

УПРАВЛЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЯМИ ПО РЕАБИЛИТАЦИИ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЦЕЛЕВЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

С.В. Грицюк, Б.И. Яцало, В.И. Диденко

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Рассматривается задача выбора структуры защитных мероприятий по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий. Для решения задачи применяются многокритериальные методы оптимизации, основанные на использовании генетических алгоритмов с учетом неопределенностей значений критериев, представленных нечеткими множествами. В процессе решения используется геоинформационная система загрязненной территории Брянской области. Проведенные исследования показывают эффективность применения многоцелевых методов, генетических алгоритмов и геоинформационных систем для решения задач охраны окружающей среды и реабилитации загрязненных территорий.

Ключевые слова: реабилитация радиоактивно загрязненных территорий, многокритериальный анализ решений, генетические алгоритмы, геоинформационные системы.

Key words: remediation of radioactively contaminated territories, multiobjective decision analysis, genetic algorithms, GIS.

ВВЕДЕНИЕ

Для реализации защитных мероприятий на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, требуется применение соответствующих принципов радиационной защиты, диктующих как обоснованность выбора (структуры) необходимых контрмер, так и оптимизацию способов их реализации [1–3]. При этом базовым методом, используемым для анализа обоснованности вмешательства и его оптимизации, является *анализ затраты-выгода* (АЗВ) [1–7].

При проведении анализа мер вмешательства в рамках ликвидации последствий радиационных аварий в большинстве случаев исходят из того, что использование «мягких защитных мероприятий» (применение которых не вызывает значимых изменений социальных и психологических факторов), к которым можно отнести также и сельскохозяйственные контрмеры, позволяет ограничиться анализом радиологических и экономических показателей при исследовании их эффективности [4–7]. В этом случае основная информация сосредоточена в таких характеризующих контрмеру показателях, как предотвращенная в результате использования

контрмеры коллективная доза облучения населения (ΔS) и затраты на проведение контрмер (P); указанные показатели являются основными величинами, участвующими в реализации АЗВ в рамках радиационной защиты.

В целом ряде работ проводится анализ защитных мероприятий по реабилитации территорий, загрязненных в результате Чернобыльской аварии. При этом, как правило, рассматривается «*прямая задача*» реализации реабилитационных мероприятий: определяются конкретные объекты (сельскохозяйственные (с.-х.) угодья, населенные пункты, другие «объекты карт землепользования») для рассматриваемой территории, где необходимо проведение контрмер согласно выбранной стратегии реабилитации; затем проводится оценка необходимых средств (финансовых затрат, материальных ресурсов) и анализ или оптимизация системы контрмер с использованием АЗВ [4–8].

В работе [9] рассматривается «*обратная задача*» оптимизации защитных мероприятий в рамках реабилитации радиоактивно загрязненных территорий: исходя из имеющегося множества допустимых контрмер и потенциальных объектов их применения (например, множества с.-х. угодий, населенных пунктов) выбрать такое их подмножество, реализация которого на соответствующих объектах доставляет оптимальное значение используемому критерию оптимизации и не выходит за рамки существующих финансовых и других (например, хозяйственно-экономических) ограничений. Формализация указанной задачи базируется на применении АЗВ при реализации каждой контрмеры на каждом объекте и формировании задачи целочисленного линейного программирования, в которой целевая функция представляет собой чистую выгоду (net benefit) от реализации системы контрмер [9].

В то же время в целом ряде рекомендаций и исследований подчеркивается, что в рамках реализации системного подхода к анализу мер вмешательства и прежде всего в долгосрочный период ликвидации последствий радиационных (техногенных) аварий необходимо учитывать весь комплекс радиологических, экономических, экологических и социальных факторов [1, 3, 4]. При таком подходе анализ различных вариантов мер вмешательства (альтернатив), в том числе реабилитации техногенно загрязненных территорий, становится многокритериальной задачей [10, 13].

Многокритериальный анализ решений сводится в большинстве случаев к классу дискретных задач с конечным (и относительно небольшим) множеством явно заданных альтернатив (multi-attributive decision analysis) или многоцелевых (multi-objective) задач с достаточно большим или бесконечным множеством неявно заданных альтернатив [10, 13, 14]. Для решения дискретных многокритериальных задач используются такие ставшие классическими методы, как MAVT, MAUT, ANP, PROMETEE, ELECTRE, TOPSIS и др. [10, 13]. Многоцелевые задачи решаются с использованием различных оптимизационных методов, включая широкий класс эволюционных (генетических) алгоритмов [14–16].

