РАЗДЕЛ 2**НАУЧНЫЕ СТАТЬИ**

DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-4-7-21

Минимизация радиационных рисков персонала в ситуациях планируемого облучения на примере выполнения работ по ликвидации объектов ядерного наследия

Иванов В.К.¹, Горский А.И.¹, Корело А.М.¹, Максютлов М.А.¹, Туманов К.А.¹,
Самойлов А.А.², Бирюков Д.В.², Ильясов Д.Ф.²

¹ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск;

² Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), Москва

Разработана модель оптимизации (минимизации) пожизненных радиационных рисков смерти при проведении радиационно опасных работ путём оптимального размещения персонала с накопленными дозами и дозами потенциального облучения на месте работ. Для оптимизации риска использовано решение задачи целочисленного линейного программирования – задачи о назначениях. Разработанная модель использована для минимизации интегрального (для всей рабочей группы) радиационного пожизненного риска смерти от радиогенных раков при проведении радиационно опасных работ по извлечению радиоактивных отходов из пункта хранения твёрдых радиоактивных отходов Белоярской АЭС в рамках ФЦП ЯРБ-2. Показана возможность существенного сокращения пожизненных радиационных рисков для этого мероприятия (в 5-7 раз) при реализации разработанной процедуры оптимизации радиационной защиты. Для решения поставленной задачи использованы современные модели радиационных рисков, подходы для их оптимизации, необходимые для оценки показателей радиологической опасности. Задание соответствующих ограничений делает подход гибким инструментом для решения задач оптимизации при проведении радиационно опасных работ практически для любого предприятия и регламента работ. Представляется полезным использовать этот подход для планирования мероприятий при реализации ФЦП ЯРБ-2.

Ключевые слова: *минимизация радиационного риска, ядерное наследие, твёрдые радиоактивные отходы, вариация персонала, радиационная защита, задача о назначениях, целочисленное линейное программирование, модель риска НКДАР ООН, симплекс-метод, Белоярская АЭС.*

Введение

В 2015 г. Правительством Российской Федерации была утверждена Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2030 года» (далее – ФЦП ЯРБ-2). Основной целью программы является комплексное обеспечение ядерной и радиационной безопасности на территории Российской Федерации путём решения первоочередных проблем ядерного наследия и создания инфраструктуры, необходимой для перевода объектов ядерного наследия в безопасное состояние с их последующей ликвидацией. Объём планируемых работ по объектам наследия возрос более чем в 2 раза по

Иванов В.К. – Председатель РНКРЗ, зам. директора по научн. работе, чл.-корр. РАН; Горский А.И.* – вед. научн. сотр., к.т.н.; Корело А.М. – ст. научн. сотр.; Максютлов М.А. – зав. лаб., к.т.н.; Туманов К.А. – зав. лаб., к.б.н. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России; Самойлов А.А. – гл. специалист; Бирюков Д.В. – мл. научн. сотр.; Ильясов Д.Ф. – научн. сотр. ИБРАЭ РАН.

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-32-60; e-mail: nrer@obninsk.com.

сравнению с ФЦП ЯРБ. Это ставит задачу по повышению эффективности работ при безусловном выполнении действующих в стране норм радиационной безопасности.

Согласно оценке [1] примерно для двух тысяч объектов наследия в той или иной форме потребуются проведение оценок потенциальной опасности для задач среднесрочного (10 лет) и долгосрочного (до 50 лет) планирования работ по выводу из эксплуатации. Примерно для 15% объектов, на которых предполагается проведение работ в рамках ФЦП ЯРБ-2, необходимо проведение мониторинга снижения потенциальной опасности по мере реализации мероприятий программы с подготовкой рекомендаций по обоснованию достаточности реализуемых мер или необходимости корректирующих действий по темпам работ или их содержанию.

