



ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ/LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.5>

EDN: RLXVUX

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРЕННОГО ОСВОЕНИЯ РАДИОАКТИВНО ЗАРАЖЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Научная статья

Василенков С.В.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0009-2027-394X;¹Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vasilenkov_sergey[at]mail.ru)

Аннотация

Цель исследования — показать возможность ускоренного (до 10 лет) и экономически эффективного возвращения в эксплуатацию радиоактивно загрязненных земель в рамках социальных программ и развития частных сельскохозяйственных производств с минимально возможным риском для здоровья и жизни населения, пребывающих и работающих на подобных территориях людей, а также для качества получаемой растениеводческой и животноводческой продукции. Решена задача в необходимости удобных расчетов предотвращенной среднегодовой дозы облучения, приближенных к реальным условиям пребывания населения на радиоактивно зараженных территориях (по данным наблюдений 40–50 кБк/м² в год). Установлена возможная потребительская стоимость этой дозы в расчетных сметах при строительстве, эксплуатации территорий, где предварительно выполняются обязательные инженерно-защитные мероприятия, и учитывается влияние природных процессов самоочищения (в зависимости от страны региона 1 мЗв/год это 12000–75000 долларов США). Актуальность этой задачи подтверждается не только заботой о здоровье, но и федеральным законодательством, которое регламентирует предельно допустимую дозу облучения величиной 1 мЗв/год, не допускающей ощутимого ущерба экономике и социальной сфере из-за возрастающего числа онкологических заболеваний, сокращения продолжительности жизни, снижении интереса к развитию инфраструктуры этих регионов. Повышение потребительской стоимости радиоактивно зараженных территорий сокращает сроки окупаемости строительства инженерно-защитных мероприятий (в нашем примере 8,8 года), создает условия для повышения интереса к созданию экологической защиты, сохранению и развитию экономики таких территорий и социальной сознательности в обществе.

Ключевые слова: внешнее и внутреннее радиоактивное облучение, предотвращенная экспозиционная доза, коэффициент перехода, природный процесс самоочищения, инженерно-защитные мероприятия.

ECONOMIC EFFICIENCY OF ACCELERATED DEVELOPMENT OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED LANDS

Research article

Vasilenkov S.V.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0009-2027-394X;¹ Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russian Federation

* Corresponding author (vasilenkov_sergey[at]mail.ru)

Abstract

The purpose of the study is to show the possibility of an accelerated (up to 10 years) and cost-effective return to operation of radioactively contaminated lands within the framework of social programs and the development of private agricultural production with minimal possible risk to the health and life of the population living and working in such territories, as well as to the quality of crop and livestock products. The problem of the need for convenient calculations of the averaged average annual radiation dose (based on observations of 40–50 Bq/m² per year), which are close to the real conditions of the population in radioactively contaminated territories, has been solved. The possible consumer cost of this dose has been established in the estimated cost sheets for the construction and operation of territories where mandatory engineering and protective measures are carried out in advance, and the influence of natural self-purification processes is taken into account (depending on the country or region, 1 mSv is equivalent to between US\$12,000 and US\$75,000). The urgency of this task is confirmed not only by concern for health, but also by federal legislation, which regulates the maximum allowable radiation dose of 1 mSv/year, which prevents significant damage to the economy and social sphere due to the increasing number of oncological diseases, reduced life expectancy, and reduced interest in the development of infrastructure in these regions. Increasing the consumer value of radioactively contaminated territories reduces the payback period for the construction of engineering and protective measures (in our example, 8.8 years), creates conditions for increasing interest in creating environmental protection, preserving and developing the economy of such territories and social awareness in society.

Keywords: external and internal radiation exposure, prevented exposure dose, transition coefficient, natural self-purification process, engineering-protective measures.



Введение

В 1986 году авария на Чернобыльской атомной электростанции была причиной выброса в окружающую среду разных радиоактивных элементов, особенно цезия-137, который вызвал заражение обширных территорий России, Украины, Белоруссии, части многих Европейских стран, что привело к тяжелым последствиям в сферах здоровья, социального комфорта и экономического развития регионов. Полученные смертельно опасные дозы облучения в первые годы после аварии спровоцировали гибель людей и развитие тяжёлых, практически неизлечимых заболеваний в последующие годы после аварии, особенно у тех, кто принимал участие в ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. Массовые переселения привели к прекращению существования многих населенных пунктов и целых жилых районов, были заброшены частные дома, животноводческие фермы, промышленные предприятия, сокращены сельскохозяйственные угодья. Несмотря на это, жизнь на этих территориях не закончилась, жители, как в крупных городах, так и в малых населенных пунктах, остались, не имея возможности или не захотев уехать, несмотря на возросшую экологическую опасность в своих регионах. С течением времени произошло перераспределение радиоактивного загрязнения, выявлены миграционные особенности радионуклидов и места формирования опасного радиационного фона, наиболее загрязненные продукты питания, полученные на этих территориях, что создало особый уклад деятельности жителей, пребывающих в быту, занятых в промышленности и в сельском хозяйстве, сделало необходимым умение защищать себя от радиоактивного облучения, учиться правильно оценивать его возможности и последствия для своего здоровья. Помощь для людей, которые остались на радиоактивно загрязненных территориях и ответственность за них ложится на органы здравоохранения, законодательства, на инженерно-строительные организации и компании, волонтерские движения.

