
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 539.163:504.064.2.001.18

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ ОСНОВНЫМИ ДОЗОБРАЗУЮЩИМИ РАДИОНУКЛИДАМИ: РЕТРОСПЕКТИВА, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОГНОЗ (НА ПРИМЕРЕ ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛ.)

В. В. ЖУРАВКОВ¹⁾, Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾, Г. Ф. ЛАСУТА²⁾, Е. В. ЖУРАВКОВ¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

Образец цитирования:

Журавков ВВ, Цыбулько НН, Ласута ГФ, Журавков ЕВ. Геоинформационное моделирование загрязнения территории основными дозобразующими радионуклидами: ретроспектива, современное состояние, прогноз (на примере Гомельской обл.). *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2026;1:24–37.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-24-37>

For citation:

Zhuravkov VV, Tsybulka MM, Lasuta GF, Zhuravkov EV. Geo-information modeling of pollution of the territories with the main dose-forming radionuclides: retrospective, current state (on the example of the Gomel region). *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2026;1:24–37. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-24-37>

Авторы:

Владислав Владимирович Журавков – кандидат биологических наук, доцент; заместитель директора по учебной работе.

Николай Николаевич Цыбулько – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; начальник научно-исследовательского сектора.

Геннадий Федорович Ласута – кандидат сельскохозяйственных наук; профессор кафедры гуманитарных наук.

Евгений Владиславович Журавков – магистр; стажер младшего научного сотрудника научно-исследовательского сектора.

Authors:

Vladislav V. Zhuravkov, PhD (biology), docent; deputy director for academic work.

zhvl@mail.ru

Mikalai M. Tsybulka, doctor of science (agriculture), full professor; head of the research sector.

nik.nik1966@tut.by

Gennady F. Lasuta, PhD (agriculture), professor at the department of humanities.

Lasuta_g@mail.ru

Evgeniy V. Zhuravkov, master's degree; junior research fellow intern in the research sector.

1907377@mail.ru

Выполнено комплексное геоинформационное моделирование загрязнения территории Гомельской обл. основными дозообразующими радионуклидами на основе интеграции архивных данных радиометрических обследований, геологических карт и полевых измерений. В работе реализованы методы пространственного интерполирования, временного анализа трендов и прогнозирования на основе физико-экологических моделей миграции радионуклидов в почвенно-растительных системах. Для восстановления непрерывных пространственных распределений концентраций радионуклидов (^{131}I , ^{132}Te , ^{103}Ru , ^{95}Nb , ^{239}Np , ^{99}Mo , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238, 239, 240}\text{Pu}$) на основе дискретных точечных измерений применяли методы пространственного интерполирования: обратного взвешенного расстояния, кригинга с внешним дрейфом, триангуляции Делоне с линейной интерполяцией. Проведен ретроспективный анализ динамики загрязнения территории Гомельской обл. основными дозообразующими радионуклидами с 1986 г., выявлены устойчивые зоны с замедленной деградацией активности, а также построен прогноз уровней загрязнения радионуклидами до 2056 г. Результаты показали, что ^{137}Cs остается доминирующим дозообразующим нуклидом (более 85 % текущей эффективной дозы), при этом его активность в среднем снизилась на 68–72 % за 40 лет. Прогноз на 2056 г. указывает на дальнейшее снижение активности до 15–25 % от текущих значений, однако зоны с высокой плотностью загрязнения останутся объектами повышенного радиационного контроля.

Ключевые слова: геоинформационные системы; пространственное моделирование; прогнозирование радиоактивного загрязнения; радиационная безопасность.

GEOINFORMATION MODELING OF POLLUTION OF THE TERRITORIES WITH THE MAIN DOSE-FORMING RADIONUCLIDES: RETROSPECTIVE, CURRENT STATE (ON THE EXAMPLE OF THE GOMEL REGION)

V. V. ZHURAVKOV^a, M. M. TSYBULKA^a, G. F. LASUTA^b, E. V. ZHURAVKOV^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bUniversity of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus,
25 Mashynabudaŭnikoŭ Street, Minsk 220118, Belarus
Corresponding author: V. V. Zhuravkov (zhvl@mail.ru)

Comprehensive geoinformation modeling of contamination of the territory of the Gomel region with the main dose-forming radionuclides has been performed online based on the integration of archived data from radiometric surveys, geological maps and field measurements. The paper implements methods of spatial interpolation, temporal trend analysis and forecasting based on physico-ecological models of radionuclide migration in soil and plant systems. Spatial interpolation methods were used to reconstruct continuous spatial distributions of radionuclide concentrations (^{131}I , ^{132}Te , ^{103}Ru , ^{95}Nb , ^{239}Np , ^{99}Mo , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238, 239, 240}\text{Pu}$) based on discrete point measurements: inverse weighted distance, kriging with external drift, triangulation Delaunay with linear interpolation. A retrospective analysis of the dynamics of contamination of the territory of the Gomel region with the main dose-forming radionuclides since 1986 has been carried out, stable zones with delayed degradation of activity have been identified, and a forecast of levels of contamination with radionuclides up to 2056 has been constructed. The results showed that ^{137}Cs remains the dominant dose-forming nuclide (more than 85 % of the current effective dose), while its activity decreased by an average of 68–72 % over 40 years. Forecast for 2056 It indicates a further decrease in activity to 15–25 % of current values, however, areas with high pollution density will remain objects of increased radiation control. The resulting cartograms and models can be integrated into radiation monitoring and land-use planning systems.

Keywords: geographic information systems; spatial modeling; dynamics; radiation pollution forecasting; radiation safety; radionuclide migration models.

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС – одна из крупнейших техногенных катастроф в истории человечества. Республика Беларусь стала наиболее пострадавшей страной – более 23 % ее территории подверглось радиоактивному загрязнению.

В течение четырех десятилетий в Беларуси накоплен беспрецедентный объем данных о пространственном распределении радионуклидов – от результатов наземных съемок и лабораторного анализа почв и растительности до аэро-гамма-спектрометрических и спутниковых наблюдений. Однако до настоящего времени отсутствует единая геоинформационная модель, интегрирующая ретроспективные данные, современные измерения и физико-экологические факторы миграции радионуклидов в целях построения достоверных прогнозов загрязнения.

Традиционные подходы к картированию, основанные на интерполяции точечных данных без учета пространственной автокорреляции и влияния ландшафтных детерминант, не позволяют адекватно оценить динамику загрязнения в условиях антропогенной нагрузки и природной рекультивации.

Настоящая публикация представляет собой комплексное исследование по систематизации и унификации данных за период с 1986 по 2056 г., включающих более 32 тыс. точечных измерений концентраций ^{131}I , ^{132}Te , ^{103}Ru , ^{95}Nb , ^{239}Np , ^{99}Mo , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238, 239, 240}\text{Pu}$, полученных в ходе мониторинговых наблюдений, научных исследований и международных проектов [1].

На основе методов геостатистического моделирования (регрессионный кригинг), триангуляции Делоне и моделирования на основе физических процессов миграции построены детализированные картограммы текущего состояния загрязнения, выявлены ключевые зоны риска и проанализированы тенденции снижения (или стабилизации) уровней радионуклидов в различных ландшафтно-экологических условиях. Особое внимание уделено прогнозированию загрязнения до 2056 г.