В последних публикациях МКРЗ и НКДАР ООН приводятся новые технологии оценки радиационных рисков, полученные за последние годы в результате выполнения крупномасштабных эпидемиологических исследований (Хиросима-Нагасаки, Чернобыль, Семипалатинск и др.). Эти технологии позволяют дать объективную прогностическую оценку индивидуального радиационного риска при выполнении работ по ликвидации ядерного наследия с учётом накопленных ранее и потенциальных лучевых нагрузок и могут быть использованы для минимизации радиационных рисков.

В данной работе решается задача минимизации радиационных рисков при планировании работ по ликвидации ядерного наследия. Под радиационным риском будем рассматривать пожизненный атрибутивный (обусловленный облучением) риск смерти от радиогенных раков. Задача будет решаться путём допустимой регламентом вариации кадрового состава предприятия по различным участкам работ с различными дозовыми нагрузками.

Материалы и методы

Сформулируем задачу следующим образом: имеется N работников с известной динамикой годовых доз с начала работы на предприятии, из которых n работников будут направлены в соответствии с регламентом работ на m операций, с известными потенциальными дозовыми нагрузками. Каждая операция требует определённого количества участников из n работников, и каждый работник может быть направлен на место работ только один раз. Как будет показано в дальнейшем, это ограничение не является строгим. Требуется распределить работников по местам работ таким образом, чтобы радиационный пожизненный риск от накопленной и потенциальной дозы был минимальным.

В сформулированном виде данная задача относится к известной задаче о назначениях, решаемой методами целочисленного программирования (оптимизации). Если $n=m$ (сумма работников по рядам матрицы рисков равна сумме по колонкам), то задача называется сбалансированной (замкнутой), если $n \neq m$ – не сбалансированной (открытой) с недостатком или избытком рабочих мест или работников. Открытую задачу можно свести к замкнутой, добавив фиктивных недостающих рабочих или недостающие рабочие места в ограничения задачи и задать нулевые значения рисков для них в матрице рисков.

Решение задач дискретной оптимизации связано с определёнными принципиальными трудностями. Полный перебор точек допустимого множества, отвечающего заданным ограничениям, как правило, неосуществим вследствие большого объёма вычислений, где рост числа вычислений имеет экспоненциальный характер. Вследствие дискретности для оценки допустимого множества неприменимы многие подходы, разработанные в математическом программи-

ровании, движение по направлению градиента, переход из одной вершины многогранного множества в другую и т.д.

Проиллюстрируем вычислительные трудности простым примером. Допустим, имеем 5 рабочих, которых надо направить на 5 мест работ. Допустимое множество решений X состоит из $5!=120$ перестановок, при 10 рабочих $10!=3,629$ млн перестановок, это при условии, что рабочего можно отправить только на одно место. При множестве из векторов x , в которых рабочий может быть распределён более чем на одну работу, при общей численности 5 человек множество X будет содержать $5^5=3125$ решений, а для 10 человек – 10^{10} решений.

Математическая модель задачи

Математическую модель рассматриваемой задачи можно представить в виде:

$$\text{Min } (f(X)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} \cdot (RC_{i,j} + R_{i,j}), \quad (1)$$

где $x_{i,j}$ – дихотомная переменная, принимающая значение 1, если сотрудник j посылается на этап работ i или 0 в противном случае; n – число работников, занятых в работах; m – число рабочих мест или операций (этапов работ); $R_{i,j}$ – потенциальный пожизненный атрибутивный риск, который может получить j -ый работник на i -ом этапе работ; $RC_{i,j}$ – атрибутивный риск за счёт хронического облучения за время предыдущей работы на предприятии.

Ограничения для данной задачи будут иметь вид:

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = b_i, \text{ где } b_i - \text{число работников, задействованных на этапе } i, \sum_i b_i = n.$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i,j} = 1, \text{ это ограничение означает, что работник привлекается к работе только один раз.}$$

$$X \geq 0.$$

Данные ограничения сводят задачу к целочисленному линейному программированию.

Ограничения могут быть модифицированы, например, в соответствии с регламентом работ, работника j , определённой квалификации, можно детерминировано направить на участок i , задав ограничение $x_{i,j}=1$.