В настоящее время имеется большое число примеров использования многокритериального анализа для решения задач охраны окружающей среды [10 – 23], реабилитации радиоактивно (техногенно) загрязненных территорий [11], проектирования, оптимального размещения и использования объектов энергетического комплекса, в том числе атомных электростанций [12, 21–23], управления землепользованием [10, 19, 24] и многих других задач [10, 13].

Одним из ключевых моментов в рамках многокритериальной поддержки принятия решений является анализ неопределенностей, включающий в себя как этапы усваивания неопределенных значений критериев и предпочтений, так и анализа влияния неопределенностей на итоговые рекомендации (принятие решений)

[10, 13]. Процесс анализа неопределенностей основан, как правило, на реализации (однопараметрических) методов анализа чувствительности, использовании вероятностных методов, в том числе методов Монте-Карло, а также на применении теории нечетких множеств [10, 13, 25, 26].

Настоящая работа представляет собой обобщение и дальнейшее развитие сформулированной в [9] обратной задачи оптимизации защитных мероприятий в рамках реабилитации радиоактивно загрязненных территорий. В отличие от [9], в данной работе рассматривается многоцелевая нелинейная задача оптимизации структуры защитных мероприятий с учетом финансовых ограничений, поиск решения которой основан на применении генетических алгоритмов, в том числе с использованием нечетких множеств в рамках оригинальной модификации алгоритма. Разработанные методы и компьютерная система реализованы на примере оптимизации структуры контрмер для Новозыбковского района Брянской области, загрязненного в результате Чернобыльской аварии (рассматривается загрязнение радионуклидами ^{137}Cs , вклад в дозу облучения в долгосрочный период других радионуклидов незначителен [4,8]).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В выбранном регионе (Новозыбковский р-н Брянской обл.) расположены n населенных пунктов, формирующих множество исследуемых объектов $A = \{A_i, i = 1, \dots, n\}$; N_i – количество населения в населенном пункте (НП) A_i .

Данные мониторинга и модельные оценки показывают [4, 8], что во многих населенных пунктах региона средняя годовая доза проживающего в них населения превышает установленный норматив (уровень реагирования, $AL=1$ мЗв/год). Для уменьшения доз местного населения может использоваться целый ряд защитных мероприятий, в том числе следующие контрмеры (КМ), рекомендуемые для применения на радиоактивно загрязненных с.-х. угодьях как наиболее эффективные [4, 6 – 8]:

- CM_1 – проведение с.-х. контрмер по коренному улучшению пастбищ и сенокосов, загрязнение молока при потреблении травы (сена) с которых превышает, согласно модельным оценкам, установленный норматив (Сан-Пин/ВДУ=100 Бк/л);
- CM_2 – применение феррацина при кормлении КРС (в течение года), если, согласно модельным оценкам, среднегодовое загрязнение молока в ЛПХ данного НП превышает ВДУ;
- CM_3 – реализация CM_1 с последующим применением CM_2 в случае, если среднее загрязнение молока после применения CM_1 превышает ВДУ.

Целью запланированных на несколько лет мер реабилитации является реализация такой структуры КМ, при которой общая стоимость КМ не превышает выделенных на их реализацию средств, а сама структура КМ является «оптимальной» или компромиссной с точки зрения критериев, сформированных привлеченными к решению задачи экспертами и (или) ЛПР.

Под альтернативой понимается множество объектов землепользования (НП и используемых жителями (фермерами) с.-х. угодий), а также соответствующих (выбранных из указанного выше списка) КМ, которые будут применяться на некоторых из объектов землепользования. Допустимыми являются те альтернативы, затраты на реализацию которых не превышают установленное предельное значение C_{\max} .

Для анализа защитных мероприятий в долгосрочный период ликвидации последствий Чернобыльской аварии было предложено несколько критериев [4, 6–8]. В рамках данной работы группой экспертов принято решение ограничиться использованием следующих трех критериев (целей), интегрирующих в себе комп-

лексный подход к анализу радиационных и социально-экономических факторов:

C_1 – (радиологический критерий) *предотвращаемая* в результате применения выбранных КМ коллективная доза облучения местного населения, чел.·Зв (чем больше предотвращенная доза, тем больше предотвращенный риск и радиологический эффект от системы КМ);

C_2 – (социально-экономический и радиационно-гигиенический критерий) доля производимого в регионе молока (критической для загрязненной территории с.-х. продукции) с загрязнением, не превышающим установленный норматив (чем выше значение критерия, тем лучше ситуация с радиационной и экономической точки зрения);

C_3 – (радиационно-гигиенический и социальный критерий) доля населения региона, проживающего в НП со среднегодовой (суммарной) дозой, превышающей установленный норматив (чем ниже значение критерия, тем лучше ситуация в регионе с радиационно-гигиенической, социальной и экономической точек зрения).

