

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ЦЕЗИЯ-137 В КУКУРУЗЕ  
НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЛЯХО.Л. Комиссарова<sup>1\*</sup>, Т.А. Парамонова<sup>1,2</sup>, к.б.н., О.Е. Денисова<sup>1</sup>,  
Н.В. Кузьменкова<sup>3,4</sup>, к.г.н., Л.А. Турыкин<sup>5</sup>, к.г.н.<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12<sup>2</sup> ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»,  
107258, Россия, Москва, ул. Глебовская, д. 20Б<sup>3</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3<sup>4</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19.<sup>5</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1\*E-mail: [Komissarova-olga93@yandex.ru](mailto:Komissarova-olga93@yandex.ru)*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований  
(проект № 20-35-90119/20)*

На территории Плавского радиоактивного пятна Тульской области, образовавшегося вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., было проведено исследование для оценки радиационной безопасности выращиваемой кукурузы, а также для выявления особенностей аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  в надземных и подземных органах культуры. Установлено, что в настоящее время плотность загрязнения пахотных почв обследованного угодья  $^{137}\text{Cs}$  составила  $167 \pm 5$  кБк/м<sup>2</sup>, превышая допустимый уровень радиоактивного загрязнения почв в 5 раз. При этом удельная активность радиоцезия в зерне –  $3,2 \pm 1,9$  Бк/кг, что существенно меньше установленных санитарно-гигиенических норм для зерновых культур. Наибольший запас  $^{137}\text{Cs}$  характерен для листьев и стеблей кукурузы (55 % от общего запаса  $^{137}\text{Cs}$  в растении). Коэффициент накопления  $^{137}\text{Cs}$  в общей биомассе кукурузы  $0,023 \pm 0,010$ , что подтверждает дискриминацию корневого поступления радионуклида в растение. При этом распределение  $^{137}\text{Cs}$  между побегами и корнями сравнительно однородное ( $K_H$   $0,023 \pm 0,014$  и  $0,021 \pm 0,017$  соответственно).

Ключевые слова: чернобыльская авария, цезий-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), радиоактивное загрязнение, коэффициент перехода, сельскохозяйственные культуры, продовольственная безопасность.

Для цитирования: Комиссарова О.Л., Парамонова Т.А., Денисова О.Е., Кузьменкова Н.В., Турыкин Л.А. Особенности накопления цезия-137 в кукурузе на радиоактивно загрязненных землях//Плодородие. – 2022. – №5. – С. 76-79. DOI: 10.25680/S19948603.2022.128.19.

Кукуруза – одна из наиболее широко используемых сельскохозяйственных культур в мире. Лидерами по производству кукурузы являются США, Китай, Бразилия [10]. В России кукуруза составляет около 10% от выращиваемых зерновых культур [12]. Наибольшие посевные площади под кукурузой расположены в Южном и Центральном федеральных округах (≈ по 30%) [11].

Ведение сельского хозяйства в ряде регионов Центрального федерального округа, таких как Брянская, Курская, Орловская и Тульская области, осложняется загрязнением почв радионуклидами, выпавшими в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. [1]. В современный период среди чернобыльских радионуклидов наибольшую опасность представляет  $^{137}\text{Cs}$ , так как, помимо массового поступления в окружающую среду (75-86 ПБк), он имеет длительный период полураспада ( $T_{1/2}=30,2$  лет) и способность необменно фиксироваться в межпакетных пространствах глинистых минералов почвы [5].

