подв}}$ , мг/кг, $\times 10^2$	$\text{Fe}_{\text{подв}}$ , г/кг	$\text{pH}_{\text{KCl}}$	Фракция $<0,01$ мм, %, $\times 10$	Коэффициент эффективной диффузии $D_{эф}$ , $\text{см}^2 \times \text{с}^{-1}$ , $\times 10^{-9}$
$\text{Ч}^{\text{B}}(\text{K})$	$2,98 \pm 0,11$	$1,64 \pm 0,04$	$0,621 \pm 0,005$	$6,01 \pm 0,1$	4,81	$14,1 \pm 0,4$
$\text{П}^{\text{Д}}(\text{K})$	$0,77 \pm 0,02$	$0,59 \pm 0,01$	$2,618 \pm 0,268$	$5,97 \pm 0,01$	4,22	$3,23 \pm 0,11$
$\text{Л}^{\text{CB}}(\text{H})$	$2,19 \pm 0,19$	$1,99 \pm 0,23$	$6,635 \pm 0,472$	$5,66 \pm 0,01$	3,79	$10,2 \pm 4,0$
$\text{П}^{\text{Д}}(\text{H})$	$1,18 \pm 0,06$	$4,73 \pm 0,13$	$2,495 \pm 0,007$	$5,9 \pm 0,01$	4,72	$7,75 \pm 0,05$
$\text{П}^{\text{Д}}(\text{П})$	$0,85 \pm 0,02$	$0,97 \pm 0,03$	$1,543 \pm 0,156$	$5,74 \pm 0,06$	1,84	$3,67 \pm 0,22$
$\text{П}^{\text{Д}}(\text{Б})$	$1,33 \pm 0$	$0,163 \pm 0,011$	$1,998 \pm 0,866$	$4,79 \pm 0,07$	2,12	$5,42 \pm 0,47$
$\text{П}^{\text{Д}}_{\text{Г}}$	$1,54 \pm 0,13$	$0,144 \pm 0,015$	$5,012 \pm 0,250$	$3,47 \pm 0,06$	5,35	$4,86 \pm 0,47$
БЗ	$0,61 \pm 0,02$	$0,137 \pm 0,006$	$2,915 \pm 0,153$	$4,3 \pm 0,03$	3,73	$7,71 \pm 0,99$

Связано это с рядом причин, важнейшей из которых является зависимость диффузии ионов  $^{60}\text{Co}$  (точнее, устойчивых аквакомплексов кобальта(II) –  $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ) во влагонасыщенной почве от химического и физического воздействия твердой фазы на движение ионов, проявляющегося в виде адсорбции ионов  $^{60}\text{Co}$ . Количественно оценить величину этого воздействия можно, например, с использованием модели сорбции Ленгмюра, которая описывает связь между растворенной и адсорбированной формой металла. Уравнение изотермы Ленгмюра в линейной форме имеет вид:

$$\frac{C}{q} = \frac{C}{Q_{\text{max}}} + \frac{1}{k_L Q_{\text{max}}}, \quad (3)$$

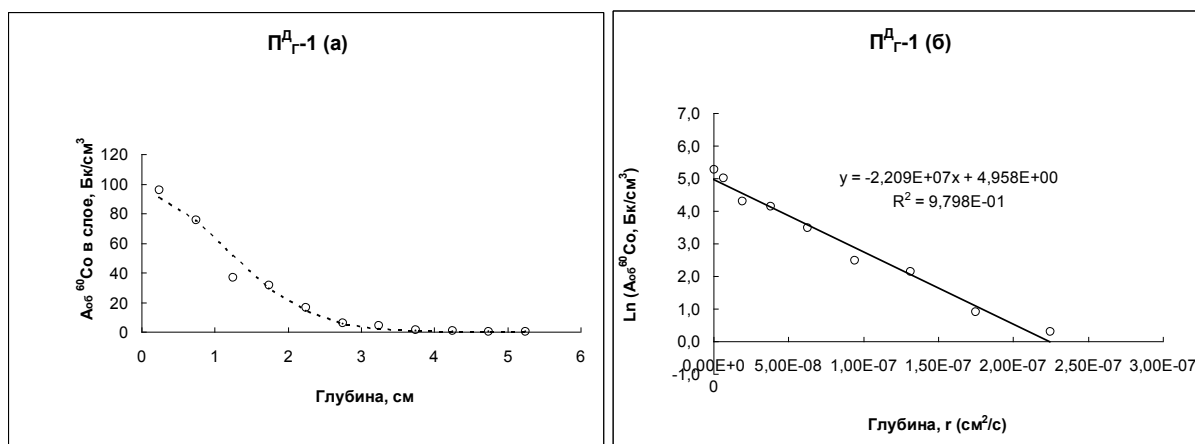
где  $q$  – количество ионов, адсорбированное единицей массы адсорбента, в данном случае почвы (мг–экв  $\text{кг}^{-1}$ );  $Q_{\text{max}}$  – максимальная адсорбция ионов на единицу массы сорбента (мг–экв  $\text{кг}^{-1}$ );  $C$  – равновесная концентрация ионов в растворе (мг–экв  $\text{л}^{-1}$ );  $k_L$  – показатель сорбции, характеризующий связующую силу центров адсорбции в отношении

рассматриваемого иона (л мг–экв<sup>-1</sup>) и представляющий собой константу равновесия адсорбционного процесса, выраженную через отношение констант скоростей адсорбции и десорбции (Фридрихсберг, 1984).

Это означает, что при увеличении количества ионогенных групп сорбента (т.е., с ростом величины  $Q_{max}$  в уравнении Лэнгмюра) скорости процесса диффузии (а, значит, и значения  $D_{эф}$ ) ионов  $^{60}\text{Co}$  через слой влагонасыщенного сорбента должны существенно снизиться. Аналогичная тенденция будет наблюдаться и с возрастанием свободной энергии адсорбции ионных частиц на реакционных центрах (т.е., с ростом величины  $k_L$  в уравнении Лэнгмюра). Именно сочетание этих двух явлений и проявилось в результатах, зафиксированных при проведении колоночных экспериментов (Табл. 1). Так, для почв характерно возрастание поверхностного заряда за счет роста рН-зависимых ионогенных групп почвенного поглощающего комплекса (ППК) с ростом рН. Также теоретически должно наблюдаться увеличение общей свободной энергии адсорбции ионов  $^{60}\text{Co}$  на реакционных центрах ППК при внесении в почву малоподвижных специфических органических веществ, фосфатов, гидроксидов железа, алюминия, марганца, свободных карбонатов и др. химических мелиорантов в результате процессов образования внутрисферных комплексов и хемосорбции.

Для определения величины эффективного коэффициента квазидиффузии  $D_{эф}$  ионов радионуклида  $^{60}\text{Co}$ ,  $D_{эф}$  в настоящей работе применялся линейный регрессионный анализ, описанный выше.

В качестве примера на Рис. 1 приводятся в графической форме распределение объемной активности (Бк/см<sup>3</sup>) радионуклида  $^{60}\text{Co}$  по слоям в образце дерново-неглубокоподзолистой грунтово-глеевой (П<sub>Г</sub><sup>А</sup>) почвы (Ленинградская обл., Ломоносовский р-н.), на основании данных, приведенных в Табл. 2.



