



Научная статья  
УДК 631.4:502.76  
doi: 10.55186/25876740\_2023\_66\_1\_58

## КОРРЕЛЯЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ $^{137}\text{Cs}$ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ РОССИИ

П.М. Орлов, Н.И. Аканова

Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии  
имени Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье приведено сопоставление уровней загрязнения почв от Чернобыльской аварии, полученных агрохимической службой Минсельхоза РФ и Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Отмечено хорошее согласие результатов. Рассчитаны уровни загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  в субъектах РФ, подвергшихся загрязнению от Чернобыльской аварии. Выявлена положительная линейная корреляция между средними значениями современного уровня загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  и площадью загрязнения сельскохозяйственных угодий. Коэффициент корреляции  $r = 0,77$ . При радиоактивном загрязнении почв от Чернобыльской аварии наблюдается значительная пятнистость. Вариабельность радиоактивного загрязнения проявляет себя на уровне субъекта РФ, административного района, населенных пунктов и отдельных хозяйств. Максимальные коэффициенты вариации наблюдаются для почв с высокими уровнями загрязнения (Брянская, Тульская и Калужская области). В целом с уменьшением плотности загрязнения почвы наблюдается тенденция к снижению коэффициента вариации. Рассчитаны периоды полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из почв Брянской (25,6 года), Калужской (22 года), Тульской (20 лет) и Орловской (18 лет) областей. Оценены скорость миграции и периоды миграционного полуснижения  $^{137}\text{Cs}$  из почв названных областей. В Брянской области период миграционного полуснижения равнялся 173 года, Калужской — 87, Тульской — 63, Орловской — 46 лет. Отмечено, что на скорость миграции влияет внесение калийных удобрений и известковых материалов. При изучении корреляций и закономерностей загрязнения почв радионуклидами от радиационных аварий следует отметить общий принцип поведения радионуклидов в почвах. Его можно назвать «принципом почвенного соответствия» и сформулировать следующим образом: при загрязнении почвы техногенными радионуклидами последние начинают себя вести в соответствии с поведением их природных изотопных носителей. Инструментом осуществления «принципа почвенного соответствия» являются изотопные реакции обмена между несущими радионуклид матрицами и компонентами почвы, удобрений и мелиорантов.

**Ключевые слова:** почвы, загрязненные территории,  $^{137}\text{Cs}$ , период полувыведения, миграция  $^{137}\text{Cs}$ , плодородие почв

Original article

## CORRELATIONS AND PATTERNS OF CONTAMINATION OF $^{137}\text{Cs}$ SOILS OF AGRICULTURAL LAND IN RUSSIA

P.M. Orlov, N.I. Akanova

All-Russian Research Institute of Agrochemistry  
named after D.N. Pryanishnikov, Moscow, Russia

**Abstract.** The article provides a comparison of the levels of soil pollution from the Chernobyl accident obtained by the agrochemical service of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation and the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. A good agreement of the results was noted. The levels of soil contamination of  $^{137}\text{Cs}$  in the subjects of the Russian Federation exposed to pollution from the Chernobyl accident were calculated. A positive linear correlation between the average values of the current level of soil pollution of  $^{137}\text{Cs}$  and the area of contamination of agricultural land was revealed. Correlation coefficient  $r = 0.77$ . With radioactive contamination of soils from the Chernobyl accident, significant spotting is observed. The variability of radioactive contamination manifests itself at the level of the constituent entity of the Russian Federation, the administrative district, settlements and individual farms. Maximum coefficients of variation are observed for soils with high levels of pollution (Bryansk, Tula and Kaluga regions). In general, with a decrease in the density of soil pollution, there is a tendency to reduce the coefficient of variation. The half-life of  $^{137}\text{Cs}$  from the soils of Bryansk (25.6 years), Kaluga (22 years), Tula (20 years) and Orel (18 years) regions is calculated. The migration rate and periods of migration half-disappearance of  $^{137}\text{Cs}$  from the soils of the named areas are estimated. In the Bryansk region, the period of migration half-warming was 173 years, Kaluga — 87, Tula — 63, Orel — 46 years. It is noted that the rate of migration is affected by the introduction of potash fertilizers and lime materials. When studying the correlations and patterns of soil contamination with radionuclides from radiation accidents, it should be noted the general principle of behavior of radionuclides in soils. It can be called the “principle of soil correspondence”. And to formulate as follows: when the soil is polluted with technogenic radionuclides, the latter begin to behave in accordance with the behavior of their natural isotopic carriers. The tool for the implementation of the “principle of soil correspondence” isotope exchange reactions between radionuclide-bearing matrices and components of soil, fertilizers and reclamation agents.

