

**Mirzoev E.B.**

Russian Institute of Radiology and Agroecology  
249032 Kievskoe shosse 109 km, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

The article presents the measures that ensure the sustainable development of livestock in radioactively contaminated areas. The choice of protective measures is determined depending on the physical and chemical properties of radionuclides (the value of the ion potential, atomic mass, half-life, type of radiation ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ )), metabolism and mechanism of action, the level of contamination of agricultural land, physiological characteristics of animals (type, age, body weight, metabolic rate, stomach structure), patterns of transfer in the soil-plant-animal-food system and profitability of production.

**Keywords:** *measures, livestock*

---

УДК 631.438+58.051

## **ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫЕ СМЕСИ И АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ПОЧВ**

**Москальчук Л.Н.<sup>1,2</sup>, Баклай А.А.<sup>1</sup>, Леонтьева Т.Г.<sup>1</sup>, Маковская Н.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси  
220109 г. Минск, а/я 119, Республика Беларусь

e-mail: leonmosk@tut.by, t.leontieva@tut.by

<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный технологический университет»  
220006 г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь

e-mail: leonmosk@tut.by

В работе представлен метод количественной оценки эффективности применения органоминеральных смесей и алюмосиликатных сорбентов для снижения миграции радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{90}\text{Sr}$  в системе почва – почвенный раствор после внесения в почву сорбента, базирующийся на сравнении потенциалов сорбции радиоцезия или радиостронция почвы и потенциального сорбента. Для эффективного снижения миграции радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{90}\text{Sr}$  в почве как минимум в 2 раза необходимо, чтобы отношение потенциалов сорбции сорбента и почвы с учетом экономической целесообразности внесения сорбента в количестве 1–4 мас. % в почву составляло не менее, чем 25. В результате внесения органоминеральных смесей или алюмосиликатных сорбентов в вышеуказанной дозе наблюдается повышение коэффициента распределения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  загрязненной почвы, что в свою очередь приводит к снижению уровня миграции данных радионуклидов в почве.

**Ключевые слова:** *органоминеральные смеси, алюмосиликатные сорбенты, загрязнение почв, радионуклиды, сорбция, миграция, реабилитация*

В результате техногенных аварий на АЭС радиоактивному загрязнению подвергаются сельскохозяйственные почвы. Значительная их часть выводится из сельскохозяйственного оборота ввиду невозможности получения на них продукции с нормативно допустимым содержанием радионуклидов. Переход радионуклидов из почвы в растения является первым и наиболее значимым звеном их дальнейшей миграции по пищевым цепям. Интенсивность данного процесса определяется химическими свойствами и физико-химическим состоянием радионуклида, влиянием физико-химических свойств почв и биологическими особенностями растений.

В ряде стран, имеющих развитую ядерную энергетику, осуществляется поиск веществ и материалов, эффективно сорбирующих радионуклиды, имеющих в значительном объеме и обладающих низкой стоимостью. Их применение будет способствовать повышению общей сорбционной способности загрязненных почв, снижению содержания подвижных форм радионуклидов в почвенном поглощающем комплексе и препятствовать миграции

радионуклидов в глубь почвенного профиля и последующему включению в биологический круговорот веществ. Такими материалами являются алюмосиликаты (клиноптилолит, бентонит, вермикулит, глауконит, иллит и др.), цеолиты, сапропели, торф и различные составы на основе гумусовых веществ.

В данной работе представлен разработанный способ снижения миграции радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почвах, предусматривающий использование различных видов органоминеральных смесей и алюмосиликатных сорбентов путем их внесения в почву в определенных дозах.

Органоминеральные смеси представляются собой смесь компонентов природного происхождения (сапропели) и отходов химических производств (гидролизный лигнин и глинисто-солевые шламы) в определенных соотношениях. Сапропели – донные отложения пресноводных водоемов. В зависимости от типологического состава значительно отличаются по химическому составу и физико-химическим свойствам, и, прежде всего, по содержанию органического вещества (от 15 до 94 %), агрохимическим свойствам,

а также по составу и структуре гуминовых и фульвокислот. Результаты исследований по применению различных типов сапропелей в качестве сорбентов радионуклидов показывают, что они позволяют существенно снизить поступление радионуклидов из почвы в растения [1].

Алюмосиликатные сорбенты представляют собой глиносодержащий материал, полученный путем водной обработки глинисто-солевых шламов (ГСШ) для удаления избыточного содержания солей  $KCl$  и  $NaCl$ . ГСШ – отходы калийного производства ОАО «Беларуськалий», значительные запасы которых находятся в Солигорском промышленном районе. По вещественному составу ГСШ представляют собой сложные образования, основными компонентами которых являются алюмосиликаты (в основном иллит – 48,2 мас. %), карбонаты кальция и магния, сульфаты кальция, хлориды натрия и калия. В среднем в ГСШ содержится: нерастворимый осадок – 65–70 %,  $NaCl$  – 20–25 % и  $KCl$  – 13–15 %. Минералогический состав, высокая удельная поверхность (40–45 м<sup>2</sup>/г), значительная степень дефектности кристаллической структуры и высокое содержание мелкодисперсной фракции делают ГСШ эффективным сорбционным материалом в отношении радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr [2, 3].