Результаты исследования формируют основу для научного обоснования мероприятий по защите населения на перспективу.

Материалы и методы исследования

В качестве базового программного обеспечения для создания карт была выбрана геоинформационная система *QGIS ver 3.42*, включающая интерфейс для связи с базами данных, который позволяет провести интеграцию с существующими системами управления базами данных. Для картограмм точки с информацией о загрязнении были преобразованы в равноплощадную картографическую проекцию. Следующий этап при создании карт состоял в построении полигонов, то есть разбиение карты на области, в которой любая точка ближе к своей точке измерения, чем к измерению, в любой другой области. Территории, заполненные небольшими полигонами, отражают высокую плотность измерений и наоборот (рис. 1).

Заключительный этап состоял в создании непосредственно самих карт, представляющих загрязнение территории Гомельской обл. Поскольку загрязнение радионуклидами представляет собой непрерывное поле, естественна попытка реконструировать эту непрерывность. Это делали с помощью методов интерполяции, оценивающих значения переменной там, где пробы не отбирались. В работе использовались методы «обратного расстояния» (IDW), кригинга с внешним дрейфом, триангуляции Делоне с линейной интерполяцией. Это методы построения сеток для интерполяции данных, где метод триангуляции Делоне строит «правильные» треугольники, избегая острых углов, а IDW интерполирует значения, взвешивая их обратно пропорционально расстоянию от точки, создавая гладкую поверхность.

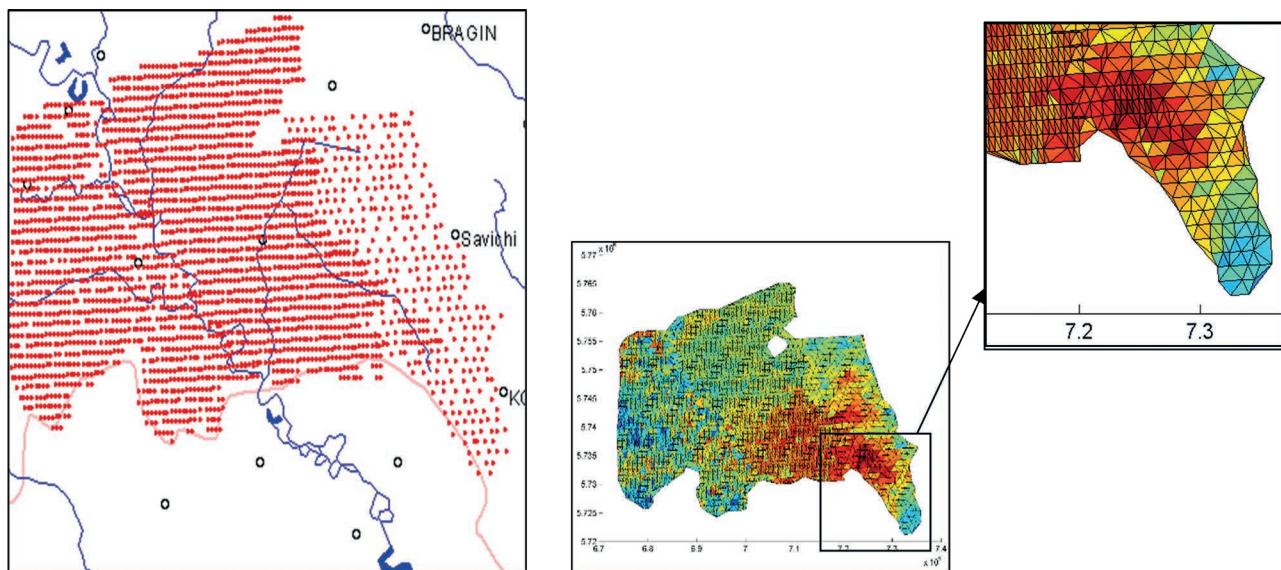


Рис. 1. Построение полигонов на основе равноплощадной картографической проекции (Гомельская обл.)

Fig. 1. Construction of polygons based on an equal-area map projection (Gomel region)

В динамике загрязнения территории Республики Беларусь радионуклидами, выброшенными во окружающую среду вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, можно выделить следующие стадии: I. Йодно-нептуниевый этап; II. Стабилизация радиационной обстановки; III. Цезиево-стронциевый этап; IV. Актинидный этап [2].

Прогноз радиоактивного загрязнения почвы на реперной площадке Масаны Хойникского р-на Гомельской обл. на основе экспериментальных представлений на рис. 2. Прогноз радиоактивного загрязнения на примере реперной площадки Масаны позволяет выявить и описать основные этапы динамики радиационной обстановки в окружающей среде после катастрофы на Чернобыльской АЭС.

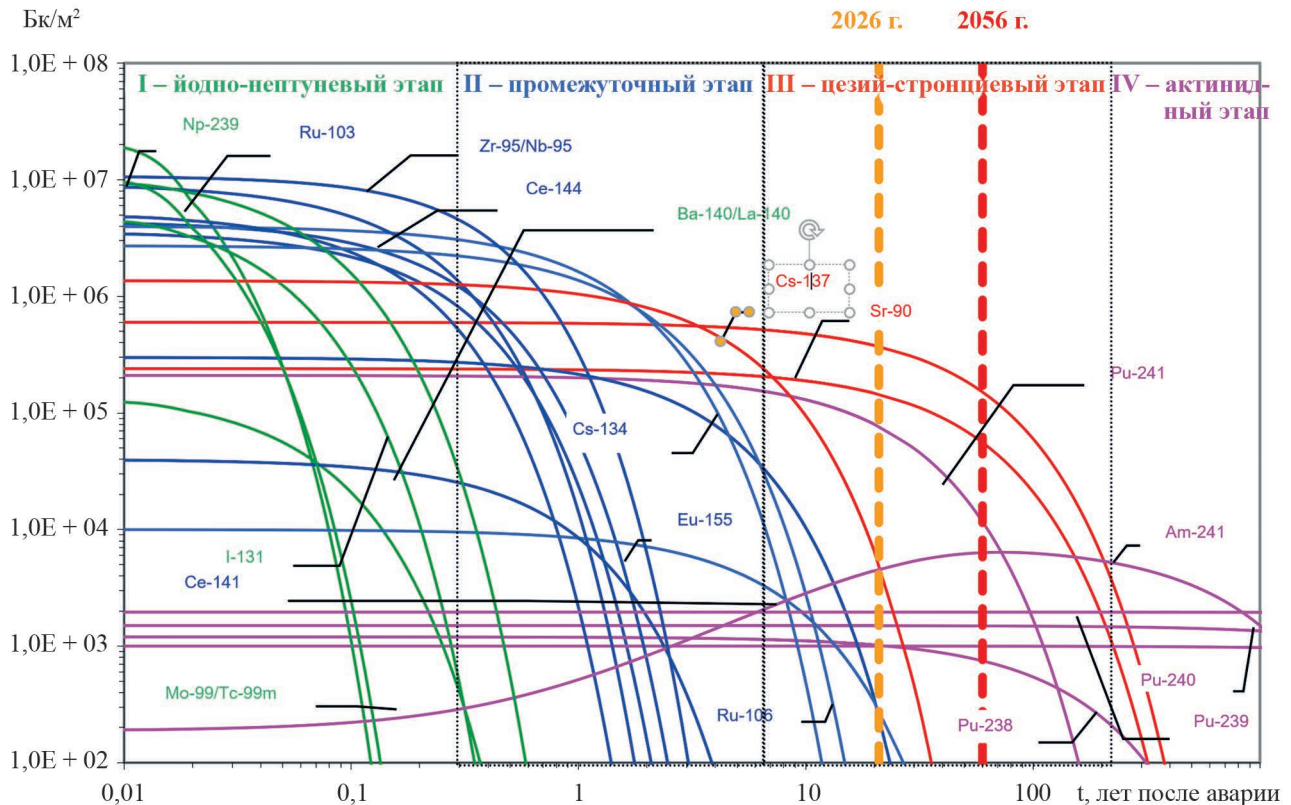


Рис. 2. Прогноз радиоактивного загрязнения почвы на реперной площадке Масаны на основе экспериментальных данных коэффициентов фракционирования радионуклидов