**Keywords:** soils, contaminated areas,  $^{137}\text{Cs}$ , half-life, migration  $^{137}\text{Cs}$ , soil fertility

Крупнейшая радиационная авария в истории развития атомной энергетики произошла на Украине 26 апреля 1986 г. на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС. В России почвы 19 областей были загрязнены  $^{137}\text{Cs}$  с плотностью загрязнения выше 1 Ки/км<sup>2</sup>. Особенно сильно пострадали сельскохозяйственные угодья Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей [1, 2].

Наибольший урон от аварии понесло сельское хозяйство. Поступление  $^{137}\text{Cs}$  в почвы сельскохозяйственных угодий обусловило загрязнение сельскохозяйственной продукции на многие десятилетия. Изучение и выявление закономерностей и корреляций радиоактивного

загрязнения почв представляет собой важную научно-практическую задачу. Для решения этой задачи нами привлечены данные агрохимической службы Министерства сельского хозяйства РФ по оценке площадей радиоактивного загрязнения почв 1992-1994 гг. [1], данные по радиоактивному загрязнению территорий населенных пунктов РФ  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  [2], результаты локального радиационного мониторинга почв сельскохозяйственных угодий на реперных участках агрохимической службы. Статистические расчеты и сопоставления этих данных позволили выявить ряд закономерностей, о которых и сообщается в этой работе.

В таблице 1 приведены данные о содержании  $^{137}\text{Cs}$  в почвах сельскохозяйственных угодий РФ, подвергшихся радиоактивному загрязнению от Чернобыльской аварии. Наблюдается корреляционная зависимость между площадью загрязнения почвы в субъекте РФ и средней плотностью загрязнения (содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в почве) с коэффициентом положительной линейной корреляции, равным 0,77. Это численное значение коэффициента корреляции соответствует области сильной корреляции (0,7-0,9).

Следует отметить, что существование сильной корреляционной зависимости между площадью радиоактивного загрязнения и средней



плотностью загрязнения не равнозначно существованию причинно-следственной связи между ними. Такая зависимость может быть значительно сложнее.

Из изложенного следует, что при возникновении крупных радиационных аварий на АЭС с продолжительным временем развития (дни, недели) должен существовать субъект РФ, в котором будут сочетаться высокий уровень загрязнения почвы с большой площадью радиоактивного загрязнения. В почве этого субъекта запас <sup>137</sup>Cs будет значительно превышать запас <sup>137</sup>Cs в почве других субъектов. Для Чернобыльской аварии таковым субъектом является Брянская область.

При радиоактивном загрязнении почв от Чернобыльской аварии наблюдается значительная пятнистость [2-6]. Пятнистость радиоактивного загрязнения почвы характерна не только для областей, подвергшихся интенсивному загрязнению (Брянская, Тульская, Орловская и Калужская области), но и для других областей, представленных в таблице 1. Вариабельность радиоактивного загрязнения имеет место на уровне субъекта РФ, административного района, населенных пунктов и отдельных хозяйств.

Максимальные коэффициенты вариации (отношение стандартного отклонения к среднему значению) наблюдаются для почв с высокими уровнями загрязнения (Брянская, Тульская и Калужская области). В целом с уменьшением плотности загрязнения почвы наблюдается тенденция к снижению коэффициента вариации. Только 2 субъекта РФ (Курская область и Республика Мордовия) имеют относительно низкую плотность загрязнения и значительный коэффициент вариации.

