

УДК 577.3 : 539.12.04

© 2008

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ  
г. ОЗЕРСКА В РЕЗУЛЬТАТЕ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ  
ИНЕРТНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ ИЗ ТРУБ РЕАКТОРНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ПО “МАЯК” В ПЕРИОД С 1948 ПО 1989 гг.**

*Ю.В. Глаголенко, Е.Г. Дрожко, Ю.Г. Мокров, С.И. Ровный, Д.А. Берегич,  
П.М. Стукалов, И.А. Иванов, А.И. Алексахин  
Россия, г. Озерск, ФГУП “ПО “Маяк”*

*Л.Р. Анспо*

*США, Солт Лейк Сити, Университет штата Юта*

*Б.А. Нанье*

*США, г. Ричланд, штат Вашингтон, Северо-Западная Тихоокеанская лаборатория*

Приведены результаты реконструкции дозы внешнего облучения населения, обусловленной атмосферными выбросами инертных радиоактивных газов активационного ( $^{41}\text{Ar}$ ) и осколочного происхождения (изотопы ксенона и криптона) из труб промышленных реакторов ПО “Маяк” в период с 1948 по 1989 гг. Расчет приземных объемных активностей выполнен с использованием программы RATCHET. Оценка доз получена в приближении полубесконечного облака. Показано, что более 90 % дозы внешнего облучения накоплено в период с 1948 по 1956 гг. Отмечено, что результаты расчета, в целом, хорошо соответствуют архивным данным инструментального контроля мощности экспозиционной дозы и данным термомолюминесцентной дозиметрии.

Значения эффективной дозы внешнего облучения жителей г. Озерска получены для различных возрастных групп населения с учетом экранирующих свойств зданий и времени пребывания на открытой местности и оцениваются в диапазоне от 16 до 23 мЗв.

Производственное объединение (ПО) “Маяк” было создано на севере Челябинской области в конце 1940-х гг. по специальному решению Правительства СССР для производства оружейного плутония. В состав предприятия входили реакторное, радиохимическое и химико-металлургическое производства.

В период становления предприятия и отработки технологических процессов (с 1948 по 1960 гг.) образующиеся газообразные радиоактивные отходы поступали в атмосферу практически без очистки, что могло привести к повышенному облучению населения близлежащих территорий. Предварительные исследования, выполненные в начале 1990-х гг., показали [1], что в тот период времени основной вклад в дозу вносили выбросы  $^{131}\text{I}$  радиохимического произ-

водства и инертных радиоактивных газов (ИРГ) реакторного производства. В период с 1948 по 1990 гг. на ПО “Маяк” эксплуатировалось пять промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР) – “А”, “АИ”, “АВ-1”, “АВ-2” и “АВ-3”. Выбросы ИРГ из других реакторных установок были незначительны и, поэтому, в данной работе не рассматриваются. Регулярный штатный инструментальный контроль мощности выбросов ИРГ был организован только в середине 1960-х гг.

Значимость радиационного воздействия ИРГ на население в 1950-е гг. была обусловлена следующими особенностями эксплуатации ПУГР:

– интенсивными выбросами радионуклидов активационного происхождения, главным

образом, —  $^{41}\text{Ar}$ , поскольку продувка графитовой кладки реактора в этот период осуществлялась обычным атмосферным воздухом;

— многочисленными аварийными ситуациями, связанными с поступлением урана в кладку реактора, которые сопровождалась выбросами ИРГ осколочного происхождения (изотопы криптона и ксенона);

— отсутствием систем газоочистки (выдержки отходящих газозвоздушных потоков для распада короткоживущих ИРГ).

Основной целью данной работы является оценка эффективных доз внешнего гамма-облучения жителей г. Озерска и других населенных пунктов в районе ПО "Маяк" на основе полученных ранее результатов реконструкции атмосферных выбросов ИРГ промышленными реакторами [2].

## 1. РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА И ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Решение поставленной задачи осуществлялось расчетным образом, путем моделирования процессов атмосферной диффузии и ветрового переноса ИРГ, получения полей приземных объемных активностей (ПОА) и последующего расчета на их основе доз облучения населения от облака ИРГ в зависимости от продолжительности пребывания на открытом пространстве и в закрытых помещениях.

Основные положения методики и результаты реконструкции мощности выбросов ИРГ из каждого реактора за весь период их эксплуатации представлены в работе [2]. Учитывались выбросы ИРГ осколочного ( $^{83\text{m},85\text{m},87,88,89}\text{Kr}$  и  $^{131\text{m},133,133\text{m},135,135\text{m},138}\text{Xe}$ ) и активационного происхождения ( $^{41}\text{Ar}$ ).

Атмосферный перенос и рассеяние ИРГ моделировались с помощью программы RATCHET, которая использовалась в рамках Хэнфордского Проекта для реконструкции доз населения [3]. Компьютерная реализация RATCHET выполнена средствами Fortran. В программе RATCHET реализована Лагранжева-Гауссова модель переноса и рассеяния дискретных клубов выброса с учетом пространственно-временных изменений наблюдаемых метеоданных.

В качестве исходных данных для проведения расчета задавались параметры, характери-

зующие источник выброса, расчетную область (домен) и метеорологическую обстановку.

ИРГ из ПУГР поступали в атмосферу через высокие выбросные трубы высотой от 86 до 100 м. Параметры каждой трубы — координаты, высота, диаметр, расход воздуха и температура отходящей газозвоздушной смеси — задавались по архивным эксплуатационным документам. Каждая труба рассматривалась в качестве точечного источника выброса. В расчетах использовались почасовые мощности выброса, полученные в предположении равномерного распределения мощности выброса за каждый месяц (год). Непрерывный характер выбросов моделировался путем запуска конечного числа клубов в час (от 4 до 6).