Fig. 2. Forecast of radioactive contamination of soil at the Masany reference site based on experimental data on fractionation coefficients of radionuclides

Результаты исследования и их обсуждение

I. Йодно-нептуновый этап. Короткоживущие изотопы, которые определяли радиационную обстановку в первые дни после аварии, находились в виде конденсационных и топливных частиц. К конденсационным частицам относятся радиоактивные изотопы ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{103}Ru и ^{106}Ru . В составе топливных частиц были ^{239}Np , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{144}Ce и др. Соотношение этих радионуклидов в значительной степени определяется глубиной выгорания ядерного топлива в реакторе АЭС [3; 4]. Для определения глубины выгорания и количества уранового топлива в почвенных выпадениях после аварии на Чернобыльской АЭС, специально была разработана методика, с использованием в качестве трассера облученного топлива ^{236}U [8]. В соответствии с методикой величина среднего выгорания топлива принята $(9,4 \pm 0,5) \text{ МВт} \cdot \text{сут} / \text{кгU}$ [3–5].

При расчетах выпадений радиоактивных изотопов ^{140}La , ^{140}Ba , ^{95}Zr , ^{97}Zr , ^{95}Nb , ^{156}Eu , ^{239}Np , ^{143}Ce рассматривалось их отношение к ^{144}Ce , так как эти радионуклиды находились в составе топливных частиц [4–6]. На основании данных реконструкции радиационной обстановки территории Гомельской обл., построены картограммы загрязнения ее территории ^{131}I , ^{239}Np , ^{132}Te , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Mo , ^{140}Ba , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce на день максимальных выпадений 29.04.1986 г. (рис. 3–12).

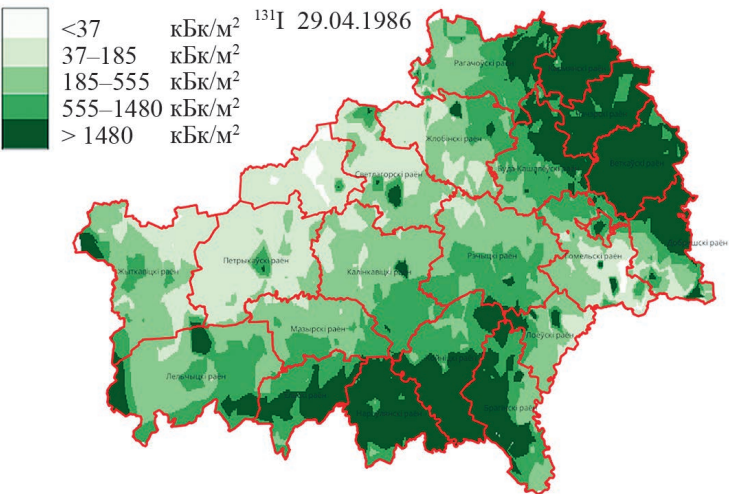


Рис. 3. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{131}I на день максимальных выпадений

Fig. 3. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{131}I

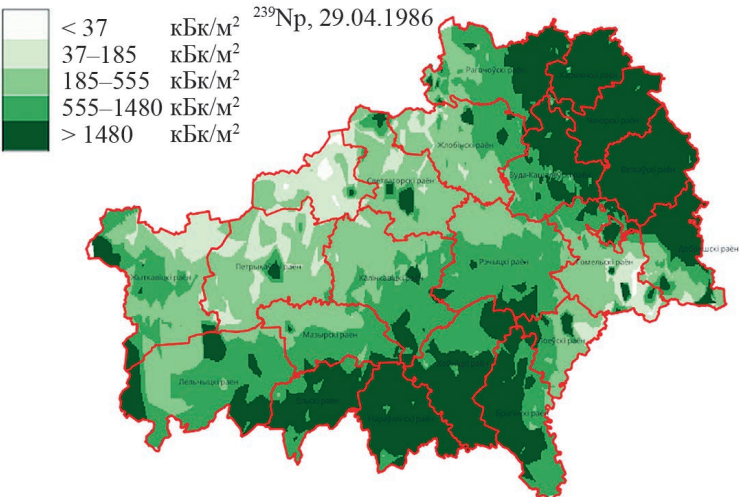


Рис. 4. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{239}Np на день максимальных выпадений

Fig. 4. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{239}Np

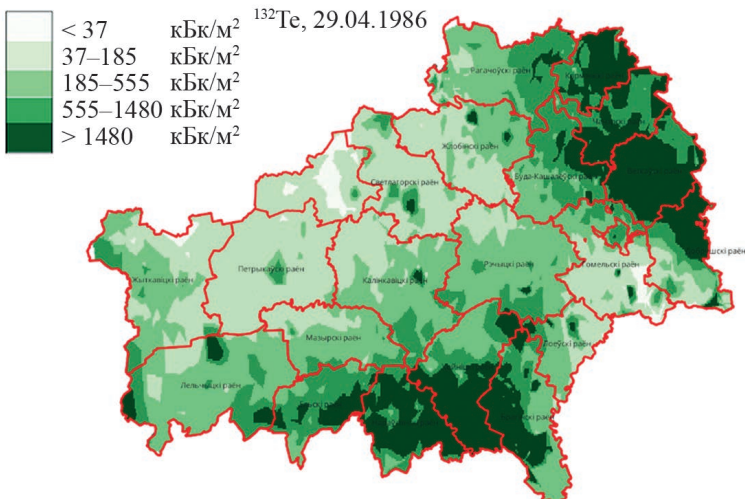


Рис. 5. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{132}Te на день максимальных выпадений

Fig. 5. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{132}Te

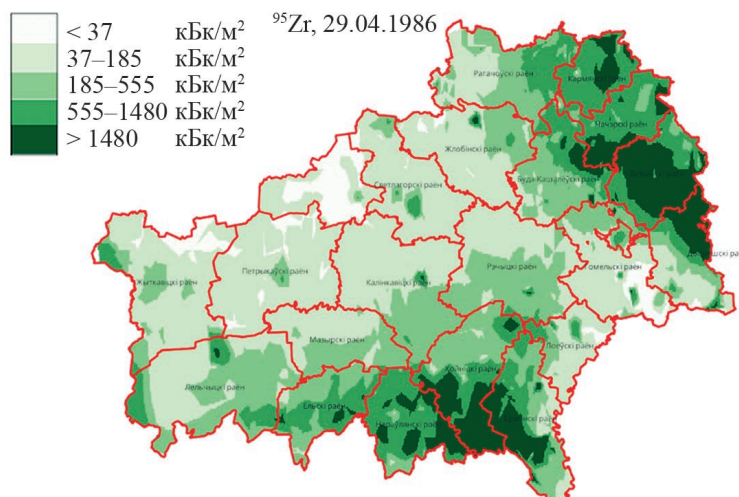


Рис. 6. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{95}Zr на день максимальных выпадений

