

ОБМЕННЫЙ КАЛЬЦИЙ ПОЧВЫ И НАКОПЛЕНИЕ ^{90}Sr СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ КУЛЬТУРАМИ

Ю. В. Путятин

Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Среди физико-химических свойств почв, влияющих на накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениях, нужно отметить механический состав, емкость поглощения и состав катионов, концентрацию обменного калия и кальция, минералогический состав и другие факторы внешней среды [2, 11, 12, 14, 15]. Физико-химическое состояние радионуклидов в почве и, в первую очередь, количество их мобильных форм являются определяющим фактором в процессах миграции радиоцезия и радиостронция в почвенном профиле и по биологическим цепочкам. ^{90}Sr сорбируется твердой фазой почвы значительно слабее, чем ^{137}Cs [7]. По сравнению с ^{137}Cs , у которого доля фиксированной фракции составляет 83–98 % от валового содержания в почве, содержание ^{90}Sr в прочносвязанной форме не превышает 7–12 % [3]. Высокая степень подвижности ^{90}Sr в почве определяет высокие коэффициенты перехода радиоизотопа из почвы в растения, которые в среднем на порядок выше, чем у ^{137}Cs [9]. По энергии адсорбируемости атомы Sr в лиотропном ряду занимают промежуточное место между Ba^{2+} и Ca^{2+} и, соответственно, энергия сорбции атомов ^{90}Sr и Ca почвенными коллоидами (анионами кристаллической решетки глинистых минералов и органическими соединениями) неодинакова [8]. Корневое поглощение радионуклидов из почвенного раствора является процессом, контролируемым физиологией растения.

Из многих показателей почвы, влияющих на размеры поступления ^{90}Sr в растения, наиболее важным является её обеспеченность обменным кальцием, который, как известно, по своим химическим свойствам весьма близок к радиоактивному стронцию [5].

Транспорт Ca осуществляется преимущественно в апопласте путем свободной диффузии, ускоряемой транспирацией, в объеме клеточной стенки, где часть ионов находится в растворе, идентичном внешнему почвенному раствору [16]. Sr и Ca переходят в корень по одинаковым путям, причем при переходе в симпласт доля неспецифической ионной утечки существенно преобладает над селективными каналами, и существенную роль играет связывание ^{90}Sr (аналогично Ca) в цитоплазматической части симпласта [10].

Особенно сильными накопительными свойствами обладают клеточные оболочки. По данным Матусова Г.Д. и др., коэффициент накопления ^{137}Cs оболочками клеток в зависимости от условий эксперимента изменялся от 67 до 265. Коэффициент накопления ^{90}Sr при всех условиях превышал 3000. Такие высокие значения коэффициентов накопления клеточной стенкой, вероятно, являются следствием отрицательного заряда, имеющегося на оболочках растительных клеток. Этот отрицательный заряд, очевидно, способствует адсорбции положительно заряженных ионов этих веществ на клеточной стенке и дальнейшему их прохождению внутрь клетки [6].

На загрязненных радионуклидами землях используются повышенные дозы известковых удобрений для проведения реакции почвенной среды до оптимального уровня и насыщения почвенно-поглощающего комплекса кальцием. Несмотря на определенную зависимость между pH и обменным кальцием, почвы, имеющие одинаковую кислотность, могут существенно отличаться по содержанию обменного кальция и, соответственно, иметь различные коэффициенты перехода ^{90}Sr и ^{137}Cs в растения. Основные массивы почв, загрязненных Чернобыльскими выпадениями, находятся в Гомельской и Могилевской областях Республики Беларусь, где средневзвешенное содержание обменного кальция в пересчете на элемент в пахотных почвах составляет 750 и 690 мг/кг, доля пахотных почв с низкой обеспеченностью этим элементом составляет 28,3 и 27,6 % соответственно [1].

