

УДК 504.064:614.876

И. А. Лихтарев¹, Л. Н. Ковган¹, С. В. Масюк¹, О. Н. Иванова¹✉, Н. И. Чепурный¹,
З. Н. Бойко¹, В. Б. Герасименко¹, С. А. Терещенко², И. Г. Кравченко², Г. И. Кортушин²,
О. Д. Марценюк²

¹Государственное учреждение “Национальный научный центр радиационной медицины”
Национальной академии медицинских наук Украины, ул. Мельникова, 53, г. Киев, 04050, Украина

²Государственное учреждение “Украинский центр информационных технологий и Национального Регистра” Министерства здравоохранения Украины, ул. Крамского, 21а, г. Киев, 03115, Украина

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ СУБЪЕКТОВ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГИСТРА УКРАИНЫ: СООБЩЕНИЕ 1. ЛОКАЛЬНО-СПЕЦИФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ РОКИТНОВСКОГО РАЙОНА РОВЕНСКОЙ ОБЛАСТИ, ОВРУЧСКОГО РАЙОНА ЖИТОМИРСКОЙ ОБЛАСТИ И ИВАНКОВСКОГО РАЙОНА КИЕВСКОЙ ОБЛАСТИ

Цель исследования. Разработка системы моделей и процедур для реконструкции индивидуализированных доз внутреннего облучения субъектов Государственного Регистра Украины лиц, пострадавших вследствие Чернобыльской катастрофы (ГРУ) – жителей радиоактивно-загрязненных территорий Рокитновского района Ровенской области, Овручского района Житомирской области и Иванковского района Киевской области.

Материалы и методы исследования. Приводится детальное описание структурной схемы и математического аппарата эколого-дозиметрических моделей, позволяющих осуществить реконструкцию индивидуализированных доз облучения от потребления продуктов питания, загрязненных радиоцезием чернобыльского происхождения субъектов трех районов Ровенской, Житомирской и Киевской областей. Разработанные модели феноменологически используют предыдущий опыт по разработке комплекса эколого-дозиметрических моделей для оценки референтных доз облучения всего населения Украины. Параметризация моделей реконструкции полностью основана на математической обработке результатов радиоэкологического (загрязнение радиоцезием молока) и дозиметрического (содержание радиоцезия в организме жителей) мониторингов, которые проводились в течение 1986–2012 гг. в населенных пунктах (НП) рассматриваемых районов. Полнота и периодичность радиоэкологического и дозиметрического мониторингов позволили реализовать НП-специфический подход для реконструкции доз, при котором для каждого НП устанавливалась либо функция поступления радиоцезия с рационом ($q_j^{ad}(t)$), либо функция изменения со временем концентрации радиоцезия в местном коровьем молоке ($c_j^{milk}(t)$). В качестве районно-специфических параметров для каждого региона определены так называемые абсолютный районный молочный эквивалент рациона ($ARME_r$) и относительное возраст-зависимое поступление радиоцезия с рационом (RRI_a^r). Параметр $ARME_r$ используется для определения доз взрослого населения в НП, для которых специфицирована функция $c_j^{milk}(t)$, а параметр RRI_a^r используется для расчета доз облучения субъектов четырех детских возрастных групп (≤ 2 лет, 3–7 лет, 8–12 лет, 13–17 лет).

✉ Иванова Ольга Николаевна, e-mail: iolgagm@gmail.com

Результаты и выводы. Модели реконструкции применены для индивидуализации доз внутреннего облучения 28 711 субъектов ГРУ Рокитновского, 18 790 субъектов ГРУ Иванковского и 41 585 субъектов ГРУ Овручского районов. Результаты индивидуализации доз приведены в виде среднегодовых значений для периода 1987–2012гг., а также в виде распределения субъектов ГРУ различных районов по интервалам доз, накопленных за весь период наблюдения. Приведены также величины суммарных (от внутреннего и внешнего облучения) доз для субъектов ГРУ рассматриваемых районов.

Ключевые слова: медико-дозиметрический реестр, эколого-дозиметрические модели, индивидуализированные дозы облучения, реконструкция доз облучения, Чернобыльская катастрофа.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2014. Вип. 19. С. 80–101.

I. A. Likhtarov¹, L. N. Kovgan¹, S. V. Masiuk¹, O. N. Ivanova¹✉, M. I. Chepurny¹, Z. N. Boyko¹, V. B. Gerasymenko¹, S. A. Tereshchenko², I. G. Kravchenko², G. I. Kortushin², O. D. Marceniyk²

¹State Institution “National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine”, Melnykov str., 53, Kyiv, 04050, Ukraine

²State Institution “Ukrainian Centre of Information Technologies and National Register” of Ministry of Health of Ukraine, Kramskogo str., 21a, Kyiv, 03115, Ukraine

Individualized internal exposure doses reconstruction for the persons of Ukraine State Register:

Report 1. Locally-specific models and doses of persons living in Rokytno raion of Rivne oblast, Ovruch raion of Zhytomyr oblast and Ivankiv raion of Kyiv oblast

Study objective. Dosimetric support of the Ukrainian State Register of persons, affected due to the Chernobyl accident (SRU). Development the system of models and procedures for the individualized internal doses reconstruction for the subjects of SRU residing in radioactive contaminated territories of Rokytno raion of Rivne oblast, Ovruch raion of Zhytomyr oblast and Ivankiv raion of Kyiv oblast.

Materials and methods. A detailed description for the schematic diagram of the methodology and mathematical relations of ecological-dosimetric models are given. It allows to reconstruct the individualized doses from the ingestion of food contaminated by radiocesium after the Chernobyl accident for the subjects of SRU from three raions of Rivne, Zhytomyr and Kyiv oblasts. Phenomenologically, the developed models are close to the previously developed complex of ecological and dosimetric models intended to estimate the reference doses for the entire population of Ukraine. Calibration of model parameters is based on mathematical treatment for results of extensive radioecological (radiocesium milk contamination) and dosimetric (radiocesium burden in human body) monitorings, that were provided in the period of 1986–2012 in the settlements of raions under consideration. Completeness and periodicity of radioecological and dosimetric monitorings allowed to realize the settlement-specific approach for dose reconstruction, wherein for each settlement either the function of radiocesium intake with diet ($q_j^{ad}(t)$) or the function of time-variation of radiocesium concentration in the local cow's milk ($c_j^{milk}(t)$) were established. Absolute raion milk equivalent of the diet ($ARME_r$) and relative age dependent intake of radiocesium with diet (RRI_a^r) are specified as a raion-specific functions for each raion. $ARME_r$ is used to calculate the doses of adults in the settlement for which the function $c_j^{milk}(t)$ was specified. RRI_a^r is used to calculate the doses for the subjects of four children age groups (≤ 2 years old, 3–7 years old, 8–12 years old, 13–17 years old).

Results and conclusions. Models for individualized internal exposure doses reconstruction of SRU subjects are developed. The individualized doses are estimated for 28711 SRU subjects from Rokytno raion, 18790 SRU subjects from Ivankiv raion and 41585 SRU subjects from Ovruch raion. Results of doses individualization are given as annual average doses for the period of 1987–2012. The distribution of SRU subjects of different raions over the intervals of doses accumulated over the entire observation period is also given. Values of total (from internal and external exposure) doses for SRU subjects of the raions under consideration are given, as well.

Key words: Medical and Dosimetric Registry, ecological and dosimetric models, individualized exposure dose, doses reconstruction, the Chernobyl accident.

Problems of radiation medicine and radiobiology. 2014;19:80-101.

ВСТУПЛЕНИЕ

В настоящее время в Украине функционирует Государственный регистр Украины субъектов, которые пострадали вследствие Чернобыльской аварии (ГРУ). К 2013 г. накоплены данные о результатах медицинских обследований (диспансеризаций) 2 млн 372 тыс. субъектов, проживающих во всех областях Украины. Целью этого регистра является долгосрочный автоматический учет состояния здоровья лиц, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС, их детей и последующих поколений. На учет в ГРУ поставлены субъекты, которые относятся в одной из 4 групп первичного учета:

Группа 1 – Ликвидаторы (13,4 % всех, состоящих на учете)

Группа 2 – Эвакуанты (3,4 %)

Группа 3 – Проживающие на радиоактивно-загрязненных территориях (64,7 %)

Группа 4 – Лица, которые родились у родителей 1–3 групп (1,8 %).

Одной из важнейших задач ГРУ до последнего времени сохраняется задача реконструкции индивидуализированных доз облучения, обусловленных Чернобыльской катастрофой. Начиная с 2007 года, в отделе дозиметрии и радиационной гигиены ННЦРМ в рамках ряда НИР проводятся работы по реконструкции индивидуализированных доз облучения субъектов ГРУ [1-2]. К настоящему времени разработаны модели реконструкции и осуществлена индивидуализация доз для субъектов, проживающих в пяти районах различных областей Украины (рис. 1):

- Рокитновский район Ровенской области;
- Овручский район Житомирской области;
- Иванковский район Киевской области;
- Козелецкий и Репкинский районы Черниговской области.

Настоящее Сообщение 1 посвящено описанию эколого-дозиметрических моделей реконструкции доз внутреннего облучения и результатов дозиметрической индивидуализации для субъектов трех из пяти районов: Рокитновского, Овручского и Иванковского. Восстановление индивидуализированных доз внутреннего облучения за счет потребления радиоактивно-загрязненных продуктов питания у жителей радиоактивно-загрязненных территорий (группа 3) является наиболее методически сложной задачей. Сложность реконструкции доз этой компоненты чернобыльского облучения связана с широкой вариабельностью состава рациона и самоограничением населением потребления местных продуктов питания. Кроме того, проводимые в течение всего послеаварийного периода сельскохо-

INTRODUCTION

Nowadays in Ukraine the State Register of Ukraine (SRU) of persons, affected due to the Chernobyl accident is in operation. By 2013 the information had accumulated about the results of medical examinations of 2 million 372 thousand persons living in all oblasts of Ukraine. The aim of SRU is a long-term automatic storage of the information on health status of persons directly affected due to the Chernobyl accident, of their children and future generations. Persons of SRU are divided over four primary account groups:

Group 1 – Liquidators (13.4% of all registered persons),

Group 2 – Evacuees (3.4%),

Group 3 – Residents of the radioactively contaminated territories (64.7%),

Group 4 – Persons who were born by parents from groups 1–3 (1.8%).

Till now, the task of reconstruction the individualized exposure doses due to Chernobyl disaster remains one of the most important for SRU. Research on the individualized doses reconstruction for SRU subjects has been carried out by Dosimetry and Radiation Hygiene Department of NRCRM since 2007 [1-2]. Currently the models of dose reconstruction have been developed and doses individualization is performed for persons residing in five raions of different Ukrainian oblasts (Figure 1):

- Rokytne raion of Rivne oblast,
- Ovruch raion of Zhytomyr oblast,
- Ivankiv raion of Kyiv oblast,
- Kozelets and Ripky raions of Chernihiv oblast.

In Report 1 the description of ecological-dosimetric models is given. The description is developed for the individualized internal exposure doses reconstruction of persons living in three of the five raions: Rokytne, Ovruch and Ivankiv. The reconstruction of individualized exposure doses due to the consumption of radioactively contaminated food for residents of radioactive contaminated territories (group 3) is the most methodologically complicated problem. The complexity of doses reconstruction of this component of Chernobyl exposure is associated with a wide variability of diet and self-limitation of local food consumption by population. Besides that the agricultural countermeasures that have been pro-

зайственные противорадиационные защитные мероприятия также модифицировали временную динамику изменения концентрации радиоцезия в местном молоке, а эффективность и интенсивность этих контрмер существенно варьировала в зависимости от населенного пункта (НП), района и времени после аварии.

Величина доз внутреннего облучения от радиоцезия определяется концентрацией $^{137,134}\text{Cs}$ в потребляемых продуктах питания местного производства, что, в свою очередь, зависит от плотности выпадений радиоцезия на почву и интенсивности выноса цезия из почвы в растительность и далее по звеньям пищевой цепочки в различные мясо-молочные и растительные продукты. Районы Украинского Полесья, к которым относятся Рокитновский район Ровенской области, характеризуются кислыми торфяно-болотистыми почвами, для которых характерна высокая интенсивность перехода цезия из почв в корневую систему растений, тогда как для территории Иванковского района характерно пре-

vided during all postaccident period, essentially substantially modified the temporary variation of radiocesium concentration in local milk. Efficiency and intensity of these countermeasures are varied significantly in different raions and settlements.