Законодательство одним из первых откликнулось на необходимость ликвидации последствий радиоактивного загрязнения, и уже в 1996 году был принят закон «О радиационной безопасности населения», который получил дополнения в 2005 и 2008 годах, где главной статьёй было необходимость сохранения жизни и здоровья населения, и ограничение величины дозы радиоактивного облучения. Согласно чему допустимая доза не должна превышать 1 мЗв/год и по возможности быть снижена до минимальных значений [1], [2].

Жители села большую часть времени суток проводят на улице, на открытой местности, не защищенные от ветра и пыли, пребывание в жилых одноэтажных домах, также слабо защищает от радиоактивного воздействия внешнего облучения, которое со временем только усугубляется. В городах из-за высотности построек, большого числа бетонных зданий и сооружений, благоустроенных газонов, дела с защитой от внешнего облучения обстоят лучше, но без специальных защитных мероприятий его негативное воздействие никуда не исчезнет. Внешнее облучение зависит от факторов времени, массы загрязненной почвы и интенсивности воздействия на объект облучения. Специальные инженерно-защитные мероприятия важны как в сельской, так и в городской местности, в одних случаях они предусматривают в местах повышенной радиоактивности локальное осушение открытыми собирателями, для ускорения поверхностного стока, в других усиленную промывку замкнутых понижений где, как правило, повышена концентрация радионуклидов. Лучше когда площадки для осушения при водоразделах имеют малый уклон, что не будет вызывать усиленной эрозии почв, а только вынос радионуклидов, промывку лучше проводить у подножия склона, где снижается уклон и происходит аккумуляция радионуклидов в замкнутых понижениях.

В настоящее время земли Брянской области, которые после Чернобыльской катастрофы подверглись сильному радиоактивному загрязнению, начинают активно возвращать в эксплуатацию, а вот мелиорацию территорий проводить не торопятся, что является недальновидным отношением и пренебрежением требований Федерального законодательства. Даже простые и известные способы мелиорации могут сильно помочь в повышении безопасности и рентабельности этих территорий.

Цель изучения — показать возможность экономически эффективного возвращения в эксплуатацию радиоактивно зараженных земель, за счет снижения рисков — ухудшения здоровья, снижения качества растениеводческой и животноводческой продукции, сокращения продолжительности жизни. Для людей оставшихся и работающих на подобных территориях задача очень актуальна и требует разработки приближенной к реальности методики расчета индивидуальной и коллективной дозы радиоактивного облучения населения. Что позволит эффективно оценивать возможность эксплуатации таких территорий при обязательном применении инженерных защитных мероприятий в фермерских хозяйствах и жилых районах, а также учете естественных природных факторов в предотвращении облучения населения.

Скорейшее достижение нормативной величины облучения 1 мЗв/год мелиоративными мероприятиями сопровождается двойным экономическим эффектом за счет предотвращенной дозы облучения и повышения объема и качества сельскохозяйственной продукции.

Методология и методика изучения

Влияние мелиоративных мероприятий и процессов самоочищения естественных нерегулируемых потоков воды были тщательно изучены нами на примере загрязненных районов Брянской области. Обследовались оросительные и осушительные системы, гидротехнические сооружения (пруды, колодцы, каналы), построенные до аварии на Чернобыльской АЭС. Некоторые из них функционируют до настоящего момента и позволяют выполнить производственную проверку рекомендуемых защитных мероприятий.

В полевых условиях проводился дозиметрический контроль радиационного фона с помощью СРП-68-01, РКСБ-104-Белвар, ДКГ-03Д-Грач и других приборов. Специальным пробоотборником на выделенных створах загрязненных водосборных участков взяты пробы почв из верхнего 10 см слоя, ила на дне прудов и каналов, растительности и дерна. Удельная активность проб определена в радиометрической лаборатории БГАУ на радиометре РУБ-01П6. Анализ показал эффективность мелиоративных мероприятий и процессов самоочищения водных потоков в снижении радиационного фона и дозовой нагрузки загрязненных территорий.

Источники поступления радиоактивного загрязнения с разных направлений в окружающей среде создают суммарное влияние на жителей населенных пунктов и любого человека, пребывающего в опасных зонах, служат причиной накопления внутреннего облучения населения:

- 1) ингаляционное поступление радиоактивной пыли;
- 2) радиоактивность в питьевой воде;
- 3) пища растительного происхождения, содержащая радионуклиды;
- 4) пища животного происхождения, в результате накопления радионуклидов и поступления их в организм человека.

Радиоактивное загрязнение почвенного слоя создает дозу внешнего γ -облучения населения, на величину которого влияют образующие его факторы.

1. На величину поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью земли влияет поверхностная активность выпавших радионуклидов, заглубление их в почву, вертикальная и горизонтальная миграция, физический распад.

2. Интенсивное воздействие человека на природу в результате производственной деятельности создает значимый антропогенный фактор.

3. Жилые и производственные здания, дорожные покрытия имеют защитные свойства.

4. Величину эффективной дозы характеризует коэффициент перехода от измеряемой мощности дозы облучения в воздухе к эффективной поглощенной дозе.

Для того чтобы определить среднегодовую эффективную дозу облучения населения (D) необходимо оценить значения внешнего облучения ($D_{\text{внеш}}$) и внутреннего ($D_{\text{вн}}$), которое могут получить жители населенного пункта, люди или животные пребывающие на радиоактивно загрязненных участках территории. Общая эффективная доза облучения определяется по формуле:

$$D = D_{\text{внеш}} + D_{\text{вн}}$$

Условия формирования эффективной среднегодовой дозы облучения у детей и взрослых при проведении тщательного дозиметрического контроля в радиоактивной зоне после Чернобыльской аварии, оказались схожими. Для разных возрастных групп в 1987–1992 годах получили эффективную среднегодовую дозу облучения не больше чем у взрослых жителей того же населенного пункта и приоритетное влияние на здоровье человека в возрастных группах не была выявлена. Предложено для оптимизации и упрощения расчетов [3] среднегодовую эффективную дозу облучения для всех жителей в населенном пункте принимать как среднюю дозу, поглощенную взрослыми жителями в течение года.

