

## МЕТОД АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

*Описан метод математического моделирования формирования активности радионуклида в системе "вода – почва – растение – продукт". На примере агрофитоценоза подсолнечника (*Heliantus annuus L.*) получена количественная оценка загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  его общей биомассы, семян и продуктов их переработки на юге Украины.*

**Ключевые слова:** математическая модель, радионуклиды и активность радиоцезия, орошение, почва, растение и продукт.

**Вступление.** Речная система Днепра с 1986г. служит транспортом для радионуклидов от загрязненных водосборных территорий Белоруссии и севера Украины до Черного моря. К 2000 г. около 80% стронция-90 и 20% цезия-137, которые выносятся Припятью в водохранилища Днепроовского каскада, поставлялись из Зоны отчуждения ЧАЭС. Миграция радионуклидов аварийного выброса Чернобыльской АЭС с загрязненной водосборной территории в реки Днепроовского бассейна обуславливает актуальность оценки радиационной ситуации на землях, орошаемых водой реки Днепр. Всего в Украине водами Днепроовского каскада орошается около 1,4 млн. га земель, в южных областях – около 1,3 млн. га [1].

В этих условиях наличие долгоживущих радионуклидов *Sr* и *Cs* в поливной воде приводит к загрязнению, как почвы орошаемых угодий, так и урожая сельскохозяйственных культур, а также продуктов их переработки. Следует отметить, что в радиоактивных выпадениях на территории Украины преобладает цезий-137.

При промышленной переработке первичной биологической продукции получают продукты, которые практически ежедневно входят в рацион человека.

Наблюдаемое в настоящее время общее ухудшение экологической ситуации в Украине, неблагоприятная медицинская обстановка, вынуждают наиболее серьезно отнестись к производству высококачественных продуктов питания.

Проблеме радионуклидов в агроэкосистемах уделено повышенное внимание специалистов разного рода деятельности. Так [2] описываются общие закономерности загрязнения продукции растениеводства радионуклидами чернобыльских выпадений, в [3] рассматривается проблема загрязнения радиоцезием почв и фитомассы злаковых зерновых культур, выращиваемых в условиях Полесья. В [4] анализируются результаты полевых исследований радиационной обстановки на различных почвенных разностях для зерновых культур и многолетних трав. Многопланово освещается вопрос загрязнения агроэкосистем радионуклидами в [5].

Цель настоящей работы - моделирование формирования активности радиоцезия в первичной биологической продукции за счет непосредственного поступления радионуклидов через листья, за счет корневого поступления, а также концентрации активности радионуклида в продуктах переработки.

К задачам данной работы следует отнести проведение численных экспериментов по оценке распределения активности *Cs-137* в общей массе растений подсолнечника по фазам вегетации, удельной активности радиоцезия в фитомассе, семенах и масле в

разрезе административных районов Запорожской области в условиях орошения водами Каховского водохранилища.

**Материалы и методы исследования.** Исследования выполнялись на основе агроклиматических данных и данных обследований радиоактивного загрязнения территории Украины с помощью динамической модели ECOSYS.

Моделирование переноса радионуклидов в сельскохозяйственных экосистемах выполнялось на основе модифицированной математической модели ECOSYS, предложенной Muller и Prohl [6], разработанной для оценки загрязнения сельскохозяйственных продуктов в условиях использования радиоактивно загрязненных источников воды для поливного земледелия.

Накопление радионуклидов в растениях на орошаемых землях происходит вследствие корневого поступления радионуклидов, которые находятся в почве вследствие первичных выпадений чернобыльского и дочернобыльского происхождения радионуклидов, которые привносятся в почву при поливе загрязненной водой, а также при непосредственном поступлении радионуклидов из поливной воды в листья.

*Расчет активности, удерживаемой наземной частью растений при поливе.* Суммарная активность, которая удерживается наземной частью растений при поливе, может быть представлена как

$$A_i = f_{w,i} A_w, \quad (1)$$

где  $A_i$  - суммарная удельная активность на растении вида  $i$ ;

$f_{w,i}$  - фракция удержания для растения вида  $i$ ;

$A_w$  - удельная поверхностная активность внесенная при поливе.

