

УДК 504.06
© 1997

АВАРИЯ 1957 Г. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ

М.И. Авраменко, А.Н. Аверин, Б.Г. Лобойко, В.П. Филин
Россия, г. Снежинск, РФЯЦ — ВНИИТФ

Ю.В. Глаголенко, Е.Г. Дрожко, Э.С. Котов, Ю.Г. Мокрое, Г.Н. Романов
Россия, г. Озерск, ПО "Маяк"

Представлены результаты работ, проведенных с целью получения исходных данных для моделирования образования Восточно-Уральского радиоактивного следа. Эти работы были проведены группой специалистов РФЯЦ-ВНИИТФ и ПО "Маяк" при поддержке Международного Научно-Технического Центра в рамках Проекта №048 : "Моделирование переноса загрязнений в атмосфере".

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью Проекта МНТЦ № 048: "Моделирование переноса загрязнений в атмосфере" является разработка эффективного инструмента для численного моделирования распространения полидисперсных примесей в атмосферном пограничном слое [1]. Другой целью является проведение детальных расчетов радиоактивного загрязнения местности и радиационных нагрузок, имевших место в результате радиационной аварии на производственном объединении "Маяк" (Челябинск-65) в 1957 г, а также получение новой информации о параметрах данной аварии. Как известно, в результате этой аварии возникла обширная территория загрязнения, известная как Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС).

Имеющийся экспериментальный материал по аварии 1957 г. и распределению загрязненности по территории ВУРС должен использоваться для проверки и калибровки создавае-

мых в рамках Проекта моделей и численных методик расчета переноса загрязнений в атмосфере. В связи с этим одним из направлений работ Проекта являлся сбор и анализ имеющихся данных по аварии 1957 г. и образовавшемуся в результате радиоактивному следу, а также проведение ряда экспериментальных и расчетно-теоретических работ для получения недостающей информации, необходимой для последующего численного моделирования образования ВУРС.

Несмотря на масштабность и широкую известность радиационной аварии 1957 г. открытые публикации по ней, по известным причинам, появились сравнительно недавно и их число не велико [2-7].

Для расследования причин аварии 1957 г была создана Правительственная комиссия под председательством министра среднего машиностроения Е.П. Славского. В первые годы после аварии большой объем работ по съемке и изучению структуры ВУРС был проведен специалистами Центральной заводской

лаборатории ПО "Маяк" совместно с рядом других организаций, в первую очередь с Институтом Прикладной Геофизики Госкомгидромета СССР. Данные исследования носили пионерский характер, поскольку до аварии 1957 г. опыта работы с обширными радиационно загрязненными территориями не существовало. Большой вклад в проведение этих работ внесли И.А. Терновский, Е.А. Федоров (ПО "Маяк"), Е.Н. Теверовский (ИПГ) и другие исследователи. При изложении результатов по структуре ВУРС был использован (с некоторыми уточнениями) обзор проведенных исследований [8], подготовленный специалистами ПО "Маяк" и ИПГ. Ряд важных параметров аварии, таких как энерговыделение взрыва и химический состав его продуктов до сих пор оставались невыясненными. С целью их определения в газодинамическом и теоретическом отделах ВНИИТФ были проведены необходимые работы, включавшие в себя эксперименты по изучению взрываемости соответствующих составов.

УСЛОВИЯ, ПРИ КОТОРЫХ ПРОИЗОШЛА АВАРИЯ

Причиной радиационной аварии, произошедшей на производственном объединении "Маяк" в 1957 г, послужил химический взрыв емкости-хранилища радиоактивных отходов радиохимического производства [2]. Взорвавшаяся емкость-хранилище (банка №14 здания 120-3) представляла собой сварную емкость цилиндрической формы с плоским дном, без крышки. Ее наружный диаметр составлял 8 м, высота - 6 м. Емкость была выполнена из нержавеющей стали (толщина стенок ~13 мм). Емкость располагалась в отдельном железобетонном каньоне диаметра 9 м и глубиной 7,4 м. Сверху каньон был прикрыт цилиндрической железобетонной плитой толщиной ~0,8 м и весом ~160 т. Поверх этой плиты была земляная насыпь толщиной 1-1,5 м. Характерная толщина бетонных боковых стенок каньона составляла ~0,8-1,2 м.

