

## Rates of $^{137}\text{Cs}$ leaching by various crop plants

Pakshina S.M.<sup>1</sup>, Belous N.M.<sup>1</sup>, Shapovalov V.F.<sup>1</sup>, Smolskiy E.V.<sup>1</sup>, Sitnov D.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Bryansk State Agrarian University,*

*Sovetskaia St. 2a, Kokino, Vygonichskiy Dist., Bryanskaya Region, 243365, Russian Federation.*

<sup>2</sup>*Novozybkov Agricultural Experimental Station of the All-Russian Scientific Research Institute of Lupine, Opytnaya Stanciya, Novozybkovskiy Dist., Bryanskaya Region, 243020, Russian Federation.*

*E-mail: bgsha@bgsha.com*

**Submitted 21.04.2017. Accepted 15.06.2017**

We studied the main reasons caused the agricultural crop variety regards  $^{137}\text{Cs}$  uptake and translocation from the soil. The cereal grains - oats (*Avena sativa* L.), Sudan grass (*Sorghum vulgare* L.), and millet seed (*Panicum milaceum* L.); grain legume – yellow lupine (*Lupinus luteus* L.), and fodder crop - annual ryegrass (*Lutium multiflorum* Lam) were considered in our research. The transpiration, transpiration coefficient, relative transpiration, multiplicity of decrease in the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in phytomass towards experimental variants and control, the intensity of the bioleaching process of  $^{137}\text{Cs}$ , the specific surfaces of rhizosphere, the rhizosphere surface density of root charges, and constants of roots and soil ion conductivity were used to calculate the  $^{137}\text{Cs}$  leaching from the soil by different crops. We used special model that considered the effect of double electrostatic fields of the rhizosphere and soil on the ion flux to calculate the  $^{137}\text{Cs}$  bioleaching from the soil by various crops. We suggested that the conductivity of the root-soil interface was the main reason of specific variation in the  $^{137}\text{Cs}$  leaching from the soil. We ranged the studied crops according to the decrease of  $^{137}\text{Cs}$  leaching from sod-podzolic sandy soil: yellow lupine, sultan grass – oats seed – millet seed – perennial ryegrass.

**Key words:** bioleaching model,  $^{137}\text{Cs}$ , rhizosphere, specific surface, surface charge density, bioleaching intensity, soil and rhizosphere electrical conductivity.

---

## Влияние сельскохозяйственных культур на показатели биовыноса $^{137}\text{Cs}$

С.М. Пакшина<sup>1</sup>, Н.М. Белоус<sup>1</sup>, В.Ф. Шаповалов<sup>1</sup>, Е.В. Смольский<sup>1</sup>, Д.М. Ситнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Брянский государственный аграрный университет*

*243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская 2а.*

<sup>2</sup>*Новозыбковская сельскохозяйственная опытная станция Всероссийского научно-исследовательского института люпина*

*243020, Россия, Брянская область, Новозыбковский район, п. Опытная станция.*

*E-mail: bgsha@bgsha.com*

В работе рассмотрены механизмы, вызывающие различия сельскохозяйственных культур в биовыносе  $^{137}\text{Cs}$  из почвы. В качестве объектов исследования взяты зерновые злаки: овёс посевной (*Avena sativa* L.), суданская трава (*Sorghum vulgare* L.), просо посевное (*Panicum milaceum* L.), зерновая бобовая культура – люпин желтый (*Lupinus luteus* L.), кормовая культура- райграс однолетний (*Lutium multiflorum* Lam). Для расчета биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы разными видами культур были определены транспирация, транспирационный коэффициент, относительная транспирация, кратность снижения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в фитомассе на вариантах по сравнению с контролем, интенсивность процесса биовыноса  $^{137}\text{Cs}$ , удельные поверхности корневых систем растений, поверхностная плотность зарядов

корней, ионопроводные постоянные корней и почвы. Для обоснования зависимости биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы от вида культуры использовалась модель, учитывающая действие двойных электростатических полей корневой системы и почвы на поток ионов. Показано, что основной причиной, вызывающей видовые различия в биовыносе  $^{137}\text{Cs}$  из почвы, является разность потенциалов на границах раздела фаз: корневая система культуры – почва. Исследованные культуры располагаются в следующей последовательности в порядке убывания величины биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из дерново-подзолистой песчаной почвы: люпин желтый, султанская трава – овёс посевной – просо посевное – райграс однолетний.