**Рис. 1.** Линейная регрессия, применяемая для определения эффективного коэффициента диффузии  $^{60}\text{Co}$  во влагонасыщенном образце дерново-неглубокоподзолистой грунтово-глеевой почвы (д. Лашковицы Волосовского района Ленинградской обл.):

(а) – распределение объемной активности радионуклида по слоям в образце почвы;  
 (б) – линейное преобразование распределения объемной активности  $^{60}\text{Co}$  по слоям в образце почвы в соответствии с формулами (2)

На основе данных регрессии в переменных  $r(x^2/(4t)) - \ln(A_v, \text{Бк/см}^3)$  для двух повторностей опыта определены  $D_{эф}$   $^{60}\text{Co}$  равные  $4,53 \times 10^{-8}$  и  $5,18 \times 10^{-8}$ , соответственно (Табл. 2).

Анализ данных, приведенных в Табл. 1 и 2, позволяет сделать вывод, что способность адсорбировать и удерживать на поверхности твердой фазы  $^{60}\text{Co}$ , проявляющаяся косвенным образом через уменьшение значений  $D_{эф}$ , у нейтральных и слабокислых почв существенно выше, чем у кислых (П<sub>Г</sub><sup>А</sup>).

Несколько более высокие значения  $D_{эф}$  для  $^{60}\text{Co}$ , полученные для почв с высоким содержанием гумуса (Ч<sup>В</sup>(К) и Л<sup>СВ</sup>(Н)), казалось бы, противоречат рассуждениям,

приведенным ранее (поскольку значения  $Q_{max}$  и  $k_L$  для чернозема и серой лесной почвы ожидаемо должны быть наиболее высокими – см., например, (Круглов и др., 2009)). Однако следует принимать во внимание тот факт, что в условиях избыточного увлажнения в почвах достаточно быстро развиваются процессы оглеения, приводящие к смене окислительного режима восстановительным, сопровождающимся повышением pH, резким падением величины окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) почв (особенно с высоким содержанием гумуса). Все это благоприятствует повышению подвижности специфических органических веществ почвы, разрушению оксидов Fe и Mn, органо-минеральных комплексов и, как следствие, снижению общей свободной энергии адсорбции ионов кобальта на ППК, а, значит, увеличению величины  $D_{эф}^{60Co}$ . Интересная гипотеза относительно роли конкурирующих ионов в увеличении величины эффективной диффузии радионуклидов в анаэробных условиях, приведена в работе (Tarasiuk et al., 2007).

**Таблица 2.** Показатели, характеризующие вертикальную миграцию  $^{60}Co$  во влагонасыщенных образцах почв (2 повторности) \*

Почва, (сут)	Слой, см	$^{60}Co$ , Бк/см <sup>3**</sup>	Коэффициент эффективной диффузии $D_{эф}$ , см <sup>2</sup> ×с <sup>-1</sup>	Почва, (сут)	Слой, см	$^{60}Co$ , Бк/см <sup>3</sup>	Коэффициент эффективной диффузии $D_{эф}$ , см <sup>2</sup> ×с <sup>-1</sup>
ЧВ(К) (134)	0–0,3	581,72	$1,38 \times 10^{-8}$	ЧВ(К) (134)	0–0,4	544,66	$1,44 \times 10^{-8}$
	0,3–0,8	10,16			0,4–0,8	13,68	
	0,8–1,3	0,75			0,8–1,3	1,73	
	1,3–1,8	0,20			1,3–1,8	0,67	
	1,8–2,3	0,19			1,8–2,3	0,24	
	2,3–2,8	0,10			2,3–2,8	0,24	
	2,8–3,3	0,00			2,8–3,3	0,19	
П <sup>Л</sup> (К) (239)	0–0,3	878,89	$3,15 \times 10^{-9}$	П <sup>Л</sup> (К) (239)	0–0,4	639,41	$3,30 \times 10^{-9}$
	0,3–0,8	55,79			0,4–0,8	76,16	
	0,8–1,3	8,70			0,8–1,3	10,42	
	1,3–1,8	1,68			1,3–1,8	2,83	
	1,8–2,3	0,50			1,8–2,3	0,96	
	2,3–2,8	0,22			2,3–2,8	0,17	
	2,8–3,3	0,12			2,8–3,3	0,12	
3,3–3,8	0,08	3,3–3,8	0,22				
Л <sup>СВ</sup> (Н) (236)	0–0,8	295,16	$7,38 \times 10^{-9}$	Л <sup>СВ</sup> (Н) (236)	0–0,7	410,11	$1,30 \times 10^{-8}$
	0,8–1,3	15,00			0,7–1,3	7,92	
	1,3–1,9	6,06			1,3–1,9	2,43	
	1,9–2,5	0,07			1,9–2,5	0,36	
	2,5–3,0	0,13			2,5–3,0	0,13	
	3,0–3,6	0,13			3,0–3,6	0,09	
	3,6–4,2	0,08			3,6–4,1	0,13	
4,1–4,6	0,13	4,1–4,6	0,13				
П <sup>Л</sup> (Н) (245)	0–0,4	752,80	$7,41 \times 10^{-9}$	П <sup>Л</sup> (Н) (245)	0–0,5	615,28	$8,09 \times 10^{-9}$
	0,4–0,8	28,89			0,5–0,9	9,36	
	0,8–1,3	2,01			0,9–1,4	1,69	
	1,3–1,8	0,46			1,4–1,9	0,28	
	1,8–2,3	0,33			1,9–2,4	0,22	
	2,3–2,8	0,21			2,4–2,9	0,24	
	2,8–3,3	0,13			2,9–3,4	0,00	
П <sup>Л</sup> (П) (245)	0–0,8	143,31	$3,83 \times 10^{-9}$	П <sup>Л</sup> (П) (245)	0–0,5	274,34	$3,52 \times 10^{-9}$
	0,8–1,3	0,63			0,5–1,0	10,16	

	1,3–1,8 1,8–2,3 2,3–3,0	0,11 0,04 0,02			1,0–1,5 1,5–2,0 2,0–2,5 2,5–3,0	1,29 0,17 0,18 0,06	
П <sup>Д</sup> (Б) (253)	0–0,5 0,5–1,0 1,0–1,5 1,5–2,0 2,0–2,5 2,5–3,0	599,86 12,86 1,94 0,67 0,14 0,00	$5,75 \times 10^{-9}$	П <sup>Д</sup> (Б) (253)	0–0,8 0,8–1,3 1,3–1,8 1,8–2,3 2,3–2,8 2,8–3,4	314,02 8,14 1,75 0,15 0,19 0,12	$5,09 \times 10^{-9}$
П <sup>ДЖ</sup> (232)	0–0,5 0,5–1,0 1,0–1,5 1,5–2,0 2,0–2,5 2,5–3,0 3,0–3,5 3,5–4,0 4,0–4,5 4,5–5,0 5,0–5,5	190,81 150,24 73,16 62,34 32,23 11,83 8,35 2,44 1,34 0,54 0,34	$4,53 \times 10^{-8}$	П <sup>ДЖ</sup> (232)	0–0,5 0,5–1,0 1,0–1,5 1,5–2,0 2,0–2,5 2,5–3,0 3,0–3,5 3,5–4,0 4,0–4,5 4,5–5,0 5,0–5,5 5,5–6,0	222,53 124,02 67,56 35,87 24,31 15,66 7,05 3,77 2,17 1,01 0,68 0,28	$5,18 \times 10^{-8}$
БЗ (132)	0–0,5 0,5–1,0 1,0–1,5 1,5–2,0 2,0–2,5 2,5–3,0	526,52 22,89 3,54 1,49 0,48 0,10	$7,01 \times 10^{-9}$	БЗ (132)	0–0,5 0,5–1,0 1,0–1,5 1,5–2,0 2,0–2,5 2,5–3,0 3,0–3,5 3,5–4,0 4,0–4,5	488,37 24,89 7,02 2,01 0,66 0,31 0,42 0,38 0,12	$8,41 \times 10^{-9}$