Рассматриваемая задача оптимизации структуры контрмер относится к классу многоцелевых задач (Multi-Objective Decision Making, MODM; множество альтернатив задается неявно): исходя из заданных финансовых ограничений необходимо выбрать такие объекты землепользования и такие КМ, которые можно рассматривать как «оптимальные» (компромиссные) с точки зрения методологии многоцелевых задач. Количество потенциально возможных альтернатив оценивается в нашем случае величиной $\sim 4^{100}$, поэтому речь о полном переборе всех альтернатив идти не может.

В рамках данной работы рассматривались варианты задачи с тремя и двумя критериями (C_1 и C_3). В статье приводятся результаты и выводы только для трехкритериальной задачи, поскольку она является более сложной за счет большего пространства решений и представляет больший интерес в плане поиска оптимальной структуры контрмер.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

Для оценки рассматриваемых критериев C_i , $i=1,2,3$, используются следующие модели, входящие в геоинформационную систему (ГИС) анализа защитных мероприятий PRANA [27–29] и адаптированные к использованию в рамках многокритериальной системы поддержки принятия решений DECERNS WebSDSS [24]:

- загрязнения сельскохозяйственной продукции, включая молоко ЛПХ, а также грибов и ягод;
- результатов применения защитных мероприятий;
- доз внутреннего и внешнего облучения населения;
- структуры загрязнения с.-х. продукции и доз облучения населения в заданном регионе.

Указанные модели используются в процессе выбора различных сочетаний объектов землепользования и реализуемых в них защитных мероприятий. Необходимо подчеркнуть, что модели оценки различных показателей риска характеризуются высоким уровнем неопределенностей, что необходимо учитывать в процессе дальнейшего использования полученных оценок, в том числе в рамках многокритериального анализа решений [13, 25, 26].

Сам процесс оптимизации основан на применении многоцелевого генетического алгоритма МОСНС [31], а также оригинальной версии данного алгоритма, модифицированного для использования нечетких значений критериев (гибридный генетический алгоритм FМОСНС).

Алгоритм FMOCHNC позволяет усваивать (принимать на вход и обрабатывать) нечеткие входные данные, учитывая тем самым неопределенности значений рассматриваемых критериев. Для реализации FMOCHNC в базовый алгоритм MOCHNC были внесены следующие изменения, придающие модифицированному алгоритму новые качества и возможности в рамках анализа неопределенностей:

- класс входных данных и решений задачи расширен для хранения нечетких значений критериев;
- переработаны используемые в генетическом алгоритме операторы сравнения (в том числе оператор проверки на парето-доминируемость) для поддержки нечетких чисел и операций нечеткого сравнения (в текущей версии алгоритма используется сравнение через дефазификацию, в новой версии алгоритма используются более сложные алгоритмы сравнения);
- модифицированы операторы ранжирования, кроссинговера и мутации для поддержки нечетких решений задачи.

Шаги, описанные выше, позволили получить работоспособный генетический алгоритм FMOCHNC для работы с нечеткими данными, возможности которого используются для решения задачи многокритериальной оптимизации структуры КМ.

Поскольку модельные оценки загрязнения с.-х. продукции и доз облучения населения, в том числе предотвращенных доз, характеризуются высоким уровнем неопределенностей, на вход алгоритма FMOCHNC подавались значения трех используемых критериев, неопределенность которых представлялась нечеткими числами. Исходя из опыта проведения модельных оценок указанных критериев и учитывая анализ их неопределенностей [4, 7, 8, 27–29], было принято решение представлять исходные входные величины для алгоритма FMOCHNC в виде нечетких чисел с трапециевидной функцией принадлежности с интервалом $\pm 5\%$ от четкого значения в верхней части трапеции и $\pm 15\%$ в нижней ее части (при этом, используя разработанный интерфейс, можно применить все основные подходы к генерации нечетких чисел с любым уровнем неопределенностей). Вычисления значений по всем критериям проводилось на основе реализации функций от нечетких величин.