The values of internal doses of radiation exposure due to the ingestion are determined by the concentration of ^{137}Cs and ^{134}Cs in the locally produced foodstuff. This concentration in its turn is determined by the ^{137}Cs activity in the depositions, uptake of cesium from soil by plants and further transfer to milk, vegetables and variety of other food products. In Rokytno raion of northern part of Rivne oblast (part of Ukrainian 'Polessiya') there are marsh-like and acid soils with unusually high intensity uptake of cesium from the soil by plant roots. At the same time in Ivankiv raion there are mainly sandy soils with

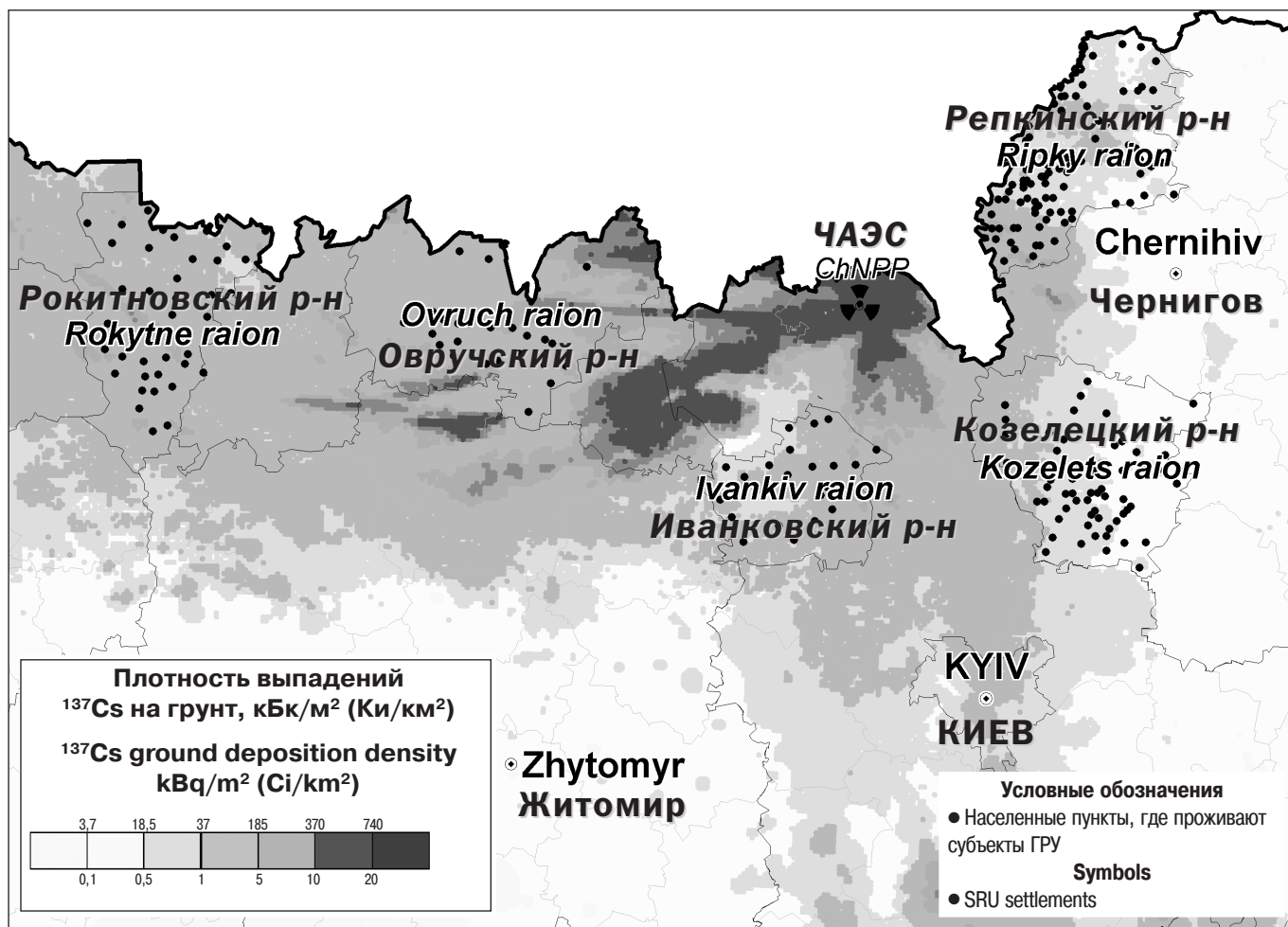


Рисунок 1. Карта-схема плотности выпадений ^{137}Cs на почву и географическое расположение населенных пунктов пяти районов проживания субъектов ГРУ, для которых выполнена реконструкция индивидуализированных доз

Figure 1. Map of ^{137}Cs activity per unit area and geographical location of SRU settlements of five raions for which the individualization of doses is carried out

Таблица 1

Общая характеристика уровней выпадений ^{137}Cs на почву и величина агрегированного коэффициента перехода цезия “почва-молоко” (TF^{91}) в населенных пунктах трех районов, где проживают субъекты ГРУ

Table 1

General characteristic of ^{137}Cs ground deposition density and the value of aggregated ^{137}Cs “soil-milk” transfer factor (TF^{91}) for the SRU settlements of three raions

Район, область	Количество НП проживания субъектов ГРУ	Плотность выпадений ^{137}Cs на почве*, $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$			TF91, $\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$ на $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$	
		^{137}Cs ground depositions density*, $\text{кВq}\cdot\text{м}^{-2}$			TF91, $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ per $\text{кВq}\cdot\text{м}^{-2}$	
		min-max	среднее по НП района	медиана	среднее по НП района	медиана
Raion, oblast	Number of SRU settlements in the raion	min-max	averaged over SRU settlements of raion	median	averaged over SRU settlements of raion	median
Рокитновский р-н, Ровенская обл. Rokytno raion, Rivne oblast	38	30–195	84	76	7.01	5.3
Овручский р-н, Житомирская обл. Ovruch raion, Zhytomyr oblast	111	6–649	137	124	2.07	1.08
Иванковский р-н, Киевская обл. Ivankiv raion, Kyiv oblast	27	25–185	73	69	0.55	0.48

Примечание. * – плотность выпадения ^{137}Cs на почве приведена к 1986 году.
Note. * – ^{137}Cs ground depositions density is adjusted to the year 1986.

обладание песчаных почв с довольно низким показателем перехода цезия из почвы в растительность.

В таблице 1 приведена информация относительно величины плотности выпадений ^{137}Cs на почву и эмпирического агрегированного коэффициента перехода цезия “почва-молоко” (TF^{91})[#], характеризующего почвенные особенности того или иного региона.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о довольно широком диапазоне изменения величины уровней радиоактивных выпадений в рассматриваемых районах. Кроме того, из представленных данных отчетливо видно, что интенсивность выноса ^{137}Cs из почвы в растительность и далее, в молоко, для территорий Рокитновского района существенно превышает значение этого показателя для Овручского и Иванковского районов. В связи с этим именно для жителей Рокитновского района следует ожидать наибольших значений доз внутреннего облучения (на единицу выпадений ^{137}Cs на почву) в сравнении с другими районами.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящее Сообщение 1 посвящено описанию моделей реконструкции индивидуализированных доз внутреннего облучения субъектов ГРУ из населения (группа 3), проживающих в Рокитновском, Овручском и Иванковском районах, а также представлению результатов применения этих моделей для индиви-

relatively low uptake of cesium from soil by plant roots.

Table 1 provides information on the magnitude of ^{137}Cs ground depositions density and aggregate empirical “soil-milk” transfer factor for cesium (TF^{91})[#], which characterizes the properties of soil in a particular region.

The data in Table 1 show that even within one raion the values of the radioactive density depositions can vary by two orders of magnitude. From presented data it is clear as well that for the territories of Rokytno raion the intensity of ^{137}Cs uptake from soil by vegetation with further transfer to milk greatly exceeds the one for Ovruch and Ivankiv raions. In this regard it should be expected that the highest values of internal exposure doses normalized per unit of ^{137}Cs ground depositions will take place just for residents of Rokytno raion.

STUDY OBJECTIVE

The aim of this Report 1 is description of models developed for the reconstruction of individualized internal exposure doses for the SRU subjects from population (group 3) living in Rokytno, Ovruch and Ivankiv raions. The results of applying these models for doses individualization for

[#] TF^{91} рассчитывался по данным государственного экологического мониторинга как отношение концентрации ^{137}Cs в молоке в том или ином НП, измеренной в 1990–1992 гг., к плотности выпадений ^{137}Cs на почву в 1991 г. в этом же НП

[#] TF^{91} was calculated according to the date of the state environmental monitoring as a ratio of the ^{137}Cs concentration in milk in a particular settlement measured in 1990–1992 to the density of ^{137}Cs ground depositions in 1991 in this settlement

дуализации доз субъектов ГРУ этих районов. В Сообщении 2 будут представлены соответственно модели реконструкции и дозы облучения субъектов ГРУ Козелецкого и Репкинского районов Черниговской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Феноменология, структурная схема и соотношения модели

В качестве индивидуализированной дозы i -му субъекту ГРУ, проживающему в j -м населенном пункте (НП), в T -й год после аварии приписывается средняя доза $D_i^{a,T}$ (для детей возрастной группы a) или $D_i^{ad,T}$ (для взрослых), реконструированная для возрастной группы этого НП, соответствующей возрасту i -го субъекта в T -й год.

В моделях реконструкции $D_i^{a,T}$ и $D_i^{ad,T}$ используются НП- и районно-специфичные функции и параметры. В качестве НП-специфичных функций j -го НП используется:

- > НП-специфическая временная функция поступления ^{137}Cs с рационом взрослых — $q_j^{ad}(t)$;
- > НП-специфическая функция временной динамики ^{137}Cs в молоке — $c_j^{milk}(t)$.

В качестве общерайонных параметров r -го района используются:

- > абсолютный молочный эквивалент рациона для взрослых жителей района r — $ARME_r$ (л/сут), определяемый как количество коровьего молока, потребление которого обеспечивает такое же поступление радиоцезия в организм жителей, как и весь рацион;
- > относительное возраст-зависимое поступление ^{137}Cs с рационом жителей района r — RRI_a^r , определяемое как отношение поступления радиоцезия с рационом у представителей возрастной группы a к поступлению радиоцезия с рационом взрослых.

Параметризация функций моделей проводится для взрослых жителей того или иного НП или района. Годовая доза внутреннего облучения для детей возраста a в j -м НП r -го района $D_i^{a,T}$ рассчитывается с использованием дозы для взрослых $D_i^{ad,T}$:

$$D_j^{a,T} = D_j^{ad,T} \cdot RRI_a^r \cdot k_a^{dos} / k_{ad}^{dos} \quad (1)$$

где k_a^{dos} , k_{ad}^{dos} — доза на единицу поступления (дозовый коэффициент) для возрастной группы a или взрослых, соответственно (Зв/Бк).

Процедура восстановления дозы $D_i^{ad,T}$ для T -го года в j -м НП существенно зависит от наличия и объема СИЧ- и молочного мониторингов в этом НП. Так, при наличии достаточного количества СИЧ-измерений $N_{ad,j}^{WBC,T}$ в j -м НП в T -м году у взрослых

the SRU subjects from these raions are also given. Models for the internal exposure doses reconstruction for the SRU subjects of Kozelets and Ripky raions of Chernihiv oblast are described in Report 2 in this digest.

MATERIALS AND METHODS

Phenomenology, structure and main relations of model

The individualized dose of SRU subject i of age a living in settlement j in year T corresponds to the average exposure dose value for children of age-group a ($D_i^{a,T}$) or adult subjects ($D_i^{ad,T}$) been reconstructed for the respective age group of that settlement j corresponding to the age of subject i in year T .