Комплекс, в который входила взорвавшаяся емкость, представлял собой заглубленное прямоугольное сооружение с двадцатью ячейками-каньонами, располагавшимися в две шеренги.

Рабочий объем взорвавшейся емкости составлял 250 м³. Заполнение емкости жидкими радиоактивными отходами происходило по 10 апреля 1957г. Эти отходы представляли собой раствор солей - в основном нитрата и ацетата натрия. Кроме того в составе отходов присутствовали радиоактивные элементы, распад которых сопровождался значительным энерговыделением: ~8,5·10⁴ ккал/час - в начале хранения и ~6,8·10⁴ ккал/час - перед взрывом. Это энерговыделение отводилось системой водяного охлаждения. Однако через некоторое время система охлаждения вышла из строя, что привело к разогреву емкости, выпариванию воды, а в последствии - к тепловому взрыву сухого "осадка" солей.

Взрыв произошел 29 сентября 1957г в 16 час. 20 мин. по местному времени.

Описанная причина взрыва была названа как наиболее вероятная в заключении Правительственной комиссии, расследовавшей причины аварии. Отметим, что "неядерный" характер взрыва достаточно очевидно следовал из проведенных в течение первых дней после взрыва анализов радионуклидного состава загрязнения, показавших отсутствие короткоживущих изотопов. Способность солей "осадка" к химическому взрыву при нагревании до ~350 °С была подтверждена в экспериментах, проведенных в ПО "Маяк" вскоре после аварии. В этих экспериментах фиксировалась вспышка образцов "осадка" (массой в несколько грамм) при их нагревании.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЗРЫВАЕМОСТИ ОТХОДОВ

Анализ компонентного состава "осадка" и возможных химических реакций показывает, что в системе при ее нагревании могут протекать экзотермические процессы с выделением газообразных продуктов. Другими словами, при нагревании такая система ("осадок")

может вести себя как взрывчатый материал. Одним из путей оценки энерговыделения взрыва сложных химических систем является метод основанный на использовании закона Гесса, согласно которому тепловой эффект химического процесса не зависит от пути его промежуточных стадий, а зависит только от начального и конечного состояния системы при условии, что превращение происходит при постоянном давлении или постоянном объеме. Для определения энергии взрыва отходов необходимы сведения о составе продуктов взрыва "осадка". Кроме того для описания взрыва необходимо знание кинетических параметров химического превращения.

Для получения этих данных были проведены работы по:

- приготовлению смеси солей "осадка" идентичных по химическому составу отходам, поступавшим на хранение (за исключением радиоактивных примесей);
- определению температуры взрыва "осадка";
- определению энергии активации и предэкспонента в формальном кинетическом уравнении для скорости протекания реакции в "осадке";
- экспериментальному определению состава продуктов взрыва "осадка" в условиях имитирующих его нахождение в емкости-хранилище;
- расчету калорийности взрыва "осадка";
- оценке длительности процесса взрыва.

Приготовление образцов солей "осадка", использованных в экспериментах по изучению взрываемости отходов радиохимических производств, происходило следующим образом. Расчетное количество солей состава тщательно перемешивалось и растворялось в 1 л воды. Стакан с раствором солей помещался на электроплитку и раствор выпаривался до образования пастообразной массы. Далее одна часть массы высушивалась на воздухе до порошкообразного состояния. Полученный таким образом порошок использовался в опытах по определению убыли массы при термировании и определению химического состава продуктов взрыва. Другая часть массы подвергалась

фильерированию через стеклянную трубку. Высушенные на воздухе, образцы имели форму таблетки диаметра 5 мм и толщиной ~7 мм и массой ~0,25 г. Эти образцы использовались в опытах по определению времени задержки вспышки при термировании.

При описании кинетики разложения сложных химических систем, протекающей в несколько стадий, практически невозможно установить, какие из стадий являются определяющими для скорости процесса в целом. Поэтому на практике для описания поведения таких систем при их нагревании обычно используется, так называемый, формальный кинетический подход. При этом подходе не рассматривается отдельно каждая стадия процесса, а рассматривается усредненный процесс без описания механизма протекания промежуточных стадий. Для описания скорости этого усредненного процесса выбирается формальное кинетическое уравнение. Из экспериментальных данных по изменению некоторых параметров процесса от времени, например, убыли массы, объема выделяющихся газообразных продуктов и т. п. определяют константы этого уравнения.