Часть удерживаемых растением радионуклидов определяется как

$$f_{w,i} = \frac{LAI}{R} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\ln 2}{3 \cdot S_i} \cdot R\right) \right], \quad (2)$$

где  $S_i$  - эффективное удержание воды для растения вида  $i$ ;

$LAI_i$  - поверхность листовой части растений, которая приходится на единицу площади их роста;

$R$  - удельный объем полива на единицу площади листовой поверхности.

Зависимость  $LAI$  от урожайности определяется функцией

$$LAI_g = LAI_{g,max} [1 - \exp(-k Y_g)], \quad (3)$$

где  $LAI_g$  - поверхность наземной части биомассы растений, приходящаяся на единицу площади ее выращивания;

$LAI_{g,max}$  - максимальное значение  $LAI$  равно 7;

$k$  - коэффициент нормирования;

$Y_g$  - урожайность биомассы растений в момент полива.

Активность радионуклидов в растении формируется за счет непосредственного поступления радионуклидов через листья, а также за счет корневого поступления

$$C_i(t) = C_{i,l}(t) + C_{i,r}(t), \quad (4)$$

где  $C_i(t)$  - общая активность в растении вида  $i$ ;

$C_{i,l}(t)$  - активность в растении вида  $i$  от поступления через листья;

$C_{i,r}(t)$  - активность в растении вида  $i$  от корневого поступления.

*Поступление радионуклидов через листья.* Концентрация активности в растениях  $C_{i,l}(t)$  в момент  $t$  после полива определяется начальной выражением

$$C_{i,l}(\Delta t) = \frac{A_i}{Y_i} \exp[-(\lambda_w + \lambda_r)\Delta t], \quad (5)$$

где  $C_{i,l}(\Delta t)$  - концентрация активности в растении вида  $i$  в период сбора урожая;  
 $A_i$  - общая удельная активность на растении вида  $i$ , что зависит от  $LAI$  данного растения в момент полива;

$Y_i$  - урожайность растения вида  $i$  в период сбора урожая;

$\lambda_w$  - скорость потери активности за счет влияния погодных факторов;

$\lambda_r$  - константа радиоактивного распада;

$\Delta t$  - время, которое прошло с момента полива до сбора урожая.

Концентрация радионуклида в растениях вида  $i$ , собранных через  $\Delta t$  дней после полива определяется следующей формулой

$$C_{i,l}(\Delta t) = \frac{A_i}{Y_i} T_i(\Delta t) \exp(-\lambda_r \Delta t), \quad (6)$$

где  $T_i(\Delta t)$  - коэффициент перехода для растения вида  $i$ ;

$Y_i$  - урожайность съедобной части растения вида  $i$ .

*Корневое поступление радионуклидов.* Концентрация радионуклида в растениях, которая поступила корневым путем, рассчитывается по формуле

$$C_{i,r}(t) = [TF_i C_s(t)] A_{xim} (1 - F_{ud}/F_{izv}), \quad (7)$$

где  $C_{i,r}(t)$  - концентрация радионуклида в растении вида  $i$  от корневого поступления в момент  $t$  после полива;

$TF_i$  - коэффициент накопления в системе почва – растение для растения вида  $i$ ;

$C_s(t)$  - концентрация радионуклида в прикорневой области почвы в момент  $t$ ;

$A_{xim}$  - обобщенная функция влияния агрохимических свойств почвы на накопление корнями радионуклидов;

$F_{ud}$  - функция влияния внесения калийных удобрений на накопление радионуклидов корнями растений;

$F_{izv}$  - функция влияния внесения извести на корневое накопление радионуклидов.