In the models for $D_i^{a,T}$ and $D_i^{ad,T}$ reconstruction the settlement-specific and raion-specific functions and parameters are used. The settlement-specific functions for j -th settlement are:

- > settlement-specific time-varying function of ^{137}Cs intake with diet for adults — $q_j^{ad}(t)$;
- > settlement-specific function of time dynamics of ^{137}Cs in milk (milk function) — $c_j^{milk}(t)$.

The next raion-specific functions are used for raion r :

- > absolute milk equivalent of diet for adults of raion r (L/day) — $ARME_r$ (Absolute Raion Milk Equivalent). $ARME_r$ corresponds to such amount of milk intake that would result in an intake of ^{137}Cs equal to the one arising from the consumption of local food in the whole diet.
- > relative intake of ^{137}Cs with diet — RRI_a^r (Raion Relative Intake), which is defined as a ratio of ^{137}Cs intakes with diet for subjects of age group a to the one for adults.

The calibration of function parameters is provided for the adult residents of a particular settlement or a raion. The annual internal exposure dose $D_i^{a,T}$ for children of age a is calculated based on the dose for the adults $D_i^{ad,T}$ as follows:

where k_a^{dos} , k_{ad}^{dos} are the effective conversion factors for ^{137}Cs for age a and for adults (Sv per Bq ingestion).

The approach for the reconstruction of $D_i^{ad,T}$ in year T in settlement j depends essentially on availability and amount of milk- and WBC measurements in settlement j . Hence if the number of WBC measurements $N_{ad,j}^{WBC,T}$ for adults in settlement j in year T is

($N_{ad,j}^{WBC,T} > 10$), доза $D_i^{ad,T}$ оцінюється безпосередньо по результатам СИЧ-вимірювань так, що:

$$D_j^{ad,T} = \bar{q}_j^{ad,T} \cdot k_{ad}^{dos} \cdot \Delta T \quad (2)$$

де $\Delta T = 365$ суток;

$\bar{q}_j^{ad,T}$ – середнє значення поступлення ^{137}Cs с раціоном у дорослих жителів j -го НП в T -м році (Бк/сут), розраховується по співвідношенню:

$$\bar{q}_j^{ad,T} = \frac{1}{N_{ad,j}^{WBC,T}} \sum_i (Q_{k,j}^{ad,T} \cdot \lambda_{ad}^{Cs}) \quad (3)$$

В (3) $Q_{k,j}^{ad,T}$ – вміст ^{137}Cs в організмі k -го дорослого жителя j -го НП, виміряний в T -й році (Бк); λ_{ad}^{Cs} – постійна напіввиведення цезія з організму дорослого (сут $^{-1}$).

Якщо в розглянутому j -м НП проживання суб'єкта ГРУ в T -й році СИЧ-моніторинг не проводився, але в ньому в період 1987–2012 гг. виконувалися СИЧ-вимірювання по крайній мірі впродовж 7 років, то по результатам всіх СИЧ-вимірювань для цього j -го НП встановлюється НП-специфічна функція поступлення ^{137}Cs с раціоном для дорослих $q_j^{ad}(t)$, а доза $D_i^{ad,T}$ внутрішнього облучення для дорослих в T -й році розраховувалася як:

$$D_j^{ad,T} = q_j^{ad}(t) \Big|_{t=T} \cdot k_{ad}^{dos} \cdot \Delta T \quad (4)$$

де $q_j^{ad}(t) \Big|_{t=T}$ – НП-специфічне поступлення ^{137}Cs с раціоном, розраховане по функції $q_j^{ad}(t)$ для T -го року.

Якщо в НП проживання суб'єкта ГРУ СИЧ-моніторинг проводився менше, ніж впродовж 7 років в період 1987–2013 гг., то при наявності для цього НП достатньої кількості результатів молочного моніторингу встановлюється НП-специфічна “молочна” функція часової динаміки концентрації ^{137}Cs в коров'ячому молоці $c_j^{milk}(t)$, Бк/л, а річна доза внутрішнього облучення для дорослих $D_j^{ad,T}$ розраховується по співвідношенню:

$$D_j^{ad,T} = c_j^{milk}(t) \Big|_{t=T} \cdot ARME_r \cdot k_{ad}^{dos} \cdot \Delta T \quad (5)$$

де $c_j^{milk}(t) \Big|_{t=T}$ – середня концентрація ^{137}Cs в молоці, розрахована по функції $c_j^{milk}(t)$ на момент $t=T$.

При недостатньому об'ємі та періодичності як СИЧ, так і молочного моніторингу в j -м НП для оцінки дози застосовується специфічна процедура встановлення параметрів функції з використанням результатів молочного моніторингу в найближчих НП.

large enough ($N_{ad,j}^{WBC,T} > 10$), dose $D_i^{ad,T}$ is evaluated based on WBC measurement results as follows:

where $\Delta T = 365$ days;

$\bar{q}_j^{ad,T}$ is the average value of ^{137}Cs intake with diet for adults of settlement j in year T (Bq per day) which is calculated as:

In (3) $Q_{k,j}^{ad,T}$ is the ^{137}Cs body burden for adult k of settlement j measured in year T (Bq), λ_{ad}^{Cs} is biological elimination rate of ^{137}Cs from the body for adults (day $^{-1}$).

In the case if the WBC monitoring in settlement j in year T have not been provided, however the WBC measurements were performed at least within 7 years (7 times) during 1987–2012, thus the results of WBC measurements are used to establish the settlement-specific function of ^{137}Cs incorporation with food ration $q_j^{ad}(t)$, and the dose $D_i^{ad,T}$ of internal irradiation for adults in year T is calculated as

where $q_j^{ad}(t) \Big|_{t=T}$ is the settlement-specific function of ^{137}Cs intake with diet, calculated by the function $q_j^{ad}(t)$ for year T .

In case if WBC monitoring in settlement j in year T had been performed during less than 7 years withing the period 1987–2013, then if there is enough data of milk monitoring the settlement-specific “milk” function of time pattern of ^{137}Cs concentration in milk $c_j^{milk}(t)$ can be established just based on the results of milk measurements. Then the internal radiation dose in adults $D_j^{ad,T}$ is calculated as:

where $c_j^{milk}(t) \Big|_{t=T}$ is the annual average concentration ^{137}Cs in milk calculated by the function $c_j^{milk}(t)$ for year T .

A specific procedure for establishing the function parameters is developed for the settlements j , where the results of WBC and milk measurements are unavailable. The results of milk monitoring in the nearest settlements are used in that procedure.

Структурная схема модели реконструкции, разработанной для индивидуализации доз облучения субъектов ГРУ Рокитновского, Овручского и Иванковського районов, представлена на рисунке 2.

A schematic diagram of the methodology used to reconstruct individualized doses for SRU subjects living in Rokytno, Ovruch, and Ivankiv raions is demonstrated in Fig. 2.

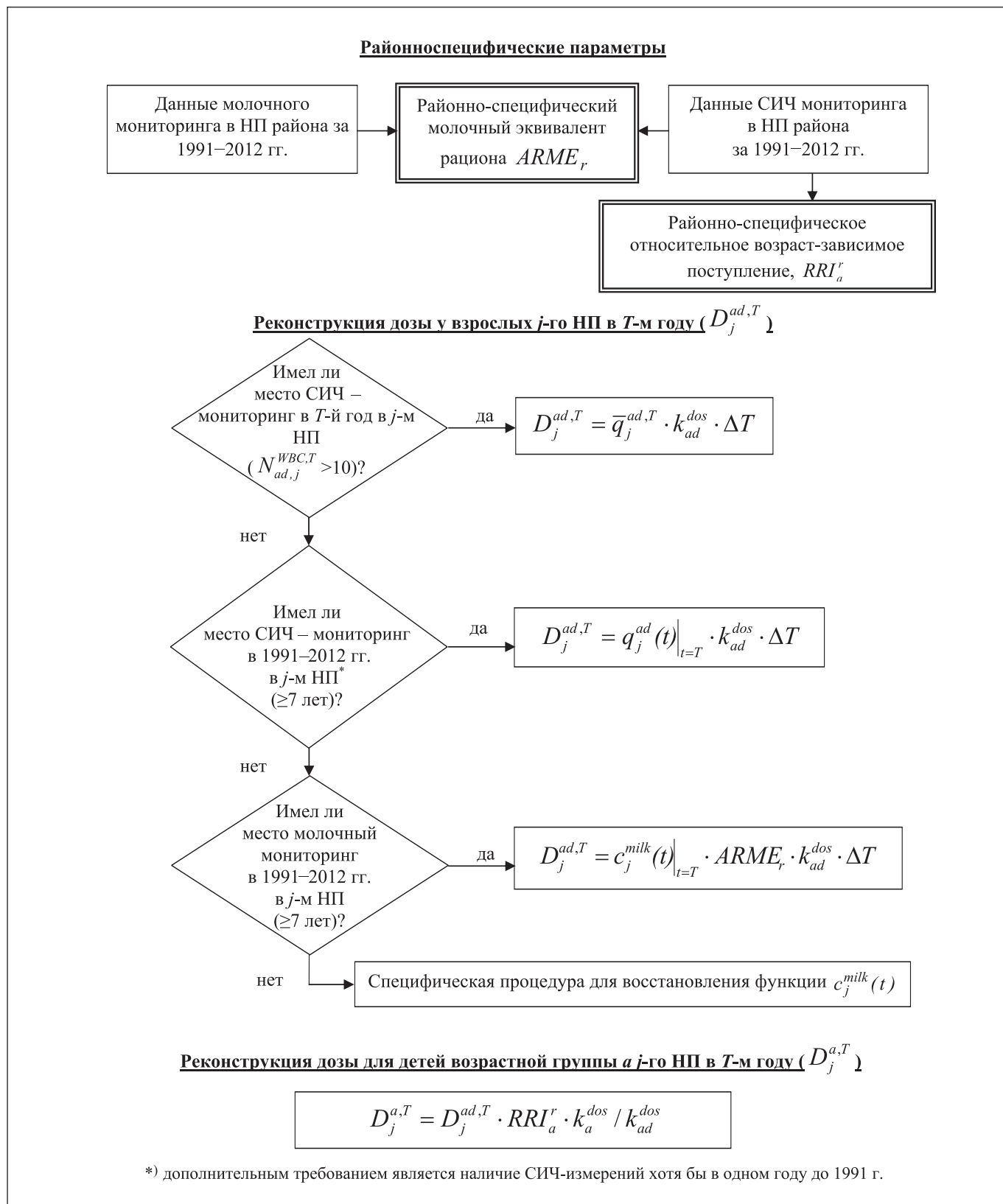


Рисунок 2. Общая схема использования результатов эколого-дозиметрического мониторинга и основная последовательность процедур в модели реконструкции индивидуализированных доз субъектов ГРУ, проживающих в НП Рокитновского, Овручского и Иванковського районов

