

ПРОГНОЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТАХ В КОТЛОВАНАХ ДЛЯ ФУНДАМЕНТА НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА

© 2010 г. Н. И. Панасюк, А. Д. Скорбун, И. А. Литвин, Е. П. Люшня,
А. М. Алферов, Г. В. Левин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Разработан и применен подход, позволяющий прогнозировать свойства радиоактивных отходов при планировании и проведении земляных работ. Выполнен прогноз количества радиоактивных отходов, представленных грунтами, которые подлежат разработке в пятнах котлованов для фундамента нового безопасного конфайнмента над разрушенным 4-м блоком ЧАЭС. Активность грунтов определялась с помощью гамма-каротажа скважин (около 500 скважин) для устройства свай шпунтового ограждения стенок котлованов и наблюдательных скважин радиогидроэкологического мониторинга. Обработка полевых материалов проведена методами математического моделирования гамма-полей от радиоактивно загрязненного грунта в геометрии и по критериям, принятым на ЧАЭС при сортировке радиоактивных отходов (РАО). Прогноз пространственного распределения РАО выполнялся с применением ГИС-технологий.

Ключевые слова: грунты, радиоактивные отходы, гамма-каротаж, ГИС-технологии, новый безопасный конфайнмент, математическое моделирование гамма-полей.

Введение

Для сооружения фундаментов нового безопасного конфайнмента (НБК) до начала настоящей работы планировалось, а в настоящее время, в основном, осуществлено устройство котлованов в радиоактивно загрязненных грунтах. Котлованы состоят из двух лент: северной ленты фундамента (СЛФ) и южной ленты фундамента (ЮЛФ), устраиваемых соответственно севернее объекта «Укрытие» и южнее его (рис. 1). Глубина котлованов составляет от 1,5 до 4 м, отметка дна котлованов 113,5 м (в балтийской системе высот (БСВ)).

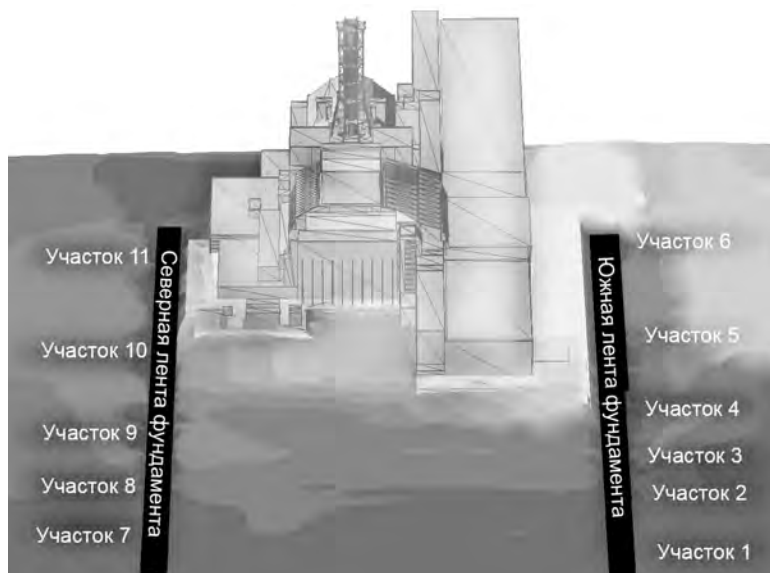


Рис. 1. Схема зоны выполнения работ.

По результатам радиогидроэкологического мониторинга, примерно на этой отметке и выше залегают наиболее радиоактивно загрязненные грунты так называемого активного слоя, которые по предварительным данным можно отнести к РАО от низкой до высокой категорий (ВАО). Для планирования разработки наиболее активных грунтов, а также для уточнения и оптимизации объема радиационного контроля земляных работ и своевременного

проведения сортировки РАО необходим предварительный прогноз радиационной обстановки в зоне производства работ. До начала земляных работ для крепления стенок будущих котлованов по их периметрам через 1,5 м выполнялось бурение скважин глубиной до 7 м и диаметром 400 мм для устройства свай шпунтового ограждения. В рамках настоящей работы было выполнено опробование данных скважин (всего около 500 скважин): гамма- и спектрометрический гамма-каротаж, лабораторные определения активности радионуклидов в пробах грунтов и определение вещественного состава грунтов. Обработка полученных данных осуществлялась в увязке с результатами ранее выполненных исследований в рамках радиогидроэкологического мониторинга. Полученные данные были использованы для прогноза будущей радиационной обстановки.

Выполненные исследования подтвердили, что вмещающие радиоактивные материалы грунты локальной зоны объекта «Укрытие» и промплощадки ЧАЭС по условиям образования подразделяются на четыре группы [1]: послеаварийные техногенные (зона I); "активный" слой (зона II); доаварийные техногенные (зона III); естественные аллювиальные отложения (зона IV).

В радиационном отношении наиболее радиоактивным является активный слой, который сформировался при аварии и в процессе ликвидации ее последствий, имеет мощность преимущественно 0,5 – 0,7 м. Гипсометрически активный слой приурочен к доаварийной поверхности земли. Судя по топографическим картам 1985 г., на СЛФ отметки доаварийной поверхности изменялась от 114, 1 - 114, 4 м (участки 8, 9) до 114, 8 - 115, 5 м (участок 11). На ЮЛФ доаварийная поверхность находилась преимущественно в пределах отметок 113,5 - 113,8 м. Образовался активный слой в результате перемешивания радиоактивных материалов, выпавших во время аварии и грунта, слагающего дневную доаварийную поверхность, а также в процессе миграции радионуклидов.

Грунты зон I и III значительно менее активны и относятся к НАО или не превышают нормативов по активности радионуклидов, позволяющих относить их к РАО.

Прогнозы радиационных характеристик РАО заключались в определении распределения мощности эквивалентной дозы (МЭД) при вскрытии кровли активного слоя (рис. 2), а также в оценке радионуклидного состава РАО, представленных разрабатываемыми грунтами. Прогнозы пространственного, по площади и по глубине, распределения категорий РАО заключались в определении отметок кровли, подошвы и мощности активного слоя. При этом особая детализация в опробовании скважин была проведена в местах предполагаемого распределения ВАО для своевременного предотвращения переоблучения персонала, осуществляющего земляные работы.