Обобщенная функция влияния агрохимических свойств почвы на накопление корнями радионуклидов находится по выражению

$$A_{xim} = (F_{pH} F_{gum} F_{KO})^{0,333}, \quad (8)$$

где  $F_{pH}$  - функция влияния  $pH$  солевой вытяжки на накопление корнями радионуклидов;

$F_{gum}$  - функция влияния содержания гумуса в почве ( $G$ ) на накопление корнями радионуклидов;

$F_{KO}$  - функция влияния содержания подвижного калия ( $K$ ) в почве на накопление корнями радионуклидов.

Концентрация в прикорневом слое почвы рассчитывается по формуле

$$C_s(t) = \frac{A_s}{L\delta} \exp[-(\lambda_s + \lambda_f + \lambda_r)t] , \quad (9)$$

где  $A_s$  - общая удельная активность на почве;

$L$  - глубина прикорневого слоя;

$\delta$  - плотность почвы;

$\lambda_s$  - скорость уменьшения активности через перемещение за границы прикорневого слоя;

$\lambda_f$  - скорость фиксации радионуклидов в почве.

*Влияние обработки с.-х. продукции на содержание радионуклидов в продуктах питания, готовых к употреблению.* Концентрацию активности в продукте переработки  $k$  получают из концентрации активности в сыром продукте по выражению

$$C_k(t) = C_{k0}(t-t_{pk})P_k , \quad (10)$$

где  $C_k(t)$  - концентрация активности в готовом к употреблению продукте  $k$  в момент  $t$ ;

$C_{k0}(t)$  - концентрация активности в сыром продукте в момент  $t$ ;

$P_k$  - коэффициент изменения активности при приготовлении продукта  $k$ .

**Результаты исследования и их анализ.** С помощью математической модели был проведен численный эксперимент накопления активности  $Cs-137$  в общей биомассе культуры подсолнечник (*Heliantus annuus*) и в хозяйственной ее части (семенах) на орошаемых землях Запорожской области. Качественные характеристики почвы: тип почвы - чернозем обыкновенный; кислотность - близка к нейтральной (рН – 6,5 – 7,0); содержание гумуса - в пределах 6%; содержание обменного калия – 17,0 мг/100г почвы; удельная активность  $Cs-137$  в почве менялась в зависимости от административного района области (табл. 1)

Таблица 1 – Уровень радиоактивного загрязнения  $Cs-137$  сельскохозяйственных угодий\* Запорожской области

№ адм. района	Административный район	Плотность загрязнения, Кюри/км <sup>2</sup>		
		1981-1985 гг.	1986 г.	2001 г.
7.	Васильевский	0,03	0,07	0,05
13.	Веселовский	0,04	0,07	0,04
2.	Вольнянский	0,04	0,12	0,03
1.	Запорожский	0,03	0,06	0,03
6.	Каменко- Днепроовский	0,03	0,04	0,03
4.	Ореховский	0,03	0,04	0,04

