

И. В. Матвеева

*Национальный авиационный университет, Институт экологической безопасности, Киев***АНАЛИЗ И ОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ КОНТРМЕР НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РАДИОЕМКОСТИ (ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ)**

В условиях существования возможности радионуклидных загрязнений от ядерных предприятий и установок принято разрабатывать и применять специальные защитные мероприятия, контрмеры для защиты персонала, населения и окружающей среды от попадания и влияния радионуклидов. В статье проведен анализ и оценка радиоэкологических контрмер на основе теории радиоемкости. Предложенные в статье принципы и методы ремедиации применимы для разных типов экосистем и для различных поллютантов.

*Ключевые слова:* контрмеры, дезактивация, фактор радиоемкости, надежность экосистем.

**Введение**

История аварий на ядерных предприятиях знает множество планируемых и реализованных защитных мероприятий, контрмер, которые с разной эффективностью могут применяться для ликвидации последствий аварий [1]. Большое разнообразие контрмер было реализовано в ходе аварии на ЧАЭС и ликвидации ее последствий. Основная задача, которая лежит в основе выбора контрмер и защитных мероприятий дезактивации, состоит в снижении индивидуальных доз для персонала и населения и уменьшении коллективных доз облучения населения [2, 3].

При этом практически нигде и никогда не оценивалось влияние контрмер на состояние экосистем. Ряд реализованных контрмер, например захоронение «Рыжего леса», механическое снятие верхнего слоя почвы, загрязненной радионуклидами, при помощи бульдозеров, скреперов или грейдеров, привели к полному разрушению лесной и почвенных экосистем. В этих местах образовывались пустыни, на которых потом потребовалось проводить высадку леса.

Поэтому важным и необходимым является проведение анализа и классификации основных контрмер на основе теории и моделей радиоемкости, чтобы оценить влияние защитных мероприятий на параметры радиоемкости экосистем и определить оптимальные схемы применения контрмер.

**Выбор и оценка эффективности контрмер на основе теории и моделей радиоемкости в типичных экосистемах**

**Контрмеры в агроэкосистемах.** В сельском хозяйстве применяется обширный спектр контрмер. В табл. 1 приведена система основных контрмер в сельскохозяйственном производстве и проведена оценка степени их влияния на вели-

чину индивидуальной дозы облучения (внешней и внутренней); на величину коэффициента дезактивации; на величину коллективной дозы для населения. В таблице приведена оценка степени влияния контрмер на величину фактора радиоемкости экосистемы.

В таблице не приведены данные о контрмерах по пылеподавлению и закреплению поверхности. Эти данные взяты из отчета по международному проекту ЕСР4-9 [7], полученные в с. Милячи в 1988 - 1993 гг., уже после начального периода аварии. Пылеподавление было тут уже не актуально и не проводилось на данной территории. В таблице добавлена оценка влияния контрмер на фактор радиоемкости, т.е. удерживающую способность компонентов экосистемы. Важно, чтобы контрмера не нарушила способность экосистемы к удержанию радионуклидов, и тогда  $F = 1$ . При этом не отмечено существенного снижения коллективной дозы. Использование фитодезактивации и специализированной машины для снятия дерна Turf-cutter оказывают влияние на величину коллективной дозы. Такие контрмеры, как внесение удобрений, глубокая вспашка, приводят к «разбавлению» радионуклидов в урожае, снижают величину индивидуальной дозы, при этом практически не влияя на величину коллективной дозы.

Известно, что величина коллективной дозы определяется суммой произведений величины индивидуальной дозы на число людей, получивших данную индивидуальную дозу облучения. Глубокая вспашка, например, снижает индивидуальную дозу для людей, использующих данное поле или пастбище, и тогда индивидуальная доза для людей может быть снижена, как минимум, в 2 раза. Но при этом количество радионуклидов в почве не уменьшается, а только разбавляется. Это может означать, что для людей, использующих данное поле или пастбище для получения

продуктов питания, количество радионуклидов, поступающих в организмы людей, будет накоплено не за 1 год, а за 4 - 5 лет, и поэтому итогов

вая коллективная доза мало изменится. Проявится только небольшое снижение за счет радиоактивного распада.