Одной из пострадавших в результате чернобыльской аварии территорий в Тульской области является Плавское радиоактивное пятно с наибольшей локализацией выпадений радиоцезия в Плавском административном районе, где плотность загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  в 1986 г. составила 5-15 Ки/км<sup>2</sup> (185-555 кБк/м<sup>2</sup>) [1]. Плавский район в послеаварийный период отнесен к зоне проживания с правом на отселение [7]. Несмотря на высокий

уровень радиоактивного загрязнения, земли продолжали использоваться для ведения растениеводства после проведения реабилитационных мероприятий – глубокой оборотной вспашки до глубины 30 см [9]. В настоящее время около 88% сельскохозяйственных угодий Плавского района занято пашней [4]. При этом современный уровень загрязнения почвы агроценозов  $^{137}\text{Cs}$  составляет 140–220 кБк/м<sup>2</sup> [9], что превышает предельно допустимую норму, равную 37 кБк/м<sup>2</sup> [7].

Поскольку получение безопасной продукции растениеводства является одной из приоритетных задач сельского хозяйства, необходимо регулярно проводить мониторинг накопления радионуклидов в агрокультурах. ФГБУ «Тулаагрохимрадиология» ежегодно измеряет содержание  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственных культурах, выращенных на территории Тульской области [3]. Однако для понимания закономерностей накопления радиоцезия в органах и тканях растений, а также для эффективного планирования ведения сельского хозяйства на радиоактивно загрязненных территориях, необходимо учитывать аккумуляцию радионуклида не только в продукции растений, но и в неиспользуемых в хозяйстве частях, в том числе в подземных фракциях.

**Цель наших исследований** – выявить общие закономерности поведения  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва-растение на примере агроценоза кукурузы.

В задачи работы входили: 1) оценка современного уровня радиоактивного загрязнения пахотных почв и продукции растениеводства в агроценозе кукурузы, расположенном в центральной части Плавского радиоактивного пятна; 2) выявление особенностей распределения  $^{137}\text{Cs}$  по органам кукурузы; 3) анализ интенсив-

ности корневого потребления радиоцезия растениями кукурузы.

**Методика.** Для проведения полевой части исследования была выбрана площадка в пределах пахотного уголка центральной части Плавского радиоактивного пятна на агрочерноземах глинисто-иллювиальных (рис 1).