\* Сельскохозяйственные угодья, орошаемые водами Каховского водохранилища

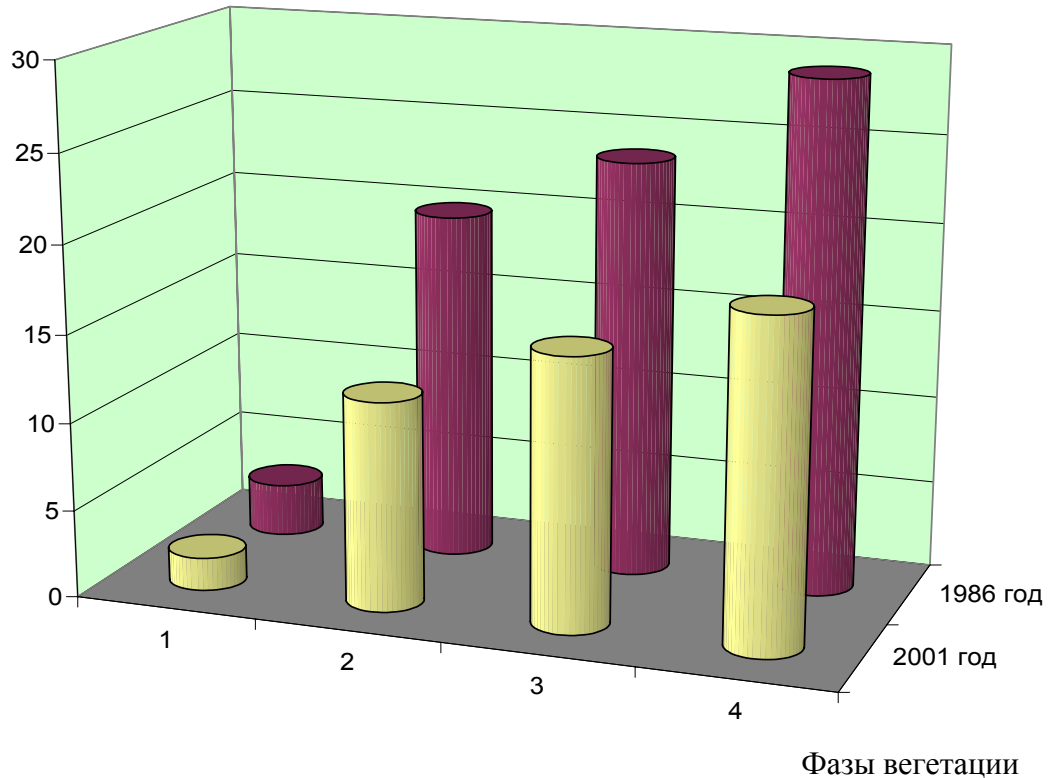
Рассматривались радиоактивные условия, сложившиеся в 1986г. и через пятнадцать лет после аварии.

В численных экспериментах учитывалось, что сельскохозяйственные угодья Запорожской области орошаются водами Каховского водохранилища. Концентрация

радионуклида  $Cs-137$  в орошаемой воде в 1986 г. составляет 0,17 Бк/л, в 2001г. – 0,10 Бк/л.

С помощью динамической модели ECOSYS были получены данные по удельной активности  $Cs-137$  в общей биомассе культуры по фазам развития на черноземах обыкновенных в 1986 и 2001 гг. (рис.1).

Активность  
 $Cs-137$ , Бк/кг



Фазы: 1 – всходы; 2 – образование соцветий; 3 - цветение; 4 – созревание.

Рисунок 1 - Распределение активности  $Cs-137$  в общей массе растений подсолнечника по фазам вегетации. Запорожская область. Вольнянский район.

Из рисунка видно, что удельная активность радиоцезия имеет свойство накапливаться. Так в период всходов подсолнечника в 1986г. концентрация  $Cs-137$  составляла 3,01 Бк/кг, в 2001 г. - 1,89 Бк/кг, в период образования соцветий удельная активность  $Cs-137$  в фитомассе подсолнечника увеличивается почти в 4 раза по сравнению с периодом всходов как в 1986г., так и в 2001г. К концу вегетации подсолнечника содержание радиоцезия в общей биомассе растений достигает 28,96 Бк/кг и 18,58 Бк/кг, соответственно. Следует отметить, что в год аварии активность радиоцезия была выше, чем в 2001г.

В общей биомассе и в семенах подсолнечника накапливается различное количество радионуклида  $Cs-137$  (табл.2). В фазу образования соцветий в общей биомассе активность радионуклида  $Cs-137$  составила в 1986г. 19,89 Бк/кг, в семенах – 11,4 Бк/кг. В фазу созревания - в общей массе 28,96 Бк/кг, в семенах – 22,42 Бк/кг. В 2001г. удельная активность, как в общей биомассе, так и в зерне, снизилась почти в 2 раза. Удельная активность в семенах, лишь на 4,37 Бк/кг меньше, чем в общей массе подсолнечника.