Цель наших исследований заключалась в определении параметров содержания обменного кальция в дерново-подзолистой почве, обеспечивающих минимум накопления ^{90}Sr сельскохозяйственными растениями.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы отбора проб. Маршрутные исследования проводились путем отбора проб растительных образцов кукурузы в фазу молочно-восковой спелости и сопряженных почвенных образцов в производственных посевах Хойникского и Брагинского районов Гомельской области методом учетных площадок на дерново-подзолистых супесчаных почвах. Почвенные образцы отбирались из пахотного слоя (0–20 см).

Агрохимическая характеристика почв: содержание гумуса – от 2,5 до 3,2 %, pH – 5,8-7,0, содержание подвижных форм P_2O_5 – от 220 до 290 мг/кг и K_2O – от 210 до 280 мг/кг. Выборка была представлена образцами почвы с содержанием обменного кальция от 400 до 1700 мг/кг.

Все данные по удельной активности растительных образцов (Бк/кг) пересчитывались на стандартную влажность, для зерна – 14 %, семян рапса – 9 %, сена – 16 %, зеленой массы – 82 % и картофеля – 80 %.

Методы определения агрохимических показателей почвы. Агрохимические показатели почв определяли по общепринятым методикам: гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО (0,4 н $K_2Cr_2O_7$ – ГОСТ 26213-91), обменную кислотность $pH_{(KCl)}$ – потенциометрическим методом (1 М KCl – ГОСТ 26483-85), содержание подвижных форм фосфора и калия – по Кирсанову (0,2 М HCl – ГОСТ 26207-91), обменных форм кальция и магния – на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAS-30 (1 М KCl – ГОСТ 26487-85).

Методы определения ^{90}Sr . Содержание ^{90}Sr оценивали по дочернему продукту распада ^{90}Y после проведения радиохимической очистки от мешающих радионуклидов оксалатным методом с последующим измерением на пластиковом сцинтилляционном детекторе спектрометра-радиометра «Прогресс-БГ». Выход носителя иттрия определяли гравиметрическим методом, выход носителя стронция – на атомно-абсорбционном спектрофотометре [12]. Статистическая погрешность измерений не превышала 15 %.

Методы математической обработки результатов. Коэффициенты перехода (K_p) радионуклида ^{90}Sr из почвы в растения рассчитывались по формуле:

$$(1) \quad K_p = \frac{A_p}{A_s}$$

где:

A_p – удельная активность радионуклида в растении (Бк kg^{-1});

A_s – плотность загрязнения почвы радионуклидом (кБк m^{-2}).

Значения агрохимических свойств почв, при которых наблюдается минимальное накопление ^{90}Sr , рассчитывались на основе квадратичной функции распределения путем деления коэффициента пропорциональности первого порядка на удвоенное значение коэффициента второго порядка. Для математической обработки экспериментального материала использовали регрессионный, корреляционный и методы описательной статистики с использованием программного обеспечения MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на то что химический состав растений контролируется генетически, уровень минерального питания оказывает существенное влияние на химический состав продукции растениеводства. При этом более значительные изменения химического состава от условий питания характерны для вегетативных органов, нежели для репродуктивных. Корреляционный анализ показал достаточно тесную отрицательную взаимосвязь (r) между содержанием обменного кальция в дерново-подзолистой супесчаной почве и коэффициентами перехода (K_p) ^{90}Sr в растениеводческую продукцию. Для зерновых культур данный показатель составил от -38 до -0,69, бобовых культур от -0,62 до -0,79, рапса – -0,56 и картофеля – -0,64. (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции (r) между агрохимическими показателями дерново-подзолистой супесчаной почвы и коэффициентами перехода (K_p) ^{90}Sr в продукцию растениеводства

Культура	Продукция	Выборка	r
Озимая рожь	зерно	33	-0,69
Пшеница	зерно	32	-0,44
Ячмень	зерно	22	-0,38
Рапс	семена	26	-0,56
Картофель	клубни	31	-0,64
Кукуруза	зеленая масса	117	-0,73
Тимофеевка луговая	сено	48	-0,56
Люпин	зерно	23	-0,62
Клевер луговой	сено	45	-0,79
Люцерна	сено	24	-0,62

Донник белый	сено	32	-0,52
--------------	------	----	-------

Согласно градациям по содержанию обменного кальция в пересчете на элемент минеральные почвы Белоруссии подразделяются на очень низкообеспеченные (менее 285 мг/кг), низкообеспеченные (286-570 мг/кг), среднеобеспеченные (571–850 мг/кг), с повышенным содержанием (851–1140 мг/кг), высокообеспеченные (1141–1420 мг/кг) и очень высокообеспеченные (более 1420 мг/кг) [4].