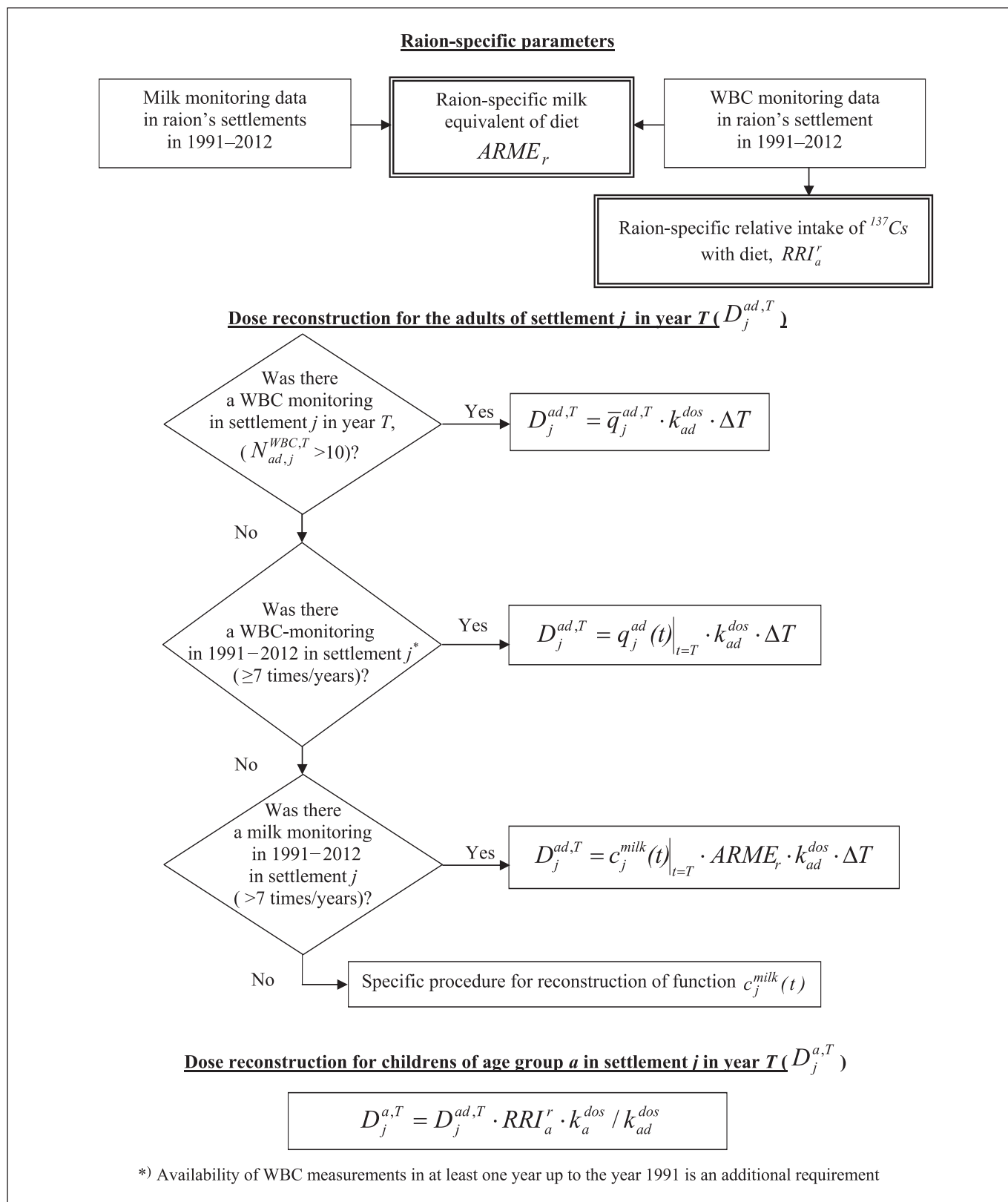


Figure 2. Structure diagram of the methodology used to the individualized doses for subjects of SRU resided in the settlements of Rokytno, Ovruch, and Ivankiv raions

В таблиці 2 на основанні аналізу частоти СИЧ- і молочного моніторингов приведено кількість НП в розглянутих районах, для яких оказалось возможным установить НП-специфичные функции поступления $q_j(t)$ или $c_j^{milk}(t)$.

Proceeding from the WBC and milk monitoring frequency a number of settlements in the raions under consideration, for which settlement-specific functions $q_j(t)$ or $c_j^{milk}(t)$ can be established, are given in Table 2.

Таблица 2

Количество НП Рокитновского, Иванковского и Овручского районов, для которых возможно установление НП-специфических функций $q_j(t)$ или $c_j^{milk}(t)$

Table 2

Number of settlements of Rokytno, Ivankiv raions for which the settlement-specific functions $q_j(t)$ or $c_j^{milk}(t)$ can be established

Район Raion	Количество НП / number of settlements			
	всего НП проживания субъектов ГРУ в районе total number of settlements were SRU subjects resided	возможность восстановления НП-специфических функций possibility to reconstruct the settlement-specific functions		специальная процедура восстановления special procedure for reconstruction
		$q_j(t)$	$c_j^{milk}(t)$	$c_j^{milk}(t)$
Иванковский Ivankiv	27	-	27	-
Овруч Овручский	111	27	75	9
Рокитновский Rokytno	38	21	17	-

Как видно из данных, представленных в таблице 2, для всех НП Рокитновского и Иванковского районов объем и частота СИЧ или молочного мониторингов позволяет установить НП-специфические функции $q_j(t)$ или $c_j^{milk}(t)$. В Овручском районе функции $q_j(t)$ и $c_j^{milk}(t)$ могут быть установлены для 102 (из 111) НП. Для 9 НП этого района разработана специальная процедура восстановления параметров функции $c_j^{milk}(t)$. В Иванковском районе для всех 27 НП оказалось возможным восстановить НП-специфические функции $c_j^{milk}(t)$.

Table 2 shows that amount and frequency of WBC and/or milk measurements allow to establish the settlement-specific functions $q_j(t)$ or $c_j^{milk}(t)$ for all settlements of Rokytno and Ivankiv raions. In Ovruch raion, functions $q_j(t)$ and $c_j^{milk}(t)$ can be established for 102 (out of 111) settlements. Special procedure for reconstruction $c_j^{milk}(t)$ is needed for 9 settlements in this raion. In Ivankiv raion, the establishment of settlement-specific functions $c_j^{milk}(t)$ for all 27 settlements can be provided.

НП-специфические функции поступления ^{137}Cs с рационом взрослых $q_j^{ad}(t)$

Параметры функции $q_j^{ad}(t)$ оценивались путем аппроксимации средних годовых поступлений ^{137}Cs с рационом у взрослых жителей того или иного НП $\bar{q}_j^{ad,T}$ (рассчитанных в соответствии с выражением 3) функцией вида:

$$q_j^{ad}(t) = a_j^q \cdot \exp(-\lambda_j^q t) \tag{6}$$

где a_j^q ($\text{Bq} \cdot \text{сут}^{-1}$) и λ_j^q (год^{-1}) - оцениваемые параметры.

Дополнительным условием при установлении НП-специфичной функции $q_j^{ad}(t)$ было требование наличия СИЧ-измерений в j -м НП хотя бы в один год до 1991 г. Кроме того, для дальнейшего использования принимались $q_j^{ad}(t)$ лишь тех НП, для которых процедура оценки параметров функции $q_j^{ad}(t)$ характеризовалась значением коэффициента де-

Settlement-specific functions of ^{137}Cs intake with diet for adults $q_j^{ad}(t)$

The parameters of function $q_j^{ad}(t)$ were estimated based on approximation of the average yearly ^{137}Cs incorporation with food in adult residents of a specific settlement $\bar{q}_j^{ad,T}$ (calculated according to eq. 3) by the function:

where a_j^q ($\text{Bq} \cdot \text{day}^{-1}$) and λ_j^q (year^{-1}) are estimated parameters.

An additional requirement for establishing settlement-specific function $q_j^{ad}(t)$ for settlement j was an availability of results of WBC measurements for settlement j for at least one year up to the year 1991. Besides, $q_j^{ad}(t)$ were accepted for further usage only for those settlements, where procedure of parameter estimation for $q_j^{ad}(t)$ was cha-

терминации $R^2 > 0,2^*$. Именно в силу последнего условия ($R^2 > 0,2$) ни для одного из НП Иванковского района функция $q_j^{ad}(t)$ оценена не была.

Параметры функции $q_j^{ad}(t)$ оценены для 21 НП проживания субъектов ГРУ Рокитновского и 27 НП проживания субъектов ГРУ Овручского районов (табл. 3). На рисунке 3 в качестве примеров визуализированы среднегодовые значения $\bar{q}_j^{ad,T}$ и функция $q_j^{ad}(t)$ для ряда НП проживания субъектов ГРУ этих районов.

characterized by the determination coefficient $R^2 > 0,2^*$. Just because of the latter condition ($R^2 > 0,2$) the function $q_j^{ad}(t)$ was not estimated for any settlement of Ivankiv raion.

The parameters of $q_j^{ad}(t)$ were evaluated for 21 settlements of Rokytne raion where SRU subjects are living, and for 27 such settlements in Ovruch raion (Table 3). Figure 3 demonstrates as examples the annual values of $\bar{q}_j^{ad,T}$ and corresponding fitted curves $q_j^{ad}(t)$ for some SRU settlements of Rokytne and Ovruch raions.

Таблица 3

Параметры НП-специфичных функций поступления активности ^{137}Cs у взрослых, $q_j^{ad}(t)$, для НП проживания субъектов ГРУ Рокитновского и Овручского районов; $q_j^{ad}(t) = a_j^q \cdot \exp(-\lambda_j^q t)$, a_j^q и λ_j^q – параметры, R^2 – коэффициент детерминации

Table 3

Estimated parameters of settlement-specific functions of ^{137}Cs intake for adults, $q_j^{ad}(t)$, for SRU settlements of Rokytne and Ovruch raions; $q_j^{ad}(t) = a_j^q \cdot \exp(-\lambda_j^q t)$, a_j^q and λ_j^q are estimated parameters, R^2 is determination coefficient

№ п/п No of settlement	НП SRU settlement	Параметры функции / parameters of $q_j^{ad}(t)$			R^2
		a_j^q Бк/сут // Bq/day	λ_j^q 1/год // 1/year	$T_j^q = \frac{\ln 2}{\lambda_j^q}$ годы / years	
Рокитновский район / Rokytne raion					
1	Беловеж / Belovezh	225	0,094	7,4	0,4
2	Березовое / Berezove	222	0,08	8,7	0,9
3	Блажевое / Blazheve	168	0,099	7	0,6
4	Боровое / Borove	217	0,16	4,4	0,8
5	Вежица / Vezhitsa	659	0,071	9,7	0,5
6	Глинное / Glynne	145	0,051	13,7	0,6
7	Дроздынь / Drozdyn	381	0,06	11,5	0,5
8	Дубно / Dubno	86	0,03	22,9	0,4
9	Каменное / Kaminne	244	0,11	6,4	0,4
10	Карпиловка / Karpilovka	142	0,077	9	0,8
11	Кисоричи / Kysorychi	217	0,16	4,3	0,8
12	Масевичи / Masevychi	364	0,13	5,3	0,7
13	Обсич / Obsich	122	0,064	10,9	0,5
14	Остки / Ostky	170	0,13	5,3	0,7
15	Переходичи / Perehodychi	746	0,14	4,9	0,7
16	Познань / Poznan	145	0,079	8,8	0,8
17	Рокитно / Rokytne	115	0,095	7,3	0,7
18	Сновидовичи / Snovydyvychi	224	0,094	7,4	0,8
19	Старое Село / Stare Selo	447	0,057	12,2	0,5
20	Томашгород / Tomashgorod	278	0,08	8,6	0,5
21	Томашгород (Сехи) / Tomashgorod (Sehy)	237	0,097	7,1	0,8

* **Коэффициент детерминации (R^2)** – статистический показатель, который используется в статистических моделях как мера зависимости вариации зависимой переменной от вариации независимых переменных. Показывает, насколько имеющиеся наблюдения подтверждают модель

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i,$$

y_i и \hat{y}_i – фактические и оценочные значения зависимой переменной.

* **Determination coefficient (R^2)** is statistical indicator, which is used in statistical models as a measure of variation of dependent variable, with regard to variation of independent variables. It shows how the available observations fit the model

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i,$$

y_i and \hat{y}_i are actual and estimated values of the dependent variable.