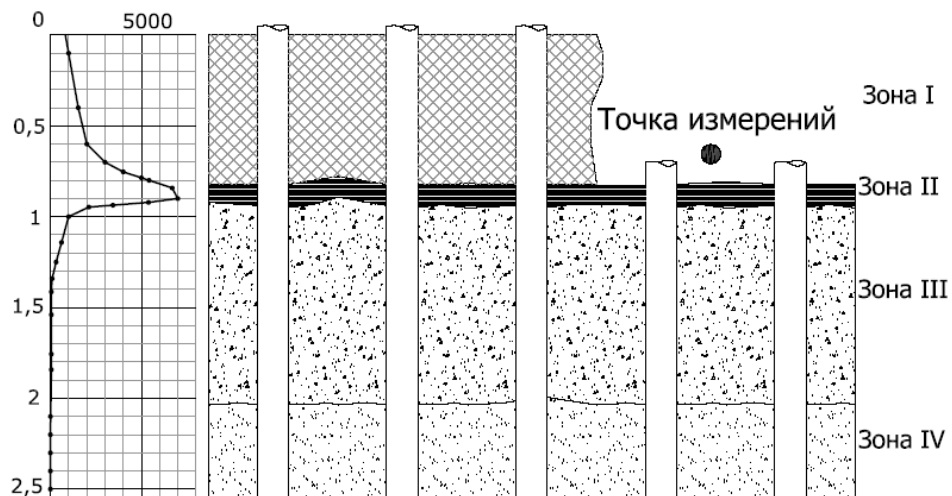


Рис. 2. Схематический разрез грунтов в зоне котлована. Зона 2 – активный слой.

Слева показана диаграмма гамма-каротажа. Задача состоит в прогнозировании величины гамма-поля в котловане (точке измерений в зоне I) после удаления верхнего слоя грунта до активного слоя.

Таким образом, основная цель работ – получение дополнительных данных о распределении радиоактивных материалов в грунтах для оперативного принятия управленческих, инженерных и проектных решений при проведении земляных работ. Особое внимание уделено прогнозам пространственного распределения ВАО и их радиационных характеристик.

Работы выполнялись на СЛФ на участках 9, 10 и 11 и на ЮЛФ на участках 2, 3, 4, 5 и 6 (см. рис. 1).

Прогноз распределения радиоактивных отходов

Прогноз распределения радиоактивных отходов, представленных грунтами активного слоя, выполнен на основании данных гамма-каротажа скважин и обработки их с помощью ГИС-технологий.

Обработка данных гамма-каротажа скважин

Задача состояла в том, чтобы по полученным с помощью гамма-каротажа скважин данным о распределении МЭД и активности по глубине скважины оценить МЭД гамма-поля на поверхности дна котлована (кровли активного слоя) при разработке грунтов котлована. Эту задачу необходимо было решить, так как на ЧАЭС для сортировки РАО при земляных работах в основном применяется критерий: МЭД на расстоянии 10 см от поверхности вскрытых при земляных работах грунтов.

Обычно для выполнения подобных расчетов необходимо определить по данным гамма-каротажа распределение активности по глубине скважины, а затем, исходя из активности, оценивать МЭД в котловане после разработки грунта. Однако чтобы избежать неопределенностей, связанных с пересчетом МЭД в активность по данным гамма-каротажа, для поставленной задачи был разработан метод, позволяющий выполнить расчеты МЭД в котлованах только по данным о МЭД в скважинах.

В основе разработанного приема лежит тот факт, что как по данным предшествующих работ, так и по данным настоящих измерений основная активность сосредоточена в узком слое грунта, что определяет геометрию расчетов, а именно: оценивание гамма-поля над активным параллелепипедом заданных размеров.

Схема расчетов следующая:

1. По диаграмме распределения МЭД по глубине скважины оцениваются кровля, подошва и мощность активного слоя в месте расположения данной скважины [2].
2. Рассчитывается гамма-поле над поверхностью данного активного слоя (который будет вскрыт при разработке грунта).

Для расчетов необходимо задаться конкретной геометрией измерений. Расчеты проведены для измерений на высоте 0,1 м от поверхности грунта с помощью программы Micro-Shield [3]. В первую очередь рассчитаем зависимость величины гамма-поля в точке проведения измерений от площади вскрытой поверхности (рис. 3). Из рисунка видно, что уже

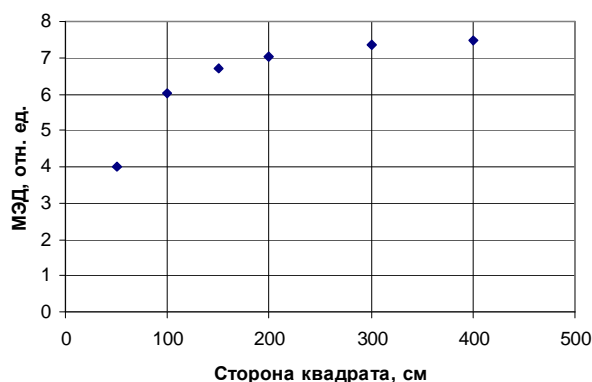


Рис. 3. Изменение МЭД, измеренной на расстоянии 10 см от квадратной поверхности активного слоя в зависимости от размера стороны квадрата.

начиная со стороны квадрата размером 150 – 200 см поле меняется слабо. Поэтому дальнейшие расчеты проведены для этих размеров, которые оказались сопоставимыми с размерами ковша экскаватора, что дает возможность использовать полученные результаты непосредственно в процессе работы техники без дополнительных пересчетов.