В зимний период происходит значительное снижение эффективной дозы внешнего облучения за счет экранирования радиоактивного загрязнения снежным покровом по сравнению с величиной в летний период. По рекомендациям МУ 2.6.1.-95 [4] и МУ 2.6.1.-3153-13 [5], данное снижение принимают примерно половину от максимальной величины в летний период и оценивают в пределах 0,45–0,6 для людей различных групп населения. Согласно многолетним наблюдениям в загрязненных регионах России, снежный покров устанавливается в среднем за три месяца, два месяца происходит его таяние, таким образом, около пяти месяцев происходит экранирование радиоактивного загрязнения.

Дерново-подзолистые и черноземные почвы характерны для загрязненных районов России, Белоруссии и Украины, на них по данным МУ 2.6.2.-95 в 1986–91 году зафиксированы заметные снижения коэффициентов перехода (к.п.) радионуклидов из почвы в растительную и животноводческую продукцию, путем поступления через коневую систему и загрязненные корма. Снижение не выявлялось с 1992–95 года, а в 2012–2020 годах произошли незначительные снижения в коэффициентах перехода и принятых эквивалентах потребления продуктов растительного и животного происхождения с дополнением потребления природных продуктов питания, поэтому можно воспользоваться для расчетов значениями к.п. для 1993–95 года или 2012-2020 года, приведенными в таблицах 1–4 [4], [5].

Таблица 1 - Средние значения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в молоко и картофель в 1993-95 гг

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.5.1>

Типы почвы	^{137}Cs , 10^{-3} м ² /кг	
	молоко	картофель
Дерново-подзолистые: песчаные	0,2	0,04
Супесчаные	0,1	0,02
Легкосуглинистые	0,05	0,01
Среднесуглинистые	0,04	0,007
Тяжелосуглинистые	0,03	0,005
Серые лесные	0,03	0,005
Луговые	0,03	0,005
Черноземные	0,01	0,004

Таблица 2 - Коэффициенты перехода ^{137}Cs из почв разных групп в молоко на период 2012–2020 ггDOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.5.2>

Группа почв (тип, подтип почв)	КП., $10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$
Торфяно-болотные	0,50
Песчаные и супесчаные (дерново-подзолистые, дерново-глебовые, дерновые, светло-серые и серые лесные)	0,17
Легко- и среднесуглинистые (дерново-подзолистые; дерновые; серые и темно-серые лесные; выщелоченные и оподзоленные черноземы)	0,06
Тяжелосуглинистые и глинистые (темно-серые лесные; черноземы: выщелоченные, оподзоленные, типичные, обыкновенные, южные; каштановые)	0,02

Средний коэффициент перехода для грибов $13,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$.Таблица 3 - Эквивалент годового потребления животных V_m , растительных V_k и природных V_{gr} пищевых продуктов взрослыми жителями средней полосы России на период 1986–1995 ггDOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.5.3>

Нуклид	Продукт	$V_m, \text{ к, гр, кг/год}$		
		Село	ПГТ	Город
Cs-137	Молоко	370	300	220
	Картофель	370	300	220
Cs-137 (с 1996 г.)	Грибы	7	5	4

Таблица 4 - Эквивалент годового потребления сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов взрослыми жителями средней полосы России на период 2012–2020 гг

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.5.4>

Нуклид	Продукт	Тип НП		
		I, кг/год	II, кг/год	III, кг/год
Cs-137	Молоко	170	140	110
	Грибы	9	7	5

Начиная с 2012–2020 года в рационе жителей населенных пунктов снизилось потребление сельскохозяйственных продуктов питания, полученных на загрязненных территориях (см. таблица 4), но увеличилось потребление природных продуктов питания (эквивалент грибы). Основную часть полного рациона питания составляет молоко как эквивалент продуктов животного происхождения и картофель как эквивалент продуктов растительного происхождения [4], [5], который восполняется как сельскохозяйственной продукцией, так и продукцией из супермаркетов. Количество продуктов потребляемых и производимых на радиоактивно загрязнённых территориях определено по рекомендациям МУ и данным опросов местных жителей.

Среднегодовые потребления молока населением в сельской местности удаленной от городов и административных центров при расчетах дозы ^{137}Cs , в настоящее время можно принимать в пределах 270-370 л, картофеля (сырой вес) тоже 270-370 кг. Коэффициентами перехода воспользуемся для молока $K_{II}^M = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, для картофеля $K_{II}^K = 0,02 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Результаты и обсуждение

Основная борьба с загрязнением разворачивается в замкнутых понижениях, где образуются «цезиевые пятна», и за год при среднем слое осадков около 700 мм (Брянская область) собирается большое количество воды на водосборах до 10 га. На водосборах «цезиевых пятен» необходимо устанавливать промывной режим и далее выше по рельефу —

удобрительные поливы, вегетационные, увлажнительные, мероприятия по борьбе с поверхностным стоком, эрозией, миграцией питательных веществ.