Обычно используются следующие уравнения [9]:

$$\frac{dx}{dt} = K(1-x) \quad (1),$$

$$K = B \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2),$$

где x - текущая концентрация разложившегося вещества, K - константа скорости реакции, t - время, E_a - формальная энергия активации процесса, B - предэкспонент, R - универсальная газовая постоянная, T - температура процесса °К.

Для определения констант уравнения (E_a , B) были использованы методы, основанные на определении зависимости времени вспышки от температуры и убыли массы при термировании.

В первом методе определение энергии активации производится по измерениям време-

ни наступления вспышки при термировании при различных температурах. Для определения энергии активации используется соотношение, полученное из решения задачи о тепловом взрыве [10]:

$$\tau_f = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

где τ_f - время задержки вспышки (время от начала термирования навески химической системы до ее взрыва). В результате проведения экспериментов по определению зависимости времени задержки вспышки от температуры термирования было получено следующее значение энергии активации:

$E_a = 47,7$ ккал/моль (по измерениям времени вспышки).

Во втором методе для определения энергии активации и предэкспонента применяется уравнение (1). По экспериментальным данным зависимости убыли массы "осадка" от времени при различных температурах термирования определяется значение константы скорости реакции K для этих температур. Затем по полученным значениям K определяются значения предэкспонента B и энергии активации E_a . В результате проведенных экспериментов по определению зависимости убыли массы осадка от времени при термировании при различных температурах были найдены следующие значения энергии активации и предэкспонента:

$$E_a = 56,731 \text{ ккал/моль};$$

$$B = \exp(39,727) = 1,79 \cdot 10^{17} \text{ сек}^{-1},$$

что находится в разумном согласии с результатами определения этой величины по температуре вспышки.

Следует отметить, что состав продуктов взрыва зависит от температурных условий разложения "осадка" при взрыве, которые определяются соотношением теплоприхода за счет химических реакций и теплоотвода, определяемого поверхностью теплообмена, т.е. от массы навески. При этом, чем больше это соотношение (масса навески), тем меньше удельные теплопотери и выше температура. При увеличении массы навески выше некото-

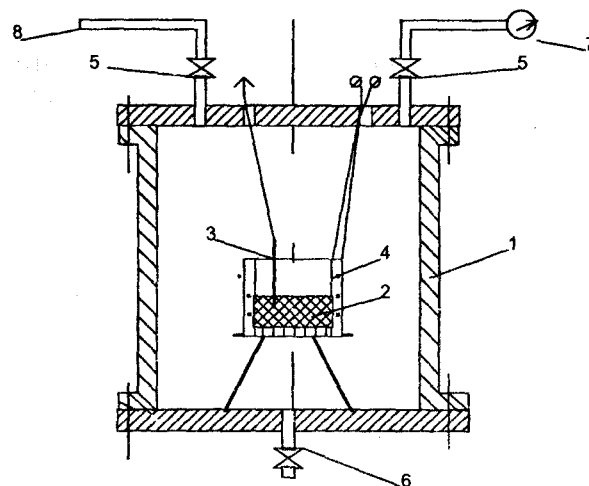


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения состава ПВ (1 - контейнер; 2 - навеска "осадка"; 3 - термопара; 4 - электронагреватель; 5 - вентили; 6 - вентиль для удаления конденсированных продуктов; 7 - манометр; 8 - линия пробоотбора газообразных продуктов)

рой "критической", температурные условия разложения "осадка" практически не изменяются, а следовательно, не изменяется и состав продуктов взрыва.

Определение состава продуктов взрыва (ПВ) "осадка" проводилось с использованием экспериментальной установки, показанной на рис. 1. С учетом результатов предварительных экспериментов зачетные опыты по определению состава ПВ проводились с навесками больше 70 г. Нагревание навески происходило со скоростью 1 градус в минуту до ее взрыва. Давление в контейнере измерялось с помощью манометра через 5 минут после взрыва навески. Через 30 минут после взрыва производился отбор проб смеси газообразных продуктов взрыва в стеклянный и металлический пробоотборники. После завершения отбора газов контейнер вскрывался и производился отбор конденсированных продуктов взрыва. Отобранные пробы передавались на анализ.