**Ключевые слова:** модель биовыноса,  $^{137}\text{Cs}$ , корневая система, удельная поверхность, плотность поверхностных зарядов, интенсивность биовыноса, ионопроводная постоянная корней и почвы.

## Введение

Авария на четвертом энергетическом блоке Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года привела к резкому увеличению содержания в природной среде Брянской области (РФ) искусственных радионуклидов, в том числе основного дозообразующего  $^{137}\text{Cs}$ , легко вовлекаемого в трофические цепи агроэкосистем (Fesenko et al., 2013; Howard et al., 2013; Fesenko et al., 2015). Её уникальность обусловлена не только количеством радиоактивных веществ, выброшенных в окружающую среду, и размером территорий, подвергшихся интенсивному радиоактивному загрязнению, но и последствиями, возникшими в сельском хозяйстве, а также материально-техническими затратами, потребовавшимися для смягчения последствий (Fesenko, Monken-Fernandes, 2013; Geraskin et al., 2013; Bradshaw et al., 2014).

Появление на территории зон с критической экологической ситуацией требует осуществления комплексного контроля состояния окружающей среды и проведения научных исследований, позволяющих не только выявить и оценить опасность уже существующих уровней загрязнения, но и установить закономерности вторичного перераспределения радионуклидов. Особый интерес представляет анализ происходящих изменений и прогноз дальнейшего развития радиоэкологической обстановки в сфере сельскохозяйственного производства, где начинаются основные пищевые цепочки, приводящие в итоге к накоплению радионуклидов в организме человека (Beresford et al., 2013; Garnier-Laplace et al., 2013; Geras'kin et al., 2014).

Современная сельскохозяйственная радиология накопила большой банк данных о биовыносе из почвы радионуклидов разными видами культур. Установлено, что ячмень, пшеница, овёс относятся к слабонакапливающим радионуклиды культурам; просо и гречиха - к средненакапливающим; фасоль и горох - к сильнонакапливающим радионуклиды культурам (Yankovich et al., 2012; Beresford et al., 2015).

В порядке убывания коэффициента перехода (Кп) сельскохозяйственные культуры располагаются в следующие последовательности:

- 1) Зерновые злаки и гречиха: гречиха > овёс > рожь > сорго > просо > ячмень > пшеница мягкая.
- 2) Зерновые бобовые: люпин синий > горох посевной > люпин желтый > люпин белый.
- 3) Многолетние бобовые травы: люцерна посевная > клевер красный > людовенец рогатый.
- 4) Многолетние злаковые травы: овсяница луговая > ежа сборная > кострец безостый > тимофеевка луговая > житняк гребневидный.

Причины возникновения этих последовательностей остались нерассмотренными. Поэтому в настоящее время возникла острая необходимость исследовать видоспецифичные механизмы, вызывающие аккумуляцию  $^{137}\text{Cs}$  в растениеводстве и определить их действие на основе одной общей зависимости.

Целью данной работы является рассмотрение основных процессов, участвующих в биовыносе  $^{137}\text{Cs}$ , а также физико-химических показателей почвы и корневых систем для определения наиболее эффективной кормовой или зернофуражной культуры для ее совместного использования с люпином, чтобы в условиях радиоактивного загрязнения на дерново-подзолистых песчаных почвах получать продукцию с высокой урожайностью и удельной активностью, соответствующей радиологическим стандартам.

## Материалы и методы исследования

Полевые опыты были проведены на опытном поле Новозыбковской сельскохозяйственной опытной станции ВНИИ люпина в 2011-2013 гг.

Почва опытного участка представлена дерново-подзолистой песчаной, подстилаемой с глубины 1,2 м мощными водноледниковыми песками. Мощность гумусового горизонта составляет 18-20 см. Содержание органического вещества (по Тюрину) составляет от 1,3 до 1,5%,  $\text{pH}_{\text{KCl}} - 5,7-5,9$ ; сумма поглощенных оснований равна 7,2-9,3 мг-экв. на 100 г почвы, содержание подвижного фосфора и калия соответственно 357-380 и 69-110 мг/кг почвы (по Кирсанову). Плотность загрязнения опытного участка  $^{137}\text{Cs}$  равна в среднем 850 кБк/м<sup>2</sup>.

Опыт развернут в звене севооборота со следующим чередованием культур: озимая рожь, картофель, одновидовые и бобово-злаковые посевы (на зеленую массу и зернофураж).