За сезон промывки (весна) на блюдца подают 4-5 разовых поливных норм величиной 2000-3000 м³/га, за время подачи одной нормы 9-12 часов, вода должна успевать впитываться в течение суток. Снизить удельную активность почвы за один полив можно на 100-200 Бк/кг и добиться очищения в радиационной зоне до приемлемых норм в течение 10 лет, кроме зоны отчуждения [6], [7]. Излишки воды постоянно собираются в замкнутых понижениях, на водосборах которых необходимо задержание внутриснежными лиманами (пленочные экраны), регулирование и переброска талого стока канавами в снегу в месте с недостатком воды, соединение замкнутых понижений каналами устроенными заранее или снежными бороздами в процессе. Улучшение подачи воды производится рыхлением «цезиевых пятен» по частям, также необходим периодический отбор проб почвы для контроля снижения её радиоактивности. Лишняя вода должна накапливаться в осушительных каналах и замкнутых водоёмах для дальнейшего использования в увлажнительных и вегетационных поливах. Самый распространенный промывной режим должен составить 1,25 вегетационных норм полива [6], [7].

В густой гидрографической сети будет ускоряться сток и вынос радионуклидов через овраги, балки, каналы, ручьи и реки. Особенно активно работает природное самоочищение весной при концентрации талого стока в период паводка, а также летом при ливневом стоке, осенью в сезон дождей, стекающие воды будут беспрепятственно уносить с собой радионуклиды и снижать радиационный фон земель склонов и русел в сравнении с водоразделом в несколько раз. Устройство сооружений, улавливающих влекомые наносы и взвешенные частицы, будет способствовать оздоровлению обширных территорий.

Принимаем по данным наблюдений [6], [7], что в результате строительства систем орошения и осушения, ускоряющих внутрипочвенный и поверхностный сток и способствующих радиоэкологической защите, радиоактивность территории снижается на 50 кБк/м² в год.

Расчет предотвращенной дозы внутреннего облучения. По формулам находим общую индивидуальную дозу снижения внутреннего облучения при загрязнении сельхозпродукции от применения защитных мероприятий [8]:

$$Q = K_{\Pi} \cdot \sigma \text{ Бк / кг} \quad (1)$$

где K_{Π} — коэффициент перехода ¹³⁷Cs из почвы в продукцию в любой год после аварии (Бк/кг)/(кБк/м²). Для молока $K_{\Pi}^M = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м²/кг, для картофеля $K_{\Pi}^K = 0,02 \cdot 10^{-3}$ м²/кг.

σ — плотность загрязнения ¹³⁷Cs пашни, сенокосов и пастбищ 50 кБк/м².

Общая предотвращенная индивидуальная доза облучения ¹³⁷Cs:

$$D_{\text{вн.инд.}} = \left(Q_{\text{вн.инд.}}^M + Q_{\text{вн.инд.к}}^K \right) \cdot K_{\text{Э}} \text{ мЗв/год} \quad (2)$$

где $K_{\text{Э}} = 1,4 \cdot 10^{-5}$ мЗв/Бк — коэффициент пересчета от годового поступления ¹³⁷Cs в организм человека к эффективной дозе.

$$Q_{\text{вн.инд.}}^M = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 5 \text{ Бк / кг}$$

$$Q_{\text{вн.инд.}}^K = 0,02 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 1 \text{ Бк / кг}$$

$$Q_{\text{вн.инд.}}^M = 5 \cdot 370 = 1850 \text{ Бк / кг}$$

$$Q_{\text{вн.инд.}}^K = 1 \cdot 370 = 370 \text{ Бк / кг}$$

$$D_{\text{вн.инд.}} = (1850 + 370) \cdot 1,4 \cdot 10^{-5} = 0,0312 \text{ мЗв/год}$$

Расчет предотвращенной дозы внешнего облучения. Перейдем от предотвращенного загрязнения 50 кБк/м² к снижению фона γ -излучения мкР/час [8]:

$$1 \text{ мкР/час} = 3700 \text{ Бк/м}^2$$

За год фон излучения после проведения защитных мероприятий снизился на:

$$\frac{50 \cdot 10^3}{3700} = 13,5 \text{ мкР/час}$$

Доза предотвращенного внешнего облучения высчитывается в соответствии с рекомендациями [6], [8], [11].

Внешнее облучение оценивается по годовой эквивалентной дозе (БЭР — биологический эквивалент рентгена), которая определяется суммой доз, полученных в результате осуществления производственных работ на территориях фермерского хозяйства или личном приусадебном участке, и пребывания в закрытых помещениях.

На выполнение производственных заданий отводят — 2000 час/год.

Пребывание на открытых территориях занимает — 2380 час/год.

Нахождение в закрытых помещениях (дома) составляет — 4380 час/год (12 часов в сутки).

Ниже приведем примерный расчет, выполненный для населенного пункта Старые Бобовичи, расположенного в экологически опасной зоне западного района Брянской области, где снежный покров устанавливается на 4 месяца: декабрь, январь, февраль, март.