Пробы газов с помощью газоанализатора ГХЛ-1 анализировались на содержание $\text{NO}_2 + \text{CO}_2$, NO , CO , H_2 , CH_4 , O_2 ; с помощью спектрофотометра СФ-26 - на содержание NO , NO_2 ; с помощью хроматографов ЛХМ-80 и "Газохром-3101" - на содержание CO , CO_2 , H_2 , N_2 , O_2 . Конденсированные продукты анализировались на содержание нитрит-иона и карбонат-иона. Определение нитрит-ионов проводилось фотометрическим методом с использованием фотоэлектрокалориметра КФК-2. Карбонат-ион определялся при помощи титрования раствора образцов конденсированных ПВ кислотой. Остальные компоненты продуктов взрыва рассчитывались, исходя из материального баланса уравнения разложения.

Наблюдавшийся взрыв "осадка" происходил при достижении температуры

$$T_d = 633 \text{ }^\circ\text{K} \text{ (360 }^\circ\text{C)} \quad (4)$$

В результате был получен следующий состав продуктов взрыва 1 кг "осадка".

- конденсированные продукты:

| | | |
|--------------------------|-----------|--------------|
| Na_2CO_3 | - 326 г | - 3,075 моль |
| NaNO_3 | - 154,3 г | - 1,818 моль |
| NaNO_2 | - 96,5 г | - 1,399 моль |
| NaOH | - 81,3 г | - 2,033 моль |
| Cr_2O_3 | - 11,72 г | - 0,077 моль |
| KOH | - 7,0 г | - 0,126 моль |
| Fe_2O_3 | - 3,67 г | - 0,023 моль |
| CaO | - 1,01 г | - 0,018 моль |
- газообразные продукты:

| | | |
|--------------------------------|----------|--------------|
| CO_2 | - 45,5 л | - 2,031 моль |
| NO_2 | - 47,8 л | - 2,134 моль |
| N_2 | - 39,0 л | - 1,741 моль |
| O_2 | - 11,6 л | - 0,518 моль |
| CO | - 6,8 л | - 0,304 моль |
| NO | - 2,7 л | - 0,121 моль |
| $\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ | - 66,6 л | - 2,977 моль |

Таким образом, масса конденсированных продуктов взрыва 1 кг "осадка" составляет 681,5 г, а суммарный объем газообразных продуктов - 220 л.

Расчет теплоты взрывчатого превращения производился с использованием уравнения реакции разложения "осадка" по энтальпиям образования исходных и конечных продуктов. В

результате расчета получено, что (за счет химических реакций) при взрыве "осадка" выделяется

$$Q = 270 \text{ ккал тепла/кг} \quad (5)$$

Следует отметить, что при взрыве в условиях аварии по мере расширения и охлаждения газообразных ПВ в облаке при достижении температуры менее $100 \text{ }^\circ\text{C}$ будет происходить конденсация паров воды с выделением 31 ккал тепла на 1 кг "осадка" и уменьшением объема газообразных ПВ на 66,6 л. При дальнейшем охлаждении (до температуры менее $50 \text{ }^\circ\text{C}$) будет происходить поглощение углекислого газа гидроокисью натрия с выделением 62 ккал тепла на 1 кг "осадка" и уменьшением объема газообразных ПВ на 45,5 л (при полном поглощении). В результате этого суммарный тепловой эффект может составить 360 ккал, а объем газообразных ПВ - 112 л на 1 кг "осадка".

На основании полученных в результате проведенных исследований данных были проведены оценки характерного времени взрыва "осадка". Для оценок скорости взрывчатого превращения использовали формальное кинетическое уравнение химического разложения (1), (2) и пренебрегали тепловыми потерями на стадии взрыва. Данное приближение дает следующую связь между скоростью горения и концентрацией разложившегося вещества:

$$\frac{dx}{d\tau} = (1-x) \cdot B \exp\left(-\frac{\varepsilon}{(1+qx)}\right) \quad (6)$$

Входящие в эту формулу безразмерные параметры - энергия активации, деленная на температуру взрыва:

$$\varepsilon = \frac{E_a}{RT_d},$$

и калорийность взрывчатки, отнесенная к ее внутренней энергии перед взрывом:

$$q = Q/AT_d$$

($A \approx 260 \text{ кал/кг-град}$ - теплоемкость вещества "осадка") были определены по результатам