Домен представлял собой прямоугольную область, зафиксированную в пространстве. Район расположения предприятия находится на полого-всхолмленной равнине (на отметках 240–250 м абс.) с незначительным перепадом высот. Хребет Уральских гор (максимальная высота 607 м абс. — гора Егоза) расположен на расстоянии 22–24 км от источников выброса. Поэтому, особенности рельефа местности в расчетах не учитывались. Исходя из поставленной задачи, географически домен должен покрывать территорию порядка 2000 км<sup>2</sup>, но из-за особенностей "клубового" подхода его реальные размеры были несколько шире, поскольку траектории движения всех клубов "запоминаются" при выходе за границу области, и при изменении метеословий клубы должны иметь возможность вернуться в домен чтобы предотвратить недооценку суммарной дозы.

RATCHET использует сеточное представление данных. Строились две взаимосвязанные равномерные сетки — пространственная (GS), — для задания местоположения объектов относительно центра домена (начала координат), и более плотная — концентрационная (GC), — для получения узловых значений проинтегрированных за сутки ПОА с учетом вклада каждого клуба. Расстояние между узлами сетки GS составляло 2 км, а для GC — 1 км.

Для всего расчетного временного интервала (1948–1989 гг.) была подготовлена последовательность почасовых метеопараметров на основе результатов измерений метеостанции п. Аргаяш, расположенной в районе ПО

“Маяк” и входящей в наблюдательную сеть Росгидромета (рис. 1). Особенности выбора источника метеорологической информации рассмотрены в работе [4]. Измерения метеопараметров на метеостанциях проводились через фиксированные промежутки времени (4–8 раз в сутки), поэтому для подготовки почасовых данных предполагалось, что погодные условия предыдущего измерения сохраняются постоянными до следующего измерения.

В качестве основных параметров, значимых для процессов атмосферного транспорта ИРГ, задавались данные о скорости и направлении ветра, температуре воздуха, атмосферной устойчивости. Возможное изменение направления ветра с высотой не учитывалось (из-за отсутствия соответствующих экспериментальных

данных), а изменение скорости ветра на высоте источника выброса определялось по адиабатическому профилю. Температура воздуха на высоте выброса соответствовала измеренной на высоте метеомачты (10 м) базовой станции. Для описания атмосферной устойчивости использовались дискретные категории по классификации Пасквила-Гиффорда-Тернера [5], рассчитанные на основе климатологических данных базовой метеостанции.

Единственным процессом, характеризующим “истощение” облака ИРГ, являлся радиоактивный распад.

На первом этапе расчет доз внешнего облучения проводили по упрощенной схеме на основе полученных значений интегральных ПОА – в геометрии полубесконечного облака с использованием коэффициентов конверсии облучения всего тела [6]. При этом экранирование поля гамма-излучения жилыми зданиями и производственными помещениями, а также временной режим пребывания населения на открытой местности не учитывались. Полученные таким образом расчетные значения доз будем называть “дозами на открытой местности”.

На территории расчетного участка (домена) было выбрано несколько контрольных точек, соответствующих местоположению того или иного населенного пункта (объекта). Одна точка была выбрана в центре промышленной площадки ПО “Маяк” и по одной точке в центре ближайших к предприятию населенных пунктов: п. Новогорный, п. Метлино (ОНИС), п. Метлино (р. Теча), г. Касли, г. Кыштым (рис. 1). На территории г. Озерска были заданы две расчетные точки: в центральной части города (“ЦЗЛ”) и на северо-восточной оконечности (“Метеостанция”).

## 2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 приведены значения эффективной дозы внешнего гамма-облучения (в сумме за весь расчетный период) по всем основным ИРГ, за исключением  $^{85}\text{Kr}$ . Известно, что  $^{85}\text{Kr}$  обладает малым периодом полураспада (3,2 мин), и на больших расстояниях (с временем переноса более 30 мин) его вклад в дозу фактически равен нулю. Однако предварительные расчеты показывают, что на территории промышленной (вблизи



Рис. 1. Схема расположения точек контроля (▲) в пределах домена

Таблица 1

Вклад различных ИРГ в суммарную (1949–1989 гг.) дозу внешнего облучения на открытой местности

в мЗв

Контрольная точка	<sup>41</sup> Ag	<sup>85m</sup> Kr	<sup>87</sup> Kr	<sup>88</sup> Kr	<sup>135m</sup> Xe	<sup>135</sup> Xe	<sup>138</sup> Xe	Сумма
Метеостанция (г. Озерск)	11,68	0,002	0,087	0,166	0,102	0,0146	1,129	13,2
ЦЗЛ (г. Озерск)	8,49	0,001	0,047	0,089	0,048	0,0078	0,531	9,2
п. Новогорный	16,69	0,002	0,126	0,233	0,158	0,0198	1,780	19,0
с. Метлино (р. Теча)	79,25	0,014	0,659	1,159	0,930	0,0963	9,995	92,1
г. Кыштым	4,64	0,001	0,029	0,054	0,031	0,0046	0,341	5,1
г. Касли	4,88	0,000	0,028	0,055	0,022	0,0048	0,245	5,2
п. Метлино (ОНИС)	15,05	0,002	0,108	0,200	0,122	0,0173	1,312	16,8
Промплощадка	412,63	0,115	4,477	8,146	6,221	0,7058	63,375	495,7

Примечание. Вклад остальных нуклидов пренебрежимо мал.