Годовая доза внешнего облучения жителя этого населенного пункта $D_{\text{вн}}$, находящегося на открытом воздухе определяется так:

От начала года до 1 июня

$$D_{\text{вн}}^I = 2380/365 \cdot 90 \cdot 0,87 \cdot 0,7 \cdot 13,5 + 2380/365 \cdot 61 \cdot 0,87 \cdot 13,5 = 4824,8 + 4671,6$$

$$= 94,96 \text{ мкБэр} = 9,46 \text{ мБэр} = 0,00956 \text{ Бэр}$$

После 1 июня до конца года

$$D_{\text{вн}}^{II} = 2380/365 \cdot 31 \cdot 0,87 \cdot 0,7 \cdot 13,5 + 2380/365 \cdot 183 \cdot 0,87 \cdot 13,5$$

$$= 1661,87 + 14014,84 = 15676,71 \text{ мкБэр} = 15,677 \text{ мБэр}$$

$$= 0,01568 \text{ бэр}$$

где 90 и 31 — число дней со снежным покровом;

61 и 183 — число дней без снега;

0,87 — коэффициент перехода от экспозиционной дозы γ -излучения к поглощенной бэр/Р;

0,7 — коэффициент задержки γ -излучения снежным покровом.

$$D_{\text{н}} = D_{\text{н}}^I + D_{\text{н}}^{II} \quad (3)$$

$$D_{\text{н}} = 0,0095 + 0,01568 = 0,02518 \text{ бэр}$$

Годовая доза внешнего облучения жителя в закрытом помещении (дома):

До 1 июня:

$$D_{\text{н}}^I = 4380/365 \cdot 151 \cdot 0,87 \cdot 0,5 \cdot 13,5 = 10640,97 \text{ мкбэр} = 0,01064 \text{ бэр}$$

После 1 июня:

$$D_{\text{н}}^{II} = 4380/365 \cdot 214 \cdot 0,87 \cdot 0,5 \cdot 13,5 = 15080,64 \text{ мкбэр} = 0,01508 \text{ бэр}$$

0,5 — коэффициент экранирования закрытых помещений.

$$D_{\text{н}} = D_{\text{н}}^I + D_{\text{н}}^{II} \quad (4)$$

$$D_{\text{н}} = 0,01064 + 0,01508 = 0,02572 \text{ бэр}$$

Работающие на производстве 2000 час/год могут работать и на открытых территориях, защищенные техникой и специальной одеждой, и частично в помещениях, поэтому введем для этих часов коэффициент экранирования 0,75.

От начала года до 1 июня:

$$D_{\text{нп}}^I = 2000/365 \cdot 90 \cdot 0,87 \cdot 0,7 \cdot 13,5 \cdot 0,75 + 2000/365 \cdot 61 \cdot 0,87 \cdot 13,5 \cdot 0,75 \\ = 3040,8 + 2944,3 = 5985,1 \text{ мкбэр} = 0,005985 \text{ бэр}$$

От 1 июня до конца года:

$$D_{\text{нп}}^{II} = 2000/365 \cdot 31 \cdot 0,87 \cdot 0,7 \cdot 13,5 \cdot 0,75 + 2000/365 \cdot 183 \cdot 0,87 \cdot 13,5 \cdot 0,75 \\ = 1047,4 + 8832,9 = 9880,3 \text{ мкбэр} = 0,00988 \text{ бэр}$$

$$D_{\text{нп}} = D_{\text{нп}}^I + D_{\text{нп}}^{II} \quad (5)$$

$$D_{\text{нп}} = 0,005985 + 0,00988 = 0,015865 \text{ бэр}$$

0,1 бэр/год=1 мЗв/год.

По формулам (3, 4, 5, 6) получаем общую индивидуальную дозу снижения внешнего облучения от влияния защитных мероприятий на радиоактивность территории (при снижении фона в размере $50 \text{ кБк/м}^2=13,5 \text{ мкР/ч}$):

$$D_{(\text{внеш.инд.})} = D_{\text{н}} + D_{\text{н}} + D_{\text{нп}} \quad (6)$$

$$D_{(\text{внеш.инд.})} = 0,02518 + 0,02572 + 0,015865 = 0,06676 \text{ мЗв/год}$$

Общая предотвращенная доза от внешнего и внутреннего облучения будет равна:

$$D_{(\text{вн.инд.})} + D_{(\text{внеш.инд.})} = 0,0312 + 0,06676 = 0,09796 \text{ мЗв/год}$$

Аналогичным образом был проведен расчет снижения дозы облучения от влияния самоочищающей способности естественных водных потоков [12], [13], [14], [15]. Предварительно по данным наблюдений [12], производимых в поле, было определено, что радиоактивность загрязненного участка снижается на 40 кБк/м^2 в год из-за процессов самоочищения.

Общее снижение индивидуальной дозы облучения от проведения защитных мероприятий и самоочищающей способности естественных нерегулируемых потоков воды составит [12], [16], [17]:

$$0,6988+0,699=1,398 \text{ мЗв/год.}$$

На начало рассматриваемого периода доза внутреннего облучения, рассчитанная по формулам (1) и (2), составляла при плотности загрязнения сельхозугодий 1044 кБк/м^2 :

$$D_{(\text{вн.инд.})} = 0,647 \text{ мЗв/год.}$$

Доза внешнего облучения на начало рассматриваемого периода, рассчитанная по формулам (3,4,5,6) составила:

$$D_{(\text{внеш.инд.})} = 5,258+4,334+2,995=12,587 \text{ мЗв/год.}$$

Общая доза облучения на загрязненном участке составляла:

$$D_{(\text{вн.инд.})} + D_{(\text{внеш.инд.})} = 0,647+12,587 = 13,235 \text{ мЗв/год.}$$

Находим, через сколько лет доза облучения населения не будет превышать 1 мЗв/год:



$(13,235-1,0)/1,398 = 8,8$ года

Также возможно определение общей коллективной предотвращенной дозы внутреннего и внешнего облучения [6], [16], [20] по формуле:

$$D_{\text{общ.кол.}} = (D_{\text{(вн.инд.)}} + D_{\text{(внеш.инд.)}}) \cdot N_{\text{чел.Зв}} \quad (7)$$

где N — число жителей в населенном пункте, чел.