В результате радиоактивного распада <sup>137</sup>Cs ( $T_{1/2} \sim 30$  лет) происходит снижение загрязнения почвы названным радионуклидом. На рисунке представлена динамика снижения содержания <sup>137</sup>Cs в почвах реперных и контрольных участков с 1991 по 2016 гг. для загрязненных Чернобыльскими выпадениями субъектов РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Пензенская, Саратовская, Тамбовская области, Республика Мордовия) и России в целом. Там же приведены расчетная зависимость снижения содержания <sup>137</sup>Cs в почве субъектов в соответствии с законом радиоактивного распада ( $T_{1/2} = 30$  лет). Видно, что в натуральных условиях первые 15-20 лет снижение содержания <sup>137</sup>Cs в почве происходило в соответствии с законом радиоактивного распада, далее с 2007 г. снижение содержания <sup>137</sup>Cs в почве происходило более быстро.

Для 8 субъектов РФ рассчитано среднее значение содержания <sup>137</sup>Cs в почве реперных участков для каждой из областей в соответствующих временных интервалах. Результаты представлены в таблице 2.

Количество реперных участков в каждой из областей незначительно. Количество данных о содержании <sup>137</sup>Cs в почве областей находится в интервале 10-40 значений.

В виду того, что при загрязнении Чернобыльскими выпадениями наблюдался значительный разброс результатов измерений содержания <sup>137</sup>Cs в почве, статистическая оценка средних значений приводила к большим погрешностям, определение периода полувыведения <sup>137</sup>Cs для каждой из областей было невозможным. Поэтому все полученные результаты были объединены

Таблица 1. Площадь и плотность загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственных угодий в областях, загрязненных от Чернобыльской аварии  
Table 1. Area and density of contamination of <sup>137</sup>Cs of agricultural land in areas contaminated from the Chernobyl accident

| Субъект РФ    | Площадь загрязнения, км <sup>2</sup> | Средняя плотность загрязнения в 2014 г, Ки/км <sup>2</sup> | Стандартное отклонение, Ки/км <sup>2</sup> | Коэффициент вариации |
|---------------|--------------------------------------|--|--|----------------------|
| 1             | 2                                    | 3  | 4  | 5                    |
| Брянская      | 6980                                 | 1,87±0,57  | 3,1  | 1,65                 |
| Тульская      | 7790                                 | 1,0±0,19   | 0,80                                       | 0,80                 |
| Орловская     | 4190                                 | 0,65±0,07  | 0,30                                       | 0,46                 |
| Калужская     | 1620                                 | 0,71±0,21  | 0,81                                       | 1,14                 |
| Рязанская     | 5320                                 | 0,61±0,06  | 0,25                                       | 0,41                 |
| Пензенская    | 4130                                 | 0,44±0,03  | 0,13                                       | 0,30                 |
| Мордовия      | 1900                                 | 0,30±0,04  | 0,19                                       | 0,63                 |
| Белгородская  | 1620                                 | 0,59±0,05  | 0,15                                       | 0,25                 |
| Липецкая      | 1619                                 | 0,50±0,06  | 0,21                                       | 0,42                 |
| Воронежская   | 1320                                 | 0,45±0,02  | 0,13                                       | 0,29                 |
| Курская       | 1220                                 | 0,41±0,08  | 0,36                                       | 0,88                 |
| Ульяновская   | 1100                                 | 0,37±0,02  | 0,06                                       | 0,16                 |
| Ленинградская | 850                                  | 0,50±0,11  | 0,20                                       | 0,40                 |
| Тамбовская    | 510                                  | 0,36±0,03  | 0,08                                       | 0,22                 |
| Нижегородская | 250                                  | 0,16±0,01  | 0,03                                       | 0,19                 |
| Смоленская    | 100                                  | 0,24±0,02  | 0,03                                       | 0,13                 |

положительная линейная корреляция между столбцами 2 и 3, коэффициент корреляции  $r = 0,77$