Таблица 3 (продолжение)

Table 3 (continued)

№ п/п No of settlement	НП SRU settlement	Параметры функции / parameters of $q_j^{ad}(t)$			R ²
		a_j^q Бк/сут // Bq/day	λ_j^q 1/год // 1/year	$T_j^q = \frac{\ln 2}{\lambda_j^q}$ годы / years	
Овручский район / Ovruch raion					
1	Великая Черниговка / Velyka Chernihivka	111	0,102	6,8	0,9
2	Великий Кобылин / Velykyi Kobylun	111	0,16	4,3	0,98
3	Выступовичи / Vystupovychi	335	0,068	10,2	0,6
4	Возничы / Voznychi	425	0,17	4	0,6
5	Гладковичи / Gladkovychi	77	0,07	10	0,3
6	Думинское / Dumynske	214	0,029	23,7	0,3
7	Заболоть / Zabolot	84	0,06	11,5	0,8
8	Кирданы / Kyrdany	35	0,051	13,5	0,4
9	Левковичи / Levkovychi	74	0,095	7,3	0,8
10	Личманы / Lychmany	104	0,04	17,2	0,4
11	Лучанки / Luchanky	270	0,10	6,8	0,9
12	Людвинювка / Lyudvynivka	213	0,056	12,4	0,4
13	Магдин / Magdyn	181	0,055	12,6	0,2
14	Мацки / Matsky	291	0,095	7,3	0,4
15	Нижняя Рудня / Nyzhnya Rudnya	180	0,11	6,4	0,8
16	Овруч / Ovruch	37	0,045	15,4	0,3
17	Пехотское / Pehotske	676	0,12	5,7	0,7
18	Пещанница / Peschanytsya	50	0,042	16,4	0,8
19	Першотравневое / Pershotravneve	94	0,073	9,6	0,6
20	Побычи / Pobychi	182	0,077	9	0,6
21	Раковщина / Rakovschina	137	0,15	4,7	0,97
22	Селезовка / Selezovka	200	0,076	9,1	0,7
23	Средняя Рудня / Serednya Rudnya	283	0,11	6,5	0,9
24	Сырница / Syrnytsa	155	0,071	9,7	0,7
25	Слобода / Sloboda	80	0,074	9,4	0,8
26	Словечное / Slovechne	36	0,042	16,3	0,6
27	Чабан / Chaban	119	0,053	13	0,5

НП-специфические “молочные” функции $c_j^{milk}(t)$

Параметры НП-специфических “молочных” функций временной динамики концентрации ¹³⁷Cs в молоке $c_j^{milk}(t)$ по результатам мониторинга концентрации ¹³⁷Cs в молоке в период 1987–2011 гг. оценены для НП субъектов ГРУ Рокитновского, Овручского и Иванковского районов, где объем СИЧ-мониторинга был недостаточным. Функция $c_j^{milk}(t)$ аппроксимировалась следующей математической формой:

$$c_j^{milk}(t) = a_j^{milk} \cdot (b_j \cdot \exp(-\lambda_{j1}^{milk} \cdot t) + (1 - b_j) \exp(-\lambda_{j2}^{milk} \cdot t)) \quad (7)$$

где a_j^{milk} , b_j , λ_{j1}^{milk} и λ_{j2}^{milk} – оцениваемые параметры.

НП-специфичные функции $c_j^{milk}(t)$ были установлены для 17 НП Рокитновского района, 75 НП Овручского района и 27 НП Иванковского района.

На рисунке 4 в качестве примеров визуализированы значения $c_j^{milk}(t)$ для ряда НП проживания субъектов ГРУ Рокитновского, Овручского и Иванковского районов.

Settlement-specific “milk” functions $c_j^{milk}(t)$

For the residents of SRU settlements of Rokytne, Ovruch and Ivankiv rayons for which the amount of WBC monitoring of ¹³⁷Cs content in milk was insufficient, the settlement-specific function $c_j^{milk}(t)$ was developed based of the results of milk measurements in 1987–2011. The function $c_j^{milk}(t)$ can be expressed as a two-exponential function:

where a_j^{milk} , b_j , λ_{j1}^{milk} and λ_{j2}^{milk} are estimated parameters.

Settlement-specific functions $c_j^{milk}(t)$ were established for 17 settlements of Rokytne raion, 75 ones of Ovruch raion, and 27 ones of Ivankiv raion.

Figure 4 shows examples of the empirical annual values of ¹³⁷Cs concentration in milk and fitted curves $c_j^{milk}(t)$ for some SRU settlements in Rokytne, Ovruch, and Ivankiv raions.

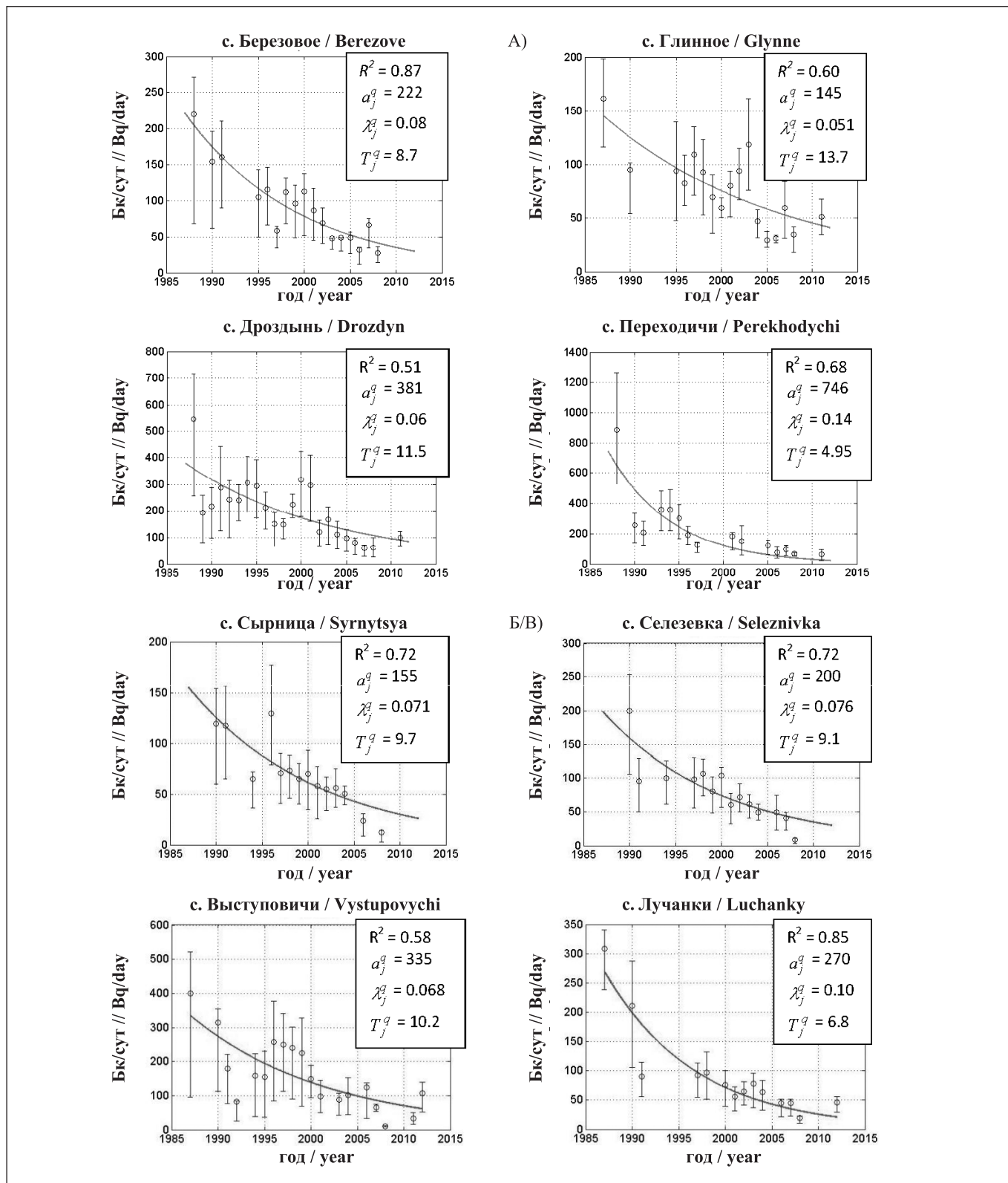


Рисунок 3. Примеры эмпирических среднегодовых значений поступления ^{137}Cs с рационом (o) и установленных модельных (сплошная кривая) НП-специфических функций поступления $q_j^{ad}(t)$ для взрослых субъектов ГРУ Рокитновского (А) и Овручского (Б) районов; $a_j^q(\text{Бк/сут})$, $\lambda_j^q(1/\text{год})$ – параметры функции $q_j^{ad}(t)$, $T_j^q = \frac{\ln 2}{\lambda_j^q}$ (годы)

Figure 3. Examples of empirical annual values of ^{137}Cs intake with the diet (o) and the fitted curves (solid curve) of SRU settlements of Rokytno raion (A) and Ovruch raion (B); $a_j^q(\text{Bq/day})$, $\lambda_j^q(1/\text{year})$ are estimated parameters, $T_j^q = \frac{\ln 2}{\lambda_j^q}$ (years)

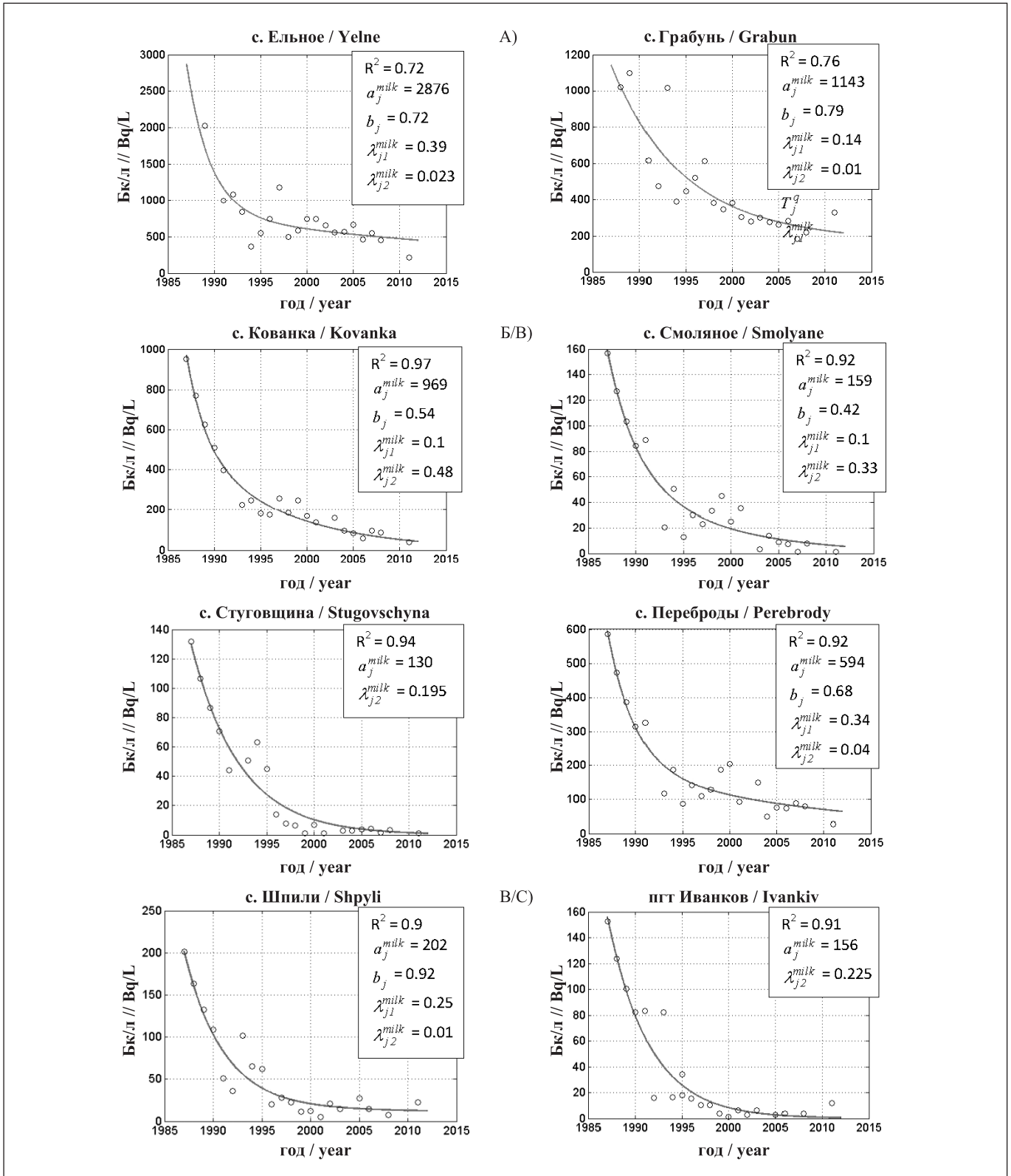


Рисунок 4. Примеры эмпирических значений среднегодовой концентрации ^{137}Cs в молоке (o) и модельная “молочная” функция (сплошная кривая) для НП проживания субъектов ГРУ Рокитновского (А), Овручского (Б) и Иванковского (В) районов; a_j^{milk} , b_j , λ_{j1}^{milk} и λ_{j2}^{milk} – параметры “молочной” функции $c_j^{milk}(t)$

Figure 4. Examples of empirical values of annual concentration of ^{137}Cs in milk (o) and fitted curves of “milk” function (solid curve) for SRU settlements of Rokytno (A), Ovruch (B) and Ivankiv (C) raions; a_j^{milk} , b_j , λ_{j1}^{milk} and λ_{j2}^{milk} are the estimated parameters of $c_j^{milk}(t)$

Специальная процедура восстановления $c_j^{milk}(t)$ для НП “без молочного мониторинга”

Для 9 НП проживания субъектов Овручского района частота молочного мониторинга (табл. 2) не позволяет установить НП-специфические функции $c_j^{milk}(t)$. Параметры функций $c_j^{milk}(t)$ для этих НП устанавливались с учетом результатов молочного мониторинга, проводимого в НП, расположенных в непосредственной близости (2–8 км) от рассматриваемого НП проживания субъектов ГРУ.