источников выброса) доза внешнего облучения от <sup>89</sup>Kr может быть сопоставима с дозой от <sup>41</sup>Ag. Вклад <sup>89</sup>Kr в суммарную дозу на территории промплощадки требует отдельного изучения.

Анализ данных табл. 1 позволяет заключить, что вклад <sup>41</sup>Ag в суммарную дозу внешнего облучения от воздействия всех ИРГ составляет не менее 85 %.

Суммарные по всем ИРГ годовые значения эффективной дозы внешнего облучения представлены в табл. 2.

### 3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Проведем сопоставление полученных расчетных результатов со следующими экспериментальными данными:

- архивные данные непрерывного автоматизированного контроля мощности экспозиционной дозы (МЭД) на стационарных постах;
- результаты измерений накопленной дозы в образцах строительной керамики методами термолюминесцентной дозиметрии (ТЛД).

#### 3.1. Сравнение с данными контроля МЭД

В 1958 г. в зоне влияния ПО “Маяк” была создана автоматизированная система стационарного дозиметрического контроля мощности

экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучающих нуклидов. Первоначально система предназначалась для оперативного контроля изменения параметров радиационной обстановки (точное время, место, значение МЭД) в результате атмосферных выпадений гамма-излучающих радионуклидов в районе расположения пункта контроля, обусловленных повышенными (аварийными) выбросами из труб предприятия или ветровым переносом активности с радиационно-опасных объектов (водоемы-хранилища ЖРО, территория ВУРС и др.).

Стационарные точки контроля были оснащены датчиками – кассетами из счетчиков СТС-8 или СТС-2 и вторичными приборами БТ (“Тисс”) или ТЗ (“Фиалка”). В состав оборудования входили также самопишущие потенциометры типа ЭПП-09, которые позволяли осуществлять непрерывную запись значения мощности дозы гамма-излучения в месте установки датчика. Нижний предел обнаружения составлял 18–20 мкР/ч (превышение естественного фона в 2–3 раза). Первоначально измерения проводились в восьми точках: ЦЗЛ (г. Озерск), метеостанция ПО “Маяк” (г. Озерск), п. Опытной научно-исследовательской станции (ОНИС), п. Татыш, п. Новогорный и др. Посты контроля были соединены выделенными (некоммутируемыми) линиями телефонной связи с пунктом управления системой, и, в случае превышения установленного уровня МЭД на одном из пун-

ДОЗИМЕТРИЯ НАСЕЛЕНИЯ ЮЖНОГО УРАЛА

Таблица 2

Суммарные по всем нуклидам годовые эффективные дозы внешнего облучения от выбросов ИРГ для различных контрольных точек на открытой местности

в мЗв

Год	Контрольные точки							
	Метеостанция (г. Озерск)	ЦЗЛ (г. Озерск)	п. Ново- горный	п. Метлино (р. Теча)	г. Кыштым	г. Касли	п. Метлино (ОНИС)	Пром- площадка
1949	0,241	0,149	0,474	1,089	0,120	0,045	0,182	11,526
1950	0,462	0,308	1,201	4,362	0,100	0,168	0,831	23,738
1951	0,679	0,497	1,409	6,993	0,387	0,484	1,449	50,885
1952	1,970	1,279	1,640	12,118	0,611	0,880	2,142	57,142
1953	3,114	3,145	3,565	14,720	1,455	1,074	2,939	97,559
1954	2,345	1,342	3,887	10,913	0,906	0,869	2,120	93,871
1955	1,250	0,933	1,845	14,331	0,349	0,447	2,622	45,430
1956	1,208	0,655	1,966	11,878	0,544	0,636	1,983	29,894
1957	0,285	0,081	0,508	2,143	0,067	0,129	0,354	12,626
1958	0,232	0,127	0,364	2,262	0,068	0,084	0,351	7,565
1959	0,163	0,098	0,347	1,268	0,080	0,078	0,250	9,636
1960	0,292	0,180	0,578	2,196	0,169	0,062	0,401	10,021
1961	0,191	0,055	0,215	1,878	0,037	0,084	0,335	9,073
1962	0,149	0,089	0,146	1,211	0,051	0,048	0,167	6,428
1963	0,086	0,046	0,156	0,778	0,019	0,011	0,114	3,830
1964	0,106	0,041	0,206	0,830	0,028	0,032	0,129	5,433
1965	0,082	0,056	0,071	1,022	0,019	0,026	0,105	4,416
1966	0,050	0,020	0,130	0,562	0,018	0,009	0,088	3,640
1967	0,064	0,021	0,100	0,316	0,020	0,020	0,053	2,648
1968	0,044	0,015	0,035	0,209	0,015	0,009	0,039	2,193
1969	0,044	0,022	0,056	0,194	0,009	0,006	0,026	1,863
1970	0,059	0,017	0,026	0,328	0,007	0,010	0,053	2,116
1971	0,007	0,002	0,008	0,035	0,001	0,001	0,004	0,280
1972	0,005	0,002	0,006	0,037	0,000	0,001	0,006	0,167
1973	0,004	0,001	0,005	0,041	0,001	0,001	0,005	0,270
1974	0,003	0,002	0,005	0,023	0,002	0,002	0,004	0,253
1975	0,002	0,002	0,004	0,028	0,002	0,001	0,005	0,198
1976	0,006	0,003	0,006	0,026	0,002	0,002	0,005	0,369
1977	0,009	0,006	0,012	0,044	0,002	0,003	0,007	0,320
1978	0,004	0,001	0,006	0,057	0,001	0,001	0,008	0,449
1979	0,004	0,002	0,006	0,040	0,002	0,001	0,007	0,254
1980	0,007	0,003	0,005	0,027	0,000	0,002	0,004	0,365
1981	0,006	0,004	0,004	0,024	0,002	0,002	0,005	0,262
1982	0,002	0,001	0,003	0,025	0,000	0,001	0,005	0,217
1983	0,002	0,002	0,006	0,025	0,001	0,000	0,004	0,279
1984	0,001	0,000	0,002	0,013	0,000	0,000	0,002	0,100
1985	0,001	0,001	0,002	0,011	0,001	0,000	0,002	0,092
1986	0,001	0,000	0,002	0,011	0,001	0,000	0,002	0,087
1987	0,001	0,001	0,003	0,016	0,001	0,000	0,003	0,093
1988	0,001	0,001	0,001	0,015	0,000	0,000	0,002	0,070
1989*	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,048
Сумма	13,183	9,211	19,016	92,103	5,100	5,230	16,812	495,710