\* - значения объемных активностей  $^{60}\text{Co}$  приведены только для слоев, в которых удалось детектировать радионуклид

\*\* - объемная активность  $^{60}\text{Co}$  приведена в пересчете на дату внесения радионуклида

Необходимо отметить, что на эдафическом уровне на величины коэффициентов диффузии оказывает влияние одновременное действие большого числа взаимосвязанных и независимых факторов. Это проявляется в виде вариабельности значений  $D_{эф}$   $^{60}\text{Co}$  для разных почв. Для выяснения роли отдельных почвенных характеристик в регулировании величины  $D_{эф}$   $^{60}\text{Co}$  были выбраны ключевые показатели, характеризующие состояние почв. Результаты, приведенные в табл. 2, показывают, что разброс значений физических и химических показателей состояния 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  $^{60}\text{Co}$ ;

- подвижные соединения Fe и Mn так же, как и органическое вещество, являются природным концентратором ионов ТМ (включая кобальт);



- кислотность почвы обусловлена качественным и количественным соотношением присутствующих в почвенно-поглощающем комплексе 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 контролируют способность последних иммобилизовывать ионы радионуклидов и ТМ;

- содержащиеся в почвах фосфаты, образующие с ионами кобальта нерастворимые соединения, традиционно считаются одними из ключевых факторов в регулировании миграционной способности ТМ.

Из сказанного выше следует вывод: все вышеупомянутые эдафические факторы, безусловно, оказывают воздействие на подвижность  $^{60}Co$  в системе почва – почвенный раствор. Поэтому при статистической обработке отражающие влияние соответствующих факторов показатели состояния почв (почвенные характеристики, или входные переменные) не могут быть исключены как незначимые. В этом случае вклад их в варьирование результативного признака целесообразно включать в качестве экспертной оценки в формулу расчета вклада отдельных входных переменных (почвенных характеристик) в варьирование результирующей переменной.

Значения почвенных характеристик (Табл. 2), приведены в форме, удобной для дальнейшего статистического анализа:  $n \times 10^m$ .

Далее, с использованием показателей, характеризующих свойства почв в качестве входных переменных, была проведена параметризация регрессионных моделей, связывающих эти показатели с подвижностью ионов  $^{60}Co$  во влагонасыщенных почвах, определяемой значениями  $D_{эф}$   $^{60}Co$ , произведено их ранжирование по степени вклада в варьирование результативного признака  $D_{эф}$ . Для этого производилась поэтапная процедура.

Сначала для предварительной оценки вклада эдафических факторов, представленных в виде значений соответствующих почвенных характеристик ( $C_{орг}$ ,  $P_2O_{5подв}$ ,  $Fe_{подв}$ ,  $pH_{KCl}$ , содержание фракции  $< 0,01$  мм) в варьирование результативного признака  $D_{эф}$   $^{60}Co$  был использован множественный регрессионный анализ. Результаты его представлены в Табл. 3.

**Таблица 3.** Результаты множественного регрессионного анализа  $D_{эф}$   $^{60}Co$  от свойств почв ( $k=5$ )\*

Параметр	БЕТА	Стандартная ошибка БЕТА	B	Станд. Ошибка B	t(2)	p-уров.
Св. член			45,8	43,59	1,05	0,40
$C_{орг}$ , %	0,28	0,34	5,2	6,42	0,80	0,51
$P_2O_{5подв}$ , мг/кг	0,01	0,42	0,1	4,05	0,03	0,98
$Fe_{подв}$ , мг/кг	0,05	0,34	0,4	2,61	0,14	0,90
$pH_{KCl}$	-0,71	0,45	-11,3	7,15	-1,58	0,26
Содерж. фр. $< 0,01$ мм, %	0,38	0,38	4,5	4,52	0,99	0,43

\*  $R = 0,904$ ;  $R^2 = 0,818$ , скорректир.  $R^2 = 0,363$   $F(5,2) = 1,7967$ ,  $p < 0,395$ , станд. ошибка оценки: 11,958,  $k$  – количество независимых переменных-предикторов

Из результатов Табл. 3 следует, что, по отдельности, влияние даже наиболее важных с точки зрения влияния на варьирование величины  $D_{эф}$   $^{60}Co$  предикторов:  $pH_{KCl}$ , содержание фракции  $< 0,01$  мм, %,  $C_{орг}$ ; – статистически не значимо. Регрессионный коэффициент для  $pH_{KCl}$  отрицателен, т.е. чем меньше  $pH_{KCl}$ , тем больше коэффициент диффузии. Вклад в регрессию для  $C_{орг}$  и «содержания фракции  $< 0,01$  мм» положителен, т.е. чем больше  $C_{орг}$  и «содержание фракции  $< 0,01$  мм», тем больше коэффициент диффузии. Приняв полученные результаты как предварительные, целесообразно с использованием пошаговой регрессии проанализировать переменные, позволяющие более точно спрогнозировать величину  $D_{эф}$   $^{60}Co$ . Результаты пошагового регрессионного анализа с использованием метода «включения» независимых переменных приведены в Табл. 4.

**Таблица 4.** Результаты пошагового регрессионного анализа  $D_{эф}^{60Co}$  от свойств почв

	Шаг +в/-ис	Множест. R	Множест. R-квадр.	R-квадр. измен.	F - вкл/искл	p-уров.	Перем. включ.
pH <sub>KCl</sub>	1	0,712	0,506	0,506	6,155	0,048	1
Содерж. фр. < 0.01 мм, %	2	0,869	0,755	0,248	5,063	0,074	2
C <sub>орг</sub> , %	3	0,903	0,816	0,061	1,324	0,314	3

В соответствии с результатами пошаговой регрессии с включением независимых переменных, наилучшим образом могут дать оценку  $D_{эф}^{60Co}$  это pH<sub>KCl</sub>, содержание фракции <0,01 мм, % и pH<sub>KCl</sub>.

В таком случае, в общем виде регрессионное уравнение будет следующим:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3, \quad (4)$$

где  $B_0, B_1, B_3$  – коэффициенты регрессионного уравнения (табл. 6),  $X_1, X_2, X_3$  – независимые переменные (показатели состояния почв).

Итоги множественного регрессионного анализа представлены в Табл. 5.