По данным проведенных стационарных опытов установлено, что в среднем в звене севооборота за счет увеличения содержания обменного кальция в почве с низкого (500 мг/кг) до среднего (850 мг/кг) урожай вырос в среднем на 8 %, содержание ^{137}Cs снизилось на 22 %, ^{90}Sr – на 25 %. Дальнейшее повышение содержания обменного кальция в почве (до 1150 мг/кг) было менее эффективным: урожай вырос только на 2 %, переход радионуклидов уменьшился на 7 % ^{137}Cs и на 14 % по ^{90}Sr . В зерне яровой пшеницы и ячменя при увеличении содержания обменного кальция в почве с 500 мг/кг до 850 мг/кг содержание ^{90}Sr снизилось в среднем на 23 %, с 850 до 1150 мг/кг – на 14 %; ^{137}Cs – на 19 % и 2 % соответственно [17, 18].

По результатам анализа растительных и сопряженных почвенных образцов, отобранных в производственных посевах, рассчитаны параболические зависимости между содержанием обменного кальция в почве и величиной накопления радионуклидов урожаем. На основании уравнений, полученных при квадратичной аппроксимации, рассчитано содержание обменного Са, при котором отмечено минимальное накопление ^{90}Sr растениеводческой продукцией. Содержание обменного Са, при котором отмечено минимальное накопление ^{90}Sr зерновыми культурами (озимая рожь, яровая пшеница, ячмень) находится в пределах 1300–1400 мг/кг ($R^2 = 0,44-0,55$).

Выращивание технических культур, например рапса, в зоне радиоактивного загрязнения является экологически и экономически оправданной контрмерой. Рапс – культура, требовательная к почвенным условиям, предпочитает слабокислые почвы. Анализ данных, полученных в результате проведения исследований, показал, что накопление радионуклидов в семенах рапса имеет достаточно высокую зависимость от содержания обменного кальция в почве. Согласно расчетам, минимальное накопление радиостронция семенами ярового рапса отмечалось при содержании обменного Са на уровне 1195 мг/кг ($R^2 = 0,68$) (табл. 2).

В зоне радиоактивного загрязнения белорусского Полесья доля кукурузы в посевах достигает 25-30 %. Анализ данных показал, что минимальные переходы ^{90}Sr в зеленую массу кукурузы отмечаются при содержании обменного кальция в почве – 1236 мг/кг ($R^2 = 0,72$).

Таблица 2

Содержание обменного кальция в дерново-подзолистой супесчаной почве, при котором наблюдается минимальное накопление ^{90}Sr сельскохозяйственными растениями

Культура	Продукция	Выборка	R^2	Обменный Са*, мг/кг почвы	Вынос Са с 1 ц основной продукции (в пересчете на а.с.вещество) [19]
Озимая рожь	зерно	33	0,55	1400	0,34
Пшеница яровая	зерно	32	0,51	1379	0,26
Ячмень	зерно	22	0,44	1300	0,25
Рапс	семена	26	0,68	1195	0,41
Картофель	клубни	31	0,76	1260	0,79
Кукуруза	зеленая масса	117	0,72	1236	0,21
Тимофеевка луговая	сено	48	0,39	980	0,35
Люпин	зерно	23	0,70	826	1,60
Клевер луговой	сено	45	0,77	1229	1,62
Люцерна	сено	24	0,47	1502	1,62
Донник белый	сено	32	0,62	926	1,62

* Содержание Са в почве, при котором отмечено минимальное накопление ^{137}Cs .

