

КРИТЕРИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАБИЛИТАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ¹

Тихомиров Николай Петрович

доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой математических методов в экономике РЭУ им. Г. В. Плеханова.

Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36.

E-mail: kafedra_mme@mail.ru

Арон Дмитрий Викторович

соискатель кафедры управления проектами и программами РЭУ им. Г. В. Плеханова.

Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36.

E-mail: aron@ibrae.ac.ru

В статье рассмотрены четыре варианта критериев эффективности экологической реабилитации территорий на примере дезактивации при радиационном загрязнении: на максимум пользы от дезактивации; на минимум связанных с ней издержек; на максимум удельной эффективности затрат на дезактивацию и минимум затрат на единицу стоимости предотвращенного дезактивацией ущерба. Доказана попарная эквивалентность первого и второго, третьего и четвертого критериев. Показано, что использование первых двух критериев позволяет получить безусловное решение задачи оптимизации дезактивации по параметру остаточной дозы облучения, а два других критерия применимы лишь при решении этой задачи с ограничениями. Приведен пример использования первых двух критериев в решении задачи оптимизации дезактивации.

Ключевые слова: загрязнение, дезактивация, затраты, издержки, выгоды, доза облучения, критерий, оптимизация.

CRITERIA OF ECONOMIC EFFECTIVENESS OF CONTAMINATED TERRITORIES REHABILITATION

Tikhomirov, Nikolay P.

Doctor of Economics, Professor, the Head of the Department for Mathematical Methods in Economics of the PRUE.

Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russian Federation.

E-mail: kafedra_mme@mail.ru

¹ Статья подготовлена по материалам исследования, проведенного при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-06-00535.

Aron, Dmitry V.

Candidate of the Department for Projects and Programs Management of the PRUE.

Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russian Federation.

E-mail: aron@ibrae.ac.ru

The article considers four variants of criteria for effectiveness of territories' ecological rehabilitation illustrated by decontamination of radioactive pollution: with max benefit of decontamination; with min of costs connected with it; with max specific efficiency of costs on decontamination and min costs per unit of prevented damage cost. The authors proved equivalent character of the first and second, third and fourth criteria in pairs. It was shown that the use of first two criteria allows us to get absolute solution of decontamination optimization by the residual dose of radiation and two other criteria can be used only for tasks with restrictions. An example of using the first two criteria for tasks of decontamination optimization was provided.

Keywords: contamination, decontamination, costs, benefit, radiation dose, criterion, optimization.

При аварийных ситуациях на объектах атомной промышленности и террористических атаках с подрывом «грязных ядерных зарядов» ликвидация последствий радиоактивного загрязнения территорий и защита населения от радиационного воздействия, как правило, предполагают проведение дезактивации загрязненной местности без отселения или с временным отселением ее жителей. Эти меры (меры вмешательства) обычно применяются при относительно невысоких уровнях ожидаемой годовой исходной дозы облучения (до 200 мЗв/год). При более высоких значениях доз с целью избежания значительных потерь здоровья и жизни жителей обычно рекомендуются их отселение и консервация территории на длительный срок, за исключением ситуаций, связанных со спасением людей или предотвращением более серьезной катастрофы. В таких случаях допускается работа ликвидаторов последствий аварии в течение относительно непродолжительного периода времени [3].

Дезактивация территории и отселение жителей требуют значительных финансовых затрат. Учитывая ограниченность ресурсов, Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) рекомендует

оптимизировать процесс обеспечения радиационной безопасности по параметру остаточной индивидуальной дозы облучения при выполнении определенных ограничений на ее верхний уровень [3. – С. 96]. Оптимальное значение этой дозы понимается как результат оценки, который бы сбалансировал вред от облучения и ресурсы, затраченные на вмешательство [3. – С. 97]. При этом речь идет именно об индивидуальной эффективной дозе, поскольку использование суммарной (коллективной) эффективной дозы может привести к ошибке при выборе мер защиты [3. – С. 98].

Оптимизация вмешательства означает необходимость обоснования адекватного содержанию этой задачи критерия. В некоторых работах предполагается, что эта проблема не имеет существенного значения, поскольку результаты, полученные при разных критериях, различаются незначительно [4; 7]. Однако, на наш взгляд, этот вывод нуждается в более тщательном обосновании, которое может быть связано с исследованием влияния критерия задачи оптимизации радиационной защиты на полученный результат, определяемый по уровню остаточной дозы облучения.