Примечание. \* Вклад выбросов ИРГ в суммарную дозу внешнего облучения после 1989 г. минимален и значимого вклада в сумму не вносит.

ктов контроля, сигнал о превышении поступал на пульт управления.

После 1965 г. система стационарного контроля претерпела значительные изменения. Был заменен тип датчиков, изменилась их конструкция. Проведена унификация мест установки датчиков, включающая требования к расположению датчиков на одинаковой высоте, исключение, по возможности, влияния рельефа местности, окружающих зданий и сооружений. В контрольных точках были установлены приборы УСИТ-2 с датчиками и самопишущие потенциометры ПСР1-01 для непрерывной записи показаний мощности дозы гамма-излучения.

Общее количество точек в 1970 г. достигло 13.

Начиная с 1959 г. записанные на диаграммной ленте самопишущего потенциометра данные обрабатывались вручную графическим способом, при этом кратковременное возращание МЭД (рис. 2) интерпретировалось как радиационное воздействие от облака ИРГ (при направлении ветра от источников выброса на контрольный пункт), а соответствующая экспозиционная доза получила название – “доза от струи выбросов”. Исходя из формы кривой на диаграмме, определялись фоновые значения МЭД (обусловленные загрязнением поверхности почвы гамма-излучающими радионуклида-

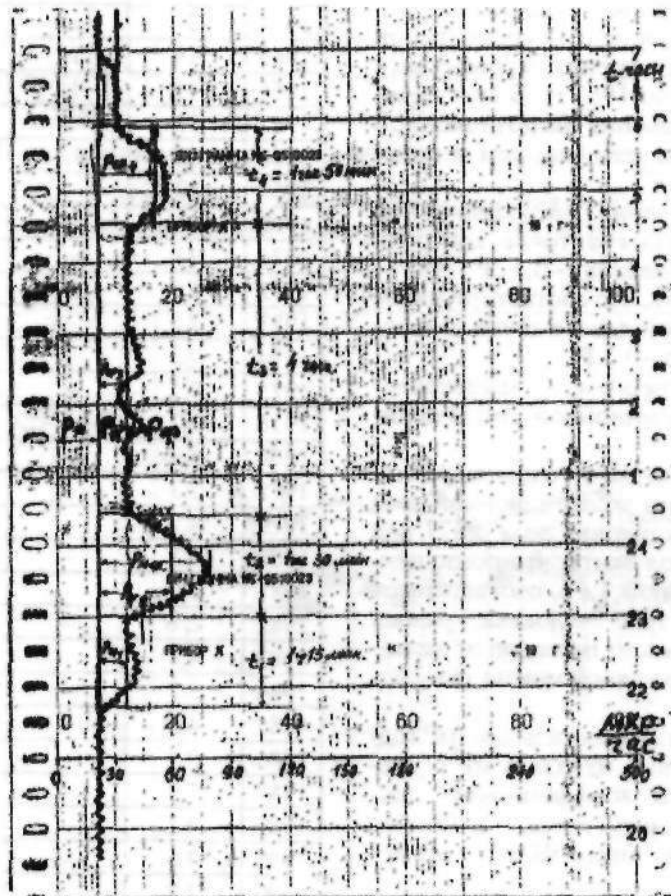


Рис. 2. Представление результатов измерения МЭД на ленте самопишущего устройства (фрагмент архивного документа) – 1964 г.

Таблица 3

Годовая экспозиционная доза  
гамма-излучения от "струи выброса" по  
данным автоматизированной системы  
радиационного контроля

в мР

Год	Метеостанция (г.Озерск)	ЦЗЛ (г.Озерск)	ОНИС (п.Метлино)	Поселок № 2 (п.Татыш)
1959	27	—	49	18
1960	39	26	34	34
1961	46	15	42	18
1962	35	16	20	16
1963	9,2	6,8	12	16
1964	27	15	20	16
1965	19	11	13	15
1966	19	11	16	13
1967	32	8	21	17
1968	8,9	5,1	6,5	5,3
1969	12	—	3,6	4
1970	11	—	1,5	3,6
1971	13	—	2,9	4,2
1972	6,7	—	3,7	4,8
1973	7,6	—	3,2	3,5
1974	7,2	—	3,4	3,2
1975	9,1	—	4,1	1,7
1976	7,7	—	2,3	2,8
1977	4,7	—	2,9	3,9
1978	3,3	—	3,2	2,8
1979	4,7	—	4,1	3,9
1980	12	—	4,3	4,7
1981	7,0	—	2,7	1,9
1982	2,6	—	2,8	2,1
1983	4,1	—	2,4	1,8
1984	2,7	—	2,4	1,8
1985	4,1	—	2,2	2,6
1986	2,4	—	2,1	1,8
1987	3,9	—	2,1	1,4
1988	4,2	—	1,6	1,7
1989	3,5	—	1,5	1,4
1990	2,9	—	0,8	0,6
1991	0,2	—	<0,1	<0,1
1992	<0,1	—	<0,1	<0,1
Сумма	~400	—	~350	~230

ми), время действия струи и уровни МЭД – по длительности и амплитуде участков превышения фоновых значений, а также суммарная экспозиционная доза от струи за определенный период времени.