Таблица 2. Среднее значение содержания <sup>137</sup>Cs в почве реперных участков локального мониторинга во временных интервалах  
Table 2. Average value of <sup>137</sup>Cs in the soil of reference sites of local monitoring in time intervals

| Субъект РФ     | Среднее значение содержания <sup>137</sup> Cs в почве, Бк/кг |               |           |             |             |             |
|----------------|--|---------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
|                | 1992-1994 гг.  | 1995-1998 гг. | 2002 г.   | 2007 г.     | 2011 г.     | 2016 г.     |
| Белгородская   | 80   | 54            | 39        | 34          | 26          | 22          |
| Воронежская    | 95   | 37            | 44        | 40          | 39          | 27          |
| Курская        | 34   | 40            | 36        | 56          | 38          | 29          |
| Липецкая       | 128  | 80            | 58        | 61          | 49          | 68          |
| Мордовия       | 56   | 188           | 167       | 116         | 35          | 22          |
| Пензенская     | 60   | 12            | 30        | 25          | 29          | 26          |
| Саратовская    | 15   | 16            | 17        | 21          | 22          | 21          |
| Тамбовская     | 30   | 27            | 18        | 18          | 38          | 28          |
| <b>Среднее</b> | <b>62,3</b>  | <b>56,8</b>   | <b>51</b> | <b>46,3</b> | <b>34,5</b> | <b>30,4</b> |

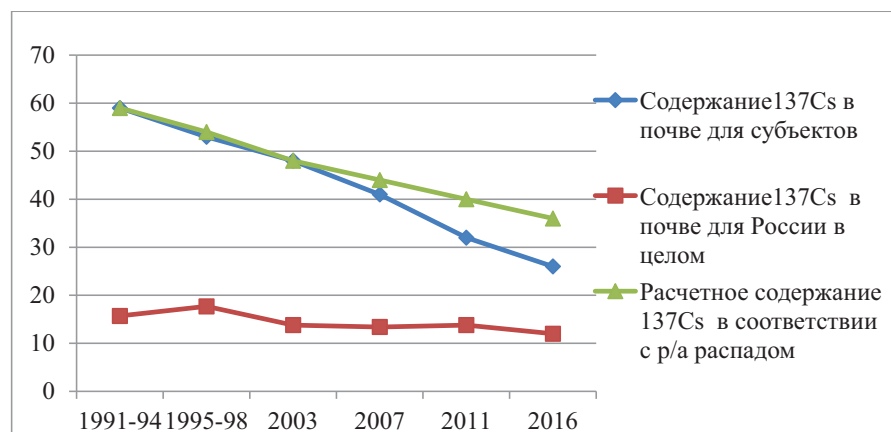


Рисунок. Изменение во времени среднего содержания <sup>137</sup>Cs в почвах субъектов РФ и России, загрязненных чернобыльскими выпадениями  
Figure. Change in time of the average content of <sup>137</sup>Cs in the soils of the subjects of the Russian Federation and Russia contaminated with Chernobyl fallout





в одно множество и для каждого временного интервала рассчитано среднее значение. На основании изменения во времени средних значений содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве для 8 областей рассчитан период полувыведения из почв с 1991 по 2016 гг. Он составил  $21,2 \pm 1,3$  года.

Мы располагаем данными о динамике снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  во времени в почве Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей [2, 7].

Скорость выведения  $^{137}\text{Cs}$  из почвы есть сумма скоростей радиоактивного распада и миграции. Была рассчитана скорость миграции  $^{137}\text{Cs}$  в почве в реальных условиях радиоактивно загрязненных территорий указанных областей по формулам 1 и 2. Результаты представлены в таблице 3.

$$X = A_0 \exp(-\lambda_1 t) - A_0 \exp(-\lambda_2 t), \quad (1)$$

$$\lambda T = \ln 2, \quad (2)$$

где  $X$  — суммарная скорость выноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в результате миграции  $\text{Ки}/\text{км}^2\text{-год}$ ;  $A_0$  — начальное содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве,  $\text{Ки}/\text{км}^2$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — константы полураспада и полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из почвы;  $t$  — время, за которое рассчитывается скорость миграции ( $t = 1$  год).

Как видно из данных таблицы 3, период полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из почвы находится в корреляционной зависимости от среднего содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве. Коэффициент корреляции достаточно высок и равен 0,95. Относительная скорость миграции имеет отрицательный коэффициент корреляции относительно среднего содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве.

Условно назовем области, приведенные в таблице 2, периферией радиоактивного загрязнения от Чернобыльской аварии. Рассчитана скорость миграционного снижения  $^{137}\text{Cs}$  из почвы на периферии радиоактивного загрязнения по формулам 1 и 2. Результаты представлены в таблице 4.