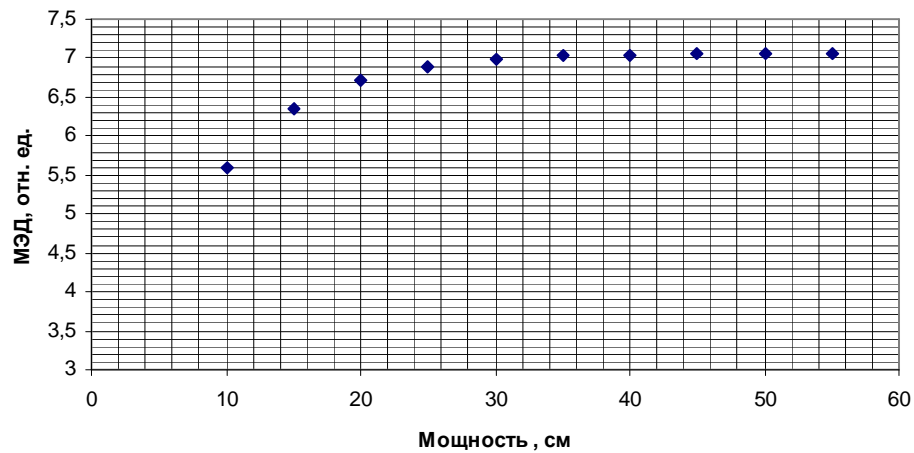


Рис. 4. Изменение МЭД, измеренной на расстоянии 10 см от квадратной поверхности 155×155 см активного слоя в зависимости от его мощности.

На рис. 4 показана зависимость МЭД в центре параллелепипеда (модель активного слоя) от его мощности. Соответственно, на рис. 5 показана зависимость МЭД в скважине от мощности активного слоя. Эти результаты дают возможность оценить необходимые размеры параллелепипеда для расчета величины гамма-поля на поверхности грунта по измерениям в скважине.

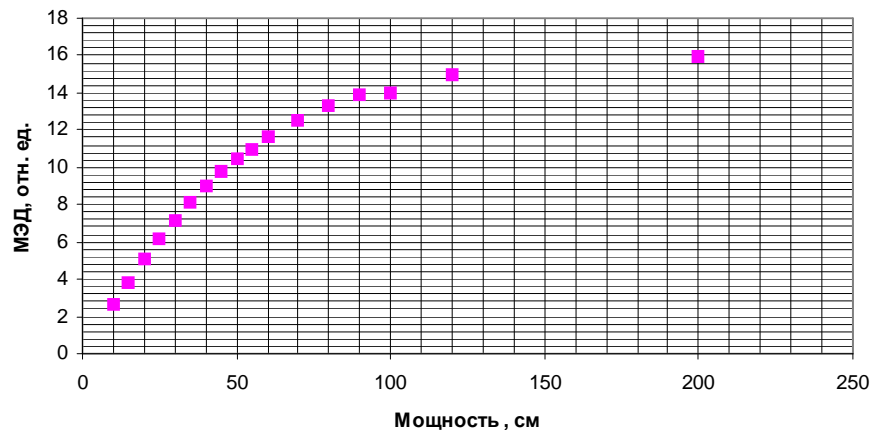


Рис. 5. Изменение МЭД в скважине в центре активного слоя в зависимости от его мощности.

Разработанная методика расчета, позволяющая избежать оценок активности грунта, демонстрируется на рис. 6. Представим себе слой радиоактивного грунта (равномерно загрязненного с единичной активностью). Рассчитаем для такого слоя поле в скважине и соответственно на расстоянии 0,1 м от поверхности. Расчет проведем для размеров, указанных на предыдущих графиках. Ясно, что поле на поверхности можно получить, умножив поле в скважине на некоторый коэффициент, величина которого зависит от мощности активного слоя. Результаты расчетов этих коэффициентов показаны на рис. 7. Таким образом, с помощью данных коэффициентов можно оценить МЭД на поверхности грунтов в процессе их разработки по данным измерений МЭД в скважине. При этом мощность активного слоя получают из обработки диаграмм гамма-каротажа.

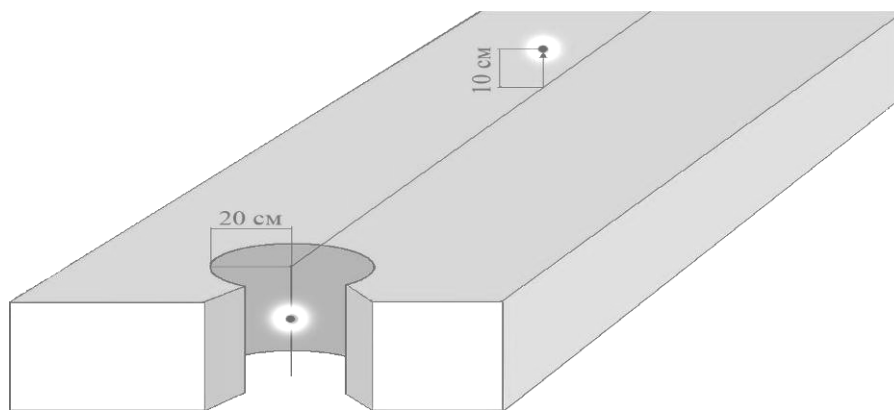


Рис. 6. Геометрия расчетов гамма-поля над поверхностью активного слоя.

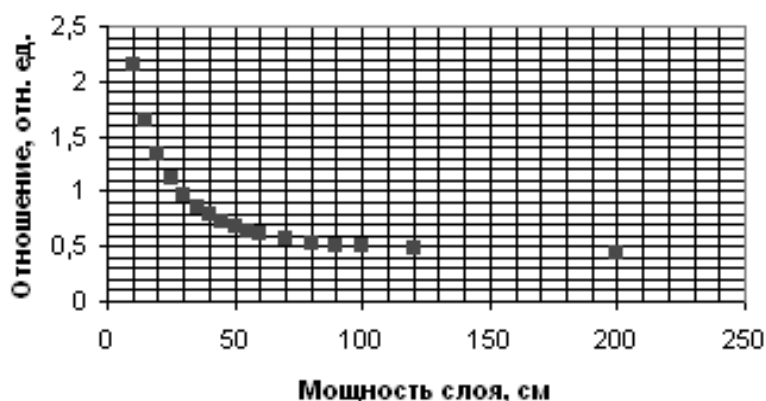


Рис. 7. Зависимость отношения МЭД на поверхности к МЭД в скважине от мощности активного слоя.