Fig. 6. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{95}Zr

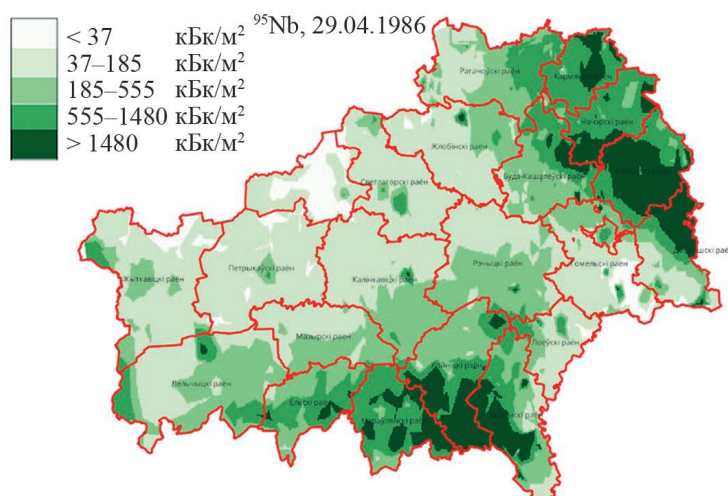


Рис. 7. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{95}Nb на день максимальных выпадений

Fig. 7. Map of contamination of the territory of Gomel region with ^{95}Nb

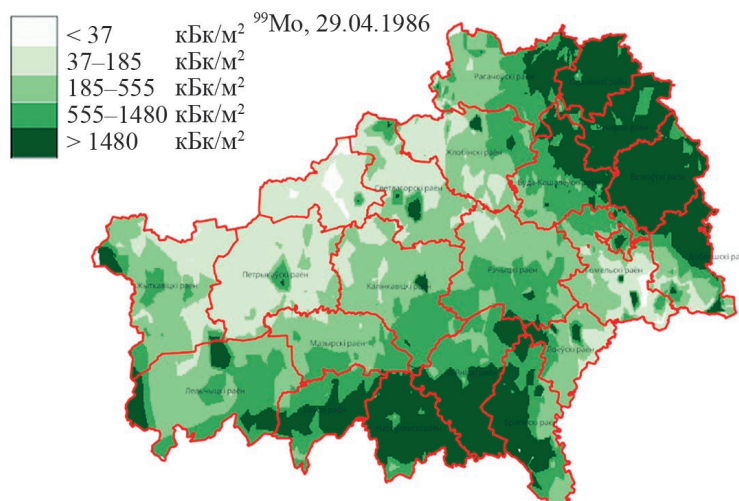


Рис. 8. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{99}Mo на день максимальных выпадений

Fig. 8. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{99}Mo

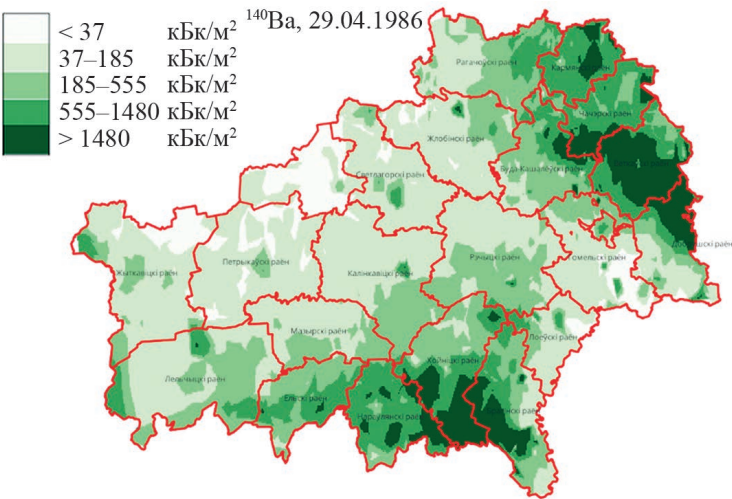


Рис. 9. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{140}Ba на день максимальных выпадений
Fig. 9. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{140}Ba

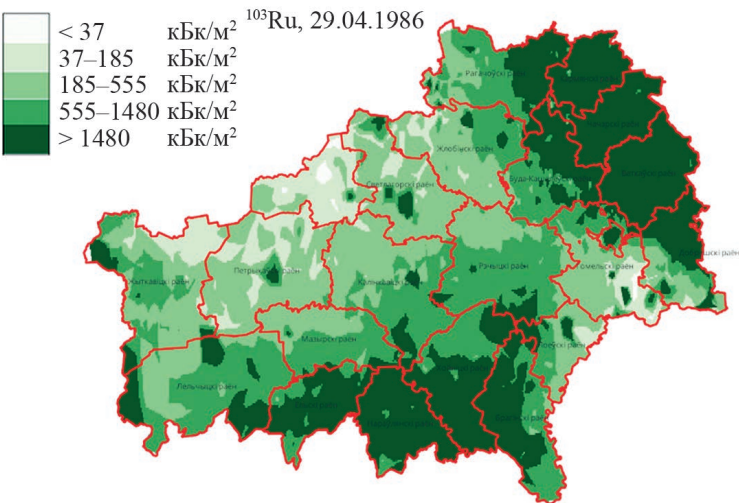


Рис. 10. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{103}Ru в день максимальных выпадений
Fig. 10. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{103}Ru

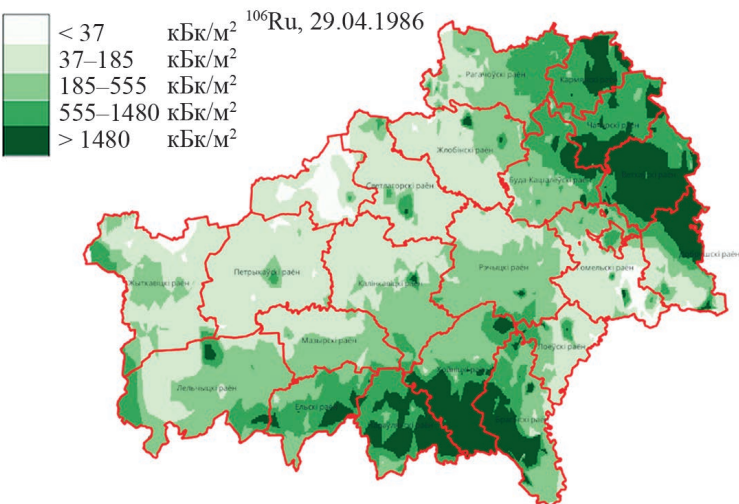


Рис. 11. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{106}Ru в день максимальных выпадений
Fig. 11. Map of the contamination of the territory of Gomel region with ^{106}Ru