Таблица 1. Общие характеристики реализованных контрмер на примере с. Милячи (Дубровицкий район, Ровенская область, 1988 - 1993 гг.)

| Применяемая контрмера               | Площадь, га | Количество голов | Количество вещества | Коэффициент дезактивации $K_d$ | Фактор радиоемкости, $F$ |
|-------------------------------------|-------------|------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
| В коллективных хозяйствах           |             |                  |                     |                                |                          |
| Глубокая вспашка                    | 990         | -                | -                   | 1,5 - 2                        | 1                        |
| Внесение высоких норм удобрений     | 720         | -                | 360 т               | 2 - 2,5                        | 1                        |
| Известкование почв                  | 420         | -                | 1260 т              | 1,5 - 2,5                      | 1                        |
| Улучшение пастбищ                   | 250         | -                | 75 т                | 2,5 - 3                        | 1                        |
| Внесение навоза и сапропеля         | 440         | -                | 13200 т             | 1,7 - 1,9                      | 1                        |
| В частных хозяйствах                |             |                  |                     |                                |                          |
| Использование болюсов               | -           | 80               | 240 шт.             | 2,2 - 2,8                      | 1                        |
| Внесение в корм хумолита            | -           | 150              | 45 кг               | 1,5 - 1,9                      | 1                        |
| Внесение в корм феррацина           | -           | 50               | 7 кг                | 2 - 3                          | 1                        |
| Применение Turf-cutter на пастбищах | 0,5         | 3                | -                   | 18 - 20                        | 0,9                      |

Следует подчеркнуть, что широко применяемые в сельском хозяйстве защитные мероприятия, как правило, не изменяют (не ухудшают) качество агроэкосистемы и тем самым не снижают значений фактора радиоемкости (см. табл. 1). Исключение составляет применение специальной машины Turf-cutter для снятия верхнего слоя почвы, дерна. Снимая при помощи Turf-cutter 1 - 5 см почвы, теряется часть плодородного слоя, что вызывает некоторое снижение фактора радиоемкости почвенного раствора ( $F = 0,9$ ; часть радионуклидов удерживается в данном компоненте экосистемы). Опасным для экосистемы является механическое снятие плодородного слоя почвы 10 - 15 см с помощью бульдозера или другой тяжелой техники. Для условий Полесья это означает обнажение песков и практически полную утрату экосистемой почвенного плодородного слоя ( $F = 0,05$ ). В ситуации обнажения песка на промплощадке ЧАЭС потребовались специальные контрмеры по закреплению, пылеподавлению и восстановлению растительности [4].

Примененные в различных хозяйствах контрмеры характеризуются экологичностью и отсутствием заметного снижения радиоемкости агроэкосистем. Это означает, что используемые в сельскохозяйственном производстве контрмеры в основном не разрушают экосистемы и не ухудшают характеристики их радиоемкости [5 - 7].

**Контрмеры в лесных экосистемах.** В Украине контрмеры в лесных экосистемах не были

реализованы в большом объеме [2]. Из значительных контрмер можно выделить систему мероприятий захоронения «Рыжего леса». Но по сути оно включало ряд этапов: мониторинг до и после захоронения, гидроизоляцию глиной «ямы-котлована», куда был свален позднее срезанный танками и бульдозерами лес. Затем всю поверхность засыпали песком. Хотя и сейчас радиационный фон на месте захороненного «Рыжего леса» достигает 2 - 4 мР/ч.

Эта процедура привела к практически полному разрушению лесной экосистемы, и фактор ее радиоемкости упал почти до нуля. Наряду с этим временное захоронение радиоактивного леса под песчаной подушкой привело к снижению дозы внешнего облучения для персонала, занятого в ликвидации, но создало опасный долговременный источник радионуклидного загрязнения почвы и грунтовых вод. Это только «отодвинуло» во времени серьезную радиоэкологическую проблему.