По полученной величине предотвращенной коллективной дозы облучения можно учесть экономическую эффективность мероприятий по радиационной безопасности населения, которая предусматривает сохранение жизни и здоровья жителей радиоактивно загрязненных территорий и способствует повышению качества получаемой в данном регионе сельскохозяйственной продукции. Предотвращенная доза облучения в размере 1 мЗв в или 1 чел.Зв эквивалентна сохранению продолжительности одного года жизни населения, что приравнивается к стоимости годового душевого национального дохода в России 12000 долларов США, на уровне стран Евросоюза и США в данный момент в размере 55000-75000 долларов США [21], [22].

Заключение

1. Мы видим, что наше предположение о том, что нормативные показатели экспозиционной дозы облучения во всех загрязненных регионах, кроме зоны отчуждения, могут быть достигнуты менее чем за 10 лет, оправдывает себя.

2. Обязательное использование инженерно-защитных мероприятий и учет ускорения процессов самоочищения позволяет принимать при расчетах окупаемости осредненные данные предотвращенной дозы облучения.

3. При создании в загрязненных регионах сельскохозяйственных производств, возвращении земель в эксплуатацию, проводимые мелиоративные мероприятия повысят экономическую целесообразность этих территорий до общепринятых нормативов.

4. Разработанная методика расчета индивидуальной и коллективной предотвращенной экспозиционной дозы найдет широкое применение в сметных расчетах при проектировании, строительстве и применении инженерных мероприятий, улучшение условий жизни и труда людей, оздоровление территорий поможет получить двойной экономический эффект от производства продукции и учета снижения среднегодовой эффективной дозы облучения.

Благодарности

Автор выражает благодарность и признательность научному руководителю профессору, доктору технических наук Василенкову Валерию Фёдоровичу; членам своей семьи; коллективу кафедры Природообустройства и водопользования за посильный вклад в выполнение данной работы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The author expresses his gratitude and appreciation to the scientific supervisor, Professor, Doctor of Technical Sciences Vasilenkov Valery Fedorovich; members of his family; the staff of the Department of Environmental Management and Water Management for feasible contribution to the implementation of this work.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Российская Федерация. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения»: [от 09.01.1996 № 3-ФЗ]. — [3-е изд.]. — 1996.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1.758-99. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. — Введ. 1999-07-02. — Москва: Департамент Госсанэпиднадзора России, 2005. — 86 С.
3. Ильин Л.А. Радиационная безопасность и защита / Л.А. Ильин, В.Ф. Кириллов, И.А. Коренков. — Москва: Медицина, 1996. — 336 с.
4. МУ 2.6.1.-95 Реконструкция накопленной эффективной дозы облучения в 1986–1995 гг. жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г.
5. МУ 2.6.1.-3153-13. Реконструкция накопленной эффективной дозы облучения в 2012-2020 гг. жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г.
6. Василенков С.В. Водохозяйственные реабилитационные мероприятия на радиоактивно загрязненных территориях / С.В. Василенков. — Москва: МГУП, 2010. — 289 с.
7. Vasilenkov S. Rehabilitation of radioactively contaminated soils in residential and agricultural areas / S. Vasilenkov. // BIO Web of Conferences. Current State, Problems and Prospects for the Development of Agricultural Science.; edited by Cherifa Boukacem-Zeghmour and others — 141. — Les Ulis: EDP Sciences — Web of Conferences, 2024. — P. 02006–02017. doi: 10.1051/bioconf/202414102006