Применение ГИС-технологий

Для каждой опробованной скважины в среде Microsoft Access создавался набор данных, включающий: результаты гамма-каротажа; данные буровых журналов; материалы плановой и высотной привязки устьев скважин.

Используя полученный набор данных по скважинам и, в качестве топографической основы, двумерную схему промплощадки объекта "Укрытие" в виде файла *.DWG, был создан ГИС-проект «Прогноз пространственного распределения радиоактивных отходов в котлованах» в программной среде ArcGIS [4,5,6].

Для интерполяции данных обработки гамма-каротажа по отдельным скважинам на всю площадь котлованов применялся модуль Geostatistical Analyst. Модуль ArcGIS Geostatistical Analyst позволяет на основе методов статистической интерполяции создавать непрерывные поверхности по данным точечных измерений. Эти поверхности представляют оценку или прогноз вероятности возникновения или существования какого-либо явления. На основе обработки данных гамма-каротажа инструменты интерполяции Geostatistical Analyst позволяют построить прогнозные карты пространственного (по площади и по глубине) распределения радиоактивных материалов в грунтах и их радиационных характеристик.

Нами анализировались две основные группы методов интерполяции: детерминистские методы и геостатистические. Детерминистские методы интерполяции строят поверхность по опорным точкам, основываясь либо на степени схожести точек выборки (например, метод обратновзвешенных расстояний), либо на степени сглаживания (например, радиальные базисные функции). Геостатистические методы интерполяции (например, кригинг) ис-

пользуют статистические свойства опорных точек. Геоestatистические методы количественно определяют пространственную корреляцию между опорными точками и учитывают расположение опорных точек в пространстве вокруг искомой точки.

В связи с неравномерной сеткой расположения скважин геоestatистические методы дают результат с высокой степенью неопределенности, поэтому в нашем случае применялась интерполяция методом обратных взвешенных расстояний (ОВР). Интерполяция по методу ОВР базируется на технике создания поверхностей по известным значениям в отдельных точках путем продления закономерностей распределения значений по мере удаления от точек и использует предположение, что объекты, расположенные ближе друг к другу, в большей степени похожи, чем удаленные друг от друга.

Интерполяцией (ОВР) построены прогнозные карты (непрерывные поверхности), характеризующие активный слой (АС) и распределения прогнозной МЭД на расстоянии 10 см от поверхности грунта. При построении карт МЭД для радиоактивных отходов выбраны следующие диапазоны [7, 8]:

0, 001 - 0,1 мЗв/ч, что соответствует низкоактивным РАО (НАО)

0,1 - 10 мЗв/ч – РАО среднеактивные (САО);

свыше 10 мЗв/ч – РАО высокоактивные (ВАО).

Для лучшего отображения диапазоны МЭД САО и ВАО разбиты на поддиапазоны.

В качестве примера приводятся карты по участкам 6 на ЮЛФ (рис. 8 - 11) и 11 на СЛФ (рис. 12), где грунты, относящиеся к ВАО, получили наибольшее распространение.

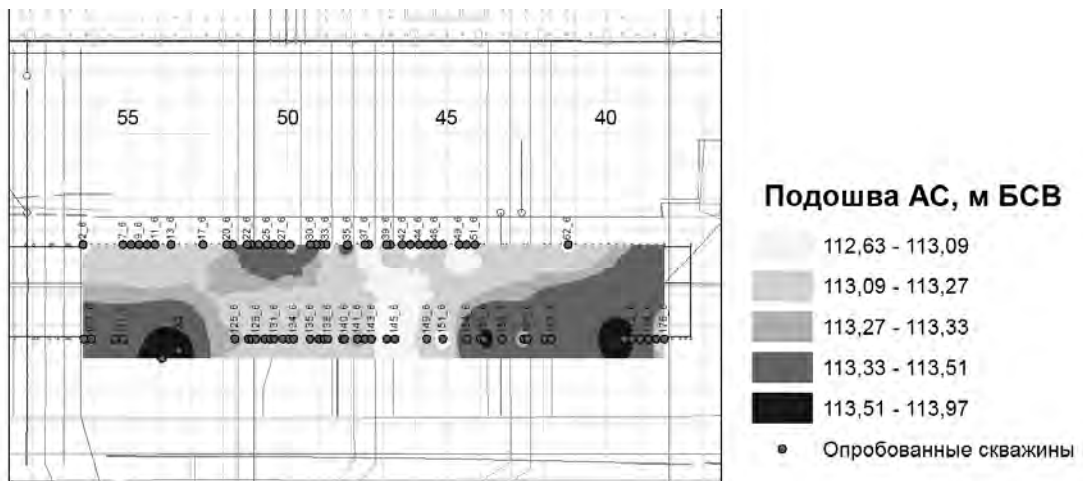


Рис. 8. Прогнозная карта отметок подошвы АС на участке 6. Значения отметок в БСВ.

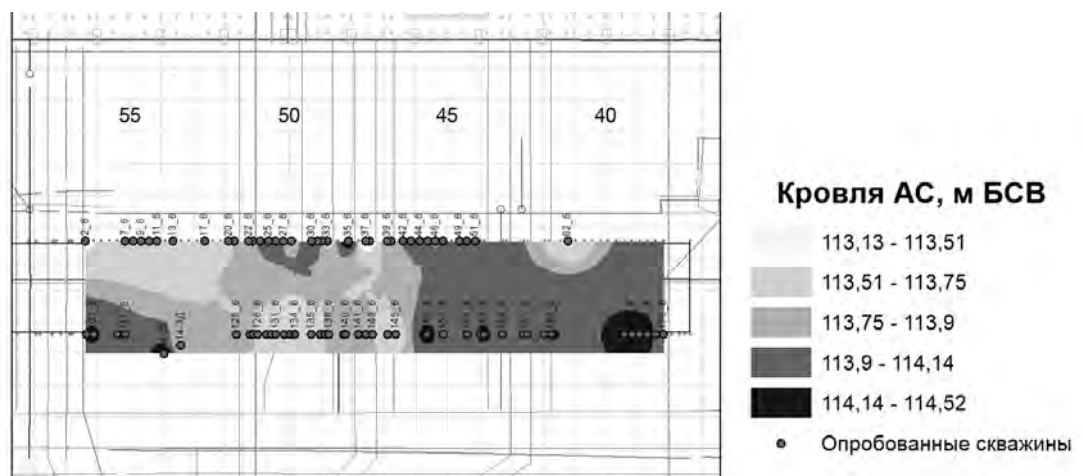


Рис. 9. Прогнозная карта отметок кровли АС на участке 6. Значения отметок в БСВ.