Бобовые культуры на единицу сухого вещества содержат кальция в среднем в 4 раза больше, чем зерновые [19], что определяет высокие размеры выноса его химического аналога ^{90}Sr . Коэффициент перехода ^{90}Sr в зерно гороха в среднем в 1,3 раза, в зерно люпина – в 2,3 раза выше, чем в зерно ячменя. Зеленая масса клевера накапливает ^{90}Sr в 3 раза больше, чем многолетние злаковые травы [9]. Согласно нашим исследованиям минимальное накопление радиостронция зерном люпина отмечалось при содержании обменного Са на уровне 826 мг/кг ($R^2 = 0,70$), люцерной –

1502 ($R^2 = 0,47$), донником белым – 926 ($R^2 = 0,62$) (табл. 2, рис. 1).

Клевер для нормального роста и развития требует слабокислой или нейтральной реакции среды. Минимальное накопление ^{90}Sr зеленой массой клевера отмечено при содержании обменного Ca на уровне 1229 мг/кг ($R^2 = 0,77$).

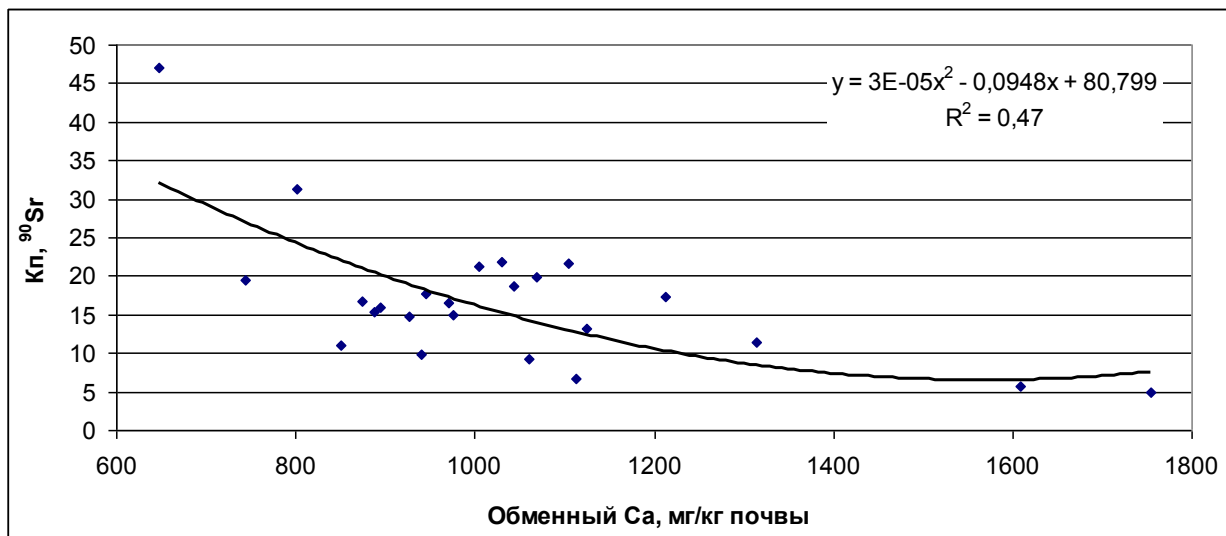


Рис. 1. Коэффициенты перехода ^{90}Sr в сухое вещество зеленой массы люцерны в зависимости от содержания обменного кальция в дерново-подзолистой супесчаной почве