Результаты измерения годовой экспозиционной дозы от струи (за вычетом фоновых значений) представлены в табл. 3.

После 1992 г. значения МЭД от струи составляли величину <0,1 мР/год.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, позволяет сделать следующие выводы:

– для г. Озерска непрерывный (1959–1992 гг.) ряд контролируемых значений МЭД существует только для одной точки – “Метеостанция” (восточная окраина г. Озерска);

– в центральной части г. Озерска (район расположения ЦЗЛ) измерения проводились только в период с 1960 по 1968 гг. В этот период времени годовые значения экспозиционной дозы были в 1,5–4 раза меньше, чем в точке контроля “Метеостанция”;

– суммарное значение экспозиционной дозы внешнего облучения в точке контроля “Метеостанция” оценивается ~0,4 Р (1959–2006 гг.). Можно полагать, что соответствующее значение экспозиционной дозы в точке контроля “ЦЗЛ” не превышало ~0,2 Р;

– суммарная погрешность вышеприведенных значений экспозиционной дозы оценивается в 50–100 %.

Известно, что в воздухе в условиях равновесия заряженных частиц экспозиционной дозе 1 Р соответствует поглощенная доза 0,877 рад (8,77 мГр). Если предположить, что поглощенной дозе в воздухе, равной 1 Гр, соответствует эффективная доза в теле человека, равная 0,7 Зв, то тогда коэффициент перехода от экспозиционной дозы к эффективной можно записать ~6,1 мЗв/Р.

Сопоставление экспериментальных (мР/год) и расчетных (пересчитано из мЗв в мР с учетом вышеприведенного коэффициента) данных для двух контрольных точек – г. Озерск (Метеостанция) и п. Метлино (ОНИС) – приведено на рис. 3 и 4.

Анализ данных, приведенных на рис. 3 и 4, позволяет сделать следующие выводы:

– в период с 1959 по 1970 гг. экспериментальные данные хорошо (в пределах пог-

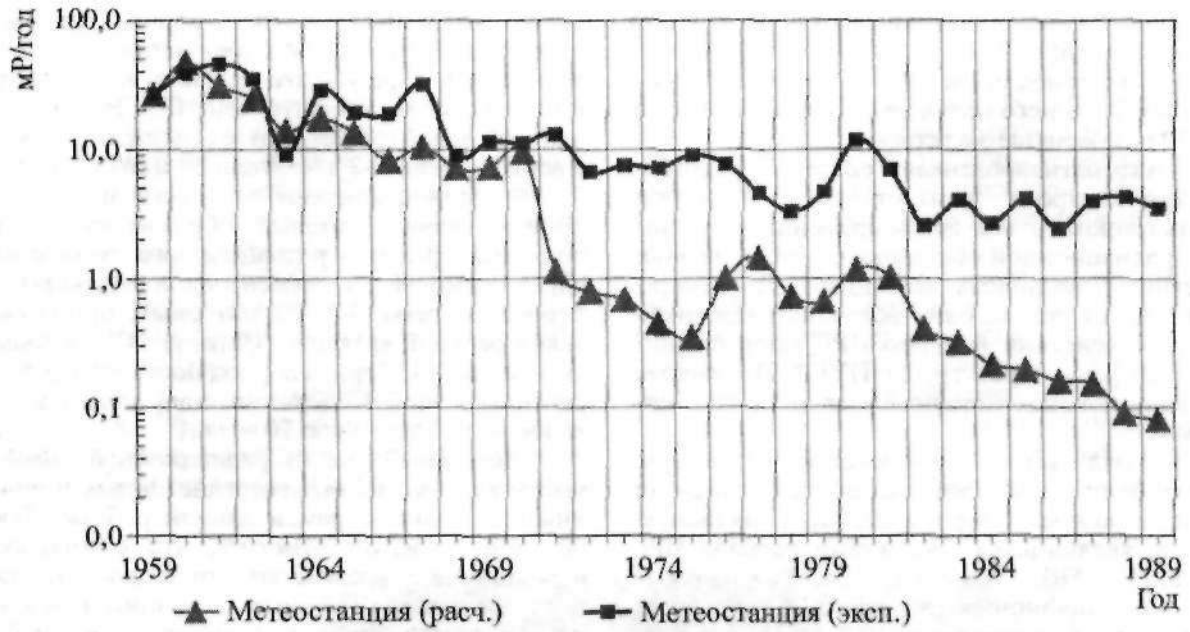


Рис. 3. Сопоставление расчетных доз внешнего облучения от облака ИРГ (пересчитано из мЗв/год в мР/год) с экспериментальными данными (мР/год) для точки "Метеостанция"