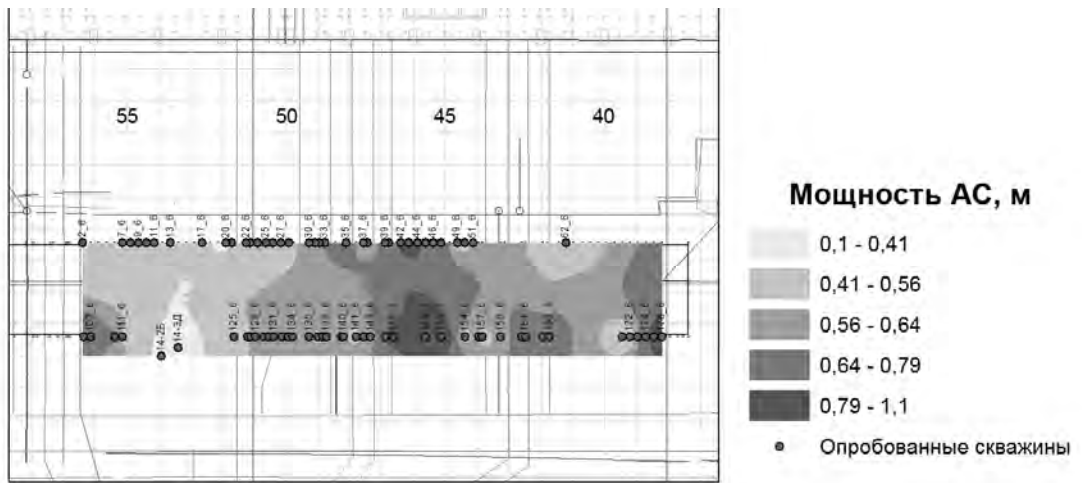


Рис. 10. Прогнозная карта мощности АС на участке б.

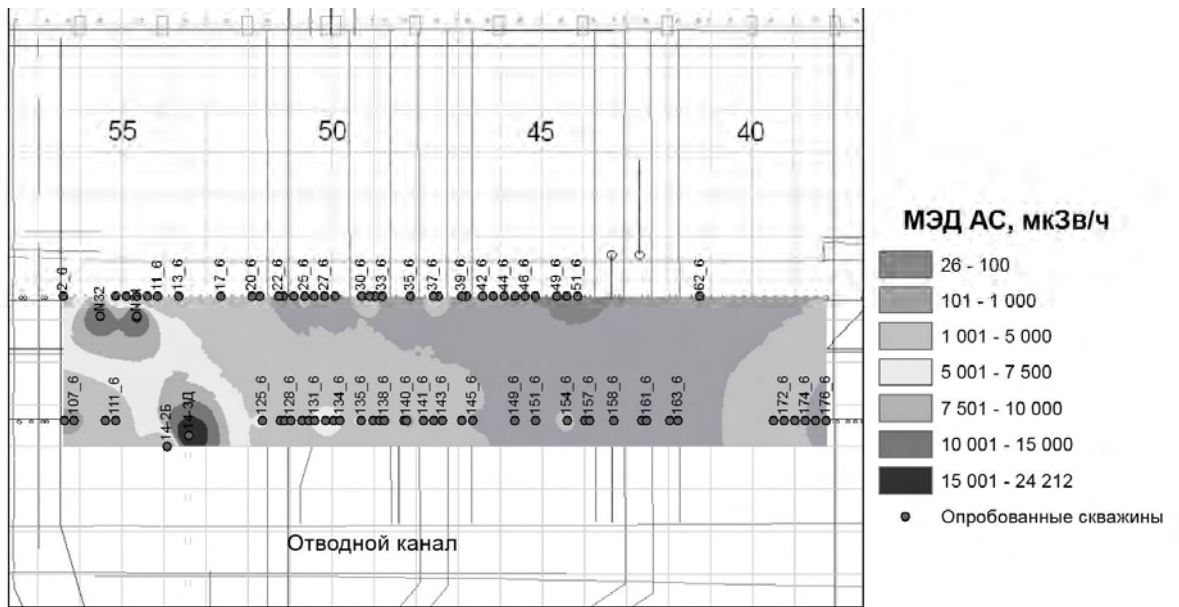


Рис. 11. Прогнозная карта МЭД на расстоянии 10 см от кровли АС на участке б.