Таблица 2 – Удельная активность  $Cs-137$  в общей массе подсолнечника (*Heliantus annuus*) и в его семенах. Запорожская обл. Вольнянский район

Фаза развития	Удельная активность цезия-137 , Бк/кг	
	Общая масса	Семена
<i>1986 год</i>		
Всходы	3,01	-
Образование соцветий	19,89	11,4
Цветение	23,71	14,07
Полная спелость	28,96	22,42
<i>2001 год</i>		
Всходы	1,89	-
Образование соцветий	11,92	6,69
Цветение	15,44	9,30
Полная спелость	18,58	14,21

Аналогичные расчеты выполнены для каждого из административных районов Запорожской области за 1986 и 2001 годы, сельскохозяйственные угодья которых орошаются водами Каховского водохранилища. Эти результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Удельная активность  $Cs-137$  в растениях подсолнечника (*Heliantus annuus*) и продуктах его переработки. Запорожская область

№ района	Административный район	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг		
		Общая масса	Семена	Масло
<i>1986 год</i>				
7	Васильевский	28,79	22,38	4,46
13	Веселовский	28,79	22,38	4,46
2	Вольнянский	28,96	22,42	4,46
1	Запорожский	28,76	22,38	4,46
6	Каменко-Днепровский	28,70	22,36	4,45
4	Ореховский	28,70	22,36	4,45
<i>2001 год</i>				
7	Васильевский	18,64	14,22	2,83
13	Веселовский	18,61	14,21	2,83
2	Вольнянский	18,88	14,20	2,83
1	Запорожский	18,58	14,20	2,83
6	Каменко-Днепровский	18,58	14,20	2,83
4	Ореховский	18,61	14,21	2,83

Из табл. 3 видно, что по районам удельная активность радиоцезия в общей биомассе и в семенах культуры практически не изменялась. Значительное снижение произошло спустя пятнадцать лет после аварии на Чернобыльской АЭС. Такие изменения наблюдаются за счет снижения активности радиоцезия в орошаемых водах.

Семена подсолнечника ценятся за содержание в них жирного масла. Семена современных районированных высокомасличных сортов содержат 50-52% жира. Среди факторов, определяющих качество масла подсолнечника, важное значение имеет удельная активность  $Cs-137$  в нем.

С помощью динамической модели ECOSYS проводился численный эксперимент накопления радионуклида  $Cs-137$  в продуктах переработки подсолнечника - масле. Данные о содержании  $Cs-137$  в конечных продуктах переработки подсолнечника представлены в таблице 3. Учитывалось, что коэффициент изменения активности радиоцезия при обработке для масла составляет 0,2.

Полученные результаты расчетов показали, что в семенах подсолнечника концентрация активности  $Cs-137$  в 1986 г. составляет 22,42 Бк/кг, в 2001 г. 14,2 Бк/кг. При технологической переработке семян подсолнечника в масло концентрация радионуклидов снижается, в год аварии она составляет 4,46 Бк/кг, спустя пять лет после аварии 2,83 Бк/кг.

Процентное соотношение удельной активности  $Cs-137$  в продукции подсолнечника (рис.2) распределилось следующим образом: семена – 40 %; масло- 8 %.