**Таблица 5.** Итоговая таблица множественного регрессионного анализа  $D_{эф}^{60Co}$  от свойств почв ( $k=3$ )\*

Параметр	БЕТА	Стандарт ная Ошибка БЕТА	B	Стандарт ная Ошибка B	t(4)	p-уров.
Св. член			47,12	22,31	2,11	0,10
pH <sub>KCl</sub>	-0,72	0,23	-11,42	3,62	-3,15	0,03
Содерж. фр. < 0.01 мм, %	0,39	0,24	4,64	2,83	1,64	0,18
C <sub>орг</sub> , %	0,28	0,24	5,20	4,52	1,15	0,31

\*  $R = 0,904$ ;  $R^2 = 0,816$ , скорректир.  $R^2 = 0,678$   $F(3,4) = 5,9024$ ,  $p < 0,0596$ , стандартная ошибка оценки: 8,506

Квадрат множественного коэффициента корреляции (коэффициент детерминации) составляет 0,816 ( $F(3,4) = 5,9024$ ,  $p < 0,0596$ ). Таким образом, почти 82 % дисперсии  $D_{эф}^{60Co}$  объясняется уравнением регрессии, 18 % вариабельности зависимой переменной приходится на другие эдафические факторы, не включенные в число предикторов. Вклад избранных предикторов (независимых переменных) в варьирование величины  $D_{эф}^{60Co}$  статистически значим на различных уровнях доверительной вероятности: pH<sub>KCl</sub> (97,1 %), фр.<0,01мм (91,3 %), C<sub>орг</sub> (77,8 %) (Табл. 6). Однако, исходя из вышеизложенного принципа о безусловном вкладе рассматриваемых переменных в варьирование результативной переменной, в окончательную регрессионную модель, связывающую физико-химические показатели состояния почв с накоплением  $^{60}Co$  в вегетативной массе ячменя были включены все эти три независимые переменные:

**Таблица 6.** Вклад отдельных независимых переменных в варьирование  $D_{эф}^{60Co}$ 

	Бета	Частная	Получаст	Толеран.	R-квадр.	t(4)	p-уров.
pH <sub>KCl</sub>	-0,687	-0,858	-0,670	0,953	0,047	-3,34	0,029
Содерж. фр. < 0,01 мм, %	0,463	0,749	0,454	0,960	0,040	2,26	0,087
C <sub>орг</sub> , %	0,296	0,586	0,290	0,961	0,039	1,44	0,222

Окончательное, полученное регрессионное уравнение имеет вид:

$$D_{эф} {}^{60}\text{Co} = 47,12 - 11,42 \times (\text{pH}_{\text{KCl}}) + 4,64 \times (\text{Фр.} < 0,01 \text{ мм}) + 5,20 \times (C_{\text{орг}}). \quad (5)$$

Сопоставление полученных результатов регрессионного анализа с фактическими значениями  $D_{эф} {}^{60}\text{Co}$  приведено в Табл. 7.

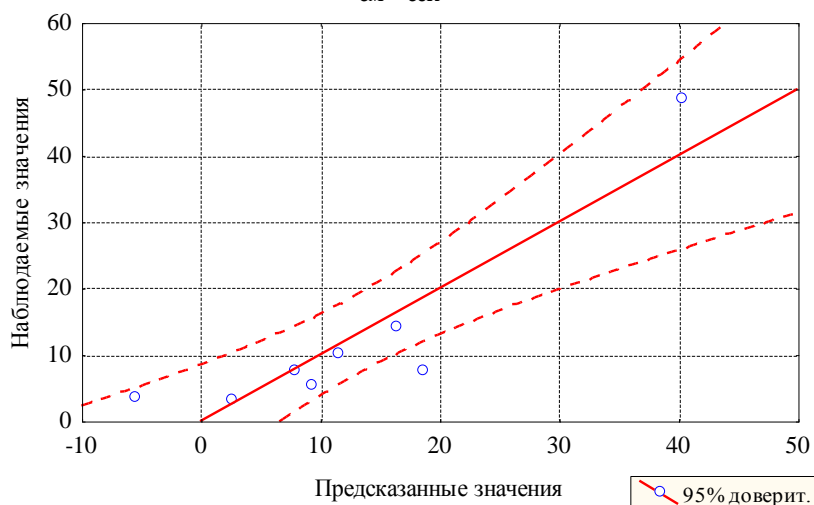
**Таблица 7.** Сопоставление фактических значений  $D_{эф} {}^{60}\text{Co}$  с полученными с помощью линейной регрессионной модели (5)

Почва	Наблюд. знач.	Предск. знач.	Остатки	Станд. предск.	Станд. остатки	Стд.ош. предск.	Махалан. Расст.	Удален. остатки	Кука расст.
ЧВ(К)	14,10	16,31	-2,21	0,28	-0,26	7,04	3,92	-7,04	0,12
ПД(К)	3,23	2,55	0,68	-0,74	0,08	5,96	2,57	1,35	0,00
ЛСВ(Н)	10,20	11,47	-1,27	-0,08	-0,15	4,49	1,08	-1,76	0,00
ПД(Н)	7,75	7,80	-0,05	-0,35	-0,01	5,46	2,01	-0,08	0,00
ПД(П)	3,67	-5,47	9,14	-1,33	1,07	6,04	2,65	18,40	0,59
ПД(Б)	5,42	9,18	-3,76	-0,25	-0,44	6,05	2,67	-7,62	0,10
ПД <sub>Г</sub>	48,60	40,33	8,27	2,05	0,97	7,41	4,44	34,25	3,07
БЗ	7,71	18,50	-10,79	0,44	-1,27	5,13	1,67	-16,94	0,36
Миним.	3,23	-5,47	-10,79	-1,33	-1,27	4,49	1,08	-16,94	0,00
Максим.	48,60	40,33	9,14	2,05	1,07	7,41	4,44	34,25	3,07
Среднее	12,59	12,59	-0,00	0,00	-0,00	5,95	2,63	2,57	0,53
Медиана	7,73	10,33	-0,66	-0,17	-0,08	6,00	2,61	-0,92	0,11

В целом, как видно из Табл. 7, наблюдается удовлетворительная сходимость экспериментально полученных и рассчитанных с помощью аппроксимирующего уравнения регрессии (5) значений  $D_{эф} {}^{60}\text{Co}$ . Дополнительно на Рис. 2. приведено наглядное сравнение результатов, полученных на основе модели множественного регрессионного анализа для зависимых переменных  $D {}^{60}\text{Co}$ , с наблюдаемыми значениями.

#### Предсказанные и наблюдаемые значения

Зависимая переменная: коэффициенты эффективной диффузии,  $D_{эф}$ ,  $\text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$



**Рис. 2.** Сравнение результатов, полученных на основе модели множественного регрессионного анализа для зависимых переменных  $D_{эф} {}^{60}\text{Co}$ , с наблюдаемыми значениями

Как видно, более 85 % экспериментально установленных значений зависимой переменной укладываются в диапазон вдоль линии регрессии, соответствующий 95 % доверительной вероятности. Полученные результаты позволяют ранжировать выбранные физико-химические показатели состояния почв по степени влияния на величину  $D_{эф}^{60Co}$ :  $pH_{KCl} > (фр < 0,01) > C_{орг}$ .

Исходя из значений частных коэффициентов корреляции переменных-предикторов, представленных в табл. 6, можно рассчитать соответствующие им значения коэффициентов детерминации: част.  $r^2$  ( $pH_{KCl}$ ) = 0,74, част.  $r^2$  ( $фр < 0,01$ ) = 0,56; част.  $r^2$  ( $C_{орг}$ ) = 0,34. Соотношения между соответствующими значениями частных коэффициентов детерминации составляют 2,14:1,63:1. Используя эти соотношения и, учитывая, что  $R^2=0,816$ , можно количественно рассчитать вклады  $q_i$  (%) соответствующих предикторов в варьирование  $D_{эф}^{60Co}$ :  $q(pH_{KCl}) = 36,32$ ;  $q(фр < 0,01) = 27,90$ ;  $q(C_{орг}) = 17,08$ .

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 в координатах остатки (наблюдаемые) – рассчитанные (на основании закона нормального распределения) нормированные значения остатков ( $Z$ -значения), что свидетельствует о нормальном распределении остатков и линейности связи между независимыми и зависимой переменными.