проведенных экспериментов и их численные значения составили:

$$\varepsilon = 45,1; \quad q = 1,64.$$

Отметим, что получаемый по (6) с этими значениями параметров темп прироста температуры при наблюдавшейся температуре взрыва (4) составляет разумную величину $\approx 4,6$ град/сек, т.е. используемая константа скорости реакции хорошо согласуется с наблюдавшейся температурой взрыва. Для процесса взрыва характерен длительный индукционный период в течение которого скорость реакции увеличивается на многие порядки без существенного выгорания. В качестве характерного времени взрыва τ_d примем промежуток от момента 10% энерговыделения до момента достижения максимума скорости горения. Тогда из (6) получим:

$$\tau_d \approx \frac{(1+0,1q)^2}{0,9q\varepsilon B} \exp\left(\frac{\varepsilon}{1+0,1q}\right) \approx 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Естественно, в силу упрощенности используемого подхода, данная оценка может давать только порядок величины характерного времени взрыва. Соответствующая оценка максимальной развиваемой при взрыве температуры ≈ 1400 °С.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ВЗРЫВА ПО СТЕПЕНИ РАЗРУШЕНИЙ НА ПРОМШЛОЩАДКЕ

Для оценки эффективного энерговыделения взрыва необходимо учесть, что инициирование взрыва происходило при достаточно высоком предварительном разогреве "осадка" за счет энергии распада присутствовавших в нем радиоактивных изотопов. Соответствующий прирост внутренней энергии составлял:

$$Q_T = A \cdot (T_d - 12 \text{ °С}) \approx 90 \text{ ккал/кг.}$$

Эту энергию следует учесть в эффективной калорийности "осадка":

$$Q + Q_T = 270 \text{ ккал/кг} + 90 \text{ ккал/кг} = Q_{\text{eff}} = 360 \text{ ккал/кг.}$$

Считая, что масса взорвавшегося "осадка" составляла 70-80 т [8], получим величину эффективного энерговыделения взрыва:

$$E_{\text{eff}} = (25 + 29) \text{ т ТНТ} \quad (7)$$

Представляет интерес выяснить, насколько указанная выше величина энерговыделения соответствует наблюдавшимся после взрыва разрушениям на промышленной площадке, а также попытаться сделать независимую оценку реализовавшегося энерговыделения, исходя из зарегистрированной картины разрушений.

Перечислим характеристики разрушений в результате взрыва, которые зарегистрированы в имеющихся документах.

- В результате взрыва крышка каньона №14, в котором стояла емкость со взорвавшимися отходами, была сорвана и отброшена в сторону на расстояние 20-25 м. Заметных повреждений крышка (железобетонная плита) не имела. Одновременно были сдвинуты (на $\sim 0,5-1$ м) перекрытия соседних каньонов №7 и 13, расположенных вплотную к взорвавшемуся. На месте взрыва образовалась воронка глубиной 9-10 м и диаметром ≈ 20 м. Верхняя часть боковых стенок каньона №14 имела зоны дробления вплоть до образования сквозных проломов. Разорванные стальные листы корпуса емкости были вынесены наружу и разбросаны по окружающей территории вплоть до расстояния ~ 150 м от центра взрыва.
- Расположенная в 80 м от центра взрыва входная будка в аналогичный заглубленный комплекс-хранилище повреждений не имела. Будка имеет высоту ~ 3 м и построена из бетонных блоков.
- В расположенном в 100 м от центра взрыва здании были выбиты все стекла вместе с рамами с восточной (обращенной к взрыву) стороны. В комнате начальника смены в обращенной к взрыву восточной стене разрушен кирпичный проем размером 2 м \times 1,5 м и толщиной $\approx 0,4$ м. Опрокинут находившийся в комнате тяжелый несгораемый сейф.

- В расположенном в 200 м от центра взрыва здании были выбиты все окна вместе с рамами с обращенной к взрыву стороны; поднята часть железной крыши, повреждены деревянные стропила. Стены разрушений не имели.
- В зданиях, расположенных в 750 м от центра взрыва, было выбито 35-70% стекол с восточной стороны.
- В столовой, расположенной в ~800 м от центра взрыва, были выбиты практически все стекла с восточной стороны.
- Камни из эпицентра с сильным радиоактивным загрязнением были обнаружены на значительных расстояниях. В частности, такой камень весом около 4 кг, был найден в 400 м от эпицентра. Мелкие камни весом 50-200 г долетали до расстояний ~500 м. Сильно загрязненный камень был обнаружен в 900 м от эпицентра.
- В 150 м от центра взрыва на деревянной вышке (высотой 1-1,5 м) располагался пост часового. Часовой был сброшен с вышки взрывной волной. Далее он продолжал оставаться на посту до смены караула (не менее 30 мин после взрыва). Телесных повреждений не имел. Вышка осталась не разрушенной.