Варианты критериев вмешательства

В качестве критериев вмешательства при аварийных ситуациях с утечкой радиации обычно рассматриваются следующие их варианты [7]:

1) максимизация пользы вмешательства, выраженной следующей разностью:

$$B = \text{Стоимость предотвращенного вмешательством ущерба} - \text{Затраты на вмешательство};$$

2) минимизация издержек вмешательства, выраженных следующей суммой:

$$Z = \text{Ущерб от остаточной дозы облучения} + \text{Затраты на вмешательство};$$

3) минимизация затрат на единицу стоимости предотвращенного ущерба, определяемых следующим соотношением:

$$\Lambda = \text{Затраты на вмешательство} / \text{Стоимость предотвращенного ущерба};$$

4) максимизация удельной эффективности затрат с целевой функцией V , обратной Λ :

$$V = \text{Стоимость предотвращенного ущерба} / \text{Затраты на вмешательство}.$$

При известных зависимостях характеристик критериев от остаточной дозы облучения D_R представляется, что ее оптимальная оценка может быть найдена методом безусловной оптимизации из уравнения критерия

$$\frac{d(\text{критерий})}{dD_R} = 0. \quad (1)$$

Рассмотрим особенности решения задачи оптимизации вмешательства по параметру остаточной дозы облучения на примере дезактивации загрязненной территории.

Решение задачи безусловной оптимизации дезактивации

Дезактивация загрязненной территории обеспечивает снижение ожидаемой исходной эффективной дозы облучения жителей D до уровня D_R (под дозами здесь будут пониматься их годовые значения в мЗв/год). При этом разность $\Delta D = D - D_R$ характеризует предотвращенную дезактивацией дозу. В целях избежания усложнений в математических выкладках в даль-

нейшем будем использовать следующие предположения:

– период дезактивации будем полагать относительно коротким, что позволит пренебречь дозой облучения, полученной индивидуумом в период ее проведения;

– ликвидаторов, проводящих дезактивацию, будем учитывать в составе населения, что позволяет не принимать во внимание возможные различия в полученных ими и жителями дозах облучения;

– ущерб здоровью и жизни индивидуума от облучения будем оценивать пропорционально полученной им пожизненной дозе исходя из предположения, что он будет жить на пострадавшей территории всю оставшуюся жизнь.

При этих предположениях стоимость предотвращенного дезактивацией ущерба, как и ущерб от остаточной дозы облучения, оценим в расчете на одного индивидуума в соответствии с рекомендациями МКРЗ [3; 5] пропорционально соответствующим дозам согласно следующим выражениям:

$$Q^+(D, D_R) = \lambda \cdot \psi \cdot \Delta D, \quad (2)$$

$$Q(D_R) = \lambda \cdot \psi \cdot D_R, \quad (3)$$

где $Q^+(D, D_R)$ – стоимость предотвращенного дезактивацией ущерба, оцениваемого пропорционально величине снижения дозы с исходного уровня D до остаточного D_R , характеризующая экономические выгоды от ее проведения;

$Q(D_R)$ – стоимостной ущерб от остаточной дозы облучения;

λ – «цена» единицы дозы облучения, которую МКРЗ рекомендует устанавливать не ниже среднедушевого ВВП за 1 Зв исходя из предположения, что коллективная доза в 1 Зв/год эквивалентна потере 1 года жизни [3; 6];

ψ – усредненный за определенное количество лет коэффициент, учитывающий динамику накопления дозы за определенный период, выраженный в годах. При проживании на загрязненной территории в течение L лет его величина приблизительно может быть оценена согласно следующему выражению [1]:

$$\psi(\mu, L) = \frac{1 - \exp(-\mu L)}{\mu}, \quad (4)$$

где μ – показатель снижения дозы за год вследствие распада радионуклидов и их миграции в естественной среде.

Затраты на дезактивацию также в расчете на одного индивидуума в соответствии с предположением, обоснованным в работах [2; 7], оценим согласно следующему выражению:

$$Q(D, D_R) = C_e \cdot \ln \frac{D}{D_R} = C_e \cdot \ln f, \quad (5)$$

где C_e – среднедушевые (в расчете на одного жителя) затраты на дезактивацию с кратностью $f = e$.

С учетом выражений (1)–(5) вышеприведенные четыре критерия примут следующий вид:

$$B = \lambda \cdot \psi \cdot (D - D_R) - C_e \cdot \ln f, \quad (6)$$

$$Z = \lambda \cdot \psi \cdot D_R - C_e \cdot \ln f, \quad (7)$$

$$\Lambda = C_e \cdot \ln f / \lambda \cdot \psi \cdot (D - D_R), \quad (8)$$

$$V = \lambda \cdot \psi \cdot (D - D_R) / C_e \cdot \ln f. \quad (9)$$

Несложно убедиться, что критерии (6) и (7), как и критерии (8) и (9), попарно эквивалентны. Эквивалентность критериев (8) и (9) непосредственно вытекает из соотношения