В качестве объектов исследования взяты зерновые злаки: овёс посевной (*Avena sativa* L.), суданская трава (*Sorghum vulgare* L.), просо посевное (*Panicum milaceum* L.), зерновая бобовая культура – люпин желтый (*Lupinus luteus* L.), кормовая культура- райграс однолетний (*Lolium multiflorum* Lam). Использовались следующие сорта культур: люпин желтый (Престиж), овес (Скакун), суданская трава (Кинельская-100), райграс однолетний (Изорский), просо посевное (Квартет).

Опыт включал три варианта: контроль,  $K_{180}$ ,  $K_{210}$ . В качестве калийных удобрений использовался 56% хлористый калий. Общая площадь опытных делянок – 70 м<sup>2</sup>, учетная площадь – 30 м<sup>2</sup>. Размещение делянок было рандомизированное, в трехкратной повторности.

Обработка почвы после уборки картофеля включала дискование почвы на глубину 8-10 см тяжелой дисковой бороной БДТ-3. В весенний период проводили культивацию с боронованием и предпосевную обработку почвы комбинированным агрегатом РВК-3,6. Минеральные удобрения вносили вручную. Посев опытных делянок проводили сеялкой СН-10 в первой декаде мая. Учет зеленой массы одновидовых посевов кормовых культур проводили вручную. Удельную активность <sup>137</sup>Cs в растительных образцах проводили на УСК «Гамма Плюс» с программным обеспечением «Прогресс-2000» в геометрии «Маринелли».

При исследовании процесса биовыноса <sup>137</sup>Cs из почвы одновидовыми посевами были рассчитаны транспирация, транспирационный коэффициент, относительная транспирация, массовая активность <sup>137</sup>Cs на одну тонну транспирирующей влаги, кратность снижения удельной активности <sup>137</sup>Cs в фитомассе трав на вариантах по сравнению с контролем ( $A_k/A_i$ ), интенсивность процесса биовыноса <sup>137</sup>Cs из почвы.

Транспирация рассчитывалась по формуле Пенмана (Penman, 1972), испаряемость по формуле Будыко (Budyko, 1956). Массовая активность <sup>137</sup>Cs на одну тонну транспирирующей влаги рассчитывалась по формуле

$$Q = A_{уд} * U / \sum E_t, \text{ Бк/т воды (1)},$$

где  $A_{уд}$  – удельная активность <sup>137</sup>Cs в зеленой фитомассе,  $U$  – урожайность,  $\sum E_t$  – транспирация за период вегетации.

Интенсивность процесса биовыноса <sup>137</sup>Cs из почвы рассчитывалась по формуле:  $\lambda = \ln(A_k/A_i) / \sum E_t$ , (2)

где  $A_k/A_i$  – удельная активность <sup>137</sup>Cs в зеленой фитомассе соответственно на контроле и варианте  $i$ ,  $\sum E_t$  – транспирация в период вегетации, мм, которая требуется для снижения удельной активности <sup>137</sup>Cs в фитомассе от его значения на контроле ( $A_k$ ) до значения при внесении определенной дозы NPK ( $A_i$ ),  $\lambda$  – постоянная величина для определенных условий протекания процесса биовыноса <sup>137</sup>Cs из почвы. Обратная величина  $\lambda$  характеризует интенсивность процесса биовыноса <sup>137</sup>Cs под действием минерального удобрения. Чем выше значение  $\lambda$ , тем интенсивнее снижается процесс биовыноса <sup>137</sup>Cs из почвы.

Для обоснования зависимости биовыноса <sup>137</sup>Cs из почвы от вида культуры использовалась модель, учитывающая действия двойных электростатических полей корневой системы и почвы на поток ионов (Pakshina, Petukhov, 1976).

## Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены некоторые фитоклиматические и метеорологические показатели в период весенне-летней вегетации культур в разные годы. Период вегетации культур в 2013 году характеризовался повышенными значениями радиационного баланса, фотосинтетически активной радиации, испаряемости и дефицита атмосферной влаги. В 2013 году культуры выращивались в экстремальных по водообеспеченности условиях ( $KU=0,34$ ).