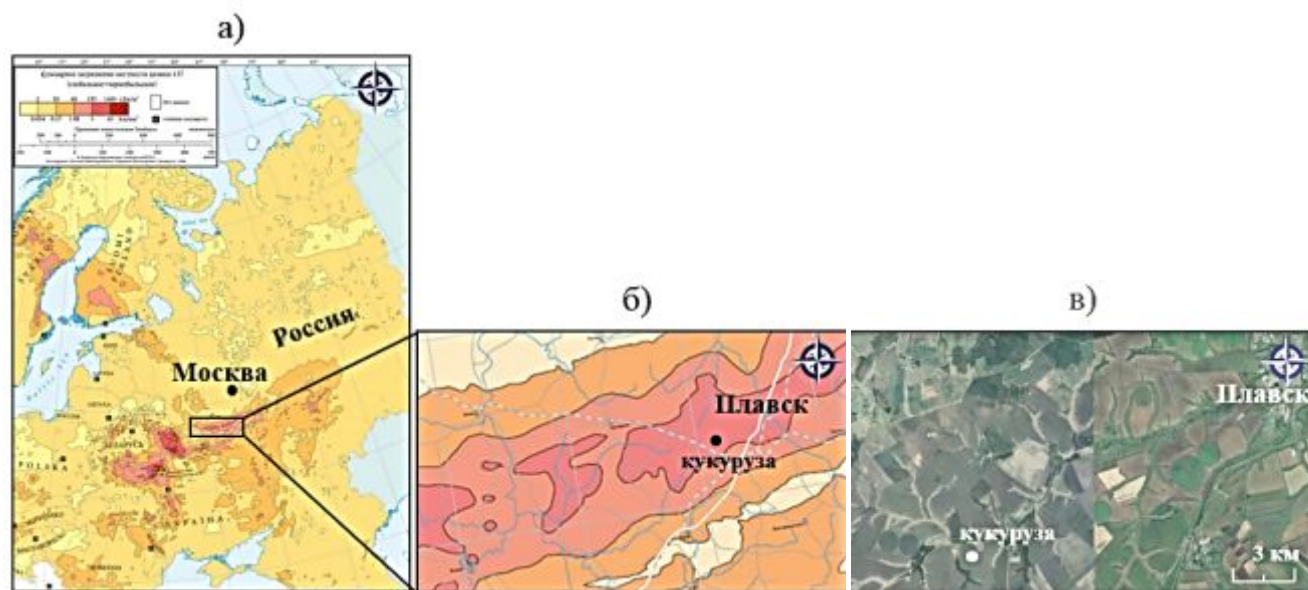


Рис 1. Расположение опорной площадки исследования на территории Плавского радиоактивного пятна: а, б – карта загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  в Европе после аварии на Чернобыльской АЭС, май 1986 г. [1]; в – изображение Google Earth

В сентябре 2021 г. на опытной площадке проводили пробоотбор биомассы кукурузы (зерновой гибрид компании Pioneer, сорт П8515). Надземные и подземные компоненты растительности отбирали с площади 2500 см<sup>2</sup> в трехкратной повторности. Надземные органы кукурузы были разделены на стебли, листья, листовые обертки початков, початки с зерном, метелки; подземная часть кукурузы – на утолщенный колеоптиль, крупные придаточные корни (диаметр поперечного сечения >3 мм), средние придаточные корни (диаметр поперечного сечения 3-0,5 мм), тонкие придаточные корни (диаметр поперечного сечения <0,5 мм). Образцы надземной и подземной частей растений тщательно отмывали от почвенного мелкозема под проточной водой на системе сит.

Пробоотбор почв проводили также в трехкратной повторности с помощью цилиндрического пробоотборника ПГ-450 до глубины 30 см, соответствующей нижней границе массового проникновения  $^{137}\text{Cs}$  в профиле пахотных черноземов Плавского радиоактивного пятна [9], в непосредственной близости от собранных растений.

В лабораторных условиях пробы растительности высушивали при температуре 75°C, почву – до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре. После этого пробы почвы и растений измельчали в целях гомогенизации на лабораторной мельнице, почву дополнительно просеивали через сито с диаметром ячейки 1 мм.

Измерения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах растительной биомассы проводили в геометрии «дента» на гамма-спектрометре Canberra GR 3818 с детектором из особо чистого германия HPGe (СИПА), в почве – также в геометрии «дента» на гамма-спектрометре «Мультирад» с блоком детектирования БДКС-63-01А с использованием программы обработки спектров «Прогресс 5.1» (Россия).

**Результаты и их обсуждение.** Оценка современного уровня радиоактивного загрязнения агрочерноземов

Плавского радиоактивного пятна  $^{137}\text{Cs}$  показала превышение допустимой нормы в  $\approx 4,5$  раза: плотность радиоактивного загрязнения почв составила  $167 \pm 5$  кБк/м<sup>2</sup>, удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в слое 0-30 см –  $493 \pm 25$  Бк/кг.

#### 1. Запасы биомассы и удельная активность $^{137}\text{Cs}$ в биомассе кукурузы на территории Плавского радиоактивного пятна

Компонент	Запас абсолютно сухой биомассы, кг/м <sup>2</sup>	Удельная активность $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг	Допустимые уровни, Бк/кг
Общая биомасса	$3,82 \pm 0,06$	$6,6 \pm 1,4$	Не нормируется
Надземная биомасса	$3,58 \pm 0,56$	$8,0 \pm 3,7$	Не нормируется
Стебли	$0,41 \pm 0,08$	$7,3 \pm 2,2$	80 [2]
Листья	$0,39 \pm 0,03$	$33,5 \pm 10,7$	
Обертки початков	$0,14 \pm 0,04$	$13,3 \pm 4,2$	Не нормируется
Початки, в т.ч. зерно	$2,64 \pm 0,38$	$3,2 \pm 1,9$	60 [6]
Метелки	$0,02 \pm 0,01$	$14,8 \pm 3,1$	Не нормируется
Подземная биомасса	$0,24 \pm 0,02$	$5,9 \pm 1,3$	Не нормируется
Утолщенный колеоптиль	$0,09 \pm 0,03$	$3,8 \pm 0,7$	Не нормируется
Крупные придаточные корни	$0,12 \pm 0,01$	$4,6 \pm 0,9$	Не нормируется
Средние придаточные корни	$0,02 \pm 0,01$	$11,2 \pm 1,2$	Не нормируется
Тонкие придаточные корни	$0,02 \pm 0,01$	$22,4 \pm 3,4$	Не нормируется