На карте-схеме рисунка 5 визуализировано расположение указанных 9 НП, а также расположение других НП, где молочный мониторинг проводился более интенсивно.

Special procedure for reconstruction of $c_j^{milk}(t)$ for SRU settlement “without milk monitoring”

The amount of milk monitoring (Table 2) did not allow to establish the settlement-specific functions $c_j^{milk}(t)$ for 9 SRU settlements of Ovruch raion. The parameters of $c_j^{milk}(t)$ for these settlements were assigned based on the results of milk monitoring performed in settlements, located in close proximity (2–8 km) from the SRU settlements.

The spatial location of these 9 settlements and the settlements with more intensive milk monitoring are shown at the map in Figure 5.

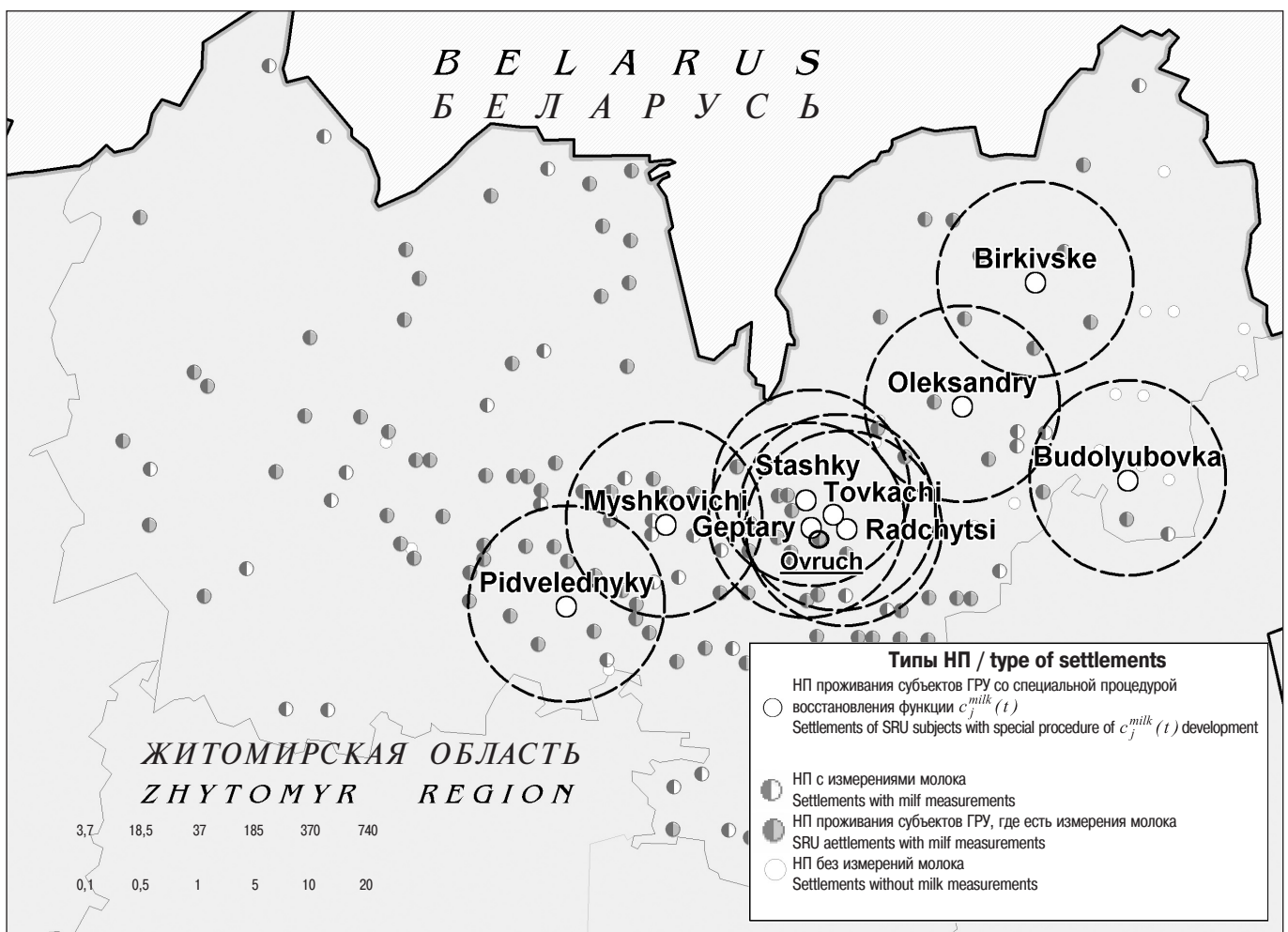


Рисунок 5. Географическое расположение НП, используемых в специальной процедуре восстановления функции $c_j^{milk}(t)$ для НП Овручского района “без молочного мониторинга”

Figure 5. Map of spatial locations of 9 SRU settlements of Ovruch raion with special procedure of $c_j^{milk}(t)$ renewal and locations of the nearest settlements with sufficient milk monitoring

Абсолютный районный молочный эквивалент рациона $ARME_r$

Численное значение абсолютного районного “молочного” эквивалента рациона для взрослых жителей района r в том или ином году T ($ARME_r^T$) опре-

Absolute raion milk equivalent of ration $ARME_r$

The value of raion absolute milk equivalent of diet for adult inhabitants of raion r in year T ($ARME_r^T$) is defined as average (weighted by the number of

деляется как среднее (взвешенное по количеству СИЧ-измерений) значение молочных эквивалентов рациона для взрослых ($\bar{w}_{milk,j}^{T,ad}$), рассчитанных для отдельных НП этого района, так что:

$$ARME_r^T = \frac{1}{N^T} \sum \bar{w}_{milk,j}^{T,ad}, \quad (8)$$

где N^T – количество НП, для которых в T -й год рассчитан НП-специфический молочный эквивалент $\bar{w}_{milk,j}^{T,ad}$.

Расчет $\bar{w}_{milk,j}^{T,ad}$ проводился по соотношениям:

$$\bar{w}_{milk,j}^{T,ad} = \begin{cases} \frac{1}{N_{ad,j}^{WBC,T}} \cdot \sum_i \frac{(Q_{i,j}^{ad,T} \cdot \lambda_{ad}^{Cs})}{\bar{c}_{milk,j}^T} & \text{при наличии измерений } ^{137}\text{Cs в молоке за год } T \\ & \text{if } ^{137}\text{Cs measurements in milk in year } T \text{ are available} \\ \frac{1}{N_{ad,j}^{WBC,T}} \cdot \sum_i \frac{(Q_{i,j}^{ad,T} \cdot \lambda_{ad}^{Cs})}{c_j^{milk}(t)|_{t=T}} & \text{при отсутствии измерений в молоке за год } T \\ & \text{if measurements in milk in year } T \text{ are unavailable} \end{cases} \quad (9)$$

где $Q_{i,j}^{ad,T}$ – содержание ^{137}Cs в организме i -го взрослого жителя j -го НП, $\bar{c}_{milk,j}^T$ – среднее значение концентрации ^{137}Cs в коровьем молоке j -го НП в T -й год.

При расчете $ARME_r^T$ принимаются во внимание данные мониторинга всех НП рассматриваемого района, независимо от того, были ли в этих НП субъекты ГРУ. В таблице 4 приведены статистические характеристики параметра $ARME_r^T$, оцененные для жителей НП Рокитновского, Овручского и Иванковського районов для периода 1987–2012 гг.

На рис. 6 визуализированы данные таблицы 4. Представленные данные свидетельствуют о том, что для рассматриваемых районов не наблюдается заметной временной динамики значений $ARME_r^T$. Поэтому для этих районов принимается единое для периода 1987–2012 гг. значение $ARME_r$, которое составляет: для Рокитновского района 0,37 л/сут, для Овручского района – 0,70 л/сут, для Иванковського района – 0,95 л/сут.

Относительное районно-специфическое поступление радиоцезия с рационом RRI_a^r

Для расчета районно-специфического возраст-зависимого поступления – RRI_a^r использовались значения относительного возраст-зависимого поступления радиоцезия с рационом, рассчитанные для отдельных НП ($f_{a,j}^{Cs,T}$), в которых в T -м году СИЧ-измерения выполнялись одновременно у взрослых и хотя бы в одной детско-подростковой возрастной группе (a), так что:

$$f_{a,j}^{Cs,T} = \frac{\bar{q}_{a,j}^T}{\bar{q}_{ad,j}^T} = \frac{\lambda_a^{Cs} \cdot \bar{Q}_j^{a,T}}{\lambda_{ad}^{Cs} \cdot \bar{Q}_j^{ad,T}} \quad (10)$$

WBC measurements) value of settlement-specific milk equivalents of adult food ration ($\bar{w}_{milk,j}^{T,ad}$), calculated for different settlements j of the raion, so

where N^T is the number of settlements j , for which the value of $\bar{w}_{milk,j}^{T,ad}$ in year T can be calculated.

Values of $\bar{w}_{milk,j}^{T,ad}$ are calculated as follows:

where $Q_{i,j}^{ad,T}$ is the ^{137}Cs body burden for adult resident i of settlement j ; $\bar{c}_{milk,j}^T$ is annual concentration of ^{137}Cs in cow's milk in settlement j in year T .

The monitoring results for all settlements of the raion are used to calculate $ARME_r^T$ regardless of residing of SRU subjects in these settlements. The statistical characteristics of $ARME_r^T$ estimated for the settlements of Rokytno, Ovruch and Ivankiv raion for the years of the period of 1987–2012 are given in Table 4.

The results of Table 4 and accepted value of $ARME_r^T$ are visualized in Fig.6. The results of Table 4 indicate that for the raions under consideration there is no significant temporal variation of values $ARME_r^T$. Therefore, for further dose calculations for each of these raions an unified $ARME_r$ value was established for period of 1987–2011 years, which are 0.37 L/day for Rokytno raion, 0.70 L/day for Ovruch raion, and 0.95 L/day for Ivankiv raion.