Таблица 1. Фитоклиматические и метеорологические показатели весенне-летней вегетации посевов культур в разные годы

| Показатель          | Год   |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|
|                     | 2011  | 2012  | 2013  |
| $\sum B_c$          |       |       |       |
| зеленая масса       | 590   | 597   | 720   |
| зернофураж          | 378   | 397   | 472   |
| $t, C$              | 19,30 | 19,40 | 21,60 |
| $L$                 | 2,46  | 2,46  | 2,45  |
| $\sum E_0$          | 240   | 243   | 294   |
| $\sum H$            | 162   | 119   | 99    |
| $\sum H - \sum E_0$ | -78   | -124  | -195  |
| $KU$                | 0,67  | 0,49  | 0,34  |

$\sum B_c$  – сумма суточных значений радиационного баланса в период вегетации, МДж/м<sup>2</sup>;  $\sum Q_f$  – сумма суточных значений в течение вегетации фотосинтетически активной радиации, МДж/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура воздуха в градусах Цельсия;  $L$  – удельная теплота парообразования, МДж/кг;  $\sum E_0$  – испаряемость за период вегетации, мм;  $\sum H$  – сумма осадков за период вегетации, мм;  $\sum H - \sum E_0$  – дефицит влаги в период вегетации, мм;  $KU$  – коэффициент увлажнения. Метеорологические показатели представлены по данным метеопоста Новозыбковской опытной станции, фитоклиматические показатели рассчитаны по данным актинометрических наблюдений, проводившихся на метеопоста БГАУ.

Период вегетации культур в 2011 году характеризовался оптимальным водным режимом ( $KU \sim 0,7$ ). В 2012 году культуры испытывали недостаток почвенной влаги ( $KU \sim 0,5$ ). Отличающиеся фитоклиматические и метеорологические условия выращивания культур в 2011-2013 гг. позволили выявить роль вида в биовыносе <sup>137</sup>Cs из почвы.

В табл. 2 представлены транспирационные коэффициенты (К.т.) разных культур в период весенне-летней вегетации.

Таблица 2. Транспирационные коэффициенты (К.т.) разных видов культур в период весенне-летней вегетации

| Год     | Культура     |               |                    |                 |                |
|---------|--------------|---------------|--------------------|-----------------|----------------|
|         | Люпин желтый | Овёс посевной | Райграс однолетний | Суданская трава | Просо посевное |
| 2011    | 362          | 467           | 496                | 469             | 378            |
| 2012    | 347          | 454           | 461                | 451             | 350            |
| 2013    | 355          | 461           | 470                | 457             | 355            |
| Среднее | 355          | 461           | 476                | 459             | 361            |

Примечание: К.т. – транспирационный расход влаги (т) на формирование одной тонны воздушно-сухой фитомассы.

Все культуры повысили значение К.т. в 2011 году, при оптимальном водном режиме, по сравнению с 2012 и 2013 годами (табл. 2). Известно, что транспирационный расход влаги на формирование одной тонны воздушно-сухой фитомассы зависит от почвенно-климатических условий и вида культуры (Agricultural encyclopedia, 1972) и не зависит от минерального питания культур (Shatilov, 1978). Данные таблицы 2 показывают, что наибольшее различие в К.т. наблюдались у разных видов культур. Люпин желтый и просо посевное затрачивали на формирование одной т фитомассы минимальное количество влаги (360 т). Райграс однолетний, являясь влаголюбивой культурой, затрачивал на формирование одной т фитомассы максимальное из представленных культур количество транспирируемой влаги (480 т). Овёс посевной и суданская трава занимают среднее положение между влаголюбивыми и засухоустойчивыми культурами (К.т. = 460).

В табл. 3 представлены рассчитанные по экспериментальным данным значения биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  с одной т транспирирующей воды (Бк/1 т воды) культурами в период весенне-летней вегетации в разные годы.

Таблица 3. Биовынос  $^{137}\text{Cs}$  с одной тонной транспирирующей воды (Бк/т воды) культурами в период весенне-летней вегетации в разные годы

| Вариант          | Люпин желтый |      |      | Овёс посевной |     |     | Райграса однолетний |     |     | Суданская трава |     |     | Просо посевное |     |      |
|------------------|--------------|------|------|---------------|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|----------------|-----|------|
|                  | 1            | 2    | 3    | 1             | 2   | 3   | 1                   | 2   | 3   | 1               | 2   | 3   | 1              | 2   | 3    |
| Контроль         | 2763         | 1489 | 1467 | 866           | 751 | 271 | 1141                | 690 | 333 | 437             | 791 | 371 | 944            | 669 | 1094 |
| K <sub>180</sub> | 1205         | 1024 | 759  | 660           | 512 | 159 | 801                 | 424 | 313 | 335             | 323 | 356 | 339            | 503 | 867  |
| K <sub>210</sub> | 913          | 915  | 488  | 219           | 480 | 473 | 145                 | 397 | 177 | 260             | 162 | 215 | 246            | 377 | 431  |

Примечание: 1 – 2011г.; 2 – 2012г.; 3 – 2013г.