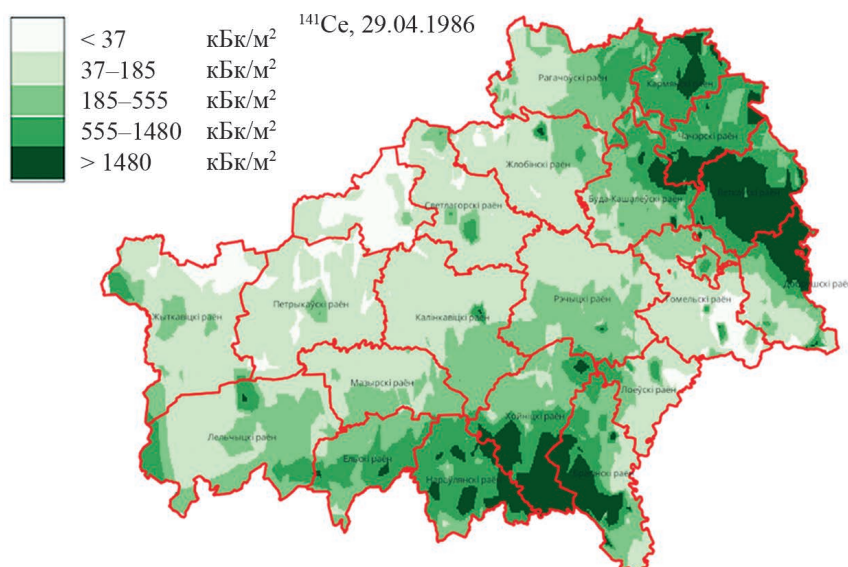


Рис. 12. Карта загрязнения территории Гомельской обл. ^{141}Ce в день максимальных выпадений

Fig. 12. Map of contamination of the territory of Gomel region with ^{141}Ce

Таким образом, кроме изотопов йода, заметный вклад в формирование загрязнения территории Беларуси в период активной стадии аварии вносили радионуклиды ^{132}Te , ^{103}Ru , ^{95}Nb , ^{239}Np , ^{99}Mo , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{95}Zr .

II. Стабилизация радиационной обстановки и III. Цезиево-стронциевый этапы. Второй и третий этапы характеризуются тем, что за счет естественного радиоактивного распада в сотни и тысячи раз снизилось радиоактивное загрязнение радионуклидами с периодом полураспада около года. Началась заметная деструкция топливных частиц и повышенная миграция ^{90}Sr . Радиационная обстановка на этом этапе в основном обусловлена радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr [7]. На рис. 13–20 представлена динамика загрязнения территории Гомельской обл. ^{137}Cs и ^{90}Sr с 2026 по 2056 г.

В данный период значительно возрастает миграция ^{90}Sr в почве и по пищевой цепочке в результате деструкции топливных частиц, что наиболее характерно для западного следа, где уран находился в первичных выпадениях в неокисленной форме. По мере деструкции топливных частиц ^{90}Sr попадает в почвенные растворы, после чего мигрирует вглубь почвы, проявляя все присущие ему как химическому элементу свойства. Это подтверждается увеличением коэффициента фракционирования ^{90}Sr к урану от глубины в почве. Происходит заметное накопление ^{241}Am за счет распада ^{241}Pu .

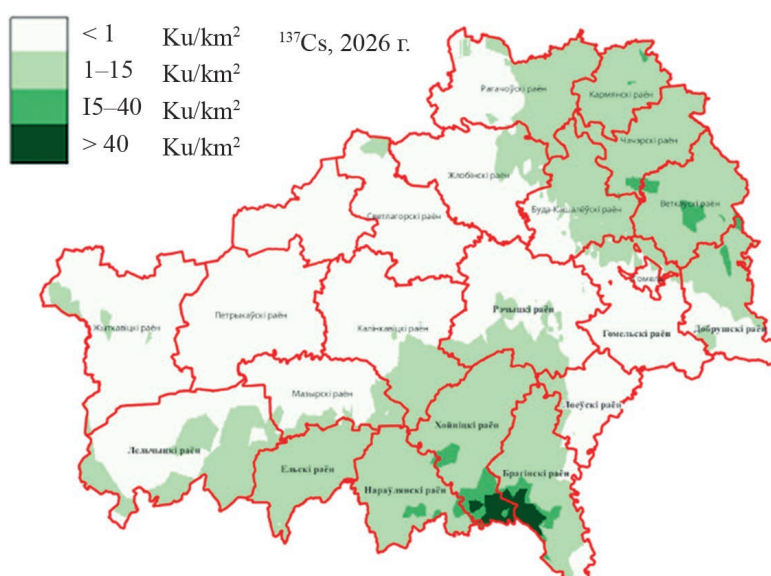


Рис. 13. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{137}Cs на 2026 г.

Fig. 13. Contamination of the Gomel region with ^{137}Cs in 2026

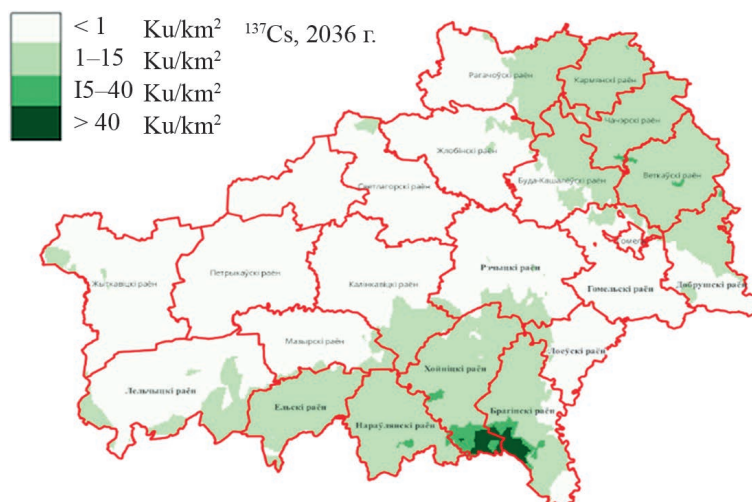


Рис. 14. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{137}Cs на 2036 г.

Fig. 14. Contamination of the Gomel region with ^{137}Cs in 2036

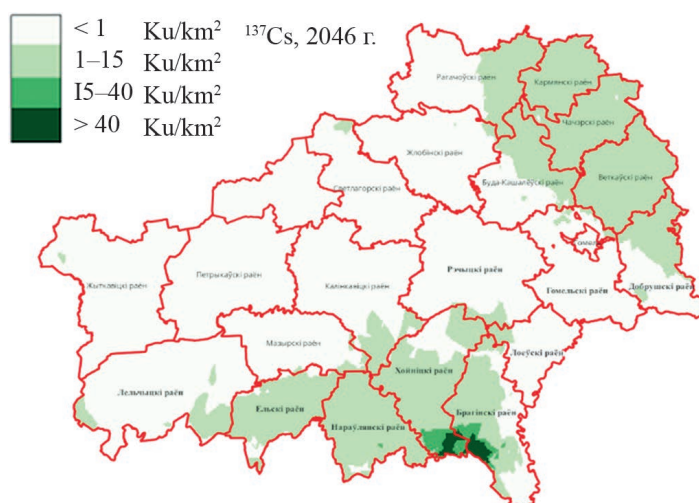


Рис. 15. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{137}Cs на 2046 г.