Данные таблиц 3 и 4 получены из двух, независимых друг от друга исследований. Данные

таблицы 3 получены при обследовании загрязненной территории Брянской, Калужской и Орловской областей. Данные таблицы 4 получены по результатам радиационного мониторинга почв на стационарных реперных участках. Как показывают данные этих таблиц, кинетические характеристики для периферии радиоактивного загрязнения находятся между аналогичными характеристиками Калужской и Тульской областей.

Основным типом почв Калужской области являются дерново-подзолистые почвы, Тульской области — черноземы, в областях периферийного загрязнения представлены оба этих типа почв. Мы считаем, что данные таблиц 3 и 4 находятся в хорошем согласии. Механизмы снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве для всей территории радиоактивного загрязнения (11 областей) одинаковы. Исключение составляет Брянская область, в которой вносились значительные количества минеральных удобрений и мелиорантов с целью снижения поступления  $^{137}\text{Cs}$  в урожай.

Скорость миграции  $^{137}\text{Cs}$  из почвы связана с миграцией катиона  $\text{Cs}^+$ , что обуславливает и объясняет значительные изменения численных значений периода полувыведения в областях загрязненных территорий. Это обстоятельство также обуславливает зависимость миграционных процессов  $^{137}\text{Cs}$  из загрязненной почвы от хозяйственной деятельности человека. Внесение калийных удобрений в почвы приводит к реакциям изотопного обмена  $^{137}\text{Cs}$  между компонентами почвы и калийными удобрениями. Процесс приводит к увеличению содержания  $^{137}\text{Cs}$  в растворимой форме, миграционная способность  $^{137}\text{Cs}$  увеличивается. Так, в ряде районов Калужской, Тульской и Орловской областей период полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из почвы меньше 20 лет (табл. 5), что существенно ниже его периода полураспада. В этих районах миграционные процессы  $^{137}\text{Cs}$  вносят существенный вклад в очищение почвы от названного радионуклида.

В первом приближении можно считать, что скорость миграции  $^{137}\text{Cs}$  прямо пропорциональна его содержанию в почве. В этом случае можно рассчитать период миграционного полуснижения  $^{137}\text{Cs}$ . Результаты расчетов приведены в таблице 1. Данные таблицы показывают, что период миграционного полуснижения  $^{137}\text{Cs}$  в почве Брянской области значительно превосходит таковой в Калужской, Тульской и Орловской областях.

В радиоактивно загрязненные почвы Брянской области с целью снижения поступления  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственные растения вносились в повышенных дозах известковые материалы. Известь (карбонат кальция, магния) не взаимодействует с  $^{137}\text{Cs}$ . Снижение поступления  $^{137}\text{Cs}$  в растения связано с изменением агрохимических показателей почвы, в первую очередь, ее кислотностью. Карбонаты кальция и магния являются «блокаторами» перехода катионов  $\text{Cs}^+$ , меченного  $^{137}\text{Cs}$ , в растения. Нормы внесения известки, в первую очередь, зависят от агрохимических свойств почвы, а не от уровня ее загрязнения. Внесение больших избытков известковых материалов приводит к снижению миграционной способности  $^{137}\text{Cs}$  и уменьшению вклада натуральных миграционных процессов очищения почвы от радиоактивности.

Снижению периода полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из почвы способствует внесение повышенных доз калийных удобрений. В результате реакций изотопного обмена  $^{137}\text{Cs}$  между цезием, находящимся в почве в виде примеси к калию в удобрениях, некоторое количество радионуклида переходит в калийное удобрение и соответственно выносятся с полей сельскохозяйственных угодий весенним поводком. В дальнейшем за счет внесения новых порций калийных удобрений мы ожидаем увеличения относительной скорости спада уровней загрязнения почвы во времени (снижения периода полувыведения  $^{137}\text{Cs}$ ).