Минимизацию целевой функции (1) можно реализовать, используя известные методы целочисленного линейного программирования, такие как венгерский метод [2], метод ветвей и границ [3], или методы, реализованные в программных пакетах Mathcad [4] или MATLAB [5], где для решения задач целочисленной оптимизации используется комбинация симплекс-метода [6] и метода ветвей и границ.

Симплекс-метод – алгоритм решения оптимизационной задачи линейного программирования путём перебора вершин выпуклого многогранника в многомерном пространстве. Сущность метода: построение базисных решений, на которых монотонно убывает линейный функционал, при заданных ограничениях. Метод ветвей и границ – общий алгоритмический метод для нахождения оптимальных решений различных задач оптимизации, особенно дискретной и комбинаторной оптимизации. По существу метод является вариацией полного перебора с отсевом подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных решений.

Расчёт радиационных рисков

Расчёт радиационных рисков можно провести с использованием моделей риска МКРЗ (Публикация 103) [7] или НКДАР ООН (2008) [8]. Выбор моделей не имеет принципиального значения, так как они дают близкие результаты. Атрибутивный пожизненный риск смертности от радиогенных раков оценим с использованием аддитивной модели риска НКДАР ООН (2008) [8].

Модель избыточного абсолютного риска (приращение к годовой спонтанной интенсивности смерти обусловленное облучением) для солидных раков в модели [8] имеет вид:

$$EAR(d, a, e) = \alpha \cdot d \cdot \exp(k_1 \cdot \ln(a - e) + k_2 \cdot \ln(a)), \quad (2)$$

где d – доза облучения; a – достигнутый возраст; e – возраст при облучении; α , k_1 , k_2 – коэффициенты модели.

Для лейкемии:

$$EARL(d, a, e, s) = \alpha \cdot (d + \frac{\beta}{\alpha} \cdot d^2) \cdot \exp(k_1 \cdot 1_{s=\text{жен}} + k_2 \cdot \ln(a - e)), \quad (3)$$

где d – доза облучения; a – достигнутый возраст; e – возраст при облучении; s – пол; α , β , k_1 , k_2 – коэффициенты модели.

Коэффициенты моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты моделей

Коэффициент	$\alpha \cdot 3\text{в}^{-1} \cdot \text{а}^{-1}$	$\beta/\alpha \cdot 3\text{в}^{-1}$	k_1	k_2
Радиогенные солидные раки (смертность)				
Абсолютный риск	$1,128 \cdot 10^{-8}$	-	0,659	2,357
Радиогенные лейкозы (смертность)				
Абсолютный риск	$7,516 \cdot 10^{-4}$	1,034	-0,525	-0,614

Приведённые модели риска не учитывают конкуренции рисков смерти в реальной популяции, вероятности умереть от других причин, не связанных с облучением. Конкуренция рисков уменьшает вероятность смерти от радиогенных раков. Учёт конкуренции рисков производится с использованием функции дожития, вероятности избежать смерти за определённый период наблюдения. Функция дожития $S(e, a)$ от возраста e до возраста a рассчитывается по формуле:

$$S(e, a) = \exp\left(-\int_e^a \lambda(u) du\right), \quad (4)$$

где $\lambda(u)$ – региональные или национальные показатели смертности от всех причин в возрасте u .

Отметим, что в общем случае функция дожития зависит и от дозы (смерть от радиогенных раков), но так как дозы при рассмотрении задач радиационной защиты, как правило, невелики (единицы или десятки мЗв), эффектом влияния облучения на функцию дожития на практике можно пренебречь.

Тогда атрибутивный индивидуальный пожизненный риск смерти от радиогенных раков для человека, облучённого в возрасте e , годовой дозой планируемого облучения d – $LAR(d, e)$, определяется из уравнения:

$$LAR(d, e) = \sum_{k=e+LP}^{u \max} (EAR(d, k, e) + EARL(d, k, e, s)) \cdot S(e, k). \quad (5)$$

В уравнении (5) $u \max=100$ – принятый предельный возраст дожития, LP – минимальный латентный период в индукции радиогенных раков, в контексте данной работы это период времени с момента облучения до момента клинических проявлений заболевания, для солидных раков принята величина $LP=10$, для лейкозов – $LP=2$ годам.