Fig. 15. Contamination of the Gomel region with ^{137}Cs in 2046

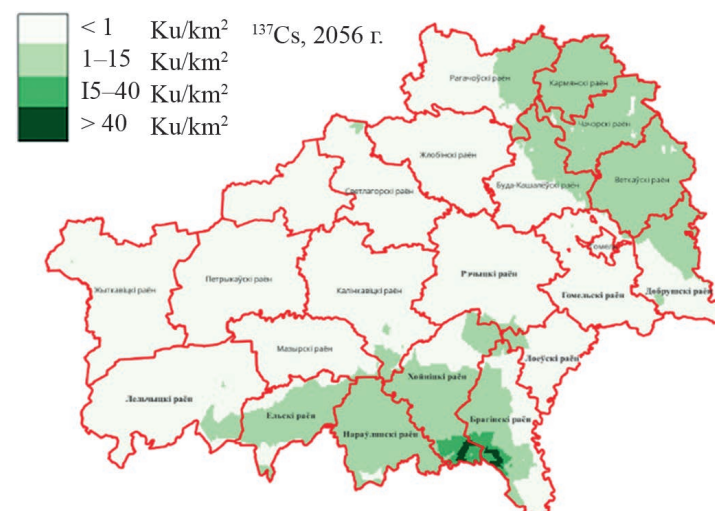


Рис. 16. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{137}Cs на 2056 г.

Fig. 16. Contamination of the Gomel region with ^{137}Cs in 2056

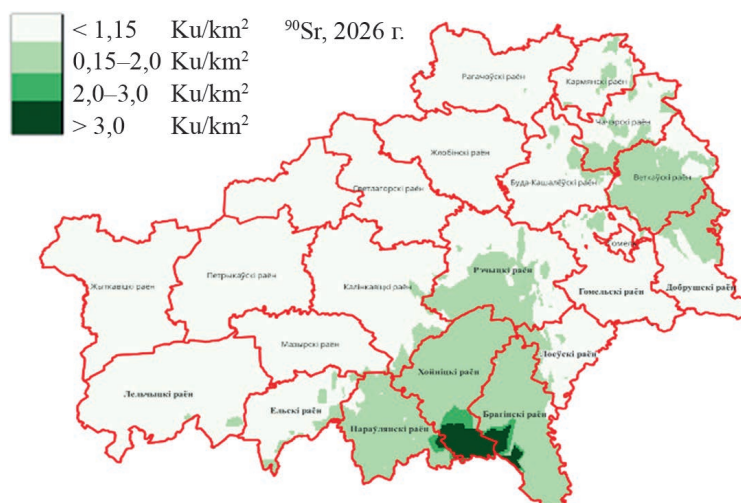


Рис. 17. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{90}Sr на 2026 г.

Fig. 17. Contamination of the Gomel region with ^{90}Sr in 2026

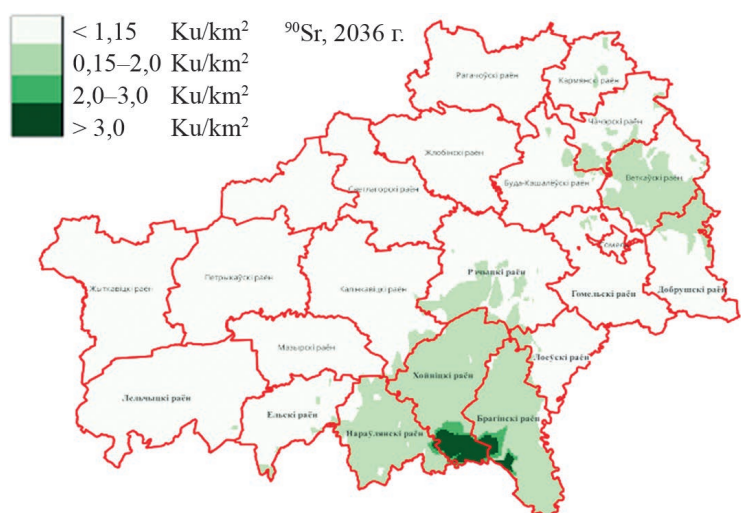


Рис. 18. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{90}Sr на 2036 г.

Fig. 18. Contamination of the Gomel region with ^{90}Sr in 2036

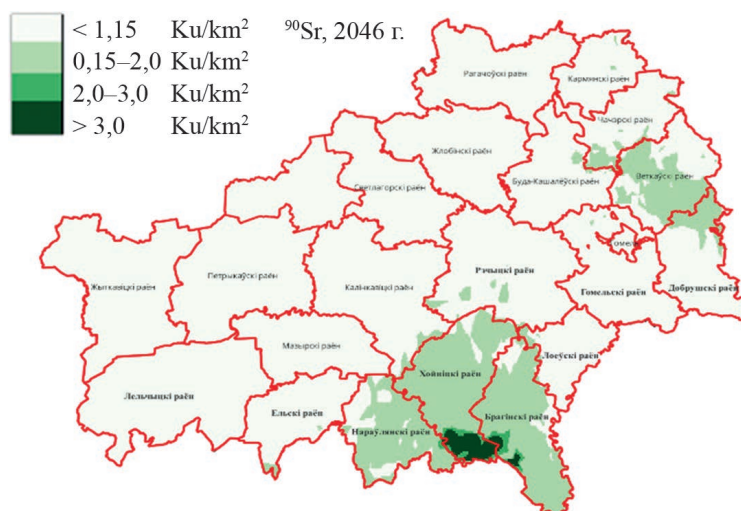


Рис. 19. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{90}Sr на 2046 г.

Fig. 19. Contamination of the Gomel region with ^{90}Sr in 2046

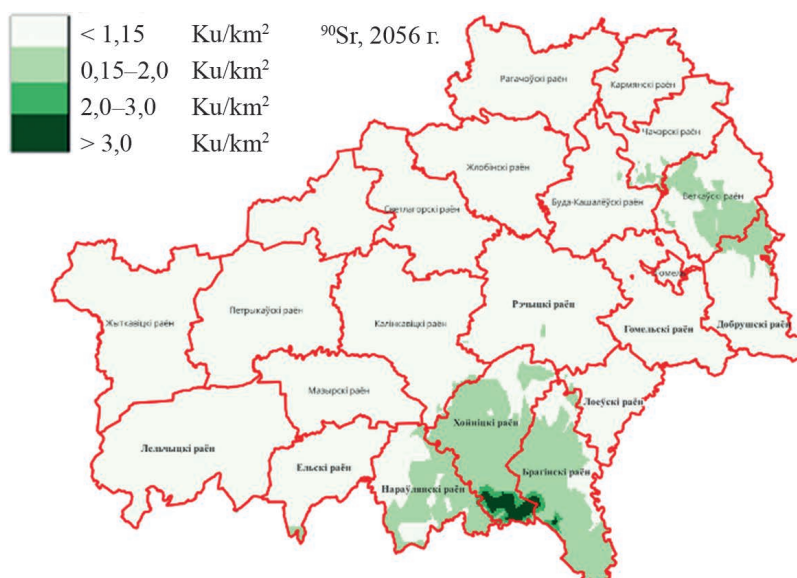


Рис. 20. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{90}Sr на 2056 г.

Fig. 20. Contamination of the Gomel region with ^{90}Sr in 2056

IV. *Актинидный этап.* За счет естественного распада и частично в результате вертикальной и горизонтальной миграции в сотни раз снижается загрязнение ^{241}Pu , ^{137}Cs , ^{90}Sr . Загрязнение в основном определяется актинидами $^{238,239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am , причем загрязнение ^{241}Am превышает загрязнение $^{238,239,240}\text{Pu}$.