Теоретической основой, обосновывающей возможность применения различных агроулучшителей (почвенных добавок) и сорбентов для повышения сорбционных свойств почв, фиксации <sup>137</sup>Cs почвами и снижения миграции данного радионуклида из почвы в растения, является теория селективной сорбции [4]. Селективная сорбция определяет поведение <sup>137</sup>Cs в минеральных почвах, а основным механизмом селективной сорбции <sup>137</sup>Cs является его ионный обмен на  $K^+$  и  $NH_4^+$  на селективных по отношению к цезию сорбционных центрах FES (Frayed Edge Sites) в области клинообразных краев слоистых глинистых минералов с кристаллической решеткой типа 2 : 1. Доступ к этим центрам больших гидратированных катионов типа кальция стерически невозможен. В связи с этим при насыщении емкости катионного обмена (ЕКО) твердой фазы почвы  $Ca^{2+}$  ионный обмен <sup>137</sup>Cs на  $K^+$  будет происходить на селективных по отношению к цезию сорбционных центрах FES. Общими закономерностями миграции <sup>90</sup>Sr из почвы в растение является обратная пропорциональная зависимость накопления <sup>90</sup>Sr растениями от концентрации обменного кальция в почве и прямо пропорциональная зависимость от потребности растения в данном микроэлементе. Известкование кислых почв для снижения миграции <sup>90</sup>Sr из почвы в растение имеет предел, ограниченный ЕКО почвы.

При внесении в почву известковых материалов и калийсодержащих веществ, влажность загрязненной почвы оказывают значительное влияние на концентрацию и соотношение ионов  $K^+$  и  $Ca^{2+}$  в почвенном растворе. Оптимальное соотношение ионов  $K^+$  и  $Ca^{2+}$  в почве с одной стороны способствует получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур, а с другой стороны – обеспечивает условия для

снижения миграции <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr из почвы в растения. Дальнейшее снижение миграции <sup>137</sup>Cs и/или <sup>90</sup>Sr из почвы, насыщенной  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  в растения возможно только путем изменения ее физико-химических и, прежде всего, сорбционных свойств [5].

После насыщения селективных по отношению к цезию сорбционных центров FES и ЕКО твердой фазы почвы соответственно катионами  $K^+$  и  $Ca^{2+}$  происходит минимизация миграции <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в системе почва – почвенный раствор – растение. Дальнейшее увеличение концентрации катионов  $K^+$  или  $Ca^{2+}$  в почвенном растворе не оказывает влияние на коэффициент накопления радионуклидов в растениях. Результаты теоретических исследований позволили выявить дополнительные резервы повышения эффективности иммобилизации <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr путем изменения сорбционных свойств почвы в результате внесения в нее сорбентов и сохранения при этом естественного плодородия почв.

На основе разработанных математических моделей миграции <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr [5–7] в системе почва – почвенный раствор получено выражение для количественной оценки эффективности сорбентов по снижению миграции <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в данной системе, определяющее коэффициент кратности снижения (КС):

$$КС = \frac{SP_{(c)}}{SP_{(n)}} \cdot M + 1, \quad (1)$$

где  $SP_{(c)}$ ,  $SP_{(n)}$  – потенциал сорбции радиоцезия или радиостронция сорбентом (с), почвой (п), мэкв/кг;  $M$  – доза внесения сорбента в почву, равная отношению массы сорбента к массе почвы.

Сравнение потенциалов сорбции радиоцезия или радиостронция почвы и потенциального сорбента в выражении (1) позволяет оценить возможность целенаправленного изменения сорбционных свойств почвы путем внесения в нее соответствующего сорбента для снижения миграции <sup>137</sup>Cs или <sup>90</sup>Sr. Так, для снижения миграции <sup>137</sup>Cs или <sup>90</sup>Sr в системе почва – почвенный раствор в два раза с учетом экономически целесообразной дозы внесения сорбента в почву в количестве 1–4 мас. %, используя выражение (1), получаем  $SP_{(c)} / SP_{(n)} \geq 25$ .

Учитывая наличие на ОАО «Беларуськалий» (г. Солигорск) значительных запасов ГСШ, хорошие кинетические и емкостные показатели, высокую селективность в отношении <sup>137</sup>Cs, данные промышленные отходы можно рассматривать как перспективные материалы для производства органоминеральных смесей и алюмосиликатных сорбентов с целью снижения миграции <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в загрязненных радионуклидами почвах. В дерново-подзолистые почвы с низким потенциалом сорбции цезия рекомендуется вносить алюмосиликатные сорбенты на основе ГСШ в количестве 4 мас. %. В результате их внесения происходит повышение коэффициента распределения <sup>137</sup>Cs почвы, что в свою очередь приводит к снижению миграции <sup>137</sup>Cs путем его закрепления на глинистых минералах (иллите).