Кодирование решений и параметры алгоритмов

Решение задачи представляет собой ряд контрмер для с.-х. угодий вокруг населенных пунктов рассматриваемого региона. Поскольку контрмера CM_3 состоит из совместного применения контрмер CM_1 и CM_2 , для кодирования решения можно использовать два бинарных массива, имеющих длины, равные количеству n населенных пунктов в заданном районе ($n = 100$ в рассматриваемой задаче). Например, пары битов (1,0), (0,0), (0,1), (1,1) используются для кодирования следующих решений: применение CM_1 для территорий вокруг первого населенного пункта, CM_2 – для третьего, CM_3 – для четвертого и отсутствие контрмер для второго населенного пункта.

Любой генетический алгоритм строится из блоков, которые можно эффективно заменять другими блоками того же типа. Основными операторами генетических алгоритмов, представляющих собой блоки соответствующих компьютерных модулей, являются операторы кроссинговера, мутации и отбора. Для каждого оператора задается свой набор параметров (например, вероятность мутации, вероятность кроссинговера, коэффициент сходимости и др.). Основные параметры рассматриваемых генетических алгоритмов приведены в табл. 1.

Выбор значений большинства указанных параметров основан на проработке различных примеров использования алгоритма MOCHNC [30–32], а также много-

Таблица 1

Параметры генетических алгоритмов

Параметр	МОСНС / FМОСНС	Параметр	МОСНС / FМОСНС
Размер популяции	200	Вероятность мутации	0.05
Ограничение количества оценок	20000	Оператор отбора родителей	RandomSelection
Количество запусков	3	Оператор отбора для нового поколения	RankingAndCrowdingSelection
Оператор кроссинговера	HUXCrossover	Начальное значение сходимости	0.25
Вероятность кроссинговера	0.80	Коэффициент сходимости	0.05
Оператор мутации	BitFlipMutation	Коэффициент элитизма	10

кратных экспериментах по использованию модифицированного алгоритма FМОСНС.

Постановка эксперимента и программная среда

Для решения задачи использовалось специально разработанное приложение с графическим представлением популяций эволюционного алгоритма. Данное приложение используется для решения оптимизационных задач с одной или несколькими целями.

Программная реализация алгоритмов и базовых эволюционных операторов основаны на Java библиотеке JMetal [32]. Представление популяции может быть либо двухмерным, в случае если рассматривается вариант задачи с двумя критериями, либо трехмерным – для задачи с тремя критериями. Решения, найденные алгоритмами, можно представить на соответствующей карте рассматриваемого района (соответствующее приложение интегрировано с ГИС загрязненных районов Брянской обл., рис.1).

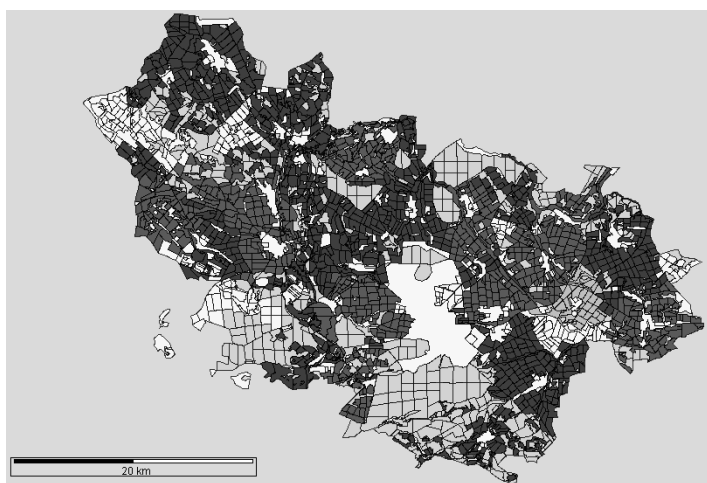


Рис. 1. Картографическое представление результатов работы алгоритма

Анализ результатов

Все алгоритмы запускались с ограничением на стоимость решения в 20000, 50000, 100000 и 500000\$ по три раза (результаты запусков для выбранной стоимости объединялись, затем удалялись доминируемые решения). Также для задачи были рассчитаны идеальная альтернатива с применением всех возможных контрмер и антиидеальная альтернатива без контрмер на всех территориях (представлены в табл. 3).