Необходимо отметить, что чернобыльская катастрофа привела к очень неравномерному загрязнению территории трансурановыми элементами. Так, содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах изменялось от $1,1 \cdot 10^5$ Бк/м² для территорий, расположенных вблизи Чернобыльской АЭС, до средних глобальных уровней на севере Беларуси. Высокие уровни загрязнения располагаются локально в радиоактивных пятнах ближнего следа. В Гомельской обл. наблюдается постоянный рост содержания ^{241}Am в компонентах экосистем в результате естественного распада ^{241}Pu [8]. На рис. 21–24 представлена динамика загрязнения территории Гомельской обл. $^{238,239,240}\text{Pu}$ с 2026 по 2056 г.

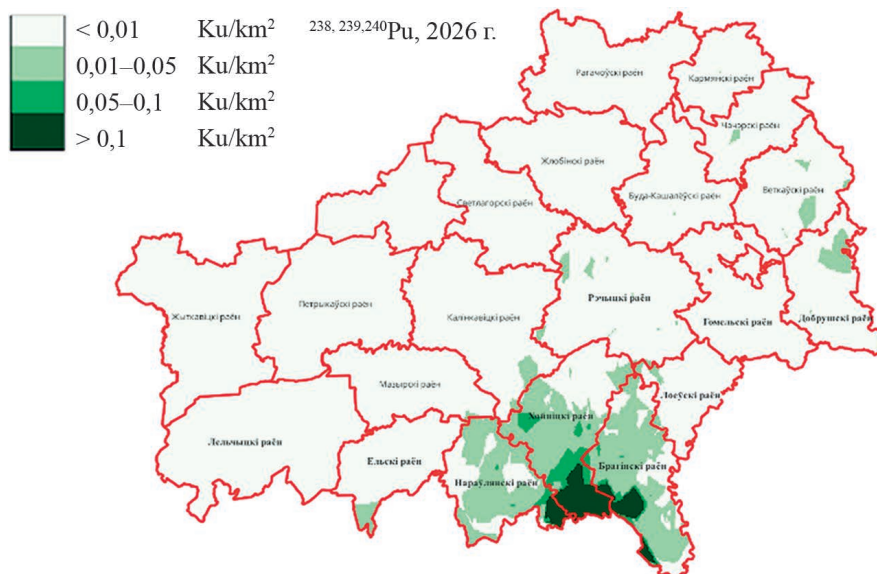


Рис. 21. Загрязнение территории Гомельской обл. $^{238,239,240}\text{Pu}$ на 2026 г.

Fig. 21. Pollution of the Gomel region by $^{238,239,240}\text{Pu}$ in 2026

Максимальный уровень загрязнения ^{241}Am , по нашим расчетам, установится к 2060 г. и превысит $^{238,239,240}\text{Pu}$ в 2,7 раза. При этом территории с уровнем загрязнения $^{238,239,240}\text{Pu} + ^{241}\text{Am}$ до 1000 Бк/м², возможно выйдут за пределы 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС.

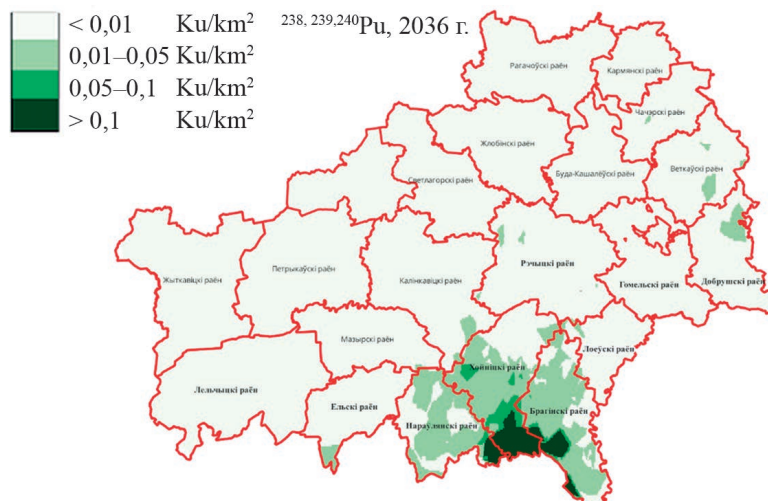


Рис. 22. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{238,239,240}Pu на 2036 г.

Fig. 22. Pollution of the Gomel region by ^{238,239,240}Pu in 2036

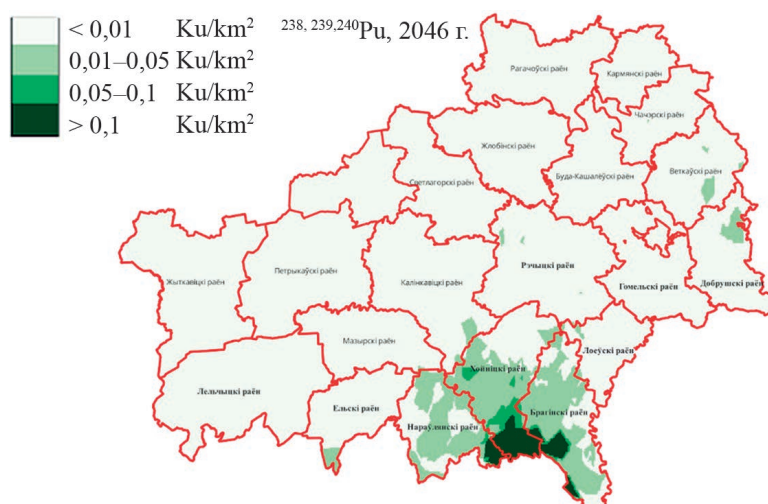


Рис. 23. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{238,239,240}Pu на 2046 г.

Fig. 23. Pollution of the Gomel region by ^{238,239,240}Pu in 2046

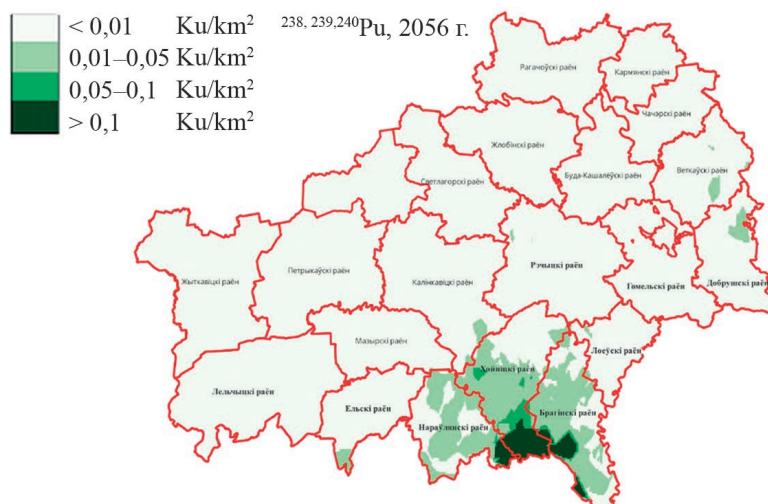


Рис. 24. Загрязнение территории Гомельской обл. ^{238,239,240}Pu на 2056 г.