#### 4. Заключение

В ходе лабораторных экспериментов по изучению процесса вертикальной миграции радионуклида  $^{60}Co$  в водонасыщенных почвенных образцах нарушенного сложения одинаковой первоначальной насыпной плотности были получены значения эффективных коэффициентов диффузии ( $D_{эф}^{60Co}$ ) для 8 различных почв. Диапазон их изменения составил  $3,23 \div 14,1 \times 10^{-9} \text{ см}^2 \times \text{с}^{-1}$ . Отличие результативного признака ( $D_{эф}^{60Co}$ ) при одинаковых внешних условиях (температура, влажность, плотность, количество внесенного радионуклида и способ его внесения на поверхность почвы) объясняется различием эдафических факторов, влияющих на процесс вертикальной миграции радионуклида. Для оценки этого влияния был использован статистический подход, где эдафические факторы, представляющие важнейшие характеристики почв, выступали в качестве исходных переменных (предикторов), а результативным признаком служил  $D_{эф}^{60Co}$ .

Полученные результаты позволили ранжировать выбранные физико-химические показатели состояния почв по степени влияния на величину  $D_{эф}^{60Co}$ :  $pH_{KCl} > фр < 0,01 > C_{орг}$ . Оцененный вклад вышеуказанных предикторов в варьирование  $D_{эф}^{60Co}$  составил, соответственно, 36,32; 27,90 и 17,08 %.

В ходе опытов был установлен факт особенно сильного увеличения величины  $D_{эф}^{60Co}$  для почв с высоким содержанием гумуса в условиях избыточного увлажнения. Связано это, по-видимому, с тем, что в таких почвах интенсивно развиваются процессы оглеения, приводящие к смене окислительного режима восстановительным, сопровождающимся повышением pH и резким падением величины окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) почв.

Это благоприятствует повышению подвижности специфических органических веществ почвы, разрушению оксидов Fe и Mn, органо-минеральных комплексов и, как следствие, снижению общей свободной энергии адсорбции ионов кобальта ППК, а, значит, росту его подвижности в системе почва – почвенных растворов. Однако, оценка количественных параметров этих процессов, требует проведения дополнительных экспериментов в динамических условиях.

Следует отметить, что существенным недостатком, ограничившим возможности статистического оценивания вклада эдафических факторов, представленных в виде различных почвенных характеристик в варьирование результирующей переменной  $D_{эф}^{60Co}$ , оказался небольшой объем выборки данных. Поэтому, полученные результаты носят предварительный характер. Необходимо продолжение дальнейших исследований в данном направлении. В частности, необходимо увеличить количество экспериментально

полученных пар значений и уточнить усредненные значения  $D_{эф}^{60Co}$ . Это позволит уточнить оценки вклада эдафических факторов в процесс вертикальной миграции в почве радионуклида  $^{60}Co$ .

### Литература

- Айвазян и др., 1985** – Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. (1985). Прикладная статистика: Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 487 с.
- Алексахин и Корнеев (ред.), 1992** – Алексахин Р.М.(ред.), Корнеев Н.А. (ред.). (1992).// Сельскохозяйственная радиоэкология, М.: Экология, 400 с.
- Анисимов и др., 1991** – Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Алексахин Р.М. (1991). О формах нахождения и вертикальном распределении  $^{137}Cs$  в почвах в зоне аварии на Чернобыльской АЭС// *Почвоведение*, № 9, С. 31–40.
- Анисимов и др., 2013** – Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Анисимова Л.Н., Гераськин С.А. Дикарев Д.В., Фригидова Л.М., Фригидов Р.А., Белова Н.В. (2013). Оценка миграционной способности и фитотоксичности Zn в системе почва-растение // *Агрехимия*, № 1, С. 64 – 74.
- Анисимов и др., 2016** – Анисимов В. С., Кочетков И. В., Дикарев Д. В., Анисимова Л. Н., Корнеев Ю. Н., Фригидова Л. М. (2016). Влияние физико-химических характеристик почв на биологическую доступность природного и радиоактивного цинка // *Почвоведение*, № 8, С. 942 – 954.
- Булгаков и др., 1990** – Булгаков А.А., Коноплев А.В., Попов В.Е., Бобовникова Ц.И., Сиверина А.А., Шкуратова И.Г. (1990). Механизмы вертикальной миграции долгоживущих радионуклидов в почвах 30-километровой зоны ЧАЭС. // *Почвоведение*, № 10, С. 14 – 19.
- Васильевская, 1994** – Васильевская В.Д. (1994). Устойчивость почв к антропогенным воздействиям // *Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв*, М.: Изд-во Моск. ун-та, С. 61 – 79.
- Дергунов и др., 1990** – Дергунов И.Д., Шевченко В.С., Криушин Н.В. (1990). Миграция радионуклидов по профилю некоторых почв Узбекистана под влиянием промывных поливов. // *Почвоведение*, № 10, с. 70 – 74.
- Дмитраков и др., 2012** – Дмитраков Л.М., Дмитракова Л.К., Пинский Д.Л., Самсонова В.П. (2012). Буферность почв и нормирование в них тяжелых металлов // *Проблемы агрохимии и экологии*, № 1, С. 53–56.
- Доспехов, 1985** – Доспехов Б.А. (1985). Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) -5-е изд., доп. и перераб, Агропромиздат, 351 с.
- Ильин, 1995** – Ильин В.Б. (1995). Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // *Агрехимия*, № 10, С. 109–113.
- Калиниченко, 2012** – Калиниченко В.П. (2012) Биогосистемотехника: Гносеологические основы управления экосистемами // *Почвоведение и агрохимия*, № 4, С. 72–76.
- Кауричев (ред.), 1980** – Кауричева И.С. (ред.). (1980). Практикум по почвоведению, М.: Колос, 272 с.
- Кирейчева, Глазунов, 1995** – Кирейчева Л.В., Глазунова И.В. (1995). Методы детоксикации почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Почвоведение*, № 7, С. 892 – 896.
- Коноплев и др., 2016** – Коноплев А.В., Голосов В.Н., Йощенко В.И., Нанба К., Онда Ю., Такаса Ц., Вакияма Й. (2016). Вертикальное распределение радиоцезия в почвах зоны аварии на АЭС Фукусима-1// *Почвоведение*, № 5, С. 620 – 632.
- Корчагина и др., 2014** – Корчагина К.В., Смагин А.В., Решетина Т.В. (2014). Оценка техногенного загрязнения городских почв на основе профильного распределения тяжелых металлов и плотности сложения // *Почвоведение*, №8, С. 988 – 998.
- Круглов и др., 2009** – Круглов С.В., Анисимов В.С., Лаврентьева Г.В., Анисимова Л.Н. (2009). Параметры селективной сорбции Co, Cu, Zn и Cd дерново-подзолистой почвой и черноземом // *Почвоведение*, № 4, С. 419 – 428.
- Кузнецов и др., 2009** – Кузнецов В.К., Грунская В.П., Калашников К.Г., Санжарова Н.И. (2009). Особенности распределения  $^{137}Cs$  в агроландшафтах склонов северной части лесостепной зоны// *Агрехимия*, № 2, С.75–86.

**Липатов, Щеглов, 2014** – Липатов Д. Н., Щеглов А. И. (2014). Пространственное варьирование коэффициентов квазидиффузии  $^{137}\text{Cs}$  в серых лесных почвах в дальней зоне загрязнения от Чернобыльской АЭС. // *Радиационная Биология. Радиоэкология*, Том 54, № 5, С. 537 – 546.