Обсуждались и другие контрмеры для лесных экосистем, например механическое удаление подстилки, содержащей в лесных экосистемах до 90 % радиоактивности. Известно, что полное удаление лесной подстилки приводит к высыханию леса и со временем к гибели ( $F = 0$ ). Эту контрмеру можно использовать только в случае подготовки леса к полной вырубке и ликвидации. Экологически обоснованных, не нарушающих характеристики радиоемкости контрмер в лесных экосистемах пока не удавалось применять.

**Контрмеры в водных экосистемах.** Контрмеры в водных экосистемах были реализованы лишь в очень небольшой части [2, 3]. После аварии на ЧАЭС Киевское водохранилище практически превратилось в пруд-отстойник, где  $F = 0,8$  и донные отложения содержат до  $10^{-5}$  Ки/кг радионуклидов. При таком уровне радионуклидного загрязнения существует реальная угроза благополучию биоты бентоса водохранилища, поскольку превышены экологически допустимые уровни радионуклидного сброса и депонирования.

Из реализованных на водохранилище контрмер можно отметить попытку «прорезать» поперек водохранилища специальные «донные ловушки». Такие ловушки эффективно не сработали. И это понятно, потому что при этом не может быть увеличен фактор радиоемкости донных отложений, так как не меняется активная толщина ила и, конечно, не меняется коэффициент накопления ( $K_H$ ) радионуклидов илами. В зоне Чернобыльской аварии на малых реках в 1986 г. было построено около 100 фильтрующих дамб-запруд, но они не смогли уловить заметные количества радионуклидов из потока талых поверхностных вод ни в 1986 г., ни в 1987 г. Известно, что фильтрующие дамбы, которые были реализованы в 1986 г. в 30-километровой зоне, задержали только несколько десятков кюри и были не эффективны и дороги. Идея о том, чтобы заменить эти фильтрующие дамбы на удерживающие, опирается на известные процессы действия биопрудов отстойников на АЭС и других объектах. Если добиться того, чтобы на ручьях и водотоках эти пруды существовали долго, то большая часть радионуклидов удерживалась бы в донных отложениях, а сверху перетекала бы относительно чистая вода и заметный запас радионуклидов не попадал в реки (Уж, Днепр и т.д.) Это было бы немного лучше, чем просто оставить запасы радионуклидов на поверхности, где они будут подержаны поверхностному стоку.

#### **Выбор и оптимизация контрмер на основе моделей и теории радиоемкости экосистем различного типа**

**Континентальные экосистемы.** Эффективность построенных фильтрующих дамб в 10-километровой зоне ЧАЭС низкая потому, что подпор воды, создаваемый дамбами, снижает фактор радиоемкости почвы ( $F = 0,9$ ), а радиоемкость донных отложений составляет  $F = 0,7$ . При этом заметная часть радионуклидов из почвы переходит в водную фазу, а радиоемкость тела фильтрующей плотины слишком низка, чтобы задерживать заметное количество радионуклидов из потока поверхностных вод. Установлено, что фак-

тор радиоемкости таких фильтрующих дамб не превышает 0,1.

Разработанные модели оценки радиоемкости системы каскада Днепровских водоемов позволяют предложить создание каскадной системы прудов, которая в данной ситуации будет высокоэффективной контрмерой. Предлагается поверхностный водоток, ручей перекрыть системой из каскада трех небольших подпорных дамб. Предлагаемые дамбы должны быть невысокими, переливными, и после заполнения верхнего пруда вода переливается в следующий, а затем – в третий пруд. При медленном токе воды в системе фактор радиоемкости каждого из прудов не превышает 0,5 - 0,6. При этом, в соответствии с моделью радиоемкости каскада, общий фактор радиоемкости составит 0,8 - 0,9. Таким образом, данный каскад способен удержать в донных отложениях водоемов до 80 - 90 % радионуклидов, при этом коэффициент дезактивации или ремедиации ( $K_D$ ) составит 10. Если внести в эти пруды высокоактивные илы, то можно увеличить радиоемкость каскада до 0,99. Такая высокоэффективная система может быть заранее создана на опасных по стоку территориях или оперативно построена за короткий срок [3, 6].