На опытном поле наблюдалось значительное снижение биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  с одной т транспирирующей влаги культурами в 2012 и 2013 годах по сравнению с 2011 годом (табл. 3). Исключение составили делянки, занятые просо посевным. Для объяснения отмеченного явления была рассчитана относительная транспирация (табл. 4).

Таблица 4. Характеристика процесса биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  культурами при внесении калийных удобрений в разные годы

| Вариант   | Люпин желтый |      |      | Овёс посевной |      |      | Райграс однолетний |      |      | Суданская трава |       |      | Просо посевное |      |      |
|---|--------------|------|------|---------------|------|------|--------------------|------|------|-----------------|-------|------|----------------|------|------|
|   | 1            | 2    | 3    | 1             | 2    | 3    | 1                  | 2    | 3    | 1               | 2     | 3    | 1              | 2    | 3    |
| Кратность снижения биовыноса $^{137}\text{Cs}$ из почвы на вариантах по сравнению с контролем |              |      |      |               |      |      |                    |      |      |                 |       |      |                |      |      |
| K <sub>180</sub>  | 2,30         | 1,40 | 2    | 1,30          | 1,50 | 1,70 | 1,40               | 1,60 | 1,50 | 1,30            | 2,40  | 1,20 | 2,80           | 1,30 | 1,30 |
| K <sub>210</sub>  | 3            | 1,60 | 3    | 3,90          | 1,60 | 0,60 | 1,50               | 1,70 | 2    | 1,70            | 11,90 | 1,70 | 3              | 1,80 | 2,50 |
| Относительная транспирация посевов  |              |      |      |               |      |      |                    |      |      |                 |       |      |                |      |      |
| Контроль  | 0,57         | 0,96 | 0,82 | 0,31          | 0,41 | 0,33 | 0,42               | 0,34 | 0,13 | 0,87            | 0,67  | 0,54 | 0,62           | 0,39 | 0,43 |
| K <sub>180</sub>  | 0,71         | 1,03 | 0,87 | 0,76          | 0,39 | 0,34 | 0,52               | 0,4  | 0,14 | 0,92            | 0,69  | 0,56 | 0,66           | 0,55 | 0,46 |
| K <sub>210</sub>  | 0,72         | 1,08 | 0,88 | 0,82          | 0,49 | 0,36 | 0,58               | 0,44 | 0,16 | 0,94            | 0,76  | 0,57 | 0,68           | 0,55 | 0,48 |
| Постоянная биовыноса $^{137}\text{Cs}$ из почвы (λ, 1/М)                                      |              |      |      |               |      |      |                    |      |      |                 |       |      |                |      |      |
| K <sub>180</sub>  | 4,90         | 1,30 | 2,70 | 1,40          | 4,20 | 5,20 | 2,70               | 4,80 | 9,60 | 1,20            | 5,20  | 1,10 | 6,60           | 1,90 | 1,90 |
| K <sub>210</sub>  | 6,30         | 1,80 | 4,20 | 6,90          | 4    | 4,80 | 2,90               | 5    | -    | 2,40            | 86    | 3,10 | 8,20           | 4,40 | 6,50 |
| Среднее   |              | 3,50 |      |               | 4,40 |      |                    | 6,60 |      |                 | 3,60  |      |                | 4,90 |      |

1 – 2011г.; 2 – 2012г.; 3 – 2013г.

В 2011 году дерново-подзолистая песчаная почва содержала повышенное количество влаги по сравнению с 2012 и 2013 годами, соответствующее оптимальному значению относительной транспирации, равной 0,7-0,85; или близкому к нему значению, равному 0,5-0,6 (табл. 1, 4). При оптимальном влагосодержании почвы наблюдались повышенные значения К.т. и биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  с одной тонной транспирируемой влаги на всех вариантах.