Raion-specific relative intake of radiocesium RRI_a^r

To calculate the raion-specific intake RRI_a^r the values of relative age-dependent intake of radiocesium with diet calculated for different settlements j ($f_{a,j}^{Cs,T}$) were used. The values $f_{a,j}^{Cs,T}$ were calculated for settlements j where WBC measurements were performed simultaneously for adults and at least for one child age group (a) in year T , and so:

Таблица 4

Численные значения среднегодовых абсолютных молочных эквивалентов рациона $ARME_r^T$, оцененные для жителей НП Рокитновского, Иванковського и Овручского районов в период 1987–2012 гг; AM – арифметическое среднее; SD – стандартная ошибка

Table 4

Calculated values of mean annual absolute milk equivalents of diet, $ARME_r^T$, for settlements of Rokytno, Ovruch and Ivankiv raion in the period of 1987–2012 (SD is standard deviation)

Год / year	$ARME_r^T$, л/сут // L/day					
	Овручский / Ovruch raion		Иванковский / Ivankiv raion		Рокитновский / Rokytno raion	
	AM / Mean	SD	AM / Mean	SD	AM / Mean	SD
1991	0,27	0,27	0,34	0,14	0,48	0,50
1992	0,47	0,46	0,51	0,56	0,25	0,17
1993	0,68	0,85	0,21	0,27	0,42	0,34
1994	0,38	0,48			0,61	0,38
1995	0,64	0,90	1,16	0,67	0,55	0,36
1996	0,63	1,05	0,75	0,72	0,45	0,41
1997	0,87	1,18	1,00	0,97	0,32	0,25
1998	0,72	1,15	0,80	0,91	0,38	0,30
1999	0,84	1,43	0,74	0,83	0,25	0,25
2000	0,61	1,17	1,20	0,53	0,29	0,26
2001	0,75	1,20	1,07	0,68	0,31	0,27
2002	0,58	0,56			0,31	0,23
2003	0,68	0,85			0,26	0,22
2004	0,81	1,62			0,27	0,20
2005	0,51	0,99			0,23	0,21
2006	0,74	1,10			0,25	0,27
2007	0,85	0,91			0,48	1,02
2008	0,41	0,64			0,28	0,28
2011	0,36	0,42	0,47	0,49	0,51	0,62
2012	0,52	0,60				
Все годы (years 1991–2012)	0,70	1,08	0,95	0,86	0,37	0,37

где λ_a^{Cs} , λ_{ad}^{Cs} – константы полувыведения цезия с организма детей возраста a и взрослых соответственно (1/сут);

$\bar{Q}_j^{a,T}$ и $\bar{Q}_j^{ad,T}$ – средние значения содержания ^{137}Cs в организме, зарегистрированные СИЧ-измерениями в T -й год в j -м НП у детей возраста a и у взрослых соответственно (Бк);

$\bar{q}_{a,j}^T$ и $\bar{q}_{ad,j}^T$ – средние значения поступления ^{137}Cs в организм в T -й год в j -м НП у детей возраста a и у взрослых соответственно (Бк/сут).

Значение $f_{a,j}^{Cs,T}$ рассчитывалось для четырех возрастных групп детей: ≤ 2 , 3–7, 8–12, 13–17 лет. При этом рассматривались лишь те измерения активности ^{137}Cs в организме жителей, выполненные на СИЧ-установках, которые хотя бы на 30 % превышали минимально-детектируемую активность (МДА).

Анализ рассчитанных НП-специфических значений $f_{a,j}^{Cs,T}$, а также усредненных по всем НП значений этого параметра для отдельных T -х годов, показал возможность для каждой возрастной группы a в рамках одного района установить единое для всего периода 1987–2012 гг. и для всех НП района значение RRI_a^r в

where λ_a^{Cs} , λ_{ad}^{Cs} are the biological elimination rate of ^{137}Cs from the body of children of age a and adults, respectively (day^{-1});

$\bar{Q}_j^{a,T}$ and $\bar{Q}_j^{ad,T}$ are mean values of the ^{137}Cs body burden measured in year T in settlement j for children of age a and adults, respectively (Bq);

$\bar{q}_{a,j}^T$ and $\bar{q}_{ad,j}^T$ are mean values of ^{137}Cs intake with diet in year T in settlement j for children of age a and adults, respectively ($\text{Bq} \cdot \text{day}^{-1}$).

The values $f_{a,j}^{Cs,T}$ were calculated for four age groups of children: ≤ 2 , 3–7, 8–12, 13–17 years. The values were calculated only for the settlements where the results of ^{137}Cs body burden WBC measurements were at least 30% higher than the minimal detectable activity (MDA).

The statistical analysis of $f_{a,j}^{Cs,T}$ values, as well as analysis of $f_{a,j}^{Cs,T}$ values, averaged for different years T , demonstrate the possibility to establish the single value RRI_a^r for each age group a for the entire period of 1987–2012 and for all settlements of raion, and so $RRI_a^r = AM\{f_{a,j}^{Cs,T}\}$, where

каждой возрастной группе, так что $RRI'_a = AM\{f_{a,j}^{Cs,T}\}$, где AM – среднее арифметическое значение модельных оценок $f_{a,j}^{Cs,T}$ (таблица 5), AM is mean value of model estimates $f_{a,j}^{Cs,T}$ (see Table 5).

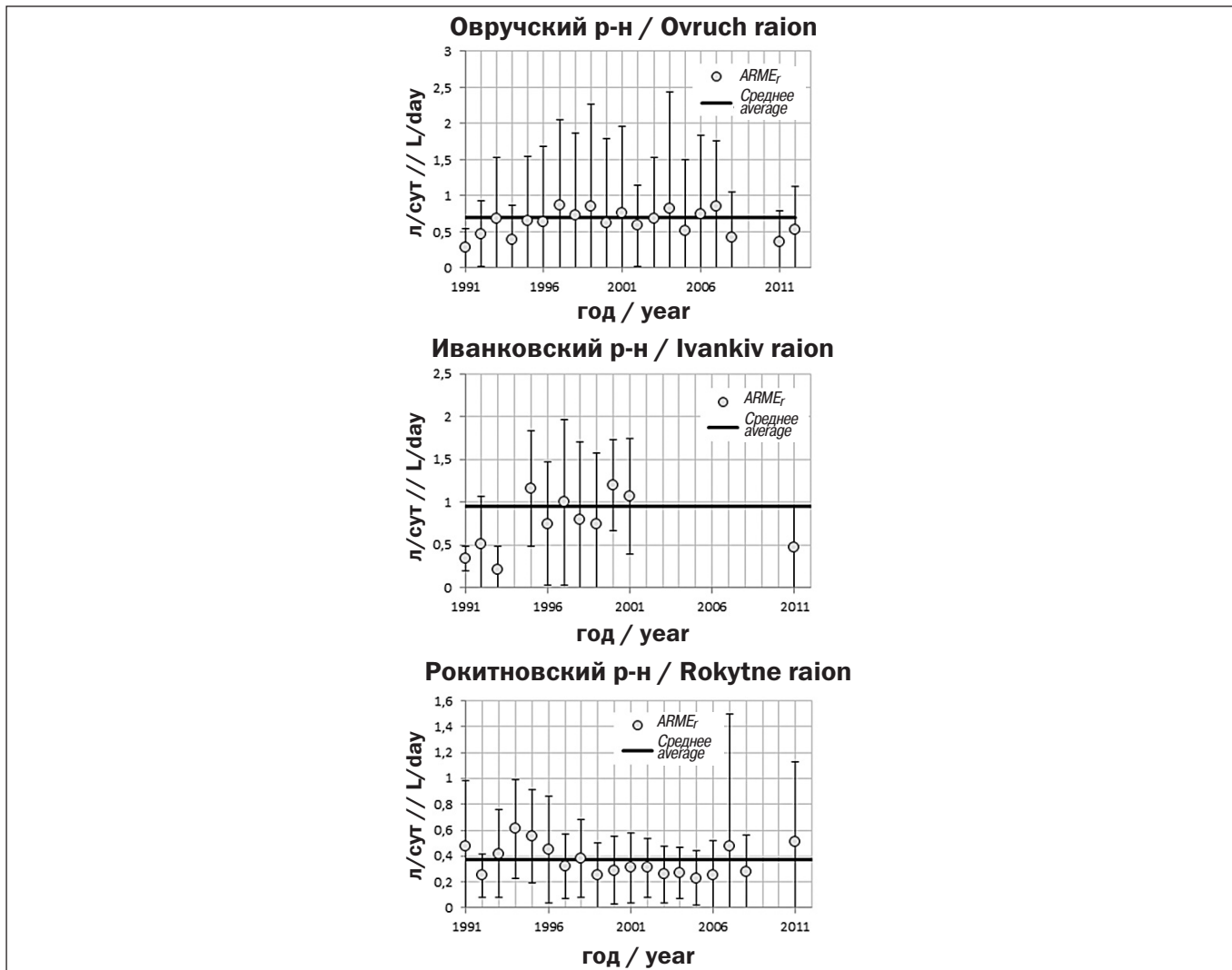


Рисунок 6. Среднегодовые численные значения молочных эквивалентов $ARME_r^T$ для взрослых жителей Овручского, Иванковского и Рокитновского районов. Сплошная линия – принятое модельное значение $ARME_r^T$
Figure 6. Annual milk equivalent $ARME_r^T$ for adult residents of Ovruch, Ivankiv, and Rokytne raion. Solid line is acceptable value of $ARME_r^T$

Таблица 5

Численные значения относительного возраст-зависимого поступления радиоцезия с рационом (RRI'_a) для разных возрастных групп детей Рокитновского, Овручского и Иванковского районов

Table 5

Calculated values of the relative intake of radiocesium with diet (RRI'_a) for different age groups of children in Rokytne, Ovruch, and Ivankiv raions

Возрастная группа a , (лет) Age group a , (years)	Рокитновский / Rokytne raion		Овручский / Ovruch raion		Иванковский / Ivankiv raion	
	RRI'_a					
	AM / Mean	SD	AM / Mean	SD	AM / Mean	SD
≤ 2	2,8	2,9	1,2	0,69	2,1	1,35
3–7	0,96	0,85	0,92	0,60	1,6	1,15
8–12	0,80	0,32	0,99	0,64	1,05	0,65
13–17	0,84	0,24	0,94	0,52	0,91	0,54
≥ 18	1,0	–	1,0	–	1,0	–

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описанные выше модели реконструкции были использованы для установления индивидуализированных доз облучения субъектов ГРУ Рокитновского, Овручского и Иванковского районов. При реконструкции доз учитывалось время (год) постановки того или иного субъекта на учет ГРУ, возможные его перемещения по НП района, а также длительность пребывания субъекта на учете в ГРУ#.

В таблице 6 указано общее количество субъектов каждого района, находящихся на учете в ГРУ, а также число субъектов, для которых удалось индивидуализировать дозы облучения. Возможность индивидуализации доз того или иного субъекта определяется достоверностью данных о его возрасте и месте жительства, а также частотой и количеством диспансеризаций за время наблюдения в ГРУ.

Таблица 6

Общее число субъектов, находящихся на учете в ГРУ в трех рассматриваемых районах и число субъектов, для которых индивидуализированы дозы облучения

Table 6

The total numbers of persons that are registered in SRU and living in the three considered raions, for whom the exposure doses were individualized

Район, область Raion, oblast	Количество субъектов ГРУ / number of SRU subjects		
	все субъекты ГРУ all SRU subjects	с индивидуализированными дозами which have individualized doses	
		количество / number	%
Овручский р-н, Житомирская обл. Ovruch raion, Zhytomyr oblast	63 871	41 585	65
Иванковский р-н, Киевская обл. Ivankiv raion, Kyiv oblast	37 308	18 790	50
Рокитновский р-н, Ровенская обл. Rokytne raion, Rivne oblast	52 805	28 711	54

В таблице 7 приведены средние значения индивидуализированных доз субъектов ГРУ каждого района в период 1986-2012 гг. В таблице указаны значения как годовой дозы внутреннего облучения, так и суммарной (в результате внутреннего и внешнего облучения) дозы облучения в этот период##.

В таблице 8 приведены относительные (в %) распределения реконструированных индивидуализированных доз субъектов ГРУ рассматриваемых районов по интервалам доз, накопленных за период наблюдения субъектов в ГРУ.

RESULTS AND DISCUSSION

Reconstruction models described above were used to calculate the individualized doses of the SRU subjects from Rokytne, Ovruch, and Ivankiv raions. At the reconstruction of doses the registration time (year) of person in SRU, his/her possible moving among the settlements of raion, as well as the length of SRU observation was taken into consideration#.

Table 6 shows the total number of persons from each raion, that are registered in SRU, as well as the number of subjects for whom individualized doses have not been done. The possibility of doses individualization of a subject is determined by veracity of data on his/her age and location of residence, as well as the frequency and number of medical examinations taken during the observation period in the SRU.

Table 7 shows the average value of individualized doses of SRU subjects from each raion during the period of 1986-2012. The table contains the values of both the annual internal dose, and total (as a result of internal and external exposure) dose during this period##.