Для сравнения результатов задача решалась с использованием ставшего стандартом (с которым принято проводить все сравнения) многокритериального генетического алгоритма NSGA II [33]. Экспериментально были установлены параметры алгоритмов, при которых они показывают наилучшие результаты. Поскольку алгоритмы обладают разной скоростью сходимости (когда особи популяции все более начинают походить друг на друга, т.е. сходятся к одному решению), для них были выбраны разные значения параметра «количество максимальных оценок» (определяет максимальное количество сравнений особей популяции в течение всех поколений): 15 тыс. для FMOCHC, 20 тыс. для MOCHC и 50 тыс. для NSGA II. Скорость сходимости предлагаемого в данной статье алгоритма FMOCHC несколько выше, чем у MOCHC, это вызвано разными алгоритмами сравнения (в FMOCHC используется сравнение нечетких чисел, основанное на дефазификации «по центру масс»).

Таблица 2

Результаты решения задачи

Алгоритм	Количество оценок, тыс.	Время выполнения, с	Размер объединенного множества решений	Количество найденных решений
NSGA II, 3 крит.	50	124,3	21	9
MOCHC, 3 крит.	20	99,3	35	2
FMOCHC, 3 крит.	15	360,4	26	10

Результаты работы алгоритмов приведены в табл.2.

Как видно из табл. 2, алгоритм MOCHC показывает на 25–35% меньшее время работы, чем NSGA-II, а нечеткий алгоритм FMOCHC оказывается в 3–4 раза медленнее. Последнее обусловлено вычислениями с нечеткими числами, которые необходимо проводить на каждой итерации алгоритма для оценки новых решений и их сравнения.

Стоит отметить, что критерию C_3 данной задачи (доля населения региона, проживающего в населенном пункте со среднегодовой дозой, превышающей установленный норматив) присуща определенная дискретность значений, что фактически является следствием проведения (непроведения) защитных мероприятий в НП. Это особенно хорошо заметно в первые поколения развития популяции, когда предложенные решения в большей степени случайны, но при этом на шкале третьего критерия отчетливо располагаются «по уровням» (см. рис. 2).

Все найденные итоговые решения (см. табл. 3) можно считать эффективными (с точки зрения потраченного бюджета и полученных результатов), поскольку они отстают от идеальной точки не более чем на 10% по критерию C_1 , совпадают по значению критерия C_3 и при этом обходятся в 33 раза дешевле по стоимости. Особое внимание стоит обратить на результаты, которые показали алгоритмы MOCHC и FMOCHC. За 80–100 поколений эти алгоритмы нашли (псевдо-) оптимальные решения, не выходя за рамки бюджета (потратив 99% выделенных средств). К недо-



Рис. 2. «Уровни» значений по критерию C_3 (МОСНС) (плоскость (C_1, C_3))

статкам алгоритма МОСНС можно отнести то, что на парето-границе он оставляет мало решений (2–3), что может помешать дальнейшему анализу задачи при выборе оптимальной (компромиссной) альтернативы и (или) ранжированию недоминируемых альтернатив (например, с помощью методов MADM: MAVT/MAUT, TOPSIS, PROMETHEE и т.д.). С алгоритмом ФМОСНС проблемы такого рода отсутствуют, при всех запусках он оставлял достаточно большое число (10–15) недоминируемых решений на парето-границе. Это результат работы с нечеткими числами, когда применение принципа парето-доминирования оставляет много схожих, но недоминирующих друг друга решений.

Таблица 3

Решения задачи (при ограничении стоимости 20000\$)

	Количество оценок, тыс.	№	C ₁ , мЗв/год max	C ₂ , % max	C ₃ , % min	Стоимость, \$
NSGA II, 3 крит.	50	1	5317.625	89.486	80.379	18472.75
		2	5304.292	90.912	80.366	19971.33
		3	5309.567	90.802	80.366	19988.64
		4	5159.384	92.993	80.366	19083.92
		5	5324.117	88.731	80.366	19536.51
МОСНС, 3 крит.	20	1	5348.233	100.0	80.366	19984.29
		2	5348.283	96.214	80.366	19978.75
ФМОСНС, 3 крит. (указаны значения по критериям после дефазификации по центру масс)	15	1	5345.140	94.574	80.366	19774.77
		2	5344.925	98.583	80.366	19759.42
		3	5344.192	98.589	80.366	19944.35
		4	5336.079	98.605	80.366	18966.96
		5	5339.448	98.601	80.366	19225.32
Идеальная точка			5804.621	100.0	80.366	668618.60
Антиидеальная точка			0.0	8.524	93.901	0.0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приводятся результаты анализа задачи оптимизации структуры контрмер (с тремя критериями) выбранными генетическими алгоритмами (МОСНС и NSGA-II) и вариант задачи с нечеткими данными и ее анализ оригинальным многокритериальным генетическим алгоритмом FMOCHC (оригинальное расширение алгоритма МОСНС для работы с нечеткими данными).