Риск потенциального облучения R в целевой функции (1) определяют по формуле (5), а риск RC от хронического облучения – суммированием пожизненных рисков от годовых доз с начала работ под облучением.

Программирование, расчёты рисков и их оптимизация в данной задаче реализованы при помощи лицензионного пакета MathCad 15 [4].

Практическая реализация метода

Выполним оптимизацию коллективного пожизненного риска смерти (атрибутивного риска) от радиогенных раков при проведении радиационно опасных работ по извлечению радиоактивных отходов (РАО) из пункта хранения твёрдых радиоактивных отходов (ТРО) «ХСО-1» Белоярской АЭС в рамках ФЦП ЯРБ-2 с использованием приведённого подхода для представленных сценариев облучения («ХСО-1» – хранилище сухих отходов 1 очереди).

Пункт хранения ТРО «ХСО-1» представляет собой железобетонное отдельно стоящее приповерхностное сооружение (заглублено в грунт на 1,5-3 м), размером 131,23×23,2 м. Хранилище разделено на отсеки, облицованные нержавеющей сталью, каждый из которых имеет загрузочный люк. Хранение осуществляется навалом, без сортировки и в некондиционированном виде. Начало эксплуатации – 1964 г. В настоящее время объём накопленных РАО составляет ~10000 м³ (в том числе более 100 м³ высокоактивных отходов (ВАО)). Основные дозообразующие радионуклиды: ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn.

В рамках извлечения РАО из пункта хранения ТРО «ХСО-1» Белоярской АЭС рассмотрим два варианта проведения работ. В качестве варианта 1 рассмотрим сценарий, предполагающий извлечение и полную переработку РАО. Вариант 2 предполагает проведение сортировки РАО перед этапом переработки с целью разделения отходов по категориям активности, в том числе выделения отходов, не относящихся к категории РАО за счёт радиоактивного распада в течение срока хранения. Предполагаемые сценарии могут быть условно разбиты на следующие укрупненные этапы работ.

Сценарий 1:

- 1) Извлечение РАО из пункта хранения.
- 2) Переработка извлечённых РАО на площадке объекта.

Сценарий 2:

- 1) Извлечение РАО из пункта хранения.
- 2) Проведение сортировки РАО, извлечённых из пункта хранения.
- 3) Переработка РАО на площадке объекта.

Оценку дозозатрат проводили на основе данных, полученных в процессе реализации мероприятий по ликвидации хранилищ РАО, расположенных на территории НИЦ «Курчатовский институт». По результатам работ средняя индивидуальная годовая доза при извлечении и упаковке низкоактивных отходов составила 1,6 мЗв/год, при извлечении и упаковке высокоактивных отходов – 3,14 мЗв/год. Незначительное увеличение средней индивидуальной годовой дозы при переходе от низкоактивных отходов к высокоактивным объясняется расширенным применением робототехники при работе с ВАО.

Общая среднесписочная численность персонала, задействованного в проведении работ по пункту хранения ТРО «ХСО-1», составляет 25 человек.

Результаты оценки дозозатрат для двух сценариев для каждого этапа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка эффективных коллективных доз облучения персонала при проведении работ по извлечению РАО

№	Наименование работ	Объём РАО, м ³	Удельные дозозатраты, чел.-мЗв/м ³	Дозозатраты по этапу работ, чел.-мЗв	Кол-во человек (из них женщин)
Сценарий 1					
1	Извлечение РАО из пункта хранения	11800	$8,6 \cdot 10^{-3}$	100,7	10
2	Переработка РАО на площадке объекта	11800	$1,5 \cdot 10^{-3}$	17,8	15 (4)
Сценарий 2					
1	Извлечение РАО из пункта хранения	11800	$8,6 \cdot 10^{-3}$	100,7	10
2	Проведение сортировки РАО, извлечённых из пункта хранения	11800	$1,5 \cdot 10^{-3}$	17,8	8 (2)
3	Переработка РАО на площадке объекта	~11000	$1,5 \cdot 10^{-3}$	16,3	7 (2)