Рассмотрим еще один пример типичной континентальной экосистемы – склоновая экосистема. Склоновая экосистема представляет систему последовательного типа, где сброс радионуклидов происходит поступательно из одного в другой элемент. Исследования на полигоне «Новоселки» в склоновой экосистеме на берегу р. Уж, состоящей из камер «лес» – «опушка» – «терраса» – «река», показали отчетливое концентрирование радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  на краю террасы. Это явление может быть положено в основу реальной контрмеры. Речь идет о создании на пути наиболее интенсивного стока радионуклидов специальной высокопродуктивной (по биомассе и выносу радионуклидов) террасы. При этом в почве террасы можно «уловить», а затем в обильной биомассе сконцентрировать (метод фитодезактивации) достаточно большое количество «стекающих» радионуклидов. Расчет динамики перераспределения радионуклидов в типичной склоновой экосистеме дает возможность создать высокопродуктивную террасу, где концентрируется более 60 - 70 % стока. Таким образом можно защитить реки и водоемы от чрезмерного сброса радионуклидов. Расчеты по модели радиоемкости склоновой экосистемы позволили нам подтвердить возможность и эффективность новой предлагаемой контрмеры [3].

Напомним, что эффективных контрмер по дезактивации леса пока не разработано. Высокая

радиоёмкость лесных экосистем ( $F = 0,90 - 0,97$ ) означает, что без разрушения лесной экосистемы (захоронение «Рыжего леса») трудно дезактивировать территорию. Отсюда следует, что экологическим наиболее приемлемым способом деконтаминации леса может служить система «перехвата» радионуклидов, которая поверхностный сток выводит из леса. Типичной является ситуация, когда радионуклиды из лесной экосистемы происходят в ручей или малую речку, вытекающую из лесного массива или протекающую рядом. В этом случае, как показали расчеты по моделям радиоёмкости, оптимальным на пути мак-

симального поверхностного стока радионуклидов может быть создание системы малых прудов. Это позволяет «сконцентрировать» радионуклиды в донных отложениях водоемов. Расчеты по моделям радиоёмкости такой системы показывают высокую эффективность данной защитной контрмеры [3, 6].

**Водные экосистемы.** Реализованные в ходе ликвидации аварии на ЧАЭС контрмеры водных экосистем были проанализированы по критериям их влияния на показатели радиоёмкости экосистем. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Контрмеры, реализованные водными экосистемами, оценка их эффективности и влияния на фактор радиоёмкости (консервативные оценки) [3]

| Контрмера   | Эффективность (экономия коллективной дозы, чел.-бэр)    | Влияние на фактор радиоёмкости  |
|---|---|---|
| Регулировка каскада р. Днепр весной и осенью 1987 г.  | Эффективна; экономия коллективной дозы 32 тыс. чел.-бэр | Сохраняет высокую радиоёмкость путем замедления стока радионуклидов ( $F = 0,8 - 0,9$ ) |
| Создание поперечных ям-ловушек по руслу Киевского водохранилища                                     | Неэффективна  | Влияния на фактор радиоёмкости не оказывает ( $F = 0,7$ )                               |
| Подпорная стена в почве для защиты р. Припять от дренажного стока радионуклидов из пруда-охладителя | Достаточно эффективна                                   | Повышает фактор радиоёмкости ( $F = 0,8$ )  |
| Сооружение защитной дамбы на Краснянской пойме р. Припять   | Высокоэффективна; экономит до 0,5 млн чел.-бэр в год    | Способствует повышению радиоёмкости путем создания режима запруды                       |

Оценка допустимого норматива на поливную воду дала значения в 7 Бк/л (Р. М. Алексахин). Кстати, поливной норматив всегда жестче, чем питьевой. В 1986 г. выполнить этот норматив было практически невозможно. Поэтому Государственным институтом проектирования водного хозяйства УССР было принято решение провести регулировку каскада в Киевском и других водохранилищах, так, чтобы минимизировать уровень радиоактивности сбрасываемой вниз по каскаду воды. По нашим оценкам это принесло экономию коллективной дозы в 32 тыс. чел.-бэр. В последующие сезоны орошения за счет захоронения в донных отложениях водохранилищ уровень радионуклидного загрязнения воды заметно упал и подобная регулировка не потребовалась. Хотя подобные проблемы возникали и в годы высоких уровней паводков.