**Мамихин и др., 2016** – Мамихин С.В., Голосов В.Н., Парамонова Т.А., Шамишурина Е.Н., Иванов М.М. (2016). Вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в аллювиальных почвах поймы р. Локна (Тульская область) в отдаленный период после аварии на ЧАЭС и его моделирование // *Почвоведение*, № 12, С. 1521 – 1533.

**Минеев (ред.), 2001** – Минеев В.Г. (ред.). (2001). Практикум по агрохимии, М.: Изд-во Моск. ун-та, 689 с.

**Мотузова, 1999** – Мотузова Г.В. (1999). Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: *Эдиторал УРСС*, 168 с.

**Мятлев и др., 2009** – Мятлев В.Д., Панченко Л.А., Ризниченко Г.Ю., Терехин А.Т. (2009). Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели, М.: Академия, 320 с.

**Паницкий и др., 2016** – Паницкий А. В., Лукашенко С. Н., Магашева Р. Ю. (2016). Особенности вертикального распределения радионуклидов в почвах условно-чистой территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона. // *Радиационная Биология. Радиоэкология*, Том 56, № 6, С. 623 – 638.

**Переволоцкий, Переволоцкая, 2012** – Переволоцкий А. Н., Переволоцкая Т. В. (2012). Прогнозирование вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в лесных почвах республики Беларусь // *Радиационная Биология. Радиоэкология*, том 52, № 6, С. 625 – 635.

**Прохоров, 1981** – Прохоров В.М. (1981). Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. М.: Энергоиздат, 98 с.

**Ринькис и др., 1989** – Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Паэгле Г.В., Куницкая Т.А. (1989). Система оптимизации и методы диагностики минерального питания растений. Рига: Зинатне. 196 с.

**Романова, Ивахненко, 2003** – Романова Т.А., Ивахненко Н.Н. (2003). Устойчивость пахотных почв Белоруссии к химическому загрязнению // *Почвоведение*, № 6, С. 754 – 763.

**Соколов (ред.), 1975** – Соколова А.В. (ред.). (1975). Агрохимические методы исследования почв, М.: Наука, 656 с.

**Тихомиров и др., 1978** – Тихомиров Ф.А., Прохоров В.М., Мусеев А.А. и др. (1978). Нахождение связи между поступлением цезия-137 в растения и свойствами почвы // *Агрохимия*, № 8, С. 116 – 124

**Тихомиров и др., 1990** – Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Кляшторин А.Л. (1990). Геохимическая миграция радионуклидов в лесных экосистемах зоны радиоактивного загрязнения ЧАЭС. // *Почвоведение*, № 10, С. 41 – 50.

**Фридрихсберг, 1984** – Фридрихсберг Д.А. (1984). Курс коллоидной химии, Л.: Химия, 368 с.

**Anisimov et al., 2015a** – Anisimov V. S., Kochetkov I.V., Dikarev D.V., Anisimova L.N., Korneev Y.N. (2015). Effects of physical-chemical properties of soils on  $^{60}\text{Co}$  and  $^{65}\text{Zn}$  bioavailability // *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 15. Is. 11. pp. 2232 – 2243. DOI 10.1007/s11368 – 015 – 1153 – z

**Anisimov et al., 2015b** – Anisimov V.S., Dikarev D.V., Anisimova L.N., Korneev Y.N., Kochetkov I.V. (2015). The Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on Bioavailability of  $^{60}\text{Co}$  // *Biogeosystem Technique*, Vol. 6, Is. 4, pp. 327 – 344. DOI: 10.13187/bgt.2015.6.327.

**Bondarkov et al., 2011** – Bondarkov M. D., Zheltonozhsky V. A., Zheltonozhskaya M.V., Kulich N.V., Maksimenko A.M., Farfan E.B., Jannik G.T. and Marra J.C. (2011). Vertical migration of radionuclides in the vicinity of the Chernobyl confinement shelter // *Health Physics*, Vol. 101, No 4, pp. 362 – 367. DOI: 10.1097/HP.obo13e3182166472

**Dong et al., 2010** – Dong W., Tims S. G., Fifield L. K., Guo Q. (2010). Concentration and characterization of plutonium in soils of Hubei in central China // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 101, pp. 29 – 32. doi:10.1016/j.jenvrad.2009.08.011.

**Kalinichenko, 2015** – Kalinichenko V.P. (2015). Biogeosystem Technique as a Paradigm of Non-waste Technology in the Biosphere // *Biogeosystem Technique*, Vol. 3, Is. 1, pp. 4 – 28. DOI: 10.13187/bgt.2015.3.4.

[Putyrskaya & Klemt, 2007](#) – *Putyrskaya V., Klemt E.* (2007). Modeling  $^{137}\text{Cs}$  migration processes in lake sediments // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 96, pp. 54 – 62. doi:10.1016/j.jenvrad.2007.01.017.

[Ramzaev et al., 2012](#) – *Ramzaev V., Repin V., Medvedev A., Khramtsov E., Timofeeva M., Yakovlev V.* (2012). Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made  $\gamma$ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 109, pp. 1 – 12. doi:10.1016/j.jenvrad.2011.12.009.

[Shinonaga et al., 2005](#) – *Shinonaga T., Schimmack W., Gerzabek M.H.* (2005). Vertical migration of  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{226}\text{Ra}$  in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 79, pp. 93 – 106. doi:10.1016/j.jenvrad.2004.05.018.

[Standringa et al., 2009](#) – *Standringa W.J.F., Brown J.E., Dowdall M., Korobova E.M., Linnik V.G., Volosov A.G.* (2009). Vertical distribution of anthropogenic radionuclides in cores from contaminated floodplains of the Yenisey River // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 100, pp. 1109 – 1120. doi:10.1016/j.jenvrad.2009.04.011.

[Takahashi et al., 2015](#) – *Takahashi J., Tamura K., Suda T., Matsumura R., Onda Y.* (2015). Vertical distribution and temporal changes of  $^{137}\text{Cs}$  in soil profiles under various land uses after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 139, pp. 351 – 361. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.07.004>.

[Tarasiuk et al., 2007](#) – *Tarasiuk N., Koviagina E., Kubarevičiene V., Shliahtich E.* (2007). On the radiocesium carbonate barrier in organics-rich sediments of Lake Juodis, Lithuania // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 93, pp. 100 – 118. doi:10.1016/j.jenvrad.2006.12.004.

[Wasserman, 2008](#) – *Wasserman M.A., Bartoly F., Viana A.G., Silva M.M., Rochedo E.R.R., Perez D.V., Conti C.C.* (2008). Soil to plant transfer of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  in Ferralsol, Nitisol and Acrisol // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 99, pp. 546 – 553. doi:10.1016/j.jenvrad.2007.08.010.

## References

[Alexakhin, Korneev \(Eds\), 1992](#) – *Alexakhin R.M. and Korneev N.A.* (Eds). (1992). Agricultural radioecology. Moscow: Ekologia, 400 p. (in Russian)

[Anisimov et al., 1991](#) – *Anisimov V.S., Sanzharova N.I., Alexakhin R.M.* (1991). On the chemical speciation and vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in soils in the zone of Chernobyl NPP // *Pochvovedenie*, No. 9, pp. 31 – 40 (in Russian).