Экспериментальная проверка разработанного

метода оценки эффективности сорбентов для снижения миграции  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{90}\text{Sr}$  в системе почва – растение с использованием данных вегетационных опытов, полученных в результате внесения органоминеральных смесей в дерново-подзолистую супесчаную почву, твердая фаза которой представляет собой насыщенный катионами  $\text{K}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  ионообменник, показала что происходит существенное снижение поступления радионуклидов из почвы в растения (в 1,5–3,2 раза по  $^{137}\text{Cs}$  и 1,8–7,6 раза по  $^{90}\text{Sr}$ ) [5].

Таким образом, одним из эффективных и экономически целесообразных способов решения проблемы реабилитации загрязненных радионуклидами дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв может быть применение органоминеральных смесей и алюмосиликатных сорбентов [5]. Органоминеральные смеси по своим физико-химическим свойствам являются комплексными удобрениями, в состав которых входит как органическое вещество (сапропели, гидролизный лигнин), так и минеральная составляющая (ГСШ). Прочная фиксация  $^{137}\text{Cs}$  в почве при внесении органоминеральной смеси или алюмосиликатного сорбента происходит в основном за счет наличия в их составе глинистого минерала – иллита, содержащегося в глинисто-солевых шламах. Для достижения эффективного снижения миграции  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{90}\text{Sr}$  в почве как минимум в 2 раза необходимо, чтобы отношение потенциалов сорбции  $^{137}\text{Cs}$  или  $^{90}\text{Sr}$  сорбента и почвы с учетом экономической целесообразности внесения сорбента в количестве 1–4 мас. % в почву составляло не менее чем 25. Использование органоминеральных смесей и алюмосиликатных сорбентов на загрязненных радионуклидами дерново-подзолистых почвах Беларуси позволит снизить миграцию радиоцезия и радиостронция и предотвратить их дальнейшее распространение в окружающей среде.

## ORGANOMINERAL MIXTURES AND ALUMINOSILICATE SORBENTS FOR REMEDIATION OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED SOILS

Maskalchuk L.N.<sup>1,2</sup>, Baklay A.A.<sup>1</sup>, Leontieva T.G.<sup>1</sup>, Makovskaya N.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Scientific Institution “Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny”, National Academy of Sciences of Belarus  
220109 Minsk, P.O. Box 119, Republic of Belarus

<sup>2</sup> Belarusian State Technological University  
220006 13a Sverdlova str., Minsk, Republic of Belarus

The paper presents a method for quantitatively assessing the effectiveness of using organomineral mixtures and aluminosilicate sorbents to reduce the migration of  $^{137}\text{Cs}$  or  $^{90}\text{Sr}$  radionuclides in the soil - soil solution system after adding a sorbent to the soil, based on a comparison of the sorption potentials of radiocesium or radiostrontium of soil and a potential sorbent. To effectively reduce the migration of  $^{137}\text{Cs}$  or  $^{90}\text{Sr}$  radionuclides in the soil (at least 2 times), it is necessary that the ratio of the sorption potentials of the sorbent and soil, taking into account the economic feasibility of introducing the sorbent in an amount of 1–4 wt. % into the soil was no less than 25. As a result of organomineral mixture or aluminosilicate sorbent insertion in the above dose, an increase in the distribution coefficient of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  of contaminated soil is observed, which in turn leads to the decreasing of these radionuclides migration in the soil.

**Keywords:** organomineral mixture, aluminosilicate sorbent, soil contamination, radionuclides, sorption, migration, remediation

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Леонтьева Т.Г. Влияние органической и минеральной составляющих сапропелей Республики Беларусь на селективную сорбцию радиоцезия // Радиохимия. 2018. Т. 60. № 1. С. 93–96.
2. Леонтьева Т.Г., Москальчук Л.Н., Баклай А.А. Перспективы использования глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для очистки водных сред и экосистем от радиоцезия // Труды БГТУ. 2016. № 3. С. 74–80.
3. Леонтьева Т.Г., Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Маковская Н.А. Состав, структура и селективная сорбция ионов цезия алюмосиликатным сорбентом, полученным из отходов калийного производства ОАО «Беларуськалий» // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. № 5. С. 726–735.
4. Wauters, J., Sweeck L., Valcke E. et al. Availability of radiocaesium in soils: a new methodology // Science of the Total Environment. 1994. V. 157. P. 239–248.
5. Москальчук Л.Н. Реабилитация радиоактивно загрязненных почв: опыт и перспективы / Lambert Academic Publishing, Norderstedt, Germany, ISBN:978-620-2-09332-3. P. 412.
6. Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Леонтьева Т.Г. Метод оценки эффективности природных неорганических сорбентов для снижения миграции  $^{137}\text{Cs}$  в системе «минеральная почва–растение» // Труды БГТУ. 2014. № 3. С. 14–17.
7. Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Леонтьева Т.Г., Стреленко Д.К. Метод оценки эффективности сорбентов для снижения перехода  $^{90}\text{Sr}$  из производственной почвы в растение // Экологический вестник. 2015. № 2 (32). С. 11–16.