Изотопное соотношение  $^{137}\text{Cs}/\text{Cs}^+$  и ионные соотношения  $\text{Cs}^+/\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+/\text{K}^+$  определяют количественные характеристики переноса  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в растения. Поведение  $^{137}\text{Cs}^+$  на ранних стадиях снижения последствий Чернобыльской аварии отличается от поведения в отдаленный период. На ранних стадиях отношение  $^{137}\text{Cs}/\text{Cs}^+$  достаточно велико, при внесении калийных удобрений это соотношение снижается за счет новых поступлений  $\text{Cs}^+$  с удобрениями. Цезий является рассеянным элементом земной коры и всегда присутствует в природных соединениях калия в качестве примеси. Эффект разбавления  $^{137}\text{Cs}$  стабильным цезием обуславливает снижение поступления  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственные растения. В отдаленный после аварии период внесение новых порций калийных удобрений уже не приводит к значительному изотопному разбавлению  $^{137}\text{Cs}$  стабильным цезием, что снижает эффективность внесения калийных удобрений с целью снижения поступления  $^{137}\text{Cs}$  в урожай.

В таблице 6 представлены данные о среднем содержании  $^{137}\text{Cs}$  в зерне пшеницы и сене естественных и многолетних трав, выращенных на реперных участках локального мониторинга сельскохозяйственных угодий России в период с 2002 по 2016 гг. (не включены данные Брянской, Орловской, Калужской и Тульской областей).

Таблица 3. Кинетические характеристики снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве на загрязненной территории 4 субъектов РФ с 1991 по 2014 гг.

Table 3. Kinetic characteristics of the reduction of the content of  $^{137}\text{Cs}$  in the soil in the contaminated territory of 4 subjects of the Russian Federation from 1991 to 2014

| Область  | *Среднее содержание $^{137}\text{Cs}$ в 2014 г., $\text{Ки}/\text{км}^2$ | Период полувыведения, год | Скорость миграционного снижения, $\text{Ки}/\text{км}^2\text{-год}^{-1}$ | Период миграционного полуснижения, год |
|--|--|---------------------------|--|--|
| 1  | 2  | 3                         | 4  | 5                                      |
| Брянская   | 3,6  | 25,6                      | $0,004A_0$   | 173                                    |
| Калужская  | 1,45   | 22                        | $0,008A_0$   | 87                                     |
| Тульская   | 1,4  | 20                        | $0,011A_0$   | 63                                     |
| Орловская  | 0,74   | 18                        | $0,015A_0$   | 46                                     |
| коэффициент корреляции равен 0,95 между столбцами 2 и 3  |  |                           |  |  |
| коэффициент корреляции равен -0,91 между столбцами 2 и 4 |  |                           |  |  |
| коэффициент корреляции равен 0,99 между столбцами 2 и 5  |  |                           |  |  |

\*К расчетам привлечены данные сильно и умеренно загрязненных районов.

Таблица 4. Кинетические характеристики снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве на периферии радиоактивного загрязнения с 1992 по 2016 гг.

Table 4. Kinetic characteristics of the reduction of  $^{137}\text{Cs}$  in the soil on the periphery of radioactive contamination from 1992 to 2016

| Территория            | Период полувыведения, год | Скорость миграционного снижения, $\text{Бк}/\text{год}$ | Период миграционного полуснижения, год |
|-----------------------|---------------------------|---|--|
| Периферия загрязнения | 21                        | $0,009A_0$  | 77                                     |



Таблица 5. Среднее значение плотности загрязнения в 2014 г. и периоды полувыведения <sup>137</sup>Cs из почв в ряде районов Калужской, Тульской и Орловской областей

Table 5. Average pollution density in 2014 and half-lives of <sup>137</sup>Cs from soils in a number of areas of Kaluga, Tula and Orel regions

| Область/район            | Плотность загрязнения в 2014 г., Ки/км <sup>2</sup> | Период полувыведения <sup>137</sup> Cs (1991-2014 гг.), год |
|--------------------------|---|---|
| <b>Калужская область</b> |   |   |
| Люденовский              | 0,9   | 15,1  |
| <b>Тульская область</b>  |   |   |
| Белевский                | 1,2   | 12,8  |
| Богородицкий             | 1,4   | 17,4  |
| Киреевский               | 1,0   | 13,3  |
| Теплоогаевский           | 0,96  | 14,9  |
| Узловский                | 1,7   | 16,5  |
| Щекинский                | 0,98  | 19,7  |
| <b>Орловская область</b> |   |   |
| Болховский               | 1,6   | 16,9  |
| Залогощекский            | 0,67  | 16,1  |
| Шаблыкинский             | 1,2   | 13,8  |