В результате проведенных оценок энерговыделения взрыва по характеру вызванным им разрушений был сделан вывод, что имеющиеся в распоряжении данные позволяют сделать лишь весьма приблизительные оценки энерговыделения, которые, не противоречат гораздо более обоснованной величине энерговыделения (7), полученной на основании проведенных экспериментов и анализов по определению калорийности взорвавшегося "осадка".

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО РАДИОАКТИВНОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ ТЕРРИТОРИИ

Непосредственно после аварийного выброса в ночь на 30 сентября была произведена предварительная оценка уровней мощности дозы гамма-излучения в пределах границы территории промплощадки предприятия. Первая

радиационная съемка территории загрязнения была проведена в октябре 1957 г силами Центральной заводской лаборатории ПО "Маяк" и экспедиции Института Прикладной Геофизики АН СССР. Съемка была осуществлена с помощью радиометров, установленных на автомобилях. Так как автомобильная съемка была ограничена возможностью проезда по грунтовым дорогам, то было принято решение провести детальное изучение радиационной обстановки на всей территории следа и с помощью авиации. В первый год после аварийного выброса силами ЦЗЛ и ИПГ АН СССР было проведено семь радиационных съемок территории (четыре автомобильных и три самолетных).

В ходе работ проводились измерения мощности дозы гамма излучения, отбор проб грунта, растительности, фуража, молока, картофеля, зерна и др. продукции, определение содержания в них суммарной бета-активности и стронция-90. В результате была построена детальная карта следа радиоактивного загрязнения.

В дальнейшем радиационные съемки территории ВУРС периодически повторялись. Их целью было изучение динамики радиационной обстановки и корректировка установленных норм радиационной безопасности.

В июне-августе 1959 г. экспедиция ИПГ провела комплексную радиометрическую съемку следа, включавшую самолетную гамма-съемку, наземную бета и гамма-съемку и массовый отбор проб почвы с последующим радиохимическим анализом. Помимо картирования следа произведено изучение его "тонкой" структуры, выявлена связь временных изменений плотности загрязнения с действием природных факторов. Оценены границы расширения следа в головной части под действием ветровой миграции.

В 1960 г ИПГ провел завершающую съемку следа с применением самолетной съемки и наземных обследований. На полученной в результате этой съемки карте распределения плотности загрязнения территории отражена значительная неоднородность пространствен-

ного (по территории) и вертикального (по профилю почвы) распределения радионуклидов на различных участках местности. В ходе съемки на трех поперечных профилях следа были заложены постоянные реперные пункты, позволяющие проводить оценку динамики следа в течение длительного периода его существования.

В последующие периоды (1964, 1974, 1980 гг.) силами Опытной научно-исследовательской станции ПО "Маяк" проводились наземные съемки на основе постоянных реперных пунктов и измерения плотности радиоактивного загрязнения на большом количестве экспериментальных площадок. Применялись приборные методы измерения поверхностной плотности загрязнения, мощности дозы гамма-излучения, радиохимические и радиометрические методы определения концентрации радионуклидов в образцах почвы. Эти съемки показали, что выпавшее радиоактивное вещество практически не изменило своего пространственного распределения на протяжении существования следа и не обусловило изменений границ плотности загрязнения, установленных в 1958-1960 гг. Выпавшее вещество закрепилось в верхнем слое почвы (2-5 см) и практически устойчиво к воздействию ветрового и водного факторов миграции. Общее уменьшение плотности радиоактивного загрязнения и мощности дозы гамма-излучения к настоящему времени (по сравнению с ситуацией после аварии) обусловлено, в основном, распадом короткоживущих радионуклидов и частичным распадом стронция-90.