Из полученных результатов сделан вывод об эффективности генетических алгоритмов при решении оптимизационных задач большой размерности. Все алгоритмы показали хорошие результаты (максимально приблизившись к идеальной точке) в рамках установленного ограничения (бюджета). Несмотря на несколько большую вычислительную сложность самого алгоритма, МОСНС показывает лучшие результаты, чем NSGA-II (для задач оптимизации структуры контрмер). В то же время предложенный в статье метод FMOCHC, позволяющий работать с нечеткими входными данными (что часто бывает необходимо в задачах, в которых исходные данные характеризуются существенными неопределенностями), и дает большее число недоминируемых решений, чем алгоритм МОСНС. Необходимо отметить при этом, что поддержка алгоритмом нечетких данных и необходимость нечеткой алгебры приводят к снижению скорости работы примерно в три раза (по результатам наших исследований).

Дополнительно было проведено исследование вариантов задачи с ограничениями стоимости в 50000, 100000 и 500000\$. Для всех рассматриваемых алгоритмов (FMOCHC, МОСНС, NSGA-II) с увеличением бюджета характерно покрытие контрмерами дополнительных территорий, не покрытых ранее, а также проведение более дорогих контрмер (контрмера №3) вместо более дешевых (контрмеры $СМ_1$ и $СМ_2$). Также стоит отметить, что при увеличении ограничений стоимости решения в 2.5 и 5 раз (50000 и 100000\$ относительно 20000\$) прирост значений по критериям не превышает 5–10%. Это связано с тем, что на многих больших по площади территориях смена контрмеры $СМ_2$ на контрмеру $СМ_3$ приводит к удорожанию в 5 – 10 раз. При ограничении стоимости в 500000\$ на большей части территорий проводилась контрмера $СМ_3$, и значения по критериям максимально приблизились к значениям идеальной точки. Указанный анализ приводит к эффективному способу решения задачи «определения обоснованной стоимости реабилитационных мероприятий на загрязненной территории», когда дальнейшее выделение средств не приводит к значимому улучшению рассматриваемых критериев.

В рамках дальнейшей модификации алгоритма рассматривается задача применения нечеткого сравнения без дефазификации в процессе работы алгоритма, а также возможность реализации нечеткой версии оператора парето-доминирования.

Литература

1. Intervention criteria in a nuclear or radiation emergency. Safety series No.109. – Vienna: IAEA, 1994. – 117 p.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99). Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. /СП 2.6.1.758-99. – М.: Минздрав России, 1999. – 115 с.
3. International Commission on Radiological Protection. Optimisation and Decision making in Radiological Protection. ICRP Publication 55 (Oxford: Pergamon Press) (1989).
4. The International Chernobyl Project. Technical Report. – Vienna: IAEA, 1991. – 740 p.
5. Яцало Б.И. Методы и алгоритмы оптимизации радиационной защиты в рамках реабилитации радиоактивно загрязненных территорий // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 29-40.