Введение сортировки отходов в рамках сценария 2 позволит достичь снижения затрат на обращение с РАО за счёт сокращения объёма РАО класса 4 ($\sim 1000 \text{ м}^3$). В этом случае, снижение затрат на обращение с РАО только на захоронение отходов составит порядка 100 млн рублей. Итоговая экономия средств будет выше, поскольку дополнительно будут исключены затраты на кондиционирование РАО, транспортировку к пункту захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и их хранение до передачи ФГУП «НО РАО» на захоронение. В то время как затраты на организацию модуля по сортировке РАО могут составлять от 0,3 до 12 млн рублей в зависимости от конфигурации необходимого оборудования.

По данным системы АРМИР [9], на начало 2017 г. на Белоярской АЭС на индивидуальном дозиметрическом контроле состояло 2865 человек, из них 683 женщины. В работах по извлечению РАО из пункта хранения ТРО «ХСО-1», согласно представленным сценариям, предполагается использовать группу, состоящую из 25 человек, 21-го мужчины и 4-х женщин. Списочный состав группы пока неизвестен. Для формирования группы используется совокупность специалистов, возрастной состав которой аналогичен возрастному составу персонала Белоярской АЭС (рис. 1).

Рис. 1. Возрастное распределение персонала Белоярской АЭС в 2016 г.

Предположим, что известен ориентировочный расширенный состав сотрудников Белоярской АЭС, которые могут принять участие в работах по извлечению РАО из пункта хранения ТРО «ХСО-1», численностью 50 мужчин и 20 женщин.

Для моделирования данного сценария сделаем случайные выборки среди персонала АЭС, согласно выбранной численности расширенных групп, и произведём для них оптимизацию (минимизацию) радиационного риска при проведении указанных работ, согласно представленным сценариям облучения. Каждый человек в выборках имеет уникальный идентификационный номер.

Возрастное распределение для этих выборок приведено на рис. 2.

Рис. 2. Возрастные распределения в случайных выборках численностью 50 человек для мужчин и 20 человек – для женщин.

Результаты оптимизации риска

Рассмотрим результаты оптимизации рисков согласно представленным сценариям облучения.

Сценарий облучения 1. Алгоритм оптимизации сформировал группу мужчин (21 человек из 50) и женщин (4 из 20) с минимальным групповым интегральным пожизненным риском.

Фрагмент таблицы назначений на места работ после оптимизации для обоих полов приведён на рис. 3. Верхняя строка – идентификационный номер человека, последующие строки – этапы работы (строка 2 – 1 этап, строка 3 – второй этап), 1 в таблице означает, что работник с соответствующим номером направляется на соответствующий этап, 0 – нет. Для данной выборки на 1 этап назначаются мужчины с номерами 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 38, 45, на 2 этап – мужчины с номерами 16, 18, 31, 34, 37, 39, 41, 42, 43, 44, 47 и женщины 2, 4, 6, 12.

Мужчины												Женщины													
sol=		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	sol =		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0		0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	...
	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	...		0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	...

Рис. 3. Фрагмент таблицы назначений на этапы работ.

На рис. 4 в соответствии с рис. 3 приведён фрагмент таблицы индивидуальных интегральных пожизненных радиационных рисков на 10000 человек.

Мужчины												Женщины										
R =	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		R =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	2.01	1.1	1.89	0	0.81	0	1.02	0	0	0		0	0	0	1.09	0	1.64	0	1.64	0	0
	1	0	0	0	0	0	0.36	0	0.45	0	...		0	0	0	1.09	0	1.64	0	1.64	0	...

Рис. 4. Фрагмент таблицы с индивидуальными рисками, нормированными на 10000 человек.