При этом средние значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в абсолютно сухой биомассе кукурузы были на порядок меньше, чем в почве. Нормируемые показатели удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в непосредственно используемых человеком или идущих на силос надземных частях кукурузы соответствовали стандартам санитарно-гигиенической и ветеринарной безопасности, как

для зерна [6], так и для зеленой массы кукурузы [2] (табл. 1).

В целом, по уменьшению значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в общей биомассе компоненты кукурузы ранжировались следующим образом: листья > тонкие придаточные корни > метелки > листовая обертка початков > средние придаточные корни > стебли > крупные придаточные корни, coleoptиль > початки с зерном.

Анализ распределения запасов  $^{137}\text{Cs}$  по надземным и подземным органам кукурузы показал, что он аккумуля-

руется в основном в листьях и стеблях, составляя  $\approx 50\%$  от общего запаса  $^{137}\text{Cs}$  в растениях, а также в зерне ( $\approx 25\%$ ) за счет его доминирующей роли в структуре биомассы растения в период уборки урожая. Однако корни кукурузы, в том числе фракция тонких придаточных корней, являющихся барьером на пути корневого поступления  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в органы и ткани растений, не вносят заметного вклада в процесс депонирования радиоцезия в связи с их малой долей участия в общей структуре биомассы (рис. 2).

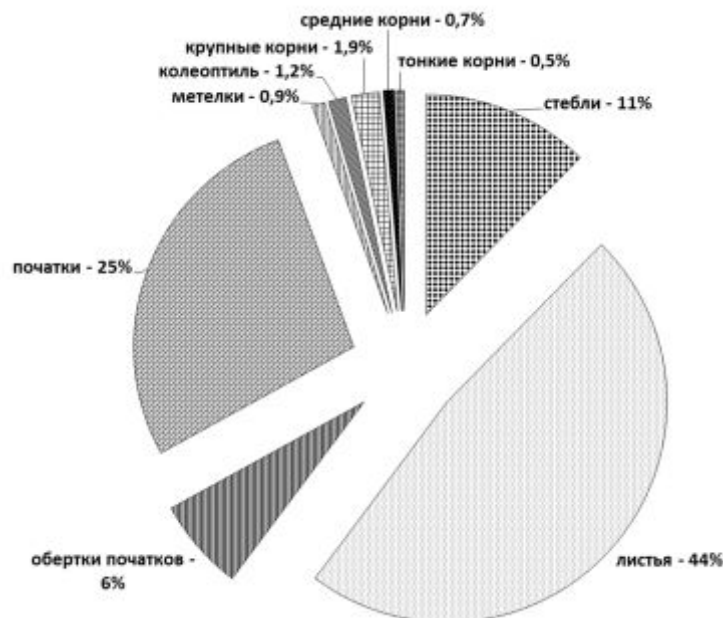


Рис. 2. Распределение запасов  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах биомассы кукурузы на территории Плавского радиоактивного пятна (%)

Для анализа интенсивности перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в растения использовали коэффициент накопления (КН), рассчитываемый как соотношение удельной активности радионуклида в растениях и почве. Средние значения КН для надземной биомассы варьировали в пределах 0,005-0,054, а для подземной биомассы – 0,008-0,046, что указывает на дискриминацию корнево-

го поглощения  $^{137}\text{Cs}$  растениями. Сравнительно высокая интенсивность поглощения  $^{137}\text{Cs}$  наблюдалась для фракции тонких придаточных корней, состоящей в основном из сосущих корней, выполняющих функцию ризофильтрации по отношению к поступающему в растение радионуклиду (рис. 3).