6. Яцало Б.И., Алексахин Р.М. Методы анализа защитных мер в сельском хозяйстве: оценка эффективности, уровни вмешательства и сравнение различных контрмер//Радиационная биология. Радиоэкология. – 1997. – Т. 37. – Вып.5. – С. 114-124.
7. Yatsalo B.I., Hedemann Jensen P. and Alexakhin R.M. Methodological Approaches to Analysis of Agricultural Countermeasures on Radioactive Contaminated Areas: Estimation of Effectiveness and Comparison of Different Alternatives//Radiat. Prot. Dosim. – 1997. – V. 74. – № 1/2. – P. 55-61.
8. Karaoglou A., Desmet G., Kelly G.N., & Menzel H.G. (Eds). The radiological consequences of the Chernobyl accident. Proc. of the first International Conference, Minsk, Belarus, 18-22 March, European Commission. ISBN 92-827-5248-8. ECSC-EC-EAEC, Brussels, Luxembourg, 1996.
9. Яцало Б.И. Реабилитация радиоактивно загрязненных территорий: методы оптимизации структуры защитных мероприятий с учетом финансовых ограничений//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 20-28.
10. Malczewski J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons Inc. New York.
11. French S. Multi-Attribute Decision Support in the Event of a Nuclear Accident// Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. – 1996. – 5. – P. 39-57.
12. Keeney R.L., Nair K. Selecting nuclear power plant sites in the Pacific Northwest using decision analysis. /In Bell D.E., Keeney R.L., Raifa H., Eds., Conflicting objectives in decisions. J. Wiley E Sons, Chichester. – 1997. – P.294-322.
13. Figueira J, Greco S, Ehrgott M. (Eds). Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys. Springer Science. Business Media, Inc.: New York, 2005.
14. Carlos A. Coello, Gary B. Lamont and David A. Van Veldhuizen. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. Second Edition. 2007.
15. Ritzel B.J., Eheart J.W., Ranjithan S. Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. Water Resources Research, 30(5):1589-1603, may 1994.
16. Cieniawski S.E., Eheart J.W. and Ranjithan S. Using Genetic Algorithms to Solve a Multiobjective Groundwater Monitoring Problem. Water Resources Research, 31(2):399-409, February 1995.
17. Reed P.M., Minsker B.S., Goldberg D.E. A multiobjective approach to cost effective long-term groundwater monitoring using an elitist nondominated sorted genetic algorithm with historical data. Journal of Hydroinformatics, 3(2):71-89, April 2001.
18. Reed P.M., Minsker B.S., Goldberg D.E. Why Optimize Long Term Groundwater Monitoring Design? A Multiobjective Case Study of Hill Air Force Base. In D. Phelps and G. Sehlke, editors, Bridging the Gap: Meeting the Worlds Water and Environmental Resources Challenges. Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress, Washington, DC, 2001. American Society of Civil Engineers. ISBN 0-7844-0569-7.
19. Matthews K.B., Craw S., Elder S., Sibbald A.R. and MacKenzie I. Applying Genetic Algorithms to Multi-Objective Land Use Planning. In D. Whitley, editor, Genetic and Evolutionary Computation Conference, pages 613-620, Las Vegas, Nevada, July 2000. Morgan Kaufmann Publishers.
20. Komuro R. Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Ecological Process Models. PhD thesis, University of Washington, Seattle, Washington, USA, December 2005.
21. Parks G.T. Multiobjective PWR Reload Core Optimization Using Genetic Algorithms. In Proceedings of the International Conference on Mathematics and Computations, Reactor Physics, and Environmental Analyses, pages 615-624, La Grange Park, Illinois, 1995. American Nuclear Society.
22. Parks G.T. Multiobjective Pressurized Water Reactor Reload Core Design by Nondominated Genetic Algorithm Search. Nuclear Science and Engineering, 124(1):178-187, 1996.
23. Parks G.T. Multiobjective Pressurised Water Reactor Reload Core Design using a Genetic Algorithm. In G. D. Smith, N. C. Steele, and R. F. Albrecht, editors, Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms, pages 53-57, Norwich, UK, 1997. Springer-Verlag.
24. Yatsalo B., Didenko V., Gritsyuk S. et. al. Multi-Criteria Spatial Decision Support System DECERNS: Application to Land Use Planning. International Journal of Information Systems and Social Change, 1(1): 11-30. 2010.
25. Radhamani G., Joseph N.P. Managing Uncertain Data using Multi Criteria Repeat Crossover Genetic Algorithm//International Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol 2. – № 4.
26. Fayad C. and Petrovic S. A Fuzzy Genetic Algorithm for Real-World Job Shop Scheduling. Innovations in applied artificial intelligence: 18th International Conference on Industrial and

Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, IEA/AIE 2005, Bari, Italy, June 22-24, 2005.

27. *Yatsalo B., Mirzeabassov O., Okhrimenko I., Pichugina I., Kulagin B.* PRANA – Decision Support System for Assessment of Countermeasure Strategy in the Long-term Period of Liquidation of the Consequences of a Nuclear Accident (Agrosphere)//Radiat. Prot. Dosim. – 1997. – V. 73. – № 1-4. – P. 291-294.

28. *Диденко В.И., Яцало Б.И., Брук Г.Я., Голиков В.Ю.* Анализ структуры доз облучения населения радиоактивно загрязненных территорий с использованием многоуровневых адаптивных моделей оценки доз//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – № 1. – С. 54-60.

29. *Yatsalo B.I.* Decision Support System for Risk Based Land Management and Rehabilitation of Radioactively Contaminated Territories: PRANA approach// Int. J. Emergency Management. – 2007. – V. 4. – № 3. – P. 504-523.