Для оценки максимального эффекта оптимизации риска определим максимум и минимум функционала (1) и их отношение (максимальный эффект оптимизации). Результаты оценки этих параметров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценки интегральных радиационных рисков на 10000 человек при облучении по сценарию 1

	Мужчины	Женщины
Максимальный риск	146,30	30,32
Минимальный риск	20,79	5,56
Максимальный эффект оптимизации	7,03	5,45

Как следует из табл. 3, вследствие оптимизации риск уменьшается в 7 раз для мужчин и 5,5 раз для женщин по сравнению с самым неоптимальным выбором.

Рассмотрим структурный портрет сформированных групп минимального риска для работников по сценарию 1. В табл. 4 приведены основные средние характеристики сформированных групп минимального риска.

Таблица 4

Основные характеристики сформированных групп минимального риска

	Мужчины		Женщины	
	1 этап	2 этап	1 этап	2 этап
Средний возраст	53,3	38,0	-	60,25
Средний риск потенциального облучения на 10000 человек	1,61	0,39	-	1,39
Средний интегральный риск на 10000 человек	1,65	0,39	-	1,39

Алгоритм оптимизации «направил» на первый этап, где доза максимальна, работников с большим возрастом в соответствии с моделью радиационного риска, где относительный риск уменьшается с увеличением возраста при облучении (рис. 5).

Рис. 5. Распределение работников в группе минимального риска по возрасту.

На рис. 6 представлено распределение персонала по индивидуальным рискам на 10000 человек от потенциального облучения.

Рис. 6. Распределение персонала в группе минимального риска по индивидуальным рискам потенциального облучения, нормированным на 10000 человек.

Следует отметить, что, несмотря на достаточно большую годовую дозу 10 мЗв, программа оптимизации риска сформировала группу, в которой только 1 человек (мужчина, риск $2,19 \cdot 10^{-4}$) незначительно превысил норму риска при потенциальном облучении ($2 \cdot 10^{-4}$). В принципе этот человек (*j*) может быть исключён из группы для работы на первом этапе путём наложения ограничения $x_{1,j}=0$. На рис. 7 представлено распределение работников группы минимального риска по интегральному риску от накопленной дозы и дозы потенциального облучения.

Рис. 7. Распределение персонала в группе минимального риска по интегральным рискам, нормированным на 10000 человек.

Из рис. 7 следует, что основной вклад в интегральный риск для мужчин даёт первый этап в соответствии с большей дозой. Сравнивая значения рисков на рис. 6 и 7 для женщин, можно сделать вывод, что алгоритм выбрал из всего списка женщин, которые не имели накопленных доз.

Для сравнения рисков для представленных сценариев облучения сделаем оценку интегрального риска при сценарии 1 для всей группы. Как следует из табл. 3, риск равен $26,35 \cdot 10^{-4}$.

Сценарий облучения 2. Рассмотрим результаты оптимизации рисков по сценарию 2 (табл. 1). Для сравнения рисков используем тот же списочный состав, который был сформирован для сценария 1.

Результаты оптимизации рисков по сценарию облучения 2 приведены на рис. 8-12 и в табл. 5, 6. Формат и описание таблиц и рисунков идентичны сценарию 1.

Мужчины											
sol =	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	...

Женщины											
sol =	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	...
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

Рис. 8. Фрагмент таблицы назначений на этапы работ.

Мужчины											
R =	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0	2.01	1.1	1.89	0	0.81	0	1.02	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0.45	0	0
	2	0	0	0	0	0	0.69	0	0	0	...

Женщины											
R =	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
	0	0	0	0	0	0.18	0.33	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	...
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

Рис. 9. Фрагмент таблицы с индивидуальными рисками, нормированными на 10000 человек.

Таблица 5

Оценки интегральных радиационных рисков на 10000 человек при облучении по сценарию 2

	Мужчины	Женщины
Максимальный риск	147,61	119,47
Минимальный риск	22,37	1,09
Максимальный эффект оптимизации	6,60	109,66

Таблица 6

Основные характеристики сформированных групп минимального риска (сценарий 2)

	Мужчины			Женщины	
	1 этап	2 этап	3 этап	2 этап	3 этап
Средний возраст	53,3	35,5	41,0	54,5	56,5
Средний потенциальный риск на 10000 человек	1,61	0,43	0,66	0,25	0,29
Средний интегральный риск на 10000 человек	1,65	0,43	0,66	0,26	0,29

Рис. 10. Распределение работников в группе минимального риска по возрасту (сценарий 2).