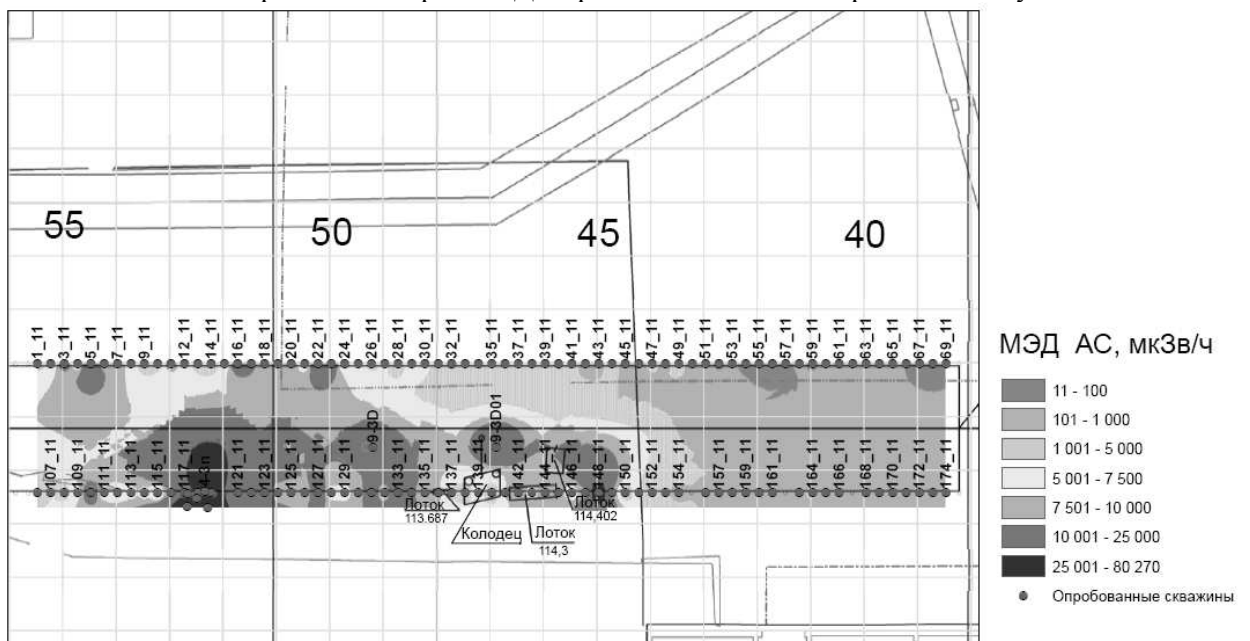


Рис. 12. Прогнозная карта распределения МЭД на расстоянии 10 см от кровли АС на участке 11.

Прогнозные величины объема и площадь распределения категорий РАО по всем участкам определены инструментом «Объем и площадь» модуля 3D Analyst. Для примера приводятся данные для участка 6 в табл. 1.

Таблица 1. Количество РАО в АС на участке 6 фундамента НБК

Категория РАО	Объем, м ³	Площадь, м ²	МЭД, мЗв/ч	Отметка кровли АС, м БСВ	Мощность, м
ВАО	56	133	7,5 – 24,2	113,57 – 114	0,24 – 0,49
ВАО-1	16	42	10,0 – 24,2	113,6 – 113,95	0,24 – 0,45
САО	1045	1743	0,1 – 7,5	113,13 – 113,83	0,3 – 1,1
САО-1	1085	1835	0,1 – 10,0	113,13 – 114,52	0,3 – 1,1
НАО	20	33	0,026 – 0,1	113,90 – 114,00	0,5 – 1

Учитывая, что погрешности определения МЭД при отделении ВАО от САО и НАО составляют порядка 25 %, в табл. 1 отдельно приведены объемы ВАО с МЭД выше 7,5 мЗв/ч и объемы ВАО-1 с МЭД выше 10 мЗв/ч.

В табл. 1 прогнозные объемы ВАО приведены для всей мощности АС. Но при разработке ВАО слоями по 10 - 20 см нижние слои могут иметь МЭД ниже 10 мЗв/ч за счет уменьшения толщины источника гамма-излучения и, следовательно, в процессе работы их не отнесут к ВАО. Например, при уменьшении в процессе разработки толщины АС с 0,3 до 0,1 м МЭД на расстоянии от поверхности 10 см уменьшается в 1,3 раза (см. рис. 4).

В целом на всех участках СЛФ и ЮЛФ подсчитанные таким образом прогнозные объемы ВАО-1 составили около 100 м³. При этом прогнозная максимальная МЭД на расстоянии 10 см от кровли АС может достигнуть 80 - 90 мЗв/ч (см. рис. 11 и 12).

Построения карт распределения удельных активностей радионуклидов

Помимо задачи получения пространственного распределения МЭД, необходимого для оценки потенциальных дозовых нагрузок на персонал, важной задачей является также определение полной активности, захороненной в грунтах. Удельная активность грунтов (в местах расположения скважин) была определена как путем интерпретации данных гамма-каротажа, так и по данным лабораторных анализов. Прогноз их пространственного распространения по всей площади котлована выполнен аналогично описанному выше с использованием ГИС-технологий. Используя модуль Geostatistical Analyst программы ArcGIS методом обратных взвешенных расстояний построены прогнозные карты удельной активности ¹³⁷Cs (рис. 13) полученные по данным обработки гамма- и спектрометрического гамма-каротажа скважин.