Table 8 shows the relative (in %) distributions of reconstructed individualized doses of SRU subjects over the intervals of doses, accumulated during the observation period of SRU subjects from the raions under study.

Субъект может быть снят с учета в ГРУ по причине его переезда в другой район (область) или по причине его смерти

Описание моделей и расчетных процедур оценки доз внешнего облучения представлено в [1-3] и основано на [4, 5]

The subject can be removed from the SRU record because of he/her relocation to another raion (oblast), or because of his/her death

Description of the models and calculated procedures for external dose estimates is presented in [1-3] and is based on [4, 5]

Таблица 7

Среднегодовые индивидуализированные дозы внутреннего и суммарного (внутреннее и внешнее) облучения, реконструированные для субъектов ГРУ Овручского, Иванковского и Рокитновского районов для периода 1986–2012 гг.

Table 7

Average individualized internal and total (internal and external) exposure doses reconstructed for SRU subjects from Ovruch, Ivankiv and Rokytne raions in the period of 1986–2012

Год / year	Овручский / Ovruch raion		Иванковский / Ivankiv raion		Рокитновский / Rokytne raion	
	Средняя индивидуализированная доза, мЗв/год // average individualized dose, mSv/year					
	внутреннее облуч. internal exposure	суммарное облуч. total exposure	внутреннее облуч. internal exposure	суммарное облуч. total exposure	внутреннее облуч. internal exposure	суммарное облуч. total exposure
1986	2,37	6,24	1,52	4,58	1,51	4,28
1987	1,82	2,99	0,82	1,75	1,77	2,61
1988	1,37	2,13	0,59	1,21	1,44	2,01
1989	1,04	1,61	0,44	0,91	1,04	1,47
1990	0,81	1,27	0,33	0,71	0,80	1,14
1991	0,63	1,02	0,26	0,58	0,85	1,14
1992	0,52	0,86	0,20	0,49	0,71	0,96
1993	0,43	0,74	0,09	0,34	0,65	0,88
1994	0,26	0,54	0,13	0,35	0,62	0,83
1995	0,31	0,57	0,10	0,32	0,62	0,81
1996	0,25	0,50	0,06	0,27	0,45	0,64
1997	0,16	0,39	0,06	0,26	0,46	0,63
1998	0,17	0,39	0,05	0,23	0,40	0,57
1999	0,20	0,40	0,08	0,26	0,31	0,46
2000	0,13	0,31	0,05	0,22	0,36	0,49
2001	0,12	0,29	0,07	0,23	0,35	0,46
2002	0,10	0,27	0,03	0,19	0,31	0,42
2003	0,08	0,25	0,03	0,18	0,26	0,37
2004	0,08	0,24	0,02	0,17	0,22	0,33
2005	0,08	0,24	0,02	0,17	0,20	0,31
2006	0,06	0,21	0,05	0,19	0,20	0,29
2007	0,08	0,22	–	–	0,20	0,29
2008	0,06	0,20	–	–	0,17	0,26
2009	0,07	0,20	–	–	0,18	0,26
2010	0,06	0,18	–	–	0,17	0,25
2011	0,06	0,17	–	–	0,15	0,23
2012	0,05	0,16	–	–	–	–

Таблица 8

Относительное (в %) распределение субъектов ГРУ Овручского, Иванковского и Рокитновского районов по интервалам доз внутреннего и суммарного облучения, накопленных за время наблюдения в ГРУ в период 1986–2013 гг.

Table 8

Relative (%) distribution of SRU subjects from Ovruch, Ivankiv and Rokytne raions over the intervals of internal and total exposure doses accumulated during the observation period in SRU in 1986–2012

Накопленная доза, мЗв Accumulated dose, mSv	Овручский / Ovruch raion		Иванковский / Ivankiv raion		Рокитновский / Rokytne raion	
	внутренняя internal	суммарная total	внутренняя internal	суммарная total	внутренняя internal	суммарная total
	Количество субъектов (% от когорты) // number of subjects (% from all subjects)					
<1	–	–	0,06	–	<0,01	–
1 – 2	0,12	–	6,1	–	1,6	0,10
2 – 5	26	0,22	39	3,0	8,3	5,5
5 – 10	39	11	55	22	41	9,5
10 – 20	23	47	0,04	75	38	49
20 – 50	12	39	–	0,47	12	33
> 50	< 0,01	2,7	–	–	0,05	2,3

ВЫВОДЫ

В работе приведено детальное описание эколого-дозиметрических моделей, разработанных с целью индивидуализации доз внутреннего облучения субъектов ГРУ, проживающих в Рокитновском районе Ровенской области, Овручском районе Житомирской области, Иванковском районе Киевской области. Разработанные модели носят выраженный НП-специфический характер и полностью основаны на обобщении результатов радиоэкологического (измерения концентрации радиоцезия в молоке) и дозиметрического (СИЧ-измерения содержания радиоцезия в организме жителей) мониторингов.

Для каждого НП проживания субъектов ГРУ этих районов устанавливалась:

- либо НП-специфическая функция поступления радиоцезия с рационом жителей этого НП, параметризованная по результатам СИЧ-мониторинга, проводимого в НП в 1987–2013 гг., $q_j^{ad}(t)$,
- либо НП-специфическая функция временной динамики концентрации радиоцезия в местном коровьем молоке, параметризованная по результатам молочного мониторинга, проводимого в НП в 1987–2013 гг., $c_j^{milk}(t)$.

На основании совместной обработки результатов молочного и СИЧ-мониторингов для каждого района устанавливался так называемый районно-специфический молочный эквивалент рациона ($ARME_r$). Возрастные особенности питания и, соответственно, дозы облучения для различных детских групп устанавливались путем введения параметра относительного возраст-зависимого поступления (RRI_a^r), значения которого устанавливались отдельно для каждого из рассматриваемых районов на основании обработки результатов СИЧ-мониторинга в разных детских группах и у взрослых. НП-специфические функции поступления $q_j^{ad}(t)$ параметризованы для 27 НП Овручского района и 21 НП Рокитновского района. Для 27 НП Иванковского района, 84 НП Овручского района и 17 НП Рокитновского района параметризованы НП-специфические “молочные” функции $c_j^{milk}(t)$.

Разработанные модели реконструкции позволили восстановить индивидуализированные дозы внутреннего облучения для:

- 41 585 субъектов Овручского района (65 % от всех субъектов ГРУ в этом районе);
- 18 790 субъектов Иванковского района (50 % всех субъектов ГРУ в этом районе);
- 28 711 субъектов Рокитновского района (54 % всех субъектов ГРУ в этом районе).

CONCLUSIONS

This paper contains a detailed description of ecological-dosimetric models elaborated with the purpose of internal doses individualization of the SRU subjects residing in Rokytne raion of Rivne oblast, Ovruch raion Zhytomyr oblast, and Ivankiv raion of Kyiv oblast. The developed models are settlement-specific and fully based on the generalization of the results of radioecological (measuring the concentration of radioactive cesium in milk) and dosimetric (WBC measurements of radiocesium in the body of inhabitants) monitoring.

For each SRU settlement in these raions, one of settlement-specific functions was calculated:

- either the function $q_j^{ad}(t)$ of radiocesium intake with diet which have been parameterized according to the results of WBC monitoring that took place in this settlement in 1987–2013,
- or the function $c_j^{milk}(t)$ of temporary dynamic of radiocesium concentration in cow's milk which was parameterized according to the results of milk monitoring that was conducted in this settlement in 1987–2013.

On the basis of joint processing of the results of milk and WBC monitoring for each raion, a raion-specific absolute raion milk equivalent of the ration ($ARME_r$) was determined. Age features of diet and, consequently, the exposure doses for different children groups were determined using the parameter of relative age intake of radiocesium with the ration (RRI_a^r). Its values are determined separately for each considered raion on the basis of processing the results of WBC monitoring in different groups of children and adults. Settlement specific intake functions $q_j^{ad}(t)$ were parameterized for 27 settlements from Ovruch raion and 21 settlements from Rokytne raion. For 27 settlements from Ivankiv raion, 84 settlements from Ovruch raion and 17 settlements from Rokytne $c_j^{milk}(t)$ raion, the settlement specific “milk” functions were parameterized.

The developed models of reconstruction allowed to restore individualized internal radiation doses for:

- 41585 subjects of Ovruch raion (65% of the SRU subjects in the raion);
- 18790 subjects of Ivankiv raion (50% of the SRU subjects in the raion);
- 28711 subjects of Rokytne raion (54% of the SRU subjects in the raion).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реконструкція індивідуалізованих доз опромінення суб'єктів Державного реєстру України (ДРУ) осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської аварії і проживають на радіоактивно-забруднених територіях (Іванківський район Київської області та Овруцький район Житомирської області) : методичні рекомендації / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, Г. В. Федосенко [та ін.] ; МОЗ України, НАМН України, ДУ "УЦІТ та НР МОЗ України", ДУ "НЦРМ АМН України", ІРЗ АТН України. – К. : [б. в.], 2010. – 37 с.
2. Реконструкція індивідуалізованих доз опромінення суб'єктів Державного реєстру України осіб (ДРУ) Рокитнівського району Рівненської області та Козелецького і Ріпкинського районів в Чернігівській області, які постраждали внаслідок Чорнобильської аварії і проживають на радіоактивно-забруднених територіях : методичні рекомендації / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, Г. В. Федосенко [та ін.] ; МОЗ України, НАМН України, ДУ "УЦІТ та НР МОЗ України", ДУ "НЦРМ АМН України", ІРЗ АТН України. – К. : [б. в.], 2012. – 66 с.
3. Реконструкція та прогноз доз опромінення населення, яке мешкає на територіях України, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС (Методика-97) : інструктивно-методичні вказівки / ред. І. А. Ліхтарьов. – К. : [б. в.], 1998. – 76 с.
4. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine / I. Likhariov, L. Kovgan, D. Novak [et al.] // Health Physics. – 1996. – Vol. 70, No. 1. – P. 87-98.
5. Chernobyl Accident: Retrospective and Prospective Estimates of External Dose of the Population of Ukraine / I. Likharev, L. Kovgan, P. Jacob, L. R. Anspaugh // Health Physics. – 2002. – Vol. 82, No. 3. – P. 290–303.

REFERENCES

1. Lihtarov IA, Kovgan LM, Fedosenko GV, et al.; Ministry of Health of Ukraine, NAMS of Ukraine, State Institution "USIT HP and the Ministry of Health of Ukraine," State Institution "NRCRM, NAMS of Ukraine", Ukrainian RPI ATS. [Reconstruction of individualized doses for subjects of State Register of Ukraine (SRU) persons affected by the Chernobyl accident and living in radiation-contaminated areas (Ivankov raion of Kyiv oblast and Ovruch raion of Zhitomir oblast): methodical guidelines]. Kyiv: [s. n.]; 2010. 37 p. Ukrainian.
2. Lihtarov IA, Kovgan LM, Fedosenko GV, et al.; Ministry of Health of Ukraine, NAMS of Ukraine, State Institution "USIT HP and the Ministry of Health of Ukraine," State Institution "NRCRM, NAMS of Ukraine", Ukrainian RPI ATS. [Reconstruction of individualized doses for subjects of State Register of Ukraine (SRU) from Rokytne raion of Rivne oblast and Kozeletskyi and Ripky raions of Chernihiv oblast affected by the Chernobyl accident and living on the radioactively contaminated areas: methodical guidelines]. Kyiv: [s. n.]; 2012. 66 p. Ukrainian.
3. Likharev IA, editor. [Reconstruction and prognosis of exposure doses for population who are living in Ukrainian territories radioactively contaminated due to Chernobyl accident (Methodic 97): instructions and guidelines]. Kyiv: [s. n.]; 1998. 76 p. Ukrainian.
4. Likhariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. Health Phys. 1996 Jan;70(1):87-98.
5. Likharev IA, Kovgan LN, Jacob P, Anspaugh LR. Chernobyl accident: retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine. Health Phys. 2002 Mar;82(3):290-303.

Стаття надійшла до редакції 17.06.2014

Received: 17.06.2014