Таблица 6. Динамика изменения среднего содержания <sup>137</sup>Cs в зерне пшеницы и сене естественных и многолетних трав с 2002 по 2014 гг. Table 6. Dynamics of changes in the average content of <sup>137</sup>Cs in wheat grain and hay of natural and multi-ribbon grasses from 2002 to 2014

| Время наблюдения | Среднее содержание <sup>137</sup> Cs, Бк/кг |                                      |
|------------------|---|--------------------------------------|
|                  | зерно пшеницы                               | сено естественных и многолетних трав |
| 2002-2004 гг.    | 3,7   | 8,4                                  |
| 2008-2009 гг.    | 4,2   | 10,4                                 |
| 2011-2012 гг.    | 3,9   | 6,1                                  |
| 2016 г.          | 2,8   | 9,5                                  |

Из данных таблицы 6 видно, что среднее содержание <sup>137</sup>Cs в зерне пшеницы и сене естественных и многолетних трав не является стабильным во времени. Содержание <sup>137</sup>Cs в растениях определяется его поступлением из почвы и атмосферного воздуха. С одной стороны, происходит снижение содержания <sup>137</sup>Cs вследствие его радиоактивного распада, с другой стороны, существует компенсация этого распада за счет работы АЭС и других предприятия ЯТЦ. В этом случае неизбежно устанавливается подвижное равновесие в системе почва-атмосфера-растение. Таким образом, при отсутствии радиационных аварий содержание радионуклидов в растениях определяется уровнем развития атомной энергетики на планете.

**Информация об авторах:**

**Орлов Павел Михайлович**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии органических, известковых удобрений и химической мелиорации, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2753-3371>, [n\\_akanova@mail.ru](mailto:n_akanova@mail.ru)  
**Аканова Наталья Ивановна**, доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией агрохимии органических, известковых удобрений и химической мелиорации, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3153-6740>, [n\\_akanova@mail.ru](mailto:n_akanova@mail.ru)

**Information about the authors:**

**Pavel M. Orlov**, candidate of chemical sciences, senior researcher of the laboratory of agrochemistry of organic, lime fertilizers and chemical reclamation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2753-3371>, [n\\_akanova@mail.ru](mailto:n_akanova@mail.ru)  
**Natalia I. Akanova**, doctor of biological sciences, professor, head of the laboratory of agrochemistry of organic, lime fertilizers and chemical reclamation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3153-6740>, [n\\_akanova@mail.ru](mailto:n_akanova@mail.ru)

**Заключение.** При изучении корреляций и закономерностей загрязнения почв радионуклидами от техногенных аварий следует отметить общий принцип поведения радионуклидов в почвах. Его можно назвать «принципом почвенного соответствия» и сформулировать следующим образом: при загрязнении почвы техногенными радионуклидами последние начинают себя вести в соответствии с поведением их природных изотопных носителей, находящихся в почве. Инструментом осуществления «принципа почвенного соответствия» являются изотопные реакции обмена между несущими радионуклид матрицами и компонентами почвы, удобрений и мелиорантов. В отдаленный после Чернобыльской аварии период (более 30 лет) следует учитывать, что <sup>137</sup>Cs связан с веществом почвы и его поведение, в том числе и накопление в сельскохозяйственных культурах, зависит от агрохимических свойств почвы. Вследствие большего изотопного разбавления (снижения изотопного <sup>137</sup>Cs/Cs<sup>+</sup>) из почв, имеющих высокое плодородие, <sup>137</sup>Cs поступает в растения в 1,5-2 раза в меньших количествах, чем из низкоплодородных почв, при одинаковом уровне загрязнения почвы.