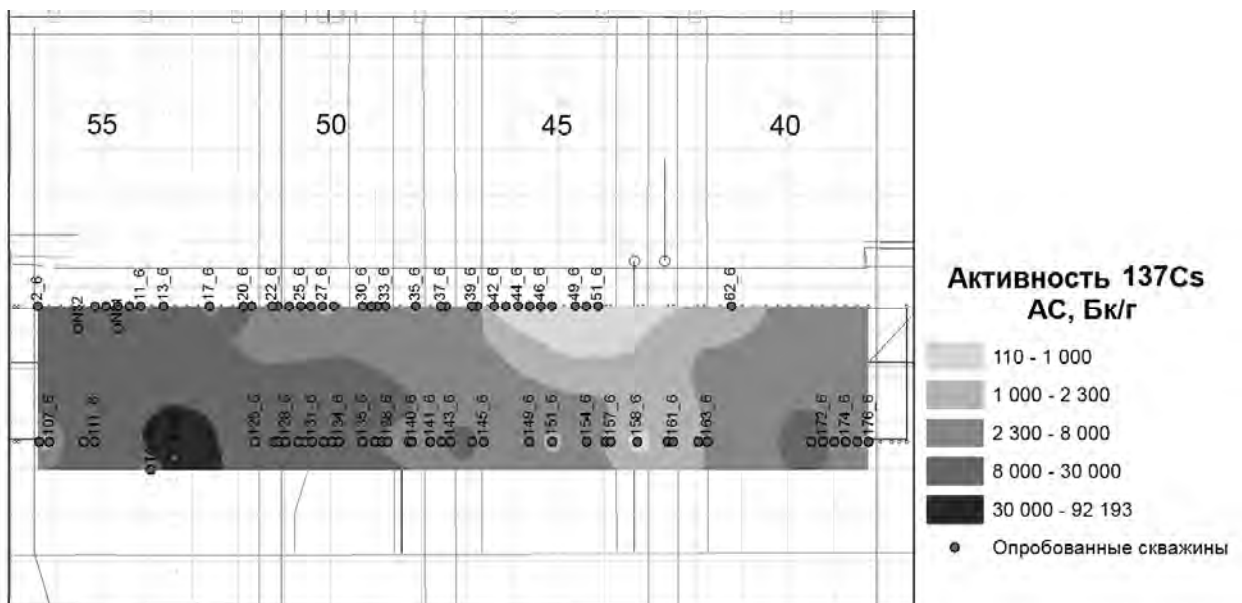


Рис. 13. Прогнозная карта распределения удельной активности ¹³⁷Cs в АС на участке 6.

Используя корреляционные соотношения между радионуклидами по данным лабораторных определений активности радионуклидов в грунтах, карту ^{137}Cs и инструмент ArcGIS «Калькулятор растров», были получены карты распределения удельных активностей ^{90}Sr и трансурановых элементов (ТУЭ) для всех участков. В качестве примера приведены карты для участка 6 (рис. 14 и 15).

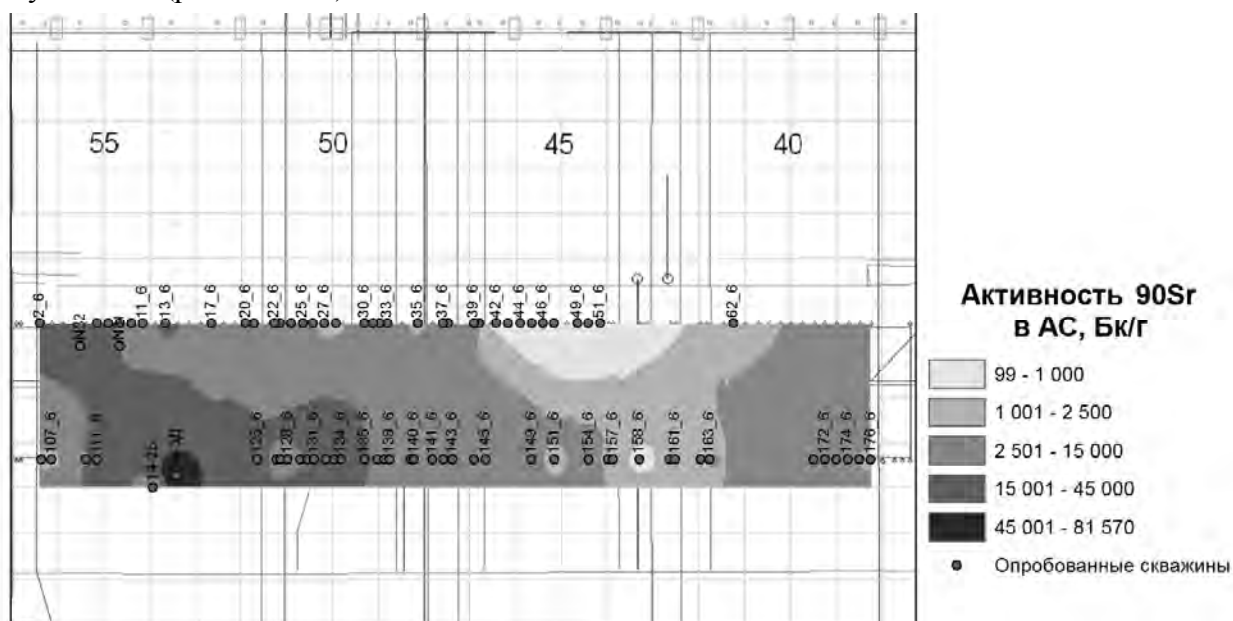


Рис. 14. Прогнозная карта распределения удельной активности ^{90}Sr в АС на участке 6.

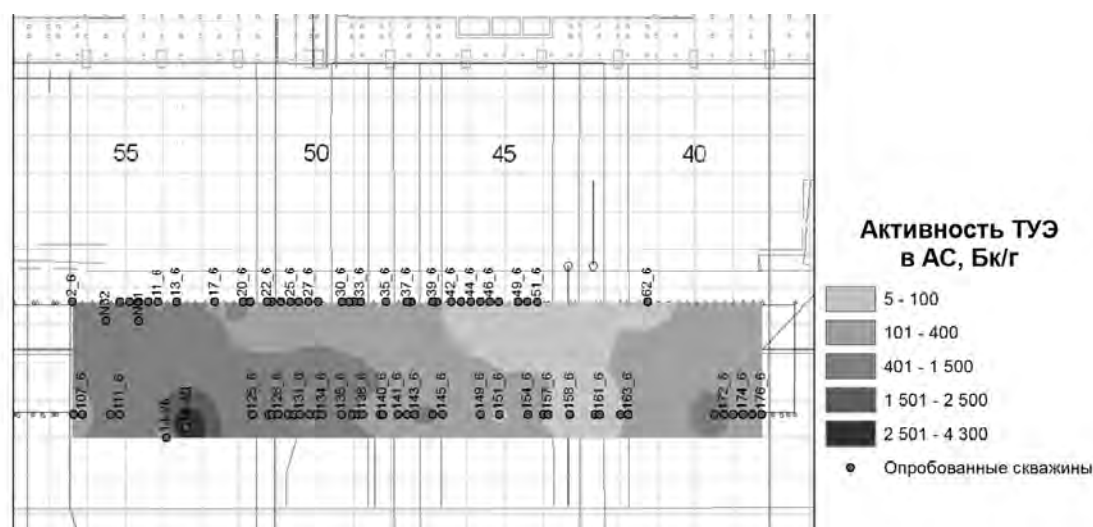


Рис. 15. Прогнозная карта распределения удельной активности ТУЭ в АС на участке 6.