В 2012 резко увеличился дефицит атмосферной влаги (-124мм) и все культуры, за исключением люпина жёлтого, понизили поглощение солнечной радиации, уменьшив значение относительной транспирации и биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  с одной тонной транспирируемой влаги на всех вариантах. В 2013 году дефицит атмосферной влаги возрос по сравнению с 2011 и 2012 годами соответственно в 1,6 и 2,5 раза. Для райграса однолетнего сложилась стрессовая ситуация ( $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} = 0,13-0,16$ ), овёс посевной испытывал большой дефицит доступной влаги ( $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} = 0,33-0,36$ ) на всех вариантах опыта. Небольшой дефицит доступной влаги испытывали просо посевное ( $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} = 0,4-0,5$ ) и султанская трава ( $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} = 0,5-0,6$ ) и совсем не испытывал дефицита доступной влаги люпин желтый ( $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} = 0,8-0,9$ ).

Таким образом, снижение на всех вариантах биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  с одной тонной транспирируемой воды культурами в период весенне-летней вегетации в 2012 и 2013 годах по сравнению с 2011 годом обусловлено запасами доступной влаги.

Кратность снижения биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы на вариантах с внесением калийного удобрения по сравнению с контролем также зависела от относительной транспирации посевов, но эту зависимость культуры проявляли специфически (табл. 4). Все культуры имели максимальное значение Ксн только при оптимальном влагосодержании почвы ( $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} = 0,7-0,85$ ). При повышении относительной транспирации и значении, равном 0,7-0,85, люпин желтый снижает значения Ксн, то есть увеличивается биовынос  $^{137}\text{Cs}$ .

Овёс посевной снижает значения Ксн при значении  $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} = 0,3-0,4$ . Райграс однолетний в течение трёх лет 2011-2013 гг испытывал недостаток доступной влаги и характеризовался низкими значениями Ксн. Суданская трава при значениях  $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} < 0,7-0,85$  имела низкие величины Ксн. Просо посевное характеризовалось низкими значениями Ксн при  $\Sigma_{\text{в}} \text{Et} / \Sigma_{\text{в}} \text{Eo} < 0,7-0,85$ . Таким образом, зависимость величин Ксн от относительной транспирации культуры проявляли по-разному.

Даже в засушливый период вегетации 2013 года относительная транспирация люпина жёлтого соответствовала оптимальному значению, равному 0,7-0,85. Все остальные культуры в 2013 году нуждались в дополнительном увлажнении, причем овёс посевной и райграс однолетний находились в стрессовых условиях. Для всех культур соблюдалась линейная, прямо пропорциональная зависимость между натуральным логарифмом Ксн и транспирацией посевов. Эта зависимость имеет следующий вид

$$\ln (A_k/A_i) = \lambda \Sigma_{\text{в}} \text{Et}, \quad (3)$$

$$\text{или } A_i = A_k / \exp(\lambda \Sigma_{\text{в}} \text{Et}), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – постоянная для определённых почвенно-климатических условий и вида культуры.

Из формулы (2) следует, что чем больше значения  $\lambda$ , тем меньше биовынос  $^{137}\text{Cs}$  культурой по сравнению с контролем. Для раскрытия механизма влияния вида культуры на биовынос  $^{137}\text{Cs}$  из почвы была использована следующая модель:

$$\text{Ск.в.} = \text{Сп} \exp[-(\text{Фк.в.} - \text{Фп})], \quad (5)$$

где Ск.в. – содержание иона в корневых волосках и почве соответственно, Фк.в., Фп- соответственно межфазные потенциалы на границах раздела корень-раствор и почва-раствор (Pakshina, Petukhov, 1976).

Корневые волоски на корнях растений образуют зону всасывания почвенного раствора. Ионы, передвигающиеся к корневым волоскам, прежде чем попасть на их поверхность, преодолевают посредством диффузии два электростатических поля, которые могут быть перекрыты.

Выражая межфазные потенциалы через поверхностную плотность зарядов корневых волосков и почвы уравнение (5) было приведено к следующему виду:

$$\text{Ск.в.} = \text{Сп} \exp[-(\lambda \text{к.в.} - \lambda \text{п})], \quad (6)$$

где  $\lambda \text{к.в.}$ ;  $\lambda \text{п}$  - соответственно постоянные корневых волосков и почвы.

Приближенное выражение для  $\lambda$  имеет следующий вид:

$$\lambda = 1,8 \cdot 10^3 \cdot \text{ЕКО} \cdot [(Z_1 + Z_2)/2]^{0,5} / \text{ST}, \quad (7)$$

где ЕКО, S, T, - соответственно ёмкость катионного обмена, удельная поверхность, температура почвы и корней в период вегетации,  $Z_1$ ;  $Z_2$  - соответственно катион и анион соли (Pakshina, 1990).