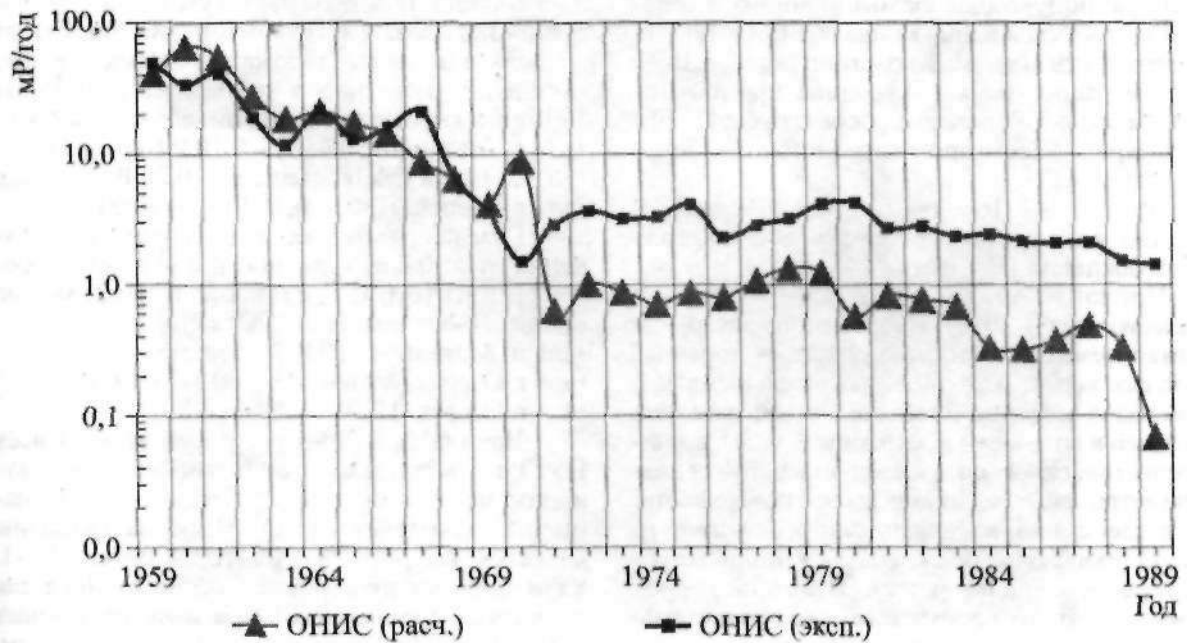


Рис. 4. Сопоставление расчетных доз внешнего облучения от облака ИРГ (пересчитано из мЗв/год в мР/год) с экспериментальными данными (мР/год) для точки "Метлино (ОНИС)"



решности измерений) совпадают с расчетными результатами;

– в период после 1970 г. расчетные значения доз внешнего облучения значительно (от 5 до 30 раз) меньше экспериментальных.

Автоматизирующая система радиационного контроля “дозы от струи” позволяла регистрировать все кратковременные изменения радиационной обстановки, обусловленные влиянием различных источников. В расчетах учитывался только один источник радиационного воздействия – облако ИРГ, поступавших в атмосферу через трубы ПУГР. В качестве дополнительных источников следует рассматривать:

– радиационное воздействие от поверхности почвы, обусловленное осаждением (в виде аэрозолей) короткоживущих радионуклидов, являющихся продуктами распада ИРГ ( $^{88}\text{Rb}$ ,  $^{89}\text{Rb}$ ,  $^{90}\text{Rb}$ ,  $^{138}\text{Cs}$ ,  $^{139}\text{Cs}$ ,  $^{139}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{Cs}$  и др.);

– радиационное воздействие от облака  $^{85}\text{Kr}$  (период полураспада 10,7 лет), поступавшего в атмосферу из труб радиохимических заводов;

– поступление ИРГ и других короткоживущих радионуклидов активационного и осколочного происхождения в виде водной аэрозоли с поверхности водоема Кызылташ (водоем В-2), который расположен на середине прямой, соединяющей источники выбросов (трубы ПУГР) и г. Озерск. Рассмотрим этот источник более подробно.

Водоем В-2 (см. рис. 1) использовался в качестве водоема оборотного водоснабжения для охлаждения ПУГР.

Потоки горячей воды из ПУГР поступали по специальному лотку на сброс в юго-восточной части водоема В-2. При взаимодействии “горячих” сбросных вод с “холодной” водой водоема В-2 происходил процесс интенсивного образования аэрозолей в виде мельчайших капель воды, возникающих при схлопывании воздушных пузырьков и при ветровом капельном выносе с поверхности. Под воздействием восходящих потоков нагретого воздуха происходил подъем и дальнейший ветровой перенос водной аэрозоли. В зимний период времени потоки восходящего пара визуально просматривались на высотах до 100 м.

Радиоактивное загрязнение сбросных вод было обусловлено:

– короткоживущими радионуклидами осколочного происхождения, которые образовывались в результате деления ядер урана, поступавшего в активную зону ПУГР с охлаждающей водой (естественное содержание урана в воде водоема В-2 достигало 20 мкг/л) [2];

– радионуклидами активационного происхождения, которые образовывались в результате реакций радиационного захвата на ядра химических элементов, содержащихся в воде водоема В-2. Характерным примером таких реакций является  $^{35}\text{Cl}$  (п,  $\gamma$ )  $^{36}\text{Cl}$  (сечение активации 0,43 барн, а период полураспада  $^{36}\text{Cl}$  равен 37,2 мин). Содержание хлор-иона в воде водоема В-2 достигало 70 мг/л.

Детальный анализ радиационной значимости каждого из вышеперечисленных источников выходит за рамки данной работы. Тем не менее, следует отметить, что суммарное радиационное воздействие от совокупности всех вышеперечисленных источников носило квазистационарный характер и в 1970–1980-е гг. составляло, в среднем (см. табл. 3):

• для п. Метлино (ОНИС) – ~2,5 мР/год;

• для г. Озерск (Метеостанция) – ~5,0 мР/год.