8. Анненков Б.Н. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б.Н. Анненков, Е.В. Юдинцева. — Москва: Агропромиздат, 1991. — 287 с.
9. Гавриченко А.И. Правила безопасности при выполнении сельскохозяйственных работ в условиях радиоактивного загрязнения территории / А.И. Гавриченко, Е.П. Овсянников, Л.Н. Карпова и др. — Москва: ВНИИОТ, 1992. — 33 с.
10. Шамратова И.А. Комплексный подход к подготовке населения к изменению радиационного статуса территорий, загрязнённых в результате аварии на Чернобыльской АЭС / И.А. Шамратова, М.Е. Петухова, Е.А. Горячев // Технологии гражданской безопасности. — 2018. — № 2. — С. 30–36. — DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.2.56.5.30
11. Скоробогатов А.М. Влияние режима зон радиоактивного загрязнения на состояние муниципальных образований (на примере Брянской области) / А.М. Скоробогатов, О.Н. Апанасюк, Т.А. Буланцева // Региональные исследования. — 2021. — №4. — С. 89–103. — DOI: 10.5922/1994-5280-2021-4-7.
12. Василенков В.Ф. Водохозяйственная радиология / В.Ф. Василенков, С.В. Василенков, Д.В. Козлов. — Москва: ФГОУ ВПО МГУП, 2009. — 413 с.
13. Дубровская О. Г. Обзор радиоактивного загрязнения окружающей среды на территории деятельности ФГБУ «Забайкальское УГМС» за 2019 год / О.Г. Дубровская, О.В. Жукова, В.Н. Левандовская. — Чита, 2020. — 17 с.
14. «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2019 году»: ежегодник / ФГБУ «НПО „Тайфун“». — Обнинск, 2020. — 331 с.
15. Крышев И.И. Оценка эколого-экономического ущерба от радиоактивного загрязнения окружающей среды / И.И. Крышев, А.А. Бурякова, Т.Г. Сазыкина // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2021. — № 1. — С. 105–112. — DOI: 10.31857/S0869803121010070
16. Панов А.В. Эффективность мероприятий, направленных на снижение доз облучения жителей сельских населенных пунктов в отдаленный период после аварии Чернобыльской АЭС / А.В. Панов, С.В. Фесенко, Р.М. Алексахин // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2001. — № 6. — С. 682–694.
17. Панов А.В. Влияние сельскохозяйственных защитных мероприятий на облучение населения, проживающего на территориях, загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС / А.В. Панов, С.В. Фесенко, Н.И. Санжарова // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2006. — № 2. — С. 233–239.
18. Дурнев Р.А. Методический подход к оценке социально-экономического состояния населённых пунктов на радиоактивно-загрязнённой территории / Р.А. Дурнев, Э.Н. Аюбов, А.В. Алымов и др. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2021. — № 1. — С. 50–59. — DOI: 10.36535/0869-4176-2021-01-7
19. Аюбов Э.Н. Результаты оценки социально-экономического состояния населённых пунктов, расположенных на радиоактивно загрязнённых территориях / Э.Н. Аюбов // Технологии гражданской безопасности. — 2022. — № 4 (74). — С. 31–34. — DOI: 10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74
20. Холодкова Т.Е. Методические подходы к оценке социально-экономического состояния малочисленных населённых пунктов Брянской области / Т.Е. Холодкова, Г.Г. Аккужина // Технологии гражданской безопасности. — 2021. — № 1. — С. 1–10. — DOI: 10.54234/CST.19968493.2021.18.2.68.10.57
21. Ракинцев Д.С. Экономическая оценка экосистемных услуг почв сельскохозяйственного назначения в условиях долгосрочного радиоактивного загрязнения на региональном уровне / Д.С. Ракинцев // Экономика устойчивого развития. — 2023. — № 1. — С. 66–70. — DOI: 10.37124/20799136_2023_1_53_66
22. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). — Москва: Минздрав России, 1999. — 116 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Rossijskaya Federaciya. Federal'nyj zakon "O radiacionnoj bezopasnosti naseleniya": [ot 09.01.1996 № 3-FZ] [Russian Federation. Federal Law "On Radiation Safety of the Population": dated January 9, 1996 No. 3-FZ]. — [3rd ed.]. — 1996. [in Russian]
2. Normy' radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99). SP 2.6.1.758-99. Ioniziruyushhee izluchenie, radiacionnaya bezopasnost' [Radiation safety standards (NRB-99). SP 2.6.1.758-99. Ionizing radiation, radiation safety]. — Introduced 1999-07-02. — Moscow: Departament Gossane'pidnadzora Rossii, 2005. — 86 p. [in Russian]
3. Il'in L.A. Radiacionnaya bezopasnost' i zashhita [Radiation safety and protection] / L.A. Il'in, V.F. Kirillov, I.A. Korenkov. — Moscow: Medicina, 1996. — 336 p. [in Russian]
4. MU 2.6.1.-95 Rekonstrukciya nakoplennoj effektivnoj dozy oblucheniya v 1986–1995 gg. zhitelej naselennykh punktov Rossijskoj Federacii, podvergshih'sya radioaktivnomu zagryazneniyu vsledstvie avarii na Chernobyl'skoj AES v 1986 g. [MU 2.6.1.-95 Reconstruction of the accumulated effective radiation dose in 1986–1995 for residents of settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the Chernobyl nuclear power plant accident in 1986]. [in Russian]
5. MU 2.6.1.-3153-13. Rekonstrukciya nakoplennoj effektivnoj dozy oblucheniya v 2012–2020 gg. zhitelej naselennykh punktov Rossijskoj Federacii, podvergshih'sya radioaktivnomu zagryazneniyu vsledstvie avarii na Chernobyl'skoj AES v 1986 g. [MU 2.6.1.-3153-13. Reconstruction of the accumulated effective radiation dose in 2012–2020 for residents of settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident in 1986]. [in Russian]
6. Vasilenkov S.V. Vodoxozhaystvenny'e reabilitacionny'e meropriyatiya na radioaktivno zagryaznenny'x territoriyax [Water management rehabilitation measures in radioactively contaminated territories] / S.V. Vasilenkov. — Moscow: MGUP, 2010. — 289 p. [in Russian]
7. Vasilenkov S. Rehabilitation of radioactively contaminated soils in residential and agricultural areas / S. Vasilenkov. // BIO Web of Conferences. Current State, Problems and Prospects for the Development of Agricultural Science.; edited by



Cherifa Boukacem-Zeghmour and others — 141. — Les Ulis: EDP Sciences — Web of Conferences, 2024. — P. 02006–02017. doi: 10.1051/bioconf/202414102006