[Anisimov et al., 2013](#) – *Anisimov V. S., Sanzharova N. I. Anisimova L. N., Geras'kin S. A., Dikarev D. V., Frigidova L. M., Frigidov R. A., Belova N. V.* (2013). The assessment of the migration ability and phytotoxicity of Zn in the system soil-plant // *Agrochemistry*, No. 1, pp. 64 – 74 (in Russian)

[Anisimov et al., 2015a](#) – *Anisimov V. S., Kochetkov I.V., Dikarev D.V., Anisimova L.N., Korneev Y.N.* (2015). Effects of physical-chemical properties of soils on  $^{60}\text{Co}$  and  $^{65}\text{Zn}$  bioavailability // *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 15, Is. 11, pp. 2232 – 2243. DOI 10.1007/s11368 – 015 – 1153 – z

[Anisimov et al., 2015b](#) – *Anisimov V.S., Dikarev D.V., Anisimova L.N., Korneev Y.N., Kochetkov I.V.* (2015). The Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on Bioavailability of  $^{60}\text{Co}$  // *Biogeosystem Technique*, Vol. 6, Is. 4, pp. 327 – 344. DOI: 10.13187/bgt.2015.6.327.

[Anisimov et al., 2016](#) – *Anisimov V.S., Kochetkov I.V., Dikarev D.V., Anisimova L.N., Korneev Y.N., Frigidova L.M.* (2016). Effect of the physico-chemical parameters of soils on the biological availability of natural and radioactive zinc // *Eurasian Soil Science*, Vol. 49, No 8, pp. 868 – 878.

[Ayvazyan et al., 1985](#) – *Ayvazyan S. A., Eniukov I. S., Meshalkin L. D.* (1985). Applied statistics: Research of dependences. M.: Finance and statistics, 487 p.

[Bondarkov et al., 2011](#) – *Bondarkov M. D., Zheltonozhsky V. A., Zheltonozhskaya M.V., Kulich N.V., Maksimenko A.M., Farfan E.B., Jannik G.T. and Marra J.C.* (2011). Vertical migration of radionuclides in the vicinity of the Chernobyl confinement shelter // *Health Physics*, Vol. 101, No 4, pp. 362 – 367. DOI: 10.1097/HP.ob013e3182166472

[Bulgakov et al., 1990](#) – *Bulgakov A. A., Konoplev, A.V., Popov V. E., Bobounikova Ts. I., Siverina A. A., Shkuratova, I. G.* (1990). Mechanisms of vertical migration of long-lived

radionuclides in the soils of 30-km zone of the ChNPP // *Pochvovedenie*, No. 10, pp. 14 – 19 (in Russian).

[Dergunov et al., 1990](#) – *Dergunov, I. D., Shevchenko, V. S., Kryuchin N. V.* (1990). The migration of radionuclides in the profile of some soils of Uzbekistan under the influence of leaching flows// *Pochvovedenie*, No. 10, pp. 70 – 74 (in Russian).

[Dmitrakov et al., 2012](#) – *Dmitrakov L. M., Dmitrakova L. K., Pinsky, D. L., Samsonova, V. P.* (2012). Buffer capacity of soils and regulation of heavy metals // *Agrochemistry and ecology problems*, No. 1, pp. 53 – 56 (in Russian).

[Dong, 2010](#) – *Dong W., Tims S. G., Fifield L. K., Guo Q.* (2010). Concentration and characterization of plutonium in soils of Hubei in central China // *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 101, pp. 29 – 32. doi:10.1016/j.jenvrad.2009.08.011.

[Dospechov, 1985](#) – *Dospechov B.A.* Technique of field method. M.: Agropromizdat, 1985, 351 p. (in Russian)

[Fridrikhsberg, 1984](#) – *Fridrikhsberg D. A.* (1984). The course of colloid chemistry. L.: Chemistry, 368 p.

[Glazko and Sister, 2016](#) – *Glazko VI, Sister VG* (2016) Biogeosystem technique as a method to attenuate the conflict between bio-, agri- and techno- spheres. // *ISJ Theoretical & Applied Science*, No 4(36), pp. 46 – 68, doi: <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2016.04.36.9>

[Ilyin, 1995](#) – *Ilyin V. B.* (1995). Evaluation of the buffer capacity of soils with respect to heavy metals // *Agrochemistry*, No. 10, pp. 109 – 113 (in Russian)

[Kalinichenko, 2012](#) – *Kalinichenko V.P.* (2012). Biogeosystem technique: Epistemological foundations of ecosystem management // *Soil Science and Agrochemistry*, № 4, pp. 72 – 76 (in Russian).

[Kalinichenko, 2015](#) – *Kalinichenko V.P.* (2015). Biogeosystem Technique as a Paradigm of Non-waste Technology in the Biosphere // *Biogeosystem Technique*, Vol. 3, Is. 1, pp. 4 – 28. DOI: 10.13187/bgt.2015.3.4.

[Kaurichev \(ed.\), 1980](#) – *Kaurichev I. S.* (ed.). (1980). Practicum on soil science. M.: Kolos, 272 p.

[Kireicheva & Glazunov, 1995](#) – *Kireicheva L. V., Glazunov I. V.* (1995). Methods for detoxification of soils contaminated with heavy metals // *Pochvovedenie*, No 7, pp. 892– 896 (in Russian).

[Konoplev et al., 2016](#) – *Konoplev A.V., Golosov V.N., Yoschenko V.I., Nanba K., Takase T., Onda Y., Wakiyama Y.* (2016). Vertical distribution of radiocesium in soils of the area affected by the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident // *Eurasian Soil Science*, Vol. 49, No 5, pp. 570 – 580.

[Kovalchuk et al., 2013](#) – *Kovalchuk MV, Naraikin OS, Yatsishina E.B.* (2013) Convergence of science and technology – a new stage of technological progress // *Problems of Philosophy*, № 3, pp. 3–11. [Electronic resource]. URL: [http://vphil.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=716&Itemid=52](http://vphil.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=716&Itemid=52) (in Russian) (Access date: 31.07.2016). (in Russian).

[Korchagina et al., 2014](#) – *Korchagina K.V., Smagin A.V., Reshetina T.V.* (2014). Assessing the technogenic contamination of urban soils from the profile distribution of heavy metals and the soil bulk density // *Eurasian Soil Science*, Vol. 47, No 8, pp. 824 – 833.

[Kruglov et al., 2009](#) – *Kruglov S.V., Anisimov V.S., Lavrent'eva G.V., Anisimova L.N.* (2009). Parameters of Selective Sorption of Co, Cu, Zn, and Cd by a Soddy-Podzolic Soil and a Chernozem // *Eurasian Soil Science*, Vol. 42, No. 4, pp. 385 – 393.

[Kuznetsov et al., 2009](#) – *Kuznetsov V. K., Grunsky V. P., Kalashnikov K. G., Sanzharova N. I.* (2009). The features of the <sup>137</sup>Cs distribution within slopes of agricultural landscapes of the Northern part of forest-steppe zone // *Agrochemistry*, No. 2, pp. 75 – 86 (in Russian).

[Lipatov & Shcheglov, 2014](#) – *Lipatov D. N., Shcheglov A. I.* (2014) Spatial variation of the quasi-diffusion coefficients of <sup>137</sup>Cs in gray forest soils in the far zone of contamination from the Chernobyl nuclear power plant // *Radiation Biology. Radioecology*, Vol. 54, No 5, pp. 537 – 546 (in Russian).

[Mamikhin et al., 2016](#) – *Mamikhin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N., Ivanov M.M.* (2016). Vertical distribution of <sup>137</sup>Cs in alluvial soils of the Lokna River floodplain (Tula oblast) long after the Chernobyl accident and its simulation// *Eurasian Soil Science*, Vol. 49, No 12, pp. 1432 – 1442.