Можно полагать, что суммарная экспозиционная доза (на открытой местности) от воздействия всех рассматриваемых дополнительных источников за период с 1948 по 1990 гг. не превысила (максимальные оценки):

• для п. Метлино (ОНИС) – 0,10 Р (0,61 мЗв);

• для г. Озерск (Метеостанция) – 0,20 Р (1,2 мЗв);

• для г. Озерск (ЦЗЛ) – 0,10 Р (0,61 мЗв).

Суммарные значения доз внешнего облучения от открытой местности с учетом выбросов ИРГ из труб ПУГР (см. табл. 1 и 2) можно оценить (максимальные оценки):

• для п. Метлино (ОНИС) – 17,4 мЗв;

• для г. Озерск (Метеостанция) – 14,4 мЗв;

• для г. Озерск (ЦЗЛ) – 9,8 мЗв.

Начиная с 1990-х гг., после вывода всех ПУГР из эксплуатации, единственным действующим источником текущего внешнего радиационного воздействия ПО “Маяк” на население является выброс  $^{85}\text{Kr}$  из труб завода РТ-1. Радиационная значимость этого источника для г. Озерска чрезвычайно мала и не превышает 0,01 мР/год (экспериментальные данные, см. табл. 3) и оценивается расчетным путем на уровне ~5 мкЗв/год.

### 3.2. Сравнение с данными люминесцентной дозиметрии

В качестве второго способа для сопоставления результатов расчета использовались экспериментальные данные, полученные методами люминесцентной (OSL) и термолюминесцентной (TL) дозиметрии. В качестве объектов контроля использовались образцы кирпичей, отобранные осенью 2006 г. на высоте 50, 100 и 200 см от уровня земли (рис. 5), из стен различных зданий (сооружений) г. Озерска постройки 1948–1949 гг. (рис. 6).

Образцы для измерений выпиливались циркулярной фрезой из средней части кирпичей после выемки последних из места закладки. Все отобранные кирпичи находились под слоем

штукатурки толщиной 20–25 мм. Характерное расстояние от мест отбора кирпичей до источников выброса составляет 8–10 км.

При изъятии кирпичей проводился первичный дозиметрический контроль с использованием прибора ДКГ-02У. Датчик устанавливался точно в точку выемки образцов. Мощность дозы внешнего облучения составляла от 0,08 до 0,11 мкЗв/ч.

Дозиметрические исследования были выполнены в лаборатории GSF (Германия). Использовались зерна кварца размером 140–200 мкм, отобранные с глубины 5–8 мм от наружной поверхности кирпича.

В общем случае, TL-метод оказался более предпочтительным, хотя в пределах погрешности оба подхода хорошо согласуются между



Рис. 5. Схема отбора образцов кирпичей (Масштаб 1 : 4200)

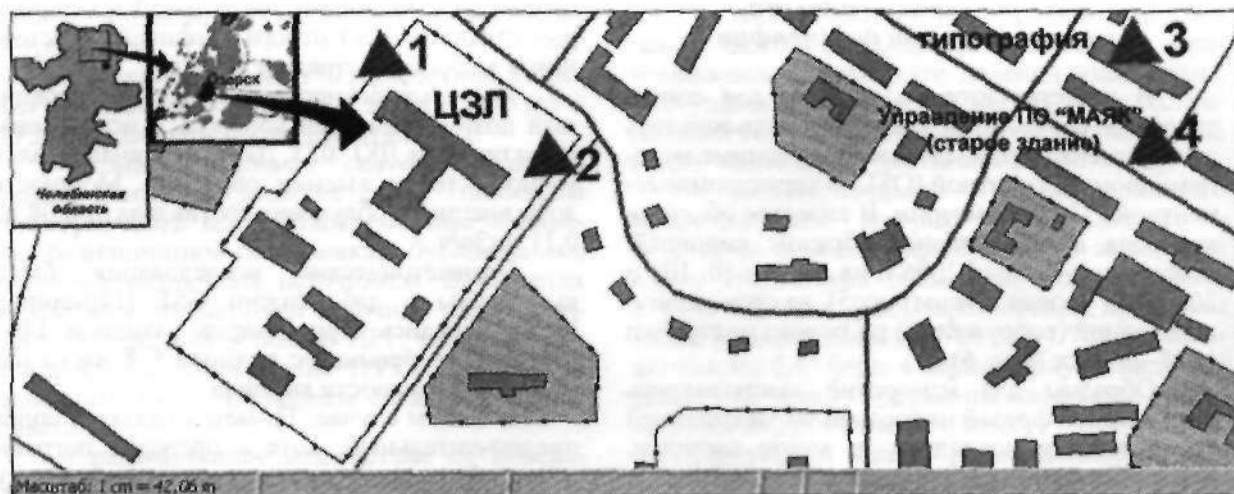


Рис. 6. Карта-схема мест отбора образцов кирпичей в г. Озерске

собой. Методика и результаты измерения техногенной составляющей поглощенной дозы внешнего гамма-облучения приведены в работе [7]. Средневзвешенный верхний предел поглощенной в кирпиче дозы оценивается в 20 мГр (3 стандартных отклонения).

Предварительные расчетные исследования показали, что средняя энергия гамма-излучения в приземном слое атмосферы, обусловленная полубесконечным объемным источником  $^{41}\text{Ar}$ , составляет  $\sim 0,2$  Мэв.

Дозовый коэффициент экранирования анализируемых проб кирпичей слоем штукатурки (20–25 мм) и наружным слоем кирпича ( $\sim 5$  мм) может достигать  $\sim 1,3$  [8]. Таким образом, с учетом полубесконечной  $2\pi$ -геометрии (стена здания – атмосфера) и коэффициента экранирования гамма-излучения слоем штукатурки, верхнее значение поглощенной дозы на открытой местности в центральной части г. Озерска можно оценить  $20 \cdot 1,3 \cdot 2,0 \cong 50$  мЗв.