8. Annenkov B.N. Osnovy' sel'skoxozyajstvennoj radiologii [Fundamentals of agricultural radiology] / B.N. Annenkov, E.V. Yudincheva. — Moscow: Agropromizdat, 1991. — 287 p. [in Russian]
9. Gavrichenko A.I. Pravila bezopasnosti pri vy'polnenii sel'skoxozyajstvenny'x rabot v usloviyax radioaktivnogo zagryazneniya territorii [Safety rules for performing agricultural work in conditions of radioactive contamination of the territory] / A.I. Gavrichenko, E.P. Ovsyannikov, L.N. Karpova et al. — Moscow: VNINOT, 1992. — 33 p. [in Russian]
10. Shamratova I.A. Kompleksny'j podxod k podgotovke naseleniya k izmeneniyu radiacionnogo statusa territorij, zagryaznyonny'x v rezul'tate avarii na Chernoby'l'skoj AE'S [An integrated approach to preparing the population for changes in the radiation status of territories contaminated as a result of the Chernobyl accident] / I.A. Shamratova, M.E. Petuxova, E.A. Goryachev // Technologies of civil safety. — 2018. — № 2. — P. 30–36. — DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.2.56.5.30 [in Russian]
11. Skorobogatov A.M. Vliyanie rezhima zon radioaktivnogo zagryazneniya na sostoyanie municipal'ny'x obrazovanij (na primere Bryanskoj oblasti) [The influence of the regime of radioactive contamination zones on the state of municipalities (on the example of the Bryansk region)] / A.M. Skorobogatov, O.N. Apanasyuk, T.A. Bulanceva // Regional studies. — 2021. — №4. — P. 89–103. — DOI: 10.5922/1994-5280-2021-4-7. [in Russian]
12. Vasilenkov V.F. Vodoxozyajstvennaya radiologiya [Water management radiology] / V.F. Vasilenkov, S.V. Vasilenkov, D.V. Kozlov. — Moscow: FGOU VPO MGUP, 2009. — 413 p. [in Russian]
13. Dubrovskaya O. G. Obzor radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy na territorii deyatel'nosti FGBU «Zabajkal'skoe UGMS» za 2019 god [Review of radioactive environmental pollution in the territory of the Zabaikalskoye UGMS Federal State Budgetary Institution for 2019] / O.G. Dubrovskaya, O.V. Zhukova, V.N. Levandovskaya. — Chita, 2020. — 17 p. [in Russian]
14. «Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2019 godu»: ezhegodnik ["Radiation situation on the territory of Russia and neighboring countries in 2019": yearbook] / FSBI NPO Typhoon. — Obninsk, 2020. — 331 p. [in Russian]
15. Kry'shev I.I. Ocenka e'kologo-e'konomicheskogo ushherba ot radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy' [Assessment of ecological and economic damage from radioactive pollution of the environment] / I.I. Kry'shev, A.A. Buryakova, T.G. Sazy'kina // Radiation biology. Radioecology. — 2021. — № 1. — P. 105–112. — DOI: 10.31857/S0869803121010070 [in Russian]
16. Panov A.V. E'ffektivnost' meropriyatij, napravlenny'x na snizhenie doz oblucheniya zhitelej sel'skix naselenny'x punktov v otdalenny'j period posle avarii Chernoby'l'skoj AE'S [Effectiveness of measures aimed at reducing radiation doses to residents of rural settlements in the long-term period after the Chernobyl nuclear power plant accident] / A.V. Panov, S.V. Fesenko, R.M. Aleksaxin // Radiation Biology. Radioecology. — 2001. — № 6. — P. 682–694. [in Russian]
17. Panov A.V. Vliyanie sel'skoxozyajstvenny'x zashhitny'x meropriyatij na obluchenie naseleniya, prozhivayushhego na territoriyax, zagryaznenny'x posle avarii na Chernoby'l'skoj AE'S [The impact of agricultural protective measures on the exposure of the population living in areas polluted after the Chernobyl accident] / A.V. Panov, S.V. Fesenko, N.I. Sanzharova // Radiation Biology. Radioecology. — 2006. — № 2. — P. 233–239. [in Russian]
18. Durnev R.A. Metodicheskij podxod k ocenke social'no-e'konomicheskogo sostoyaniya naselyonny'x punktov na radioaktivno-zagryaznyonnoj territorii [Methodological approach to assessing the socio-economic condition of settlements in a radioactively contaminated area] / R.A. Durnev, E'.N. Ayubov, A.V. Aly'mov et al. // Problems of safety and emergency situations. — 2021. — № 1. — P. 50–59. — DOI: 10.36535/0869-4176-2021-01-7 [in Russian]
19. Ayubov E'.N. Rezul'taty' ocenki social'no-e'konomicheskogo sostoyaniya naselyonny'x punktov, raspolozhenny'x na radioaktivno zagryaznyonny'x territoriyax [Results of the assessment of the socio-economic condition of settlements located in radioactively contaminated territories] / E'.N. Ayubov // Technologies of civil safety. — 2022. — № 4 (74). — P. 31–34. — DOI: 10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74 [in Russian]
20. Xolodkova T.E. Metodicheskie podxody' k ocenke social'no-e'konomicheskogo sostoyaniya malochislenny'x naselyonny'x punktov Bryanskoj oblasti [Methodological approaches to assessing the socio-economic condition of small settlements in the Bryansk region] / T.E. Xolodkova, G.G. Akkuzhina // Civil security technologies. — 2021. — № 1. — P. 1–10. — DOI: 10.54234/CST.19968493.2021.18.2.68.10.57 [in Russian]
21. Rakincev D.S. E'konomicheskaya ocenka e'kosistemny'x uslug pochv sel'skoxozyajstvennogo naznacheniya v usloviyax dolgosrochnogo radioaktivnogo zagryazneniya na regional'nom urovne [Economic assessment of ecosystem services of agricultural soils in conditions of long-term radioactive contamination at the regional level] / D.S. Rakincev // Economics of sustainable development. — 2023. — № 1. — P. 66–70. — DOI: 10.37124/20799136_2023_1_53_66 [in Russian]
22. Normy radiacionnoj bezopasnosti [Radiation safety standards] (NRB-99). — Moscow: Ministry of Health of Russia, 1999. — 116 p. [in Russian]