**Список источников**

1. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1993 году». С. 64-69. Утв. Постановлением Правительства РФ от 24.01.1993 г. № 53.
2. Данные по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu / под ред. С.М. Вакуловского. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 225 с.
3. Орлов П.М., Лунев М.И., Аканова Н.И. Динамика содержания долгоживущих радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в различных типах почв районов Брянской и Калужской областей // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: серия экология. Пенза: Изд-во ПензГУ, 2017. № 05 (39), № 06 (40). С. 103-110.
4. Сычев В.Г., Лунев М.И., Орлов М.М., Белус Н.М. Чернобыль: радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий и агрохимические аспекты снижения последствий радиоактивного загрязнения почв. М.: ВНИИА, 2016. 183 с.
5. Светов В.А. Проблемы Чернобыля в агропромышленном комплексе России // Химия в сельском хозяйстве. 1996. № 1. С. 2-3.
6. Орлов П.М., Аканова Н.И. Оценка вариабельности влияния уровней загрязнения почвы, внесения минеральных удобрений, мелиорантов и кальцийсодержащих отходов промышленности на накопление <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в урожае сельскохозяйственных культур // The Way of Science. 2018. № 9 (55). С. 13-19.

7. Справочник по радиационной обстановке и дозам облучения населения районов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. М.И. Баллонова. СПб., 1992. 140 с.

**References**

1. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii okruzhayushchei prirodnoi sredy Rossiiskoi Federatsii v 1993 godu» (1993). [State report "On the state of the environment of the Russian Federation in 1993"], pp. 64-69. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation from 24.01.1993. No. 53.
2. Vakulovskii, S.M. (ed.) (2015). *Dannye po radioaktivnomu zagryazneniyu territorii naselennykh punktov Rossiiskoi Federatsii* <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu [Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu]. Obninsk, FGBU "NPO "Typhoon", 225 p.
3. Orlov, P.M., Lunev, M.I., Akanova, N.I. (2017). *Dinamika soderzhaniya dolgozhivushchikh radionuklidov <sup>137</sup>Cs i <sup>90</sup>Sr v razlichnykh tipakh pochv raionov Bryanskoi i Kaluzhskoi oblasti* [Dynamics of the content of long-lived radionuclides <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in various types of soils of the districts of the Bryansk and Kaluga regions]. *XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plus: seriya ehkologiya* [XXI century: Results of the past and problems of the present plus: a series of ecology]. Penza, Publishing House of PenzSTU, no. 05 (39), no. 06 (40), pp. 103-110.
4. Sychev, V.G., Lunev, M.I., Orlov, M.M., Belous, N.M. (2016). *Chernobyl': radiatsionnyi monitoring sel'skokhozyaistvennykh ugodii i agrokhimicheskie aspekty snizheniya posledstviy radioaktivnogo zagryazneniya pochv* [Chernobyl: radiation monitoring of agricultural land and agrochemical aspects of reducing the consequences of radioactive contamination of soils]. Moscow, VNIIA, 183 p.
5. Svetov, V.A. (1996). *Problemy Chernobylya v agropromyshlennom komplekse Rossii* [Problems of Chernobyl in the agro-industrial complex of Russia]. *Khimiya v sel'skom khozyaistve* [Chemistry in agriculture], no. 1, pp. 2-3.
6. Orlov, P.M., Akanova, N.I. (2018). *Otsenka variabelnosti vliyaniya urovnei zagryazneniya pochvy, vneseniya mineral'nykh udobrenii, meliorantov i kal'tsiisoderzhashchikh otkhodov promyshlennosti na nakoplenie <sup>137</sup>Cs i <sup>90</sup>Sr v urozhay sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Assessment of variability of the influence of soil pollution levels, application of mineral fertilizers, reclamation agents and calcium-containing industrial waste on the accumulation of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in the yield of agricultural crops]. *The Way of Science*, no. 9 (55), pp. 13-19.
7. Ballonov, M.I. (ed.) (1992). *Spravochnik po radiatsionnoi obstanovke i dozam oblucheniya naseleniya raionov Rossiiskoi Federatsii, podvergnivshisya radioaktivnomu zagryazneniyu vsledstvie avarii na Chernobyl'skoi AEHS* [Handbook on the radiation situation and radiation doses of the population of the regions of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant]. Saint-Petersburg, 140 p.