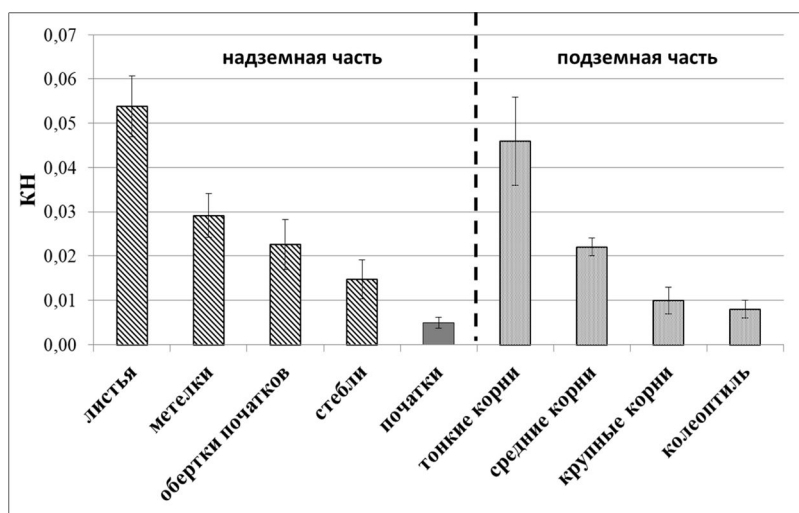


Рис. 3. Коэффициенты накопления  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах биомассы кукурузы на территории Плавского радиоактивного пятна

Полученные в работе значения КН для зерна  $1,2 \cdot 10^{-2}$ , стеблей и листьев кукурузы  $2,2 \cdot 10^{-2}$  соответствуют усредненным данным, опубликованным МАГАТЭ для районов умеренного климата соответственно [8].

При оценке общего баланса распределения запасов  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва-растение можно отметить, что почва является главным долговременным резервуаром радионуклида. В ней сосредоточен практически весь

пул радиоцезия. В биомассу кукурузы в течение вегетационного сезона переходит не более 0,02% от общего содержания радионуклида в системе почва-растение (табл. 2).

**2. Распределение запасов  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва – растение в агроценозе с кукурузой на территории Плавского радиоактивного пятна**

Биомасса	Запасы $^{137}\text{Cs}$ в биомассе, кБк/м <sup>2</sup> (%)	Запасы $^{137}\text{Cs}$ в почве, кБк/м <sup>2</sup> (%)	Общие запасы $^{137}\text{Cs}$ в системе почва-растение, кБк/м <sup>2</sup>
Общая	0,030 (0,02)	167,287 (99,98)	167,317
Надземная	0,029 (0,02)		
Подземная	0,001 (0,001)		

**Заключение.** В современный период плотность радиоактивного загрязнения почвы исследованного сельскохозяйственного угодья на территории Плавского радиоактивного пятна превышает допустимый уровень в  $\approx 4,5$  раз и составляет  $167 \pm 5$  кБк/м<sup>2</sup>. Несмотря на высокий показатель радиоактивного загрязнения пахотной почвы, накопление  $^{137}\text{Cs}$  в зерне кукурузы ( $3,2 \pm 1,9$  Бк/кг) и зеленой биомассе ( $17,2 \pm 3,4$  Бк/кг), идущей на силос, существенно меньше санитарно-гигиенической и ветеринарных норм. В целом интенсивность корневого потребления  $^{137}\text{Cs}$  низкая,  $\text{КН} < 0,1$  для всех компонентов кукурузы. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  между надземными и подземными органами практически одинаковое ( $\text{КН}$  составляют  $0,023 \pm 0,014$  и  $0,021 \pm 0,017$  для надземной и подземной частей соответственно). Сравнительно повышенная аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  наблюдается в листьях и тонких придаточных корнях.