Из формул (5-7) следует, что биовынос  $^{137}\text{Cs}$  зависит не только от свойств почвы, но и особенностей корневой системы культуры.

Имея данные ЕКО, удельной поверхности, температуры почвы в период вегетации по формуле (7) было рассчитано значение  $\lambda \text{п}$  для дерново-подзолистой песчаной почвы, которое составило 5,3 1/М. При определении постоянной корневых волосков ( $\lambda \text{к.в.}$ ) к величине  $\lambda \text{п}$  прибавлялось экспериментально полученное значение постоянной биовыноса ( $\lambda$ ).

Постоянная биовыноса зависит от вида культуры и относительной транспирации, обусловленной фитоклиматическими условиями вегетации. По средней величине биовыноса на вариантах с внесением разных доз калийного удобрения культуры расположились в следующую убывающую последовательность: люпин желтый, суданская трава > овёс посевной > просо посевное > райграсс однолетний.

В табл. 5 приведены физико-химические характеристики корневых систем растений. Данные ёмкости катионного обмена корневых систем были взяты из работ (Drake et al., 1951; Mehlich, Drake, 1955; Drake, 1964). Для расчета удельной поверхности корневых систем использовалась формула (7).

Таблица 5. Физико-химическая характеристика корневых систем культур.

| Показатель           | Люпин желтый | Овёс посевной | Райграсс однолетний | Суданская трава | Просо посевное |
|----------------------|--------------|---------------|---------------------|-----------------|----------------|
| ЕКО, мэкв/100г       | 47,7         | 22,8          | 22,5                | 13,5            | 12,2           |
| S, м <sup>2</sup> /г | 33,3         | 14,4          | 11,6                | 9,3             | 7,3            |
| σ, Кл/м <sup>2</sup> | 1,37         | 1,51          | 1,86                | 1,39            | 1,6            |
|                      | 8,8          | 9,7           | 11,9                | 8,9             | 10,2           |

ЕКО – ёмкость катионного обмена воздушно-сухих корней растений, S – удельная поверхность корней, σ – плотность поверхностных зарядов корней растений, λ – постоянная корневой системы культуры.

Корни люпина жёлтого имеют очень большую удельную поверхность, несравнимую с другими исследуемыми культурами (табл. 5), поэтому люпину желтому доступна трудноусвояемая влага, содержащая большую долю адсорбированных катионов  $^{137}\text{Cs}$ . Расположение культур по величине плотности отрицательного заряда и постоянной корневых систем подтверждает экспериментально полученные данные по величине биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы.

При подборе культуры для составления смешанного посева с люпином желтым необходимо учитывать плотность поверхностных зарядов и засухоустойчивость компонента. С учетом этих признаков для составления смешанного посева с люпином желтым на дерново-подзолистых песчаных почвах можно использовать только просо посевное.

## Выводы

При проведении экспериментально-полевых исследований биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  разными видами культур получены следующие результаты:

- при выращивании на дерново-подзолистых песчаных почвах разные виды культур имеют следующие значения транспирационного коэффициента: люпин желтый и просо посевное – 360, овёс посевной и суданская трава – 460, райграсс однолетний – 480;
- для всех исследуемых видов культур соблюдается линейная прямо пропорциональная зависимость между натуральным логарифмом кратности снижения биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы на вариантах по сравнению с контролем и транспирацией посевов. Коэффициент, входящий в зависимость, является постоянной величиной для определённого вида культуры и почвенно-климатических условий;
- в соответствии с убыванием средней величины биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы на вариантах с внесением калийного удобрения, культуры составили следующую последовательность: люпин желтый, суданская трава > овёс посевной > просо посевное > райграсс однолетний;
- биовынос  $^{137}\text{Cs}$  из почвы определяется физико-химическими свойствами почвы и корневой системы культуры. По величине плотности поверхностных зарядов корневой системы культуры располагаются в последовательности, которая соответствует с экспериментально полученной по величине биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  из дерново-подзолистой песчаной почвы;
- люпин желтый, который характеризуется самым большим значением удельной поверхности, способен усваивать труднодоступную влагу с основной долей адсорбированного  $^{137}\text{Cs}$  и поддерживать на оптимальном уровне относительную транспирацию в засушливый вегетационный период ( $KU=0,34$ );
- для смешанных посевов с люпином, при возделывании их на дерново-подзолистых песчаных почвах в разные годы, можно использовать только просо посевное, тогда как райграсс однолетний, суданская трава и овёс посевной по способности к биовыносу  $^{137}\text{Cs}$  сравнимы с люпином желтым.