Проведенный анализ эффективности реализованных контрмер водных экосистем (см. табл. 2) показывает их достаточно высокую эффективность. Эффективность контрмер тем выше, чем больше используется высокая радиоёмкость водных экосистем, в частности донных отложений

водохранилищ. Общий принцип выбора оптимальных контрмер для водных экосистем состоит в том, чтобы планируемая контрмера повышала фактор радиоёмкости водной экосистемы или хотя бы не снижала.

Таким образом, 30-километровая зона ЧАЭС представляют собой систему водосборных площадей, лугов, малых рек и, в конечном итоге, большую часть водосборной площади р. Днепр. Известно, что примерно 40 % стока радионуклидов в Днепро́вский каскад дает именно 30-километровая зона ЧАЭС.

**Ландшафтные экосистемы.** Типичными экосистемами, формирующими сток радионуклидов в р. Днепр, являются ландшафтные экосистемы параллельного типа, где реализуются сложные комбинированные варианты сброса радионуклидов. Анализ радиоёмкости ландшафтов следует начинать с классификации территории, с выделения мест, зон, концентрирования радионуклидов, где наилучшим способом могут быть реализованы различные контрмеры. Оценка величин факторов радиоёмкости для всех основных элементов может быть сделана через веро-

ятность удержания радионуклидов в этих элементах ландшафта [3].

Применение геоинформационных систем, ГИС-технологий, в Институте географии НАН Украины [4] позволило, на примере зоны отчуждения, определить территории, где происходит аккумуляция стока радионуклидов или их потеря. Такое исследование с применением теории радиоемкости экосистем позволило выделить в экосистеме элементы, где могут быть перспективно, эффективно и оптимально применяться конкретные контрмеры по ремедиации. При этом можно свести к минимуму объем применения контрмер (например, использование Turf-cutter) и экологические последствия. Показано, что на большей части территории зоны отчуждения применение контрмер неэффективно и даже вредно.

### Выводы

Контрмеры эффективны в экосистемах или их частях с наибольшим значением радиоемкости. Применение контрмер целесообразно при повышении значения фактора радиоемкости экосистемы или ее элементов.

Ландшафты 30-километровой зоны ЧАЭС представляют собой систему водосборных площадей, лугов, малых рек и, в конечном итоге, большую часть водосборной площади р. Днепр. Известно, что около 40 % стока радионуклидов в Днепровский каскад дает именно 30-километровая зона ЧАЭС.

Стратегия применения реальных контрмер может включать два основных пути: первый – определение зон аккумуляции радионуклидов в ландшафте и применение контрмер именно в этих зонах, где отмечены высокие значения факторов радиоемкости; второй – формирование ландшафтов с помощью ландшафтно-устроительных мероприятий таким образом, чтобы повысить радиоемкость в определенных частях ландшафта, где можно надолго захоронить радионуклиды (например, овраги, болота) либо эффективно использовать контрмеры. Учитывая эти обстоятельства, можно предложить оптимальную систему реабилитации загрязненных радионуклидами территорий, прежде всего почв. Речь снова идет об управлении радиоемкостью экосистем и ее повышении.

Гармонизация взаимоотношений природы и человека возможна лишь на пути четких реализаций положений экологической этики. Учет всех возможных последствий влияния загрязнителей на биосферу, теоретических и практических последствий реализации защитных контрмер с акцентом на экоэтические взаимоотношения биосферы и человечества позволяют оптимально выстроить их гармонические связи [8].