30. *Alba E., Molina G. and Chicano F.* Optimal placement of antennae using metaheuristics. In Numerical Methods and Applications (NM&A-2006), Borovets, Bulgaria, August 2006.

31. *Nebro A.J., Alba E., Molina G., Chicano F., Luna F., Durillo J.J.* Optimal antenna placement using a new multi-objective chc algorithm. Proceedings of ACM GECCO 2007.

32. *Durillo J.J., Nebro A.J., Luna F., Dorronsoro B., Alba E.* jMetal: a Java Framework for Developing Multi-Objective Optimization Metaheuristics. TechRep. ITI-2006-10, Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computaci3n, University of M3laga, 2006.

33. *Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and Meyarivan T.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2):182-197, 2002.

34. *Blum C. and Roli A.* Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. ACM Computing Surveys, 35(3):268-308, 2003.

35. *Steuer R.E.* Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application. John Wiley, New York, 1986.

Поступила в редакцию 1.07.2010

УДК 539.125.5.03:621.039.512

Interval Estimation of Reactivity \A.G. Yuferov, R.L. Ibragimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 illustrations. – References, 13 titles.

The algorithms of an estimation of an interval of uncertainty for a reactivity meter are described on the basis of an integral equation of a kinetics.

УДК 504.064

Management of Remediation Measures on Radioactively Contaminated Territories with the use of Multiobjective Optimization \S. Gritsyuk, B. Yatsalo, V. Didenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 35 titles.

Optimization of the countermeasure structure on remediation of radioactively contaminated territory is considered. Multiobjective optimization is based on implementation of modified genetic algorithms and treatment of uncertain/fuzzy criteria. Geographic information system (GIS) of contaminated territory is used within the case study analysis on countermeasure optimization. This study demonstrates effectiveness of integration of multiobjective methods, genetic algorithms and GIS within the problems on environmental protection and remediation of contaminated sites.

УДК 504.45: 546.027

Up-to-date Content of Long-Lived Artificial Radionuclides in the Area of the Tom and Ob Rivers Impacted by the Siberian Chemical Combine Discharges \A.I. Nikitin, I.I. Kryshev, N.I. Bashkurov, N.K. Valetova, G.E. Dunaev, A.I. Kabanov, I.Yu. Katrich, A.O. Krutovsky, V.A. Nikitin, G.I. Petrenko, A.M. Polukhina, G.N. Selivanova, V.B. Chumichev, V.N. Shkuro; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

Data are presented and discussed on content of ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ and other artificial radionuclides in water, bottom sediments and flood-plain soils of the Tom and Ob rivers part from Tomsk to the region of their confluence (through which the radioactive effluents of the Siberian Chemical Combine are transported). Data received in 2008-2009 in frames of the ISTC Project No.3547 «Analysis of radionuclide transport and assessment of radiation risk for population and environmental objects in the Ob-Irtysh river basin».

УДК 621.039.51: 621.039.58

Numerical-Experimental Analysis of Emergency Shut Down Cooling of VVRC Reactor at Loss of ELECTRICAL Supplying of the Circulating Pumps \O.Yu. Kochnov, V.V. Sergeev, A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 13 pages, 8 tables, 12 illustrations. – References, 6 titles.

Based on the experiment performed on the pool type research reactor VVRC during operation at emergency condition of shut down cooling and the data obtained on reactor IS RY RBT-6, post-test calculations of dynamics at shut down cooling of facility are carried out at loss of power supply of circulating pumps. In the paper are presented the results of calculations at shut down cooling of reactor VVRC at natural circulation mode, starting from maximal acceptable power. Calculations were carried out with using the international thermal hydraulic code TRAC designed for the analysis of technical safety for water-cooled nuclear power plants.

УДК 621.039.5

Simulation of Transients in the Circuits of Nuclear Power Plants with BN-type Reactors Involving Variable-Speed Drives of Reactor Coolant Pumps \E.Yu. Anishev, V.S. Gorbunov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

Based on the simulation of thermal hydraulic transients, the paper analyzes the advantages of smooth variation of coolant flow in the primary circuits of nuclear power plants with fast neutron reactors.

Maintenance of optimal turbine steam parameters and “softer” transients help to increase power unit cost effectiveness and reduce thermal stresses and temperature gradients in reactor plant vessel structures.

УДК 621.039.5

Parameters of Fluctuations of the Working Body at Pulse Indignations on Pressure in the Second Contour of the Atomic Power Station with VVER-1000 \R.O. Katereev, K.N. Proskurjakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 tables, 3 illustrations. – References, 5 titles.