## References

- Agricultural Encyclopedia. (1972). Moscow: Soviet Encyclopedia (in Russian).
- Beresford, N.A., Wells, C., Wood, M.D., Beaugelin-Seiller, K., Burgos, J. et al. (2015). Radionuclide biological half-life values for terrestrial and aquatic wildlife. *J. Environ. Radioactivity*, 150, 270-276. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.08.018
- Beresford, N.A., Yankovich, T.L., Wood, M.D., Fesenko, S., Andersson, P., Muikku, M., Willey, N.J. (2013). A new approach to predicting environmental transfer of radionuclides to wildlife: A demonstration for freshwater fish and cesium. *Science of the Total Environment*, 463-464, 284-292. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.013
- Bradshaw, C., Kapustka, L., Barnhouse, L., Brown, J., Ciffroy, P. et al. (2014). Using an Ecosystem Approach to complement protection schemes based on organism-level endpoints. *J. Environ. Radioactivity*, 136, 98-104. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.05.017
- Budyko, M.I. (1956). Heat balance of the Earth surface. Leningrad, Hydrometeoizdat (in Russian).

- Drake, M., Vengeis, J., Colby, W.S. (1951). Cation-exchange Capacity of Plant Roots. *Soil Science*, 72(2), 139-149.
- Drake, M. (1964). Soil chemistry and plank nutrition. In: *Chemistry of the soil*. New York-London.
- Fesenko, S., Chupov, A., Jacob, P., Ulanovsky, A., Bogdevich, I. et al. (2013). Justification of remediation strategies in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 119, 39-47. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2010.08.012
- Fesenko, S., Isamov, N., Sanzharova, N., Fesenko, E., Barnett, C.L., Beresford, N.A., Howard, B.J. (2015). Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: biological half-lives. *J. Environ. Radioactivity*, 142, 136-151. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.01.015
- Fesenko, S., Monken-Fernandes, H. (2013). Environmental remediation: From Arlington to Astana. *J. Environ. Radioactivity*, 119, 1-4. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.01.008
- Garnier-Laplace, J., Beaugelin-Seiller, K., Hinton, T.G., Geras'kin, S., Oudalova, A., Della-Vedova, C., Real, A. (2013). Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates. *J. Environ. Radioactivity*, 121, 12-21. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.01.013
- Geraskin, S., Evseeva, T., Oudalova, A. (2013). Effects of long-term chronic exposure to radionuclides in plant populations. *J. Environ. Radioactivity*, 121, 22-32. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.03.007
- Geras'kin, S.A., Volkova, P.Y. (2014). Genetic diversity in Scots pine populations along a radiation exposure gradient. *Science of the Total Environment*, 496, 317-327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.020
- Howard, B.J., Beresford, N.A., Barnett, C.L., Wells, C., Copplestone, D. et al. (2013). The IAEA handbook on radionuclide transfer to wildlife. *J. Environ. Radioactivity*, 121, 55-74. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.01.027
- Mehlich, A., Drake, M. (1953). Soil chemistry and plank nutrition (pp. 286-328). In *Chemistry of the soil*. New York.
- Pakshina, S.M., Petukhov, V.R. (1976). Impact of double electric layers of root surface and soil particles on the availability of nutritional elements to the plants. *Agricultural Chemistry (Agrokhimiya)*, 5, 97-102 (in Russian).
- Pakshina, S.M. (1990). Salt migration in soil micropores. Thesis of Doctoral Dissertation. Novosibirsk (in Russian).
- Penman, X. (1972). Water turnover. Moscow: Mir (in Russian).
- Shatilov, I.S. (1978). Water usage and plant transpiration in field conditions. In: *Scientific background of crop prognosis*. Moscow: Kolos (in Russian).
- Yankovich, T., Beresford, N.A., Barnett, C.L., Fesenko, S., Fesenko, J. et al. (2013). Establishing a database of radionuclide transfer parameters for freshwater wildlife. *J. Environ. Radioactivity*, 126, 299-313. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.07.014

---

**Citation:**

Pakshina, S.M., Belous, N.M., Shapovalov, V.F., Smolskiy, E.V., Sitnov D.M. (2017). Rates of <sup>137</sup>Cs leaching by various crop plants. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(2), 184-190.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0. License

---