Предложенные в статье принципы и методы ремедиации применимы для разных экосистем и для различных типов загрязнителей (физической, химической и биологической природы).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гродзинский Д.М., Кутлахмедов Ю.А., Михеев А.Н. и др. Антропогенная радионуклидная аномалия и растения. - К.: Лыбидь, 1991. - 160 с.
2. Кутлахмедов Ю.А., Корогодина В.И., Кольтовер В.К. Основы радиоэкологии. - К.: Вища шк., 2003. - 320 с.
3. Кутлахмедов Ю.А., Матвеева И.В., Родина В.В. Надежность экологических систем. Теория, модели и практические результаты. - Саарбрюккен: Palmarium academic publishing, 2013. - 318 с.
4. Давыдчук В.С., Зарудная Р.Ф., Михели С.В. и др. Ландшафты Чернобыльской зоны и их оценка по условиям миграции радионуклидов. - К.: Наук. думка, 1994. - 112 с.
5. Перепелятников Г.П. Основы общей радиоэкологии. - К.: Аттика, 2012. - 440 с.
6. Strategy of Desactivation. Final Report project ECP-4. - Brussels, 1996. - 320 p.
7. Fluxes of radionuclides in rural communities in Russia, Ukraine and Belarus. ECP- 9. - Brussels, 1998. - 258 p.
8. Гюрюканов А.Н., Федоров В.М. Тимофеев-Ресовский Н.В. Биосферные раздумья. - М., 1996. - 368 с.

### І. В. Матвєєва

*Національний авіаційний університет, Інститут екологічної безпеки, Київ*

### АНАЛІЗ І ОЦІНКА РАДІОЕКОЛОГІЧНИХ КОНТРЗАХОДІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РАДІОЄМНОСТІ (ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ)

В умовах існування можливості радіонуклідних забруднень від ядерних підприємств і установок прийнято розробляти і застосовувати спеціальні захисні заходи, контрзаходи, для захисту персоналу, населення та навколишнього середовища від попадання і впливу радіонуклідів. У статті проведено аналіз і оцінку радіоекологічних контрзаходів на основі теорії радіоемності. Запропоновані в статті принципи та методи ремедиації можна застосовувати для різних типів екосистем і для різних поллютантів.

*Ключові слова:* контрзаходи, дезактивація, фактор радіоемності, надійність екосистем.

I. V. Matveeva

*National Aviation University, Institute for Environmental Security, Kyiv***ANALYSIS AND EVALUATION RADIOECOLOGICAL COUNTERMEASURES  
BASED ON RADIOCAPACITY THEORY (PROBLEMS AND PROSPECTS)**

In care of existence of possible radioactive contamination from nuclear enterprises and equipment it is usual to develop and apply special protective measures, countermeasures to protect workers, population and the environment from radionuclides impact. Analysis and assessment of radioecological countermeasures based on the radiocapacity theory have been realized in this article. The principles and methods of remediation proposed in the article can be used for different types of ecosystems and for different pollutants.

*Keywords:* countermeasures, decontamination, radiocapacity factor, ecosystems reliability.

## REFERENCES

1. *Grodzinskij D.M., Kutlakhmedov Yu.A., Mikheev A.N. et al.* Anthropogenic radionuclide anomaly and plants. - Kyiv: Lybid, 1991. - 160 p. (Rus)
2. *Kutlakhmedov Yu.A., Korogodin V.I., Koltover V.K.* Basics of radioecology. - Kyiv: Vyshcha shkola, 2003. - 320 p. (Rus)
3. *Kutlakhmedov Yu.A., Matveeva I.V., Rodina V.V.* Reliability of ecological systems. Theory, models and practical results. - Saarbruecken: Palmarium academic publishing, 2013. - 318 p. (Rus)
4. *Davydchuk V.S., Zarudnaya R.F., Mikheli S.V. et al.* Landscapes of the Chernobyl zone and their evaluation under the terms of the radionuclide migration. - Kyiv: Naukova dumka, 1994. - 112 p. (Rus)
5. *Perepelyatnikov G.P.* Basics of general radioecology. - Kyiv: Attika, 2012. - 440 p. (Rus)
6. *Strategy of Desactivation.* Final Report project ECP-4. - Brussels, 1996. - 320 p.
7. *Fluxes of radionuclides in rural communities in Russia, Ukraine and Belarus.* ECP- 9. - Brussels, 1998. - 258 p.
8. *Tyuryukanov A.N., Fedorov V.M. Timofeev-Resovskij N.V.* Biosphere reflection. - Moskva, 1996. - 368 p. (Rus)

Надійшла 12.06.2014  
Received 12.06.2014