Используя выделенные ранее площади ВАО, САО И НАО, инструментом «Калькулятор растров» были получены карты удельных активностей радионуклидов по категориям РАО.

Таблица 2. Средние значения удельной активности и общие активности радионуклидов в грунтах на участке 6 ЮЛФ

Участок РАО	Удельная активность, Бк/г			Общая активность, Бк		
	^{137}Cs	^{90}Sr	ТУЭ	^{137}Cs	^{90}Sr	ТУЭ
ВАО	24345	21545	1132	$2,36 \cdot 10^{12}$	$2,09 \cdot 10^{12}$	$1,1 \cdot 10^{11}$
САО	7730	6841	360	$13,4 \cdot 10^{12}$	$11,8 \cdot 10^{12}$	$6,22 \cdot 10^{11}$
НАО	354	313	16,5	$1,28 \cdot 10^{10}$	$1,14 \cdot 10^{10}$	$0,6 \cdot 10^9$
Всего				$15,8 \cdot 10^{12}$	$14 \cdot 10^{12}$	$7,36 \cdot 10^{11}$

Перемножив с помощью «Калькулятора растров» карты удельной активности радионуклидов на карты мощности АС, получаем общие активности радионуклидов по каждому участку (см. табл. 2.)

Выводы

Полученные оценки распределения РАО по категориям оказываются зависящими от способа разработки грунтов, что приводит, в частности, к уменьшению, по сравнению с расчетом, количества реально захороненных в контейнеры ВАО. Оценки же собственно извлеченной из котлована и перемещенной на другую территорию активности являются абсолютными и могут использоваться организацией, принимающей грунты из котлована (ГСП «Комплекс»), в качестве контрольных при оценке принятой на хранение активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рабочий проект по стабилизационным мероприятиям. Корректировка отчетов по результатам исследований. Отчет 6: "Отчет по определению характеристик РАО Западной зоны". SIP K 02 01 000 INR 006 02. Отчетный документ Д 17.1. Консорциум "КСК", 2002.*
2. *Оружий А. П., Панасюк М. І., Скорбун А. Д. Особливості розрахунку гамма-полів у свердловинах локальної зони об'єкта "Укриття"// Проблеми Чорнобиля.- 2004. - Вип. 15. - С. 107 - 113*
3. *MicroShield. Version 5.User's Manuel. Grove Engineering Inc.*
4. *Радиологические исследования грунтов в котлованах и скважинах. Северная лента фундаментов НБК (промежуточный отчет). SIP 09-02-001 NI03 RPT 003 01. Отчетный документ D1(D3.7.5). Консорциум ГП НИИСК – ИПБ АЭС, 2009.*
5. *Радиологические исследования грунтов в котлованах и скважинах. Южная лента фундаментов НБК (промежуточный отчет). SIP 09-02-001 NI03 RPT 006 01. Отчетный документ D2(D3.7.5). Консорциум ГП НИИСК – ИПБ АЭС, 2010.*
6. *Радиологические исследования грунтов в котлованах и скважинах. Северная и южная ленты фундаментов НБК (окончательный отчет). SIP 09-2-001 NI 03 RPT 008 01. Отчетный документ D3 (D3.7.9). Консорциум ГП НИИСК – ИПБ АЭС, 2010.*
7. *Положение по обращению с твердыми радиоактивными отходами на ЧАЭС, 29П-С.*
8. *Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України. Зареєстровані в МОЗ України за № 54 від 02.02.2005 та в Мініст. за № 552/10832 від 20.05.2005.*

ПРОГНОЗ РОЗПОДІЛУ РАДИОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ПРИ ЗЕМЛЯНИХ РОБОТАХ У КОТЛОВАНАХ ДЛЯ ФУНДАМЕНТУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА

**М. І. Панасюк, А. Д. Скорбун, І. А. Литвин, Є. П. Люшня,
А. М. Алфьоров, Г. В. Левін**

Розроблено та використано підхід, який дозволяє прогнозувати властивості радіоактивних відходів при плануванні проведення земляних робіт. Виконано прогноз кількості радіоактивних відходів, представлених грунтами, які підлягають розробці в плямах котлованів для фундаменту нового безпечного конфайнмента над зруйнованим 4-м блоком ЧАЕС. Активність ґрунтів визначалась за допомогою гамма-каротажу близько 500 свердловин для встановлення палів шпунтової огорожі стінок котлованів та спостережних свердловин радіогідроекологічного моніторингу. Обробку польових матеріалів проведено методами математичного моделювання гамма-полів від радіоактивно забрудненого ґрунту в геометрії та за критеріями, прийнятими на ЧАЕС при сортуванні радіоактивних відходів (РАВ). Прогноз просторового розподілу РАВ виконувався з використанням ГІС-технологій.

Ключові слова: ґрунти, радіоактивні відходи, гамма-каротаж, ГІС-технології, новий безпечний конфайнмент, математичне моделювання гамма-полів.

**PREDICTION OF THE RADIOACTIVE WASTES DISTRIBUTION AT EARTHMOVING
IN FOUNDATION PITS FOR NEW SAFE CONFINEMENT**

**M. I. Panasyuk, A. D. Skorburn, I. A. Lytvyn, E. P. Liushnya,
A. M. Alfyoroff, G. V. Levin**

The approach was developed and applied for predicting of properties of radio-active wastes for planning and realization of earthmovings. The prediction of amount of radio-active wastes, corresponded by soils which are subject to digging inside the spots of foundation pits for new safe confinement above the destroyed Unit 4 of CNPP have been carried out. Soil's activity was determined by means of the gamma-logging of approximately 500 boreholes for enclosing sheathing piles of walls of foundation pits and observation boreholes of the radiohydroecological monitoring. Treatment of the field materials was fulfilled by the methods of mathematical design of gamma-fields from radio-active contaminated soil in the geometry and according to criteria, accepted on CNPP for radioactive wastes sorting. Prediction of spatial distribution of radioactive wastes was carried out with the use of GIS-technologies.

Keywords: soils, radioactive wastes, gamma-logging, GIS-technologies, new safe confinement, mathematical design of gamma-fields.

Поступила в редакцию 28.05.10