#### 4. ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ

Как уже отмечалось выше, жители г. Озерска подвергались облучению от облака ИРГ и от поверхности почвы, загрязненной радионуклидами, образовавшимися при их

распаде. Доза внешнего облучения населения определяется не только уровнем радиоактивного загрязнения поверхностного слоя почвы и приземного слоя атмосферы, но и характером жизнедеятельности населения. Под характером жизнедеятельности населения в данном случае следует понимать:

- относительную долю времени (в течение календарного года) нахождения жителей в зданиях и сооружениях, на открытой местности и за пределами территории основного проживания во время отпуска или каникул;
- защитные свойства жилых и общественных зданий, определяющие снижение уровня внешнего облучения внутри них, по сравнению с уровнем облучения на открытой местности.

В работе [9] на основании результатов исследований, выполненных в районах, подверженных радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, рекомендуется принимать следующие данные о распределении времени пребывания жителей в различных, с точки зрения формирования внешнего облучения, условиях (табл. 4).

В данной работе для всех возрастных групп жителей г. Озерска был принят следующий временной режим проживания населения:

- в зданиях и помещениях – 0,7;
- на открытой местности – 0,2;

Таблица 4

Значение коэффициента, характеризующего режим поведения населения в зависимости от возраста [9]

в долях от продолжительности календарного года

Место пребывания	Дошкольники, 1–6 лет	Школьники, 7–15 лет	Взрослые, старше 16 лет
Помещения	0,8	0,8	0,6
Улицы (асфальт)	0,15	0,15	0,2
Целина	0,05	0,05	0,2

Таблица 5

Значения коэффициента экранирования [10]

Тип здания или местоположение	Тип воздействия:		$K_s$
	С – радиоактивное облако; S – загрязнение почвы		
На 1 м выше уровня почвы	C		1,0
	S		0,7
Одноэтажный кирпичный дом	C		0,6
	S		0,05–0,3
<b>Небольшой многоэтажный дом</b>			
Подвал	S		0,01
Первый этаж	S		0,5
<b>Большой многоэтажный дом</b>			
Подвал	C		0,2
	S		0,005
Верхний этаж	S		0,01

– за пределами территории основного проживания – 0,1.

В табл. 5 [10] приведены значения коэффициента экранирования –  $K_s$ , который численно равен отношению мощности дозы внешнего облучения внутри здания к мощности дозы на открытой местности.

В данной работе, на основе анализа данных

табл. 5, для всех возрастных групп населения г. Озерск были приняты следующие значения коэффициента экранирования:

- от радиоактивного облака – 0,5;
- от загрязнения почвы – 0,2.

При этих предположениях верхняя (максимальная) оценка значений результирующих доз внешнего облучения жителей г. Озерска, учитывающих время пребывания на открытой местности и защитные свойства зданий, будет составлять от ~16 мЗв (центральная часть города) до ~23 мЗв (восточная часть).

### ВЫВОДЫ

Получена расчетная оценка значений эффективной дозы внешнего облучения населения ближайших к ПО “Маяк” населенных пунктов в результате выбросов ИРГ реакторного производства. Расчет атмосферного переноса и рассеяния ИРГ выполнены с помощью программного комплекса RATCHET. Первичные дозовые расчеты проведены в приближении полубесконечного облака. Максимальное значение дозы внешнего облучения жителей г. Озерска оценивается в диапазоне 16–23 мЗв.

*Работа выполнена в рамках проекта 1.4 JCCRER.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сулова К.Г., Хохряков В.Ф., Дрожко Е.Г. и др. Эффективная доза облучения жителей г. Челябинска-65: В сб. Хроническое радиационное воздействие: риск отдаленных эффектов / I Международный симпозиум. Январь 9–13, Челябинск, 1995. – С. 11–12.
2. Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. и др. Методика и результаты реконструкции выбросов инертных радиоактивных газов из труб графитовых реакторов ПО “Маяк” за весь период их эксплуатации // Вопросы радиац. безопасности. – 2008. – Спецвыпуск. – С. 6–21.
3. J.V. Ramsdell, C.A. Simonen, K.W. Burk. Regional Atmospheric Transport Code for Hanford Emission Tracking (RATCHET). PNWD-2224 HEDR. – Batelle, PNL, Richland, WA. – 1994.
4. Музруков В.А. Обеспечение расчетов приземных концентраций загрязняющих веществ в

зоне влияния "ПО "Маяк" метеорологической информацией // Вопросы радиац. безопасности. – 2005. – № 2. – С. 78–85.

5. Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу (ДВ-98). – М.: Госкомэкология РФ, Минатом РФ, 1999.

6. K.F. Eckerman, J.C. Ryman. Federal guidance report № 12. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. EPA-402-R-93-081, EPA USA. – 1993.

7. Evaluation of external exposure of the population in Ozyorsk due to radioactive noble gases with luminescence measurements of bricks / С. Woda, P. Jacob, Y. Mokrov, S. Rovny // Fifth International

Workshop on Radiation Risk Research in Southern Urals, 13–15 August, Bad Griesbach, Germany: Scientific Programme. Book of Abstracts. List of Participants, 2007. – P. 34.

8. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. – М.: Атомиздат, 1966. – 311 с.

9. Иванов Е.А. Методика расчета годовой дозы внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях // Атомная энергия. – Сентябрь 1996. – Т. 81, вып. 3. – С. 236–239.

10. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 265 с.