Рассмотрим данные по параметрам следа на момент его образования, основанные на результатах измерений, проведенных в 1958-1960 гг. Естественно, ко времени проведения этих измерений распределение загрязненности по территории следа претерпело некоторые изменения под воздействием вторичного ветрового переноса, особенно в головной части следа вблизи участков с высокой плотностью загрязнения. Эти процессы наблюдались экспериментально с помощью развернутой до ава-

Таблица
Радионуклидный состав выброса

| Радионуклид | Активность (%) |
|---------------|----------------|
| Sr-89 | следы |
| Sr-90+Y-90 | 5,4 |
| Zr-95+Nb-95 | 24,9 |
| Ru-106+Rh-106 | 3,7 |
| Cs-137 | 0,036 |
| Ce-144+Pr-144 | 66 |
| Pm-147 | следы |
| Eu-155 | следы |
| Pu | следы |

рии сети точек наблюдений за интенсивностью радиоактивных выпадений (методом липких лент). Было установлено, что ветровая миграция не привела к заметному расширению площади загрязнения. Так, согласно [8], увеличение площади загрязнения по уровню 2 Ки/км² по стронцию-90 составило ≈ 4%.

Активность и радионуклидный состав выброса были определены вскоре после аварии на основании паспортных данных поступавших во взорвавшуюся емкость растворов. К моменту взрыва активность содержащихся в ней отходов составляла около 2·10⁷ кюри. (таблица).

После аварии проводились многочисленные измерения мощности экспозиционной дозы (загрязненности территории) как вблизи эпицентра, так и на образовавшемся радиоактивном следе. Эти измерения показали, что ~ 90% активности было рассеяно вблизи эпицентра на территории промплощадки (до расстояний R ≈ 5 км), и только ~10% активности было унесено за пределы промплощадки и образовало ВУРС.

В течение первых недель после аварии специалистами ЦЗЛ было проведено обследование территории промплощадки и оценен уровень радиоактивного загрязнения. В ходе этого обследования была измерена мощность

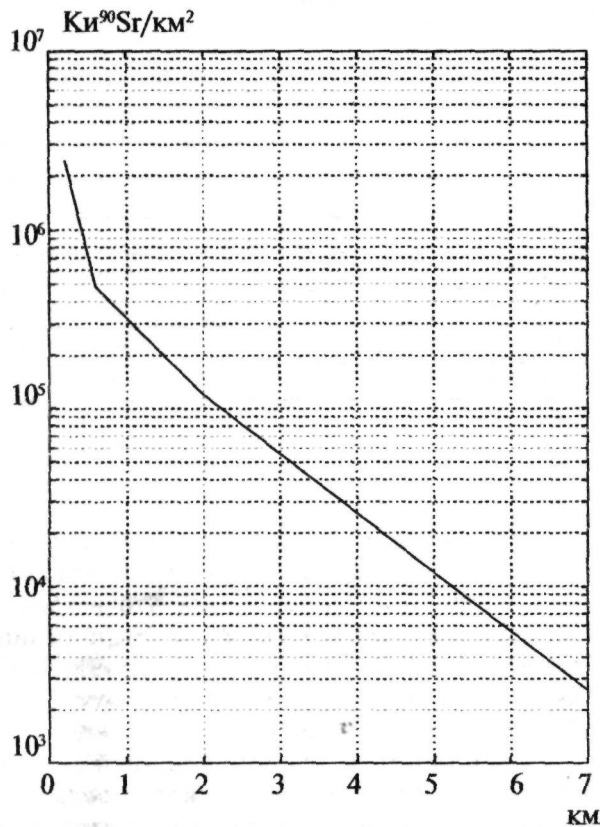


Рис. 2. Загрязненность (по Sr-90) на оси следа на промплощадке в зависимости от расстояния от эпицентра

экспозиционной дозы в 61 точке территории промплощадки. Измерения проводились при помощи приборов ПМР-1 и ПР-1. Характерная измеренная величина мощности экспозиционной дозы составляла: ~ 360 Р/час - на расстоянии ~ 100 м от эпицентра по направлению ветра; ~ 72 Р/час - на расстоянии ~ 500 м от эпицентра. На краю воронки мощность экспозиционной дозы превышала 1000 Р/час.

На рис. 2 показана полученная загрязненность стронцием-90 на оси следа в зависимости от расстояния от эпицентра.