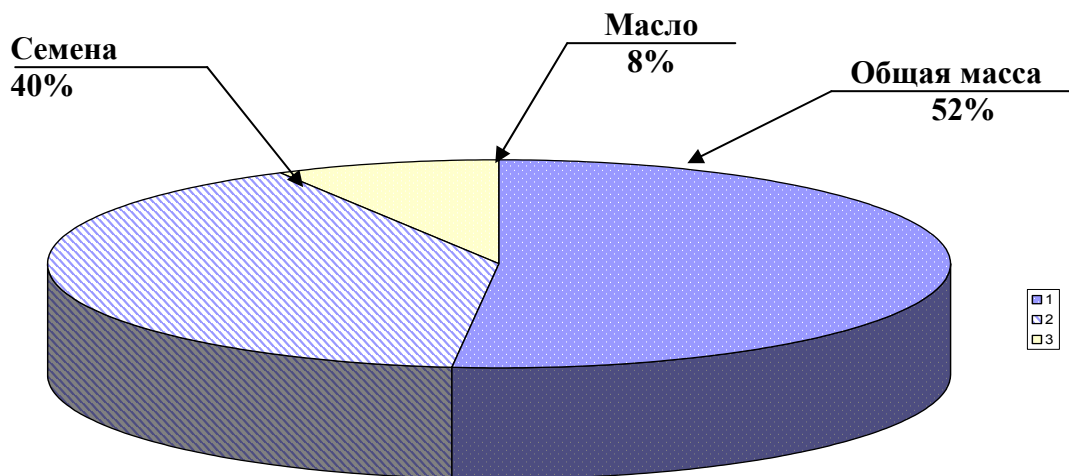


Рисунок 2 - Распределение удельной активности  $Cs-137$  в продукции подсолнечника (*Heliantus annuus*). Запорожская область. Вольнянский район.

**Выводы.** При изучении условий загрязнения первичной биологической продукции (общей биомассы, семян и масла подсолнечника) радионуклидами  $Cs-137$  можно сделать вывод, что значения удельной активности радионуклида в семенах и масле на порядок ниже величин ВДУ (временно допустимого уровня). Полученные результаты подтверждают, что пищевые продукты – семечка и масло являются практически «чистыми» и могут без ограничения использоваться в питании.

Изложенная методика агроекологічної оцінки радіоактивного забруднення первинної біологічної продукції може бути використана і для інших агрофітоценозів.

### Список літератури

1. *Войцехович О.В., Шестопалов В.М., Скальський А.С., Канивець В.В.* Мониторинг радіоактивного забруднення поверхневих і підземних вод після Чорнобильської аварії. К.: УкрНИГМИ, 2001. – 147 с.
2. *Бондарь П.Ф., Лоцилов Н.А., Дутов А.И. и др.* Общие закономірності забруднення продукції рослинництва на території підвергшійся радіоактивному забрудненню в результаті аварії на ЧАЭС// Пробл. с.-х. радіології. – 1991. – Вып. 1 – с. 88-105.
3. *Коткова Т.М.* Вплив механічного складу та вмісту гумусу у дерново-підзолистих ґрунтах на рухливість радіоцезію в ланці ґрунт – фітомаса злакових зернових культур. // Вісник Державної агроекологічної академії України. – Збірник наукових праць. 2001. №1 с.47 – 49.
4. *Проблемы сельскохозяйственной радиологии.* / под ред. Н.А. Лоцилова. Киев: Укр. НИИСХР, - 1993. - Вып. 3,- 247 с.
5. *Проблемы сельскохозяйственной радиологии.* / под ред. Б.С. Пристера. Киев: Укр. НИИСХР, - 1996 - Вып. 4, - 240 с.
6. *Сафранов Т.А., Польовий А.М., Коніков Є.Г. и др.* Антропогенне забруднення геологічного середовища та ґрунтового-рослинного покриву. – Одеса: “ТЭС”, 2003.– 260с.

#### **Метод агроекологічної оцінки радіоактивного забруднення первинної біологічної продукції.**

**Жигайло О.Л.**

*Описаний метод математичного моделювання формування активності радіонукліда в системі "вода – ґрунт – рослина – продукт". На прикладі агрофітоценозу соняшнику (*Heliantus annus L.*) виконана кількісна оцінка забруднення <sup>137</sup>Cs його загальної біомаси, насіння та продукту його переробки на півдні України.*

**Ключові слова:** математична модель, радіонукліди й активність радіоцезію, зрошення, ґрунт, рослина й продукт.

#### **Method of agroecological estimation of primary biological production radioactive contamination.**

**Zhigailo E.**

*Method of mathematical modeling of radionuclide activity forming in the system "water – soil – plant - product" was described. Contamination quantitative assessment of total biomass, seeds and products of their processing on the South of Ukraine was received on the example of sunflower (*Heliantus annus L.*) agrophytocenosis.*

**Keywords:** mathematical model, radioactive nuclides and activity of radioactive caesium, irrigation, soil, plant and product.