$$\Lambda \cdot V = 1. \quad (10)$$

Эквивалентность критериев (6) и (7) можно показать, решая задачу безусловной оптимизации на максимум критерия B и минимум критерия Z . С учетом того, что

$$f = \frac{D}{D_R}, \text{ получим:}$$

$$\frac{dB}{dD_R} = \frac{dZ}{dD_R} = \lambda \cdot \psi - \frac{C_e}{D_R} = 0. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что оптимальное значение остаточной дозы облучения D_R^1 для дезактивации определяется как отношение среднедушевых затрат на эту меру вмешательства и стоимости усредненных лет проживания на загрязненной территории:

$$D_R^1 = \frac{C_e}{\lambda \cdot \psi}. \quad (12)$$

Согласно выражению (12) с ростом стоимости затрат на дезактивацию оптимальное значение остаточной после нее дозы облучения увеличивается, а с ростом стоимости года жизни и снижением интенсивности распада изотопов – уменьшается. При этом найденное решение не зависит ни от исходной дозы облучения, ни от кратности дезактивации.

Решая задачу (1), например, для критерия V , который с учетом выражений (2) и (5) имеет следующий вид:

$$V = \frac{\lambda \cdot \psi \cdot (D - D_R)}{C_e \cdot (\ln D - \ln D_R)}, \quad (13)$$

можно показать, что оптимальное значение остаточной после дезактивации дозы облучения D_R^1 оказывается равным исходной дозе D . Иными словами, в отсутствие дезактивации затраты на ее проведение на единицу стоимости предотвращенного ущерба являются минимальными (равными нулю), а стоимость предотвращенного ущерба на единицу затрат на дезактивацию – максимальной (стремится к бесконечности). Этот парадоксальный результат можно получить после подстановки в числитель уравнения (1), например, выражения (13). Используя правило дифференцирования дроби, после очевидных сокращений имеем:

$$\frac{D - D_R}{D_R} = \ln \frac{D}{D_R}. \quad (14)$$

$$\text{Учитывая, что } \frac{D}{D_R} = f, \text{ выражение (14)}$$

приводится к следующему виду:

$$f - \ln f = 1, \quad (15)$$

где неизвестной является кратность дезактивации f . Это уравнение имеет единственное решение $f = 1$, что соответствует условию $D = D_R$.

Полученный результат свидетельствует о том, что третий и четвертый критерии не адекватны содержательной постановке задачи безусловной оптимизации дезактивации. Представляется, что они могут быть использованы в решении подобных задач с ограничениями, например, на уровень за-

трат на дезактивацию, ее кратность и некоторых других.

В целом, сопоставляя рассмотренные критерии, следует признать, что их варианты, основанные на соотношениях затрат и выгод, связанных с вмешательством, в меньшей степени соответствуют постановке рассматриваемых оптимизационных задач по сравнению с их абсолютными аналогами, характеризующими пользу или издержки вмешательства.

Рассмотрим пример использования первого и второго критериев при решении задачи оптимизации дезактивации.

Предположим, что территория крупного города в результате чрезвычайной ситуации, связанной с утечкой радиации, оказалась загрязненной изотопом ^{137}Cs , годовой темп снижения мощности дозы излучения которого в естественной среде можно принять равным 0,06 [4]. В этом случае в соответствии с выражением (4) при продолжительности жизни индивидуума на загрязненной территории в течение 25 лет коэффициент накопления дозы ψ окажется равным приблизительно 13 годам. Согласно данным, представленным в работах [2; 4], для российского города среднестатистические затраты на дезактивацию с кратностью $f = e$ составляют примерно 4 000 долларов. Стоимость года жизни индивидуума примем равной 14 000 долларов, что примерно соответствует среднестатистическому ВВП в России за 2014 г. С учетом этих данных полученное оптимальное значение остаточной дозы облучения D_R^1 для первого и второго критериев должно составить приблизительно 22 мЗв/год при любом значении исходной дозы D . Из этого результата вытекает, что, например, при исходной дозе облучения $D = 30$ мЗв/год это оптимальное значение

будет достигнуто при кратности дезактивации $f \approx 1,36$; при исходной дозе $D = 50$ мЗв/год $f \approx 2,27$; при $D = 70$ мЗв/год $f \approx 3,18$ и т. д. Таким образом, при увеличении исходной дозы облучения оптимальное решение по остаточной дозе достигается путем повышения кратности дезактивации. Заметим, что при увеличении стоимости года жизни индивидуума оптимальное значение остаточной после дезактивации дозы облучения будет снижаться. При значениях этой стоимости на уровне 30–40 тыс. долларов, что соответствует среднестатистическому ВВП многих развитых стран, оптимальное значение остаточной дозы составит 7–10 мЗв/год. Этот результат свидетельствует о возможностях манипулирования решением рассмотренной задачи путем использования различных вариантов стоимости года жизни.