Fig. 24. Pollution of the Gomel region by ^{238,239,240}Pu in 2056

Заключение

Настоящее исследование представляет собой комплексное геоинформационное моделирование загрязнения территорий Гомельской обл. основными доозообразующими радионуклидами ^{131}I , ^{132}Te , ^{103}Ru , ^{95}Nb , ^{239}Np , ^{99}Mo , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238, 239, 240}\text{Pu}$ с учетом трех временных аспектов: ретроспективного анализа (1986–1990 гг.), оценки современного состояния (2020–2024 гг.) и построения долгосрочного прогноза (до 2056 г.). На основе интеграции данных радиометрических измерений, геологических и почвенных картограмм, а также результатов полевых исследований, разработана унифицированная пространственная база данных, охватывающая более 32 тыс. точек измерений за 40 лет.

Применение метода регрессионного кригинга позволило восстановить детализированные картограммы распределения радионуклидов с высокой точностью, а также количественно оценить влияние ключевых факторов окружающей среды.

Анализ динамики показал, что за 40 лет среднее содержание ^{137}Cs в почве на территории Гомельской обл. снизилось на 68 % в результате физического распада и процессов вертикальной миграции. По прогнозу к 2056 г. около 84 % территории Гомельской области будет иметь плотность загрязнения ^{137}Cs менее 37 кБк/м². Подвижность ^{90}Sr в почве и его более высокая биологическая доступность по сравнению с ^{137}Cs требуют особого внимания в контексте ведения аграрного производства.

Библиографические ссылки

1. Журавков ВВ, Цыбулько НН, Тонконогов БА. ГИС технологии при моделировании радиоактивного загрязнения территорий Беларуси в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. Управление информационными ресурсами. В: Материалы XXI Международной научно-практической конференции. Минск: Академия управления при Президенте Республики Беларусь; 2025. с. 400–402.
2. Журавков ВВ, Цыбулько НН, Журавков ЕВ. Инновационные цифровые технологии при моделировании радиоактивного загрязнения территорий Беларуси после аварии на ЧАЭС. Защита окружающей среды от экотоксикантов: международный опыт и российская практика. В: Материалы VII Международной научно-технической конференции. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ»; 2025. с. 78–81.
3. Загрязнение территории населенных пунктов Республики Беларусь ^{137}Cs , ^{90}Sr и Pu на январь 1998 г. Минск: Белгидромет; 1998.
4. Конопля ЕФ, Миронов ВП, Журавков ВВ. Радиация и Чернобыль. Короткоживущие радионуклиды на территории Беларуси. Минск: Белорусская наука; 2008. 198 с.
5. Миронов ВП, Журавков ВВ, Ананич ПИ, Булыга СФ, Матусевич ЖЛ. Определение количества и глубины выгорания уранового топлива в выпадениях на загрязненных территориях, после катастрофы на ЧАЭС, с помощью трассера урана-236. Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2005;4:121–123.
6. Mironov VV, Pribylev SV, Zhuravkov VV. The use of ^{236}U as a tracer of irradiated uranium. Security through Science series. 2009;2:13–21.
7. Миронов ВП, Матусевич ЖЛ, Кудряшов ВП, Ананич ПИ, Журавков ВВ. Методика определения глубины выгорания и количества уранового топлива в выпадениях на территории Беларуси, после катастрофы на ЧАЭС с помощью трассера U-236. В: Современные проблемы радиоэкологии. Сборник материалов научно-практической конференции. Минск: [б. и.]; 2002. с. 89–91.
8. Цыбулько НН, Герменчук МГ, Журавков ВВ. Радиоактивное загрязнение территории Беларуси: динамика, современное состояние и долгосрочный прогноз. Журнал БГУ. Экология. 2025;3:67–75.

Reference

1. Zhuravkov VV, Tsybulko NN, Tonkonogov BA. GIS tehnologii pri modelirovanii radioaktivnogo zagrjaznenija territorij Belarusi v otdalennyj period posle avarii na ChAJeS. Upravlenie informacionnymi resursami [GIS technologies in modeling radioactive contamination of the territories of Belarus in the late period after the Chernobyl accident]. In: Information Resource Management. Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference. Minsk: Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus; 2025. p. 400–402. Russian.
2. Zhuravkov VV, Tsybulko NN, Zhuravkov EV. Innovacionnye cifrovye tehnologii pri modelirovanii radioaktivnogo zagrjaznenija territorij Belarusi posle avarii na ChAJeS. Zashhita okruzhajushhej sredy ot jekotoksikantov: mezhdunarodnyj opyt i rossijskaja praktika [Innovative digital technologies in modeling radioactive contamination of the territories of Belarus after the Chernobyl accident. Environmental protection from ecotoxikants: international experience and Russian practice]. In: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference. Ufa: UNPC «USPTU Publishing House»; 2025. p. 78–81. Russian.
3. Zagrjaznenie territorii naselennyh punktov Respubliki Belarus' ^{137}Cs , ^{90}Sr i Pu na janvar' 1998 g. [Contamination of the Territory of Settlements in the Republic of Belarus with ^{137}Cs , ^{90}Sr , and Pu as of January 1998]. Minsk: Belgidromet; 1998. Russian.
4. Konoplya EF, Mironov VP, Zhuravkov VV. Korotkozvivushhie radionuklidy na territorii Belarusi [Radiation and Chernobyl: Short-Lived Radionuclides on the Territory of Belarus]. Minsk: Belorusskaya navuka; 2008. 198 p. Russian.

5. Mironov VP, Zhuravkov VV, Ananich PI, Bulyga SF, Matusevich ZhL. *Opređenje količestva i glubiny vygoranija uranovogo topliva v vypadenijah na zagriznennyh territorijah, posle katastrofy na ChAJeS, s pomoshh'ju trassera urana-236* [Determination of the Amount and Burnup Depth of Uranium Fuel in Fallout from Contaminated Areas after the Chernobyl Disaster Using a Uranium-236 Tracer]. *Viesci Nacyjnal'noj akademii navuk Bielarusi. Sieryja fizika-techničnych navuk*. 2005;4:121–123. Russian.
6. Mironov VV, Pribylev SV, Zhuravkov VV. The use of ^{236}U as a tracer of irradiated uranium. *Security through Science series*. 2009;2:13–21.
7. Mironov VP, Matusevich ZhL, Kudryashov VP, Ananich PI, Zhuravkov VV. *Metodika opredelenija glubiny vygoranija i količestva uranovogo topliva v vypadenijah na territorii Belarusi, posle katastrofy na ChAJeS s pomoshh'ju trassera U-236* [Methodology for determining the burnup depth and the amount of uranium fuel in fallout on the territory of Belarus after the Chernobyl disaster using the U-236 tracer]. In: *Modern problems of radioecology: Collection of materials of scientific and practical conference*. Minsk: [publisher unknown]; 2002. p. 89–91. Russian.
8. Tsybulko NN, Germenchuk MG, Zhuravkov VV. *Radioaktivnoe zagriznenie territorii Belarusi: dinamika, sovremennoe sostojanie i dolgosrochnyj prognoz* [Radioactive contamination of the territory of Belarus: dynamics, current state, and long-term forecast]. *Journal of BSU. Ecology*. 2025;3:67–75. Russian.

Статья поступила в редколлегию 03.02.2026.
Received by editorial board 03.02.2026.