Структура групп минимального риска приведена на рис. 11, 12.

Рис. 11. Распределение персонала в группе минимального риска по индивидуальным рискам потенциального облучения, нормированным на 10000 человек.

Рис. 12. Распределение персонала в группе минимального риска по интегральным рискам, нормированным на 10000 человек.

Суммарный риск (сценарий 2) для всей группы равен 23,46 на 10000 человек.

Интегральные групповые радиационные риски, нормированные на 10000 человек, при обоих сценариях близки и равны 26,35 для сценария облучения 1 и 23,46 для сценария 2.

Величина эффекта оптимизации зависит от численности предварительного списка. Выберем случайно список из 50 человек (мужчин), зафиксируем его, и будем постепенно уменьшать случайным образом численность этого списка.

На рис. 13 приведена зависимость максимального эффекта оптимизации от численности списка мужчин. Отметим, что даже при детерминированной численности списка 21 человек (число мужчин на работах по сценариям 1 и 2) оптимизация возможна и величина эффекта больше единицы и равна 1,3.

Рис. 13. Величина эффекта оптимизации в зависимости от численности списка потенциальных работников (мужчины).

Анализ результатов расчётов радиационных рисков позволяет заключить, что предложенный подход к их оптимизации предоставляет возможность реализации сценария работ с сортировкой РАО со снижением радиационного риска по сравнению со сценарием без сортировки (без оптимизации риска).

Основные выводы

1. Разработан подход, минимизирующий радиационные риски персонала в ситуациях планируемого облучения при проведении работ по ликвидации объектов ядерного наследия в рамках ФЦП ЯРБ-2. Подход использует методы целочисленной оптимизации (программирования) посредством вариации имеющегося кадрового состава предприятия по рабочим местам в соответствии с регламентом мероприятий и профессиональной ориентацией.

2. Разработанный подход использован для минимизации интегрального (для всей рабочей группы) радиационного риска при проведении радиационно опасных работ по извлечению РАО из пункта хранения ТРО «ХСО-1» Белоярской АЭС в рамках ФЦП ЯРБ-2. Показана возможность существенного сокращения (в 5-7 раз) пожизненных радиационных рисков для двух вариантов планирования этого мероприятия.

3. Сценарий 2 с сортировкой РАО перед этапом переработки с целью разделения отходов по категориям активности и оптимизацией риска позволяет снизить стоимость работ по переработке и захоронению РАО и радиационный риск (по сравнению со сценарием 1 без оптимизации риска).

4. Задание соответствующих ограничений делает подход гибким инструментом для решения задач оптимизации при проведении радиационно опасных работ практически для любого предприятия и регламента работ. Представляется разумным использовать этот подход для планирования мероприятий при реализации ФЦП ЯРБ-2.

Литература

1. **Абрамов А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Кудрявцев Е.Г., Большов Л.А., Линге И.И., Абалкина И.Л., Бирюков Д.В., Ведерникова М.В., Хамаза А.А., Шарафутдинов Р.Б., Бочкарев В.В.** К вопросу оценки объёма ядерного наследия в атомной промышленности и на иных объектах мирного использования атомной энергии в России //Ядерная и радиационная безопасность. 2014. № 3 (73). С. 3-13.
2. **Kuhn H.W.** The Hungarian method for the assignment problem //Naval Research Logistics Quarterly. 1955. V. 2. P. 83-97.
3. **Land A.H., Doig A.G.** An automatic method of solving discrete programming problems //Econometrica. 1960. V. 28, N 3. P. 497-520.
4. Mathcad. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ptc.ru.com/engineering-math-software/mathcad> (дата обращения 4.10.2017).
5. **Дьяконов В.П.** MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Библиотека профессионала. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.
6. **Таха Хэмди А.** Глава 3. Симплекс-метод //Введение в исследование операций, 7-е изд. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. С. 95-141.
7. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 2-4.
8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report. New York: United Nations, 2008.
9. **Иванов В.К., Корело А.М., Панфилов А.П., Райков С.В.** АРМИР: система оптимизации радиологической защиты персонала. М.: Изд-во «Перо», 2014. 302 с.