Вместе с тем при любом варианте полученные с использованием среднестатистического ВВП оценки оптимальных значений остаточной после дезактивации дозы облучения следует рассматривать как верхние пределы этого показателя, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, среднестатистический ВВП представляет собой нижний предел возможной стоимости года жизни индивидуума, что снижает оценку стоимости предотвращенного ущерба и, таким образом, завышает оптимальное значение остаточной дозы облучения. Во-вторых, на практике в величине предотвращенного ущерба должны учитываться и экономические потери, обусловленные нарушением режима жизнедеятельности на загрязненной территории, которые были предотвращены дезактивацией. В результате оптимальные оценки остаточной дозы облучения могут быть снижены до величины порядка 1–5 мЗв/год.

Список литературы

1. Арон Д. В., Тихомиров Н. П., Цуглевич В. Н. Анализ эффективности дезактивации территории в префектуре Фукусима на примере муниципалитета Тамура // Экономика природопользования. – 2015. – № 3. – С. 113–121.

2. Ильясов Д. Ф. Подходы к экономическому обоснованию нормативов радиационной безопасности при аварийных ситуациях // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2015. – № 2. – С. 168–173.
3. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) : пер с англ. / под общей ред. М. Ф. Киселёва и Н. К. Шандалы. – М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
4. Тихомиров Н. П., Арон Д. В. Методы обоснования рациональных стратегий обеспечения радиационной безопасности (при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации) // Экономика природопользования. – 2016. – № 4. – С. 75–84.
5. Тихомирова Т. М. Критический анализ методологии оценки и нормирования радиационной безопасности // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2012. – № 6. – С. 94–106.
6. Тихомирова Т. М., Гордеева В. И. К вопросу оценки рисков онкологической заболеваемости и смертности с учетом половозрастной структуры населения // Вопросы онкологии. – 2014. – Т. 60. – № 5. – С. 571–577.
7. Crik M. J. Derived Intervention Levels for Involving Countermeasures in the Management of Contaminated Agricultural Environment // Division of Nuclear Safety, IAEA. – Vienna, 2009.

References

1. Aron D. V., Tikhomirov N. P., Tsuglevich V. N. Analiz effektivnosti dezaktivatsii territorii v prefektуре Fukusima na primere munitsipaliteta Tamura [Analysis of Decontamination Effectiveness in Fukushima by the Example of Tamura Municipality]. *Ekonomika prirodnopol'zovaniya*, 2015, No. 3, pp. 113–121. (In Russ.).
2. Il'yasov D. F. Podkhody k ekonomicheskomu obosnovaniyu normativov radiatsionnoy bezopasnosti pri avariynnykh situatsiyakh [Approaches to the Economic Feasibility of Radiation Safety Standards in Emergency Situations]. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsia*, 2015, No. 2, pp. 168–173. (In Russ.).
3. Publikatsiya 103 Mezhdunarodnoy komissii po radiatsionnoy zashchite (MKRZ) [The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103], translated from English, edited by M. F. Kiselev and N. K. Shandala. Moscow, Izd. ООО ПКФ «Алана», 2009. (In Russ.).
4. Tikhomirov N. P., Aron D. V. Metody obosnovaniya ratsional'nykh strategiy obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti (pri chrezvychaynykh situatsiyakh s utechkoy radiatsii) [Methods of a Substantiation Rational Strategy for Ensuring Radiation Safety (in Emergency Situations with Radiation Leaks)]. *Ekonomika prirodnopol'zovaniya*, 2016, No. 4, pp. 75–84. (In Russ.).
5. Tikhomirova T. M. Kriticheskiy analiz metodologii otsenki i normirovaniya radiatsionnoy bezopasnosti [A Critical Analysis of the Methodology for the Assessment and Regulation of Radiation Safety]. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova*, 2012, No. 6, pp. 94–106. (In Russ.).
6. Tikhomirova T. M., Gordeeva V. I. K voprosu otsenki riskov onkologicheskoy zabelevalomosti i smertnosti s uchetom polovozrastnoy struktury naseleniya [On the Evaluation of the Risks of Cancer Incidence and Mortality According to Age-Specific Structure of the Population]. *Voprosy onkologii*, 2014, Vol. 60, No. 5, pp. 571–577. (In Russ.).
7. Crik M. J. Derived Intervention Levels for Involving Countermeasures in the Management of Contaminated Agricultural Environment. *Division of Nuclear Safety, IAEA*. Vienna, 2009.