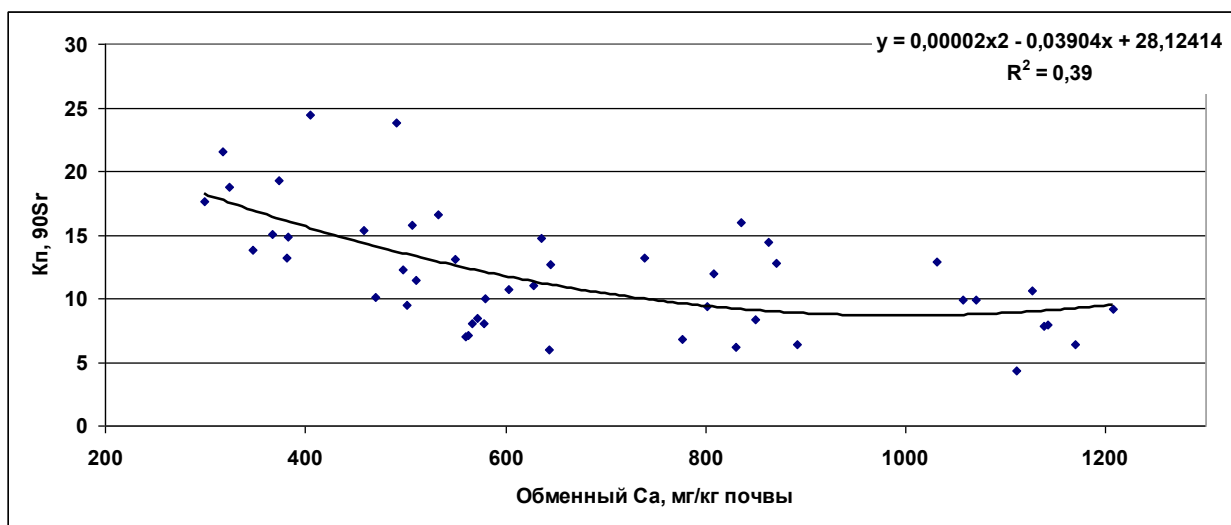


Рис. 2. Коэффициенты перехода ^{90}Sr в сено тимофеевки луговой в зависимости от содержания обменного кальция в дерново-подзолистой супесчаной почве

Многолетние злаковые травы менее требовательны к почвенным условиям. Тимофеевка является одной из самых распространенных многолетних злаковых трав в республике. Минимум накопления ^{90}Sr тимофеевкой луговой отмечается при содержании обменного кальция на уровне 980 мг/кг почвы ($R^2 = 0,39$).

Картофель является одной из основных продовольственных культур, по данным Белстата Республики Беларусь? среднегодовое его потребление на душу населения составляет 170–180 кг. Установлено, что минимум накопления ^{90}Sr клубнями соответствует содержанию обменного кальция – 1260 мг/кг почвы ($R^2 = 0,76$).

При обработке данных полевых и радиохимических исследований методом описательной статистики, проведенной с 11 исследуемыми культурами, установлено, что среднее значение обеспеченности дерново-подзолистой супесчаной почвы обменным кальцием, при котором наблюдается минимальное накопление радиостронция составляет 1200 мг/кг почвы, с учетом величины стандартного отклонения интервал данного показателя находится в пределах 990–1410 мг/кг. По данным последнего тура обследования, в Гомельской и Могилевской областях Республики Беларусь

доля пахотных почв с обеспеченностью обменным кальцием IV, V и VI групп (более 860 мг/кг в пересчете на элемент) составляет 33,3 и 19,2 % соответственно [1].

ВЫВОДЫ

1. В результате обработки данных, полученных в маршрутных исследованиях, проведенных на дерново-подзолистых супесчаных почвах, загрязненных радионуклидами, установлена достаточно тесная отрицательная связь между содержанием в почве обменного кальция и накоплением ^{90}Sr сельскохозяйственными культурами.

2. Эффективность насыщения почвы кальцием в дискриминации ^{90}Sr значительно выше на почвах с низкой обеспеченностью данным элементом питания растений.

3. Минимум биологической доступности ^{90}Sr для зерновых культур отмечен при содержании обменного кальция 1300-1400 мг/кг почвы, рапса – 1195, кукурузы – 1236, тимофеевки луговой – 980, клевера лугового – 1229, люцерны – 1502 и картофеля – 1260 мг/кг почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2013-2016 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2017. – 275 с.

2. Алексахин, Р. М. Поведение ^{137}Cs в системе почва-растение и влияние внесения удобрений на накопление радионуклида в урожай / Р. М. Алексахин, И. Т. Моисеев, Ф. А. Тихомиров // Агрохимия. – 1992. – № 8. – С. 127–137.