- Mineev (ed.), 2001 – Mineev V. G. (ed.). (2001). Practicum on agricultural chemistry. M.: Izd-vo Mosk. University press, 689 p.
- Motuzova, 1999 – Motuzova G. V. (1999). Compounds of trace elements in soil: the systematic organization, ecological significance, monitoring. M.: URSS Editorial, 168 p.
- Myatlev et al., 2009 – Myatlev, V. D., Panchenko L. A., Riznichenko G. Yu., Terekhin A. T. (2009). Probability theory and mathematical statistics. Mathematical models. Moscow: Academy, 320 p.
- Panitsky et al., 2016 – Panitsky A.V., Lukashenko S. N., Magasheva R. Y. (2016). Peculiarities of the vertical distribution of radionuclides in soils of conditionally pure areas of the former Semipalatinsk test site. // Radiation Biology. Radioecology, Vol 56, No. 6, pp. 623 – 638.
- Perevolotsky & Perevolotskaya, 2012 – Perevolotsky A.N., Perevolotskaya T.V. (2012). Prediction of vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in forest soils of the Republic of Belarus // Radiation Biology. Radioecology, Vol. 52, No 6, pp. 625 – 635 (in Russian).
- Prokhorov, 1981 – Prokhorov V. M. (1981). Migration of radioactive contaminants in soils. M.: Energoizdat, 98 p.
- Putyrskaya & Klemt, 2007 – Putyrskaya V., Klemt E. (2007). Modeling  $^{137}\text{Cs}$  migration processes in lake sediments // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 96, pp. 54 – 62. doi:10.1016/j.jenvrad.2007.01.017.
- Ramzaev et al., 2012 – Ramzaev V., Repin V., Medvedev A., Khrantsov E., Timofeeva M., Yakovlev V. (2012). Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made  $\gamma$ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 109, pp. 1 – 12. doi:10.1016/j.jenvrad.2011.12.009.
- Rin’kis et al., 1989 – Rin’kis G. J., Raman H. K., Paegle, G. V., kunitskaya, T. A. (1989). The optimization system and methods of diagnosis of mineral nutrition of plants. Riga: Zinatne, 196 p.
- Romanova & Ivakhnenko, 2003 – Romanova T.A., Ivakhnenko N.N. (2003). Tolerance of plowed soils of Belarus for chemical contamination // Eurasian Soil Science, Vol. 36, No 6, pp. 677 – 684.
- Shinonaga et al., 2005 – Shinonaga T., Schimmack W., Gerzabek M.H. (2005). Vertical migration of  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{226}\text{Ra}$  in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 79, pp. 93 – 106. doi:10.1016/j.jenvrad.2004.05.018.
- Sokolov (ed.), 1975 – Sokolov A.V.(ed.). (1975). Agrochemical methods of soil investigation. Moscow: Nauka, 656 p.
- Standringa, 2009 – Standringa W.J.F., Brown J.E., Dowdall M., Korobova E.M., Linnik V.G., Volosov A.G. (2009). Vertical distribution of anthropogenic radionuclides in cores from contaminated floodplains of the Yenisey River // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 100, pp. 1109 – 1120. doi:10.1016/j.jenvrad.2009.04.011.
- Takahashi, 2015 – Takahashi J., Tamura K., Suda T., Matsumura R., Onda Y. (2015). Vertical distribution and temporal changes of  $^{137}\text{Cs}$  in soil profiles under various land uses after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 139, pp.351 – 361. http://dx.doi.org./10.1016/j.jenvrad.2014.07.004.
- Tarasiuk et al., 2007 – Tarasiuk N., Koviagina E., Kubarevičiene V., Shliahtich E. (2007). On the radiocesium carbonate barrier in organics-rich sediments of Lake Juodis, Lithuania // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 93, pp. 100 – 118. doi:10.1016/j.jenvrad.2006.12.004.
- Tikhomirov et al., 1978 – Tikhomirov F. A., Prokhorov V. M., Moiseev, A. A. and others (1978). Finding a link between intake of caesium-137 in plants and properties of soils // Agrochemistry, No. 8, pp. 116 – 124.
- Tikhomirov et al., 1990 – Tikhomirov F. A., Shcheglov A. I., Tsvetnova O. B., Klyashtorin A. L. (1990). Geochemical migration of radionuclides in the forest ecosystems of Chernobyl NPP radioactive contamination zone // Pochvovedenie, No. 10, pp. 41 – 50 (in Russian).
- Vasil’evskaya, 1994 – Vasil’ evskaya V. D. (1994). The resistance of soils to anthropogenic influences // Soil-ecological monitoring and soil conservation. M.: Izd-vo Mosk. Univ. pp. 61 – 79.
- Wasserman, 2008 – Wasserman M.A., Bartoly F., Viana A.G., Silva M.M., Rochedo E.R.R., Perez D.V., Conti C.C. (2008). Soil to plant transfer of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  in Ferralsol, Nitisol and Acrisol // Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 99, pp. 546–553. doi: 10.1016/j.jenvrad.2007.08.010.

**Изучение совместного влияния свойств почв на скорость диффузии  $^{60}\text{Co}$** 

Вячеслав Сергеевич Анисимов <sup>a, \*</sup>, Дмитрий Владимирович Дикарев <sup>a</sup>,  
Валерий Викторович Иванов <sup>a</sup>, Татьяна Витальевна Переволоцкая <sup>a</sup>,  
Лидия Николаевна Анисимова <sup>a</sup>, Илья Владимирович Кочетков <sup>a</sup>,  
Андрей Владиславович Томсон <sup>a</sup>, Лариса Ивановна Ратникова <sup>a</sup>, Андрей Иванович Санжаров <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,  
Российская Федерация

**Аннотация.** В ходе лабораторных экспериментов по изучению процесса вертикальной миграции радионуклида  $^{60}\text{Co}$  в водонасыщенных почвенных образцах нарушенного сложения одинаковой первоначальной насыпной плотности были получены значения эффективных коэффициентов диффузии ( $D_{эф}^{60\text{Co}}$ ) для относящихся к 4-м типам 8-ми различных минеральных почв.

Были отмечены существенные расхождения значений  $D_{эф}^{60\text{Co}}$  исследованных почв, обусловленные различием почвенных характеристик. Для оценки этого влияния был использован статистический подход, где эдафические факторы, представляющие важнейшие характеристики почв, выступали в качестве исходных переменных (предикторов), а результивным признаком служил  $D_{эф}^{60\text{Co}}$ .

На основании исследования зависимости между основными физико-химическими свойствами почв и величиной эффективного коэффициента диффузии ( $D_{эф}^{60\text{Co}}$ ) выбранные физико-химические показатели состояния почв ранжированы по степени влияния на величину результивного признака:  $\text{pH}_{\text{KCl}} > (\text{фр} < 0.01) > \text{C}_{\text{орг}}$ . Также был определен вклад каждого из выбранных показателей состояния почв (предикторов) в варьирование величины  $D_{эф}^{60\text{Co}}$ . Оцененный вклад для  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , содержание фракции  $< 0.01$  и  $\text{C}_{\text{орг}}$  составил, соответственно, 36.32, 27.90 и 17.08 %. В ходе опытов был установлен факт особенно сильного увеличения величины  $D_{эф}^{60\text{Co}}$  для почв с высоким содержанием гумуса в условиях избыточного увлажнения.

**Ключевые слова:**  $^{60}\text{Co}$ , почвы, физико-химические свойства, полная влагоемкость, вертикальная миграция, коэффициент эффективной диффузии.

\* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: [vsanisimov@list.ru](mailto:vsanisimov@list.ru) (В.С. Анисимов)