Таким образом, основной пул выпавшего  $^{137}\text{Cs}$  в настоящее время сохраняется в почве, а миграция радионуклида в растения незначительная. Следовательно, продукция растениеводства – как зерно, так и надземная биомасса, идущая на корм, безопасна и может исполь-

зоваться местным населением, либо в коммерческих целях без ограничений по радиационно-гигиеническому фактору.

#### Литература

1. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии / Ю. А. Израэль и др. — Люксембург, Бюро для официальных изданий Европейских сообществ, 1998. — 71 с.
2. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Ветеринарные правила и нормы. — ВП 13.5.13/06-01. — Минсельхоз РФ от 19.12.2000 (действительны до 2016).
3. Доклад об экологической ситуации в Тульской области за 2020 год. — Сборник правовых актов Тульской области и иной официальной информации, 2021. — 117 с.
4. Региональный доклад о состоянии и использовании земель Тульской области в 2020 году / Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (РОСРЕЕСТР), 2021. — 126 с.
5. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р.М. Алексахин, Н.А. Корнеев. — М.: Экология, 1992. — 400 с.
6. СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». — Постановление главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001. — № 36.
7. Федеральный закон РФ «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации, вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС». — 15.05.1991. — № 1244-1.
8. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. — Vienna: International atomic energy agency, 2010. — 109 p.
9. Komissarova O., Paramonova T. Land use in agricultural landscapes with chernozems contaminated after Chernobyl accident: Can we be confident in radioecological safety of plant foodstuff? // International Soil and Water Conservation Research. — 2019. — Vol. 7. — № 2. — P. 158-166.
10. World Food and Agriculture. — Rome: FAO. Statistical Yearbook, 2021. — 266 p.
11. АБ-Центр — Экспертно-аналитический центр агробизнеса [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ab-center.ru> — Дата доступа: 02.06.2022.
12. Росстат [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VSHP\\_2016\\_T1\\_k2\(2\)](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VSHP_2016_T1_k2(2)). — Дата доступа: 02.06.2022.

## FEATURES OF CAESIUM-137 ACCUMULATION IN ABOVEGROUND AND BELLOWGROUND ORGANS OF MAIZE GROWN ON RADIOACTIVELY CONTAMINATED LANDS

**O.L. Komissarova, T.A. Paramonova, O.E. Denisova,  
N.V. Kuzmenkova, L.A. Turykin**

*On the territory of Plavsk radioactive hotspot of Tula region, formed as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in 1986, a study was conducted to assess the radiation safety of edible part of maize, as well as to identify the features of  $^{137}\text{Cs}$  accumulation in aboveground and belowground biomass. It has been established that at present the content of  $^{137}\text{Cs}$  in arable soil was  $167 \pm 5$  kBq/m<sup>2</sup>, exceeding the permissible level of radioactive contamination of soils by 5 times. At the same time,  $^{137}\text{Cs}$  activity in grains were  $3.2 \pm 1.9$  Bq/kg, which was significantly less than the established sanitary standards for grain crops. The largest  $^{137}\text{Cs}$  inventory was typical for leaves and stems (52% of the total  $^{137}\text{Cs}$  inventory in plant).  $^{137}\text{Cs}$  transfer factor for the total biomass of maize was  $0.023 \pm 0.010$ , which confirms the discrimination of the root radionuclide intake into plant.  $^{137}\text{Cs}$  distribution between shoots and roots was relatively homogeneous (TF  $0.023 \pm 0.014$  and  $0.021 \pm 0.017$  correspondently).*

*Key words:* Chernobyl accident agrosystems, crops, caesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), transfer factor, radioactive contamination, food safety.