3. Ликвидация последствий Чернобыльской аварии в АПК Белоруссии / Г. В. Василюк [и др.] // Агрохимический Вестник. – 2001. – №3. – С. 12–16.

4. Агрохимические регламенты для повышения плодородия почв и эффективного использования удобрений / В. В. Лапа [и др.]: учеб. пособие. – Горки: БГСХА, 2002. – 48 с.

5. Левина Э. М. Влияние почвообразующих минералов, удобрений и некоторых химических соединений на накопление ^{90}Sr в урожае растений: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Э. М. Левина. – М., 1979. – 18 с.

6. Матусов Г. Д. Закономерности накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr растительной клеткой / Г. Д. Матусов, Н. Н., Кудряшова, А. П. Кудряшов // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: тез. док. – М., 2000. – С. 451.

7. Москалев Ю. И. Распределение, биологическое действие и миграция радиоактивных изотопов / Ю. И. Москалев, В. Н. Стрельцова. – М., 1961. – 172 с.

8. Поляков Ю. А. Радиоэкология и дезактивация почв / Ю. А. Поляков. – М.: Атомиздат, 1970. – 304 с.

9. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь; под ред. И.М. Богдевича. – Минск, 2003. – 72 с.

10. Соколик А. И. Действие почвенных факторов на механизмы переноса радионуклидов в системе почва-растение / А. И. Соколик, Д. А. Федорович // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: науч. труды. – С-Пб: Гидрометеиздат, 2000. – С. 124–130.

11. Юдинцева, Е. В. Агрохимия радиоактивных изотопов стронция и цезия / Е. В. Юдинцева, И. В. Гулякин. – М., 1968. – 472 с.

12. Clifton, J. Relationships between radionuclide content and textural properties in Irish sea intertidal sediments / J. Clifton, P. McDonald, A. Plater, F. Oldfield // Water, Air and Soil Pollution. 1997. – V. 99. – P. 209–216.

13. International Atomic Energy Agency. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency. IAEA-TECDOC-1092. Vienna, 1999. – 307 p.

14. Behaviour of radionuclides in meadows and efficiency of countermeasures / N. I. Sanzharova [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1996. – Vol. 64, № 1/2. – P. 43–48.

15. Twining J. R. Soil-water distribution coefficients and plant transfer factors for ^{134}Cs , ^{85}Sr and ^{65}Zn under field conditions in tropical Australia / J. R. Twining, T. E. Payne, T. Itakura // Journal of Environmental Radioactivity. – 2004. – V. 71, Issue 1. – P. 71–87.

16. White P. J. The pathways of calcium movement to the xylem / P. J. White // Journal of Experimental Botany. – 2001. – V. 52, № 358. – P. 891–899.

17. Путятин, Ю. В. Агроэкологические оптимумы насыщенности кальцием почв, загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr // Ю. В. Путятин, Т. М. Серая – Почвоведение. – 2007. – № 1. – С. 106–112.

18. Путятин, Ю. В. Минимизация поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениеводческую продукцию: монография / Ю. В. Путятин. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2008. – 255 с.

19. Система применения удобрений: учебник / В. В. Лапа [и др.]; под ред. В. В. Лапы. – Минск: ИВЦ Минфина, 2016. – 440 с.

EXCHANGEABLE CALCIUM OF SOIL AND ^{90}Sr ACCUMULATION BY CROPS

Y. V. Putyatin

Summary

In the field experiments conducted on sod-podzolic loamy sand soil (Podzoluvisol) close negative correlations have been found between exchange calcium contents in the soil and ^{90}Sr accumulation by plants. The efficiency of soil saturation by calcium in discrimination of ^{90}Sr is much higher on soils with low Ca status. The minimum of bioavailability of ^{90}Sr was observed at the content of exchange calcium for grain crops at 1300–1400 ppm of soil, rapeseed – 1195, corn – 1236, timothy grass – 980, clover – 1229, alfalfa – 1502 and potato – 1260 ppm of soil.

Поступила 28.11.18