**Minimization of radiation risks from planned occupational exposure
as in the case of nuclear legacy facilities liquidation**

**Ivanov V.K.¹, Gorski A.I.¹, Korelo A.M.¹, Maksoutov M.A.¹, Tumanov K.A.¹,
Samoylov A.A.², Biryukov D.V.², Ilyasov D.F.²**

¹ A. Tsyb MRRC, Obninsk;

² Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Moscow

The model for minimizing lifetime radiation risk of death for people doing radiation hazardous work was developed. According to the model the optimal accommodation of the workers with high cumulative doses and high doses of possible occupational radiation exposure allows minimization of the risk. For these purposes the solution of a problem of linear integer programming (problem of allocation) was used. The developed model was applied to minimization of integrated lifetime risk of death from radiation associated cancer assessed for a team of workers, who withdrawn radioactive wastes from the storage at the Beloyarsk NPP. Due to developed plan of radiological protection optimization they managed to reduce the life-time radiation risks by 5-7 times. To solve the problem state-of-the-art models for radiation risks, methods for risks optimization, necessary for estimation of radiological danger were used. Due to corresponding constraints the developed method is a flexible tool applicable to optimization of radiation hazardous works practically at all nuclear power providers and operation procedures. We see it practicable to use the developed method for planning radiation hazardous operation procedures.

Key words: *minimization of radiation risk, nuclear legacy, solid radioactive waste, staff variation, radiation protection, problem of allocation, linear integer programming, UNSCEAR risk model, simplex method, Beloyarsk NPP.*

Ivanov V.K. – Deputy Director, Chairman of RSCR, Corresponding Member of RAS; **Gorski A.I.*** – Lead. Researcher, C. Sc., Tech.; **Korelo A.M.** – Senior Researcher; **Maksoutov M.A.** – Head of Lab., C. Sc., Tech.; **Tumanov K.A.** – Head of Lab., C. Sc., Biol. A. Tsyb MRRC. **Samoylov A.A.** – Senior Specialist; **Biryukov D.V.** – Researcher; **Ilyasov D.F.** – Res. Assistant. IBRAE RAS.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-32-60; e-mail: nrer@obninsk.com.

References

1. **Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Kudryavtsev E.G., Bolshov L.A., Linge I.I., Abalkina I.L., Biryukov D.V., Vedernikova M.V., Khamaza A.A., Sharafutdinov R.B., Bochkarev V.V.** Concerning the evaluation of nuclear legacy volume in the nuclear industry and other facilities of nuclear energy peaceful use in Russia. *Yademaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety*, 2014, no. 3 (73), pp. 3-13. (In Russian).
2. **Kuhn H.W.** The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1955, vol. 2, pp. 83-97.
3. **Land A.H., Doig A.G.** An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, 1960, vol. 28, no. 3, pp. 497-520.
4. Mathcad. Available at: <http://www.ptc.ru.com/engineering-math-software/mathcad> (Accessed 4.10.2017).
5. **Dyakonov V.P.** MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 in mathematics and modeling. Professional Library. Moscow, SOLON-Press, 2005. 576 p. (In Russian).
6. **Takha Khemdi A.** Chapter 3. Simplex method. *Operations Research: An Introduction*. 7th ed. Moscow: Williams Publ., 2007, pp. 95-141. (In Russian).
7. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 2-4.
8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report. New York, United Nations, 2008.
9. **Ivanov V.K., Korelo A.M., Panfilov A.P., Raykov C.V.** ARMIR: the system for optimization of radiological protection of the staff. Moscow, Pero Publ., 2014. 302 p. (In Russian).