Образовавшийся радиоактивный след в границах по плотности загрязнения $\eta > 2$ Ки⁹⁰Sr/км² имел форму узкой полосы шириной 4,5-6 км и длиной 105 км. Площади территории следа с различными уровнями загрязнения (в кюри Sr-90/км²) на момент его образования составляли:^{*)}

| | |
|---------------|--------------------------|
| $\eta > 2$ | $S = 560 \text{ км}^2$, |
| $\eta > 12$ | $S = 230 \text{ км}^2$, |
| $\eta > 50$ | $S = 120 \text{ км}^2$, |
| $\eta > 200$ | $S = 50 \text{ км}^2$, |
| $\eta > 800$ | $S = 16 \text{ км}^2$, |
| $\eta > 2000$ | $S = 8 \text{ км}^2$. |

В границах плотности загрязнения 0,1 Ки/км² (удвоенный уровень плотности загрязнения стронцием-90 в данном регионе обусловлен глобальными выпадениями от испытаний ядерного оружия) длина следа составляет около 300 км, а площадь - около 20000 км².

Изотопный состав радионуклидов можно считать одинаковым по всей территории следа, каких либо эффектов фракционирования не обнаружено. По этой причине для описания распределения загрязненности достаточно использовать плотность загрязнения стронцием-90.

Радиоактивный след имеет четкую ось с ярко выраженным максимумом загрязненности на оси и монотонным спаданием с увеличением расстояния от эпицентра. На рис. 3 показана плотность загрязнения на оси следа (по стронцию-90 вне промплощадки) в зависимости от расстояния от эпицентра $\eta(R)$.

В начале следа угол между его осью и направлением на север составляет 28° (т.е. направление оси от эпицентра - северо-восточное). Далее, начиная с ~20 км от эпицентра, ось следа начинает поворачивать к востоку. Этот поворот заканчивается примерно на 30 км, где угол оси с направлением на север составляет 40° и далее практически не меняется.

^{*)} - Приводимые данные по параметрам загрязнения уточнены по сравнению с публикациями [2-7]

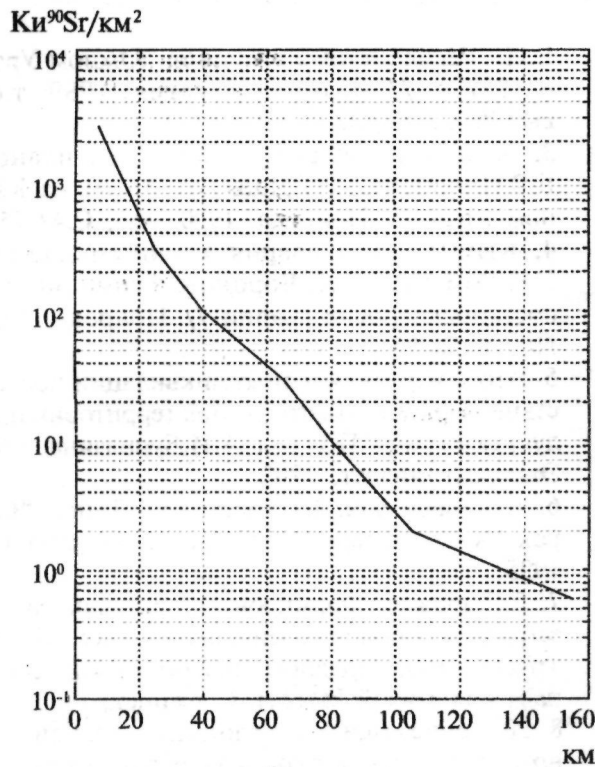


Рис. 3. Плотность загрязнения на оси следа ($Ku^{90}Sr/км^2$) в зависимости от расстояния от эпицентра

Распределение загрязненности в поперечном сечении следа не описывается гауссовым распределением. Имеет место асимметрия распределения загрязненности относительно оси следа с более пологим спаданием от оси на юго-восток. Эта асимметрия незначительна в начале следа (до $R \approx 15-20$ км) и увеличивается в дальнейшем.

На рис. 4 показаны величины, характеризующие поперечные размеры следа - эффективная поперечная дисперсия и дисперсии левого и правого крыла поперечного сечения. Дисперсия распределения загрязнения в поперечном сечении с юго-восточной стороны монотонно растет с расстоянием от эпицентра. Дисперсия с северо-западной стороны сначала слабо растет, между 20 и 50 км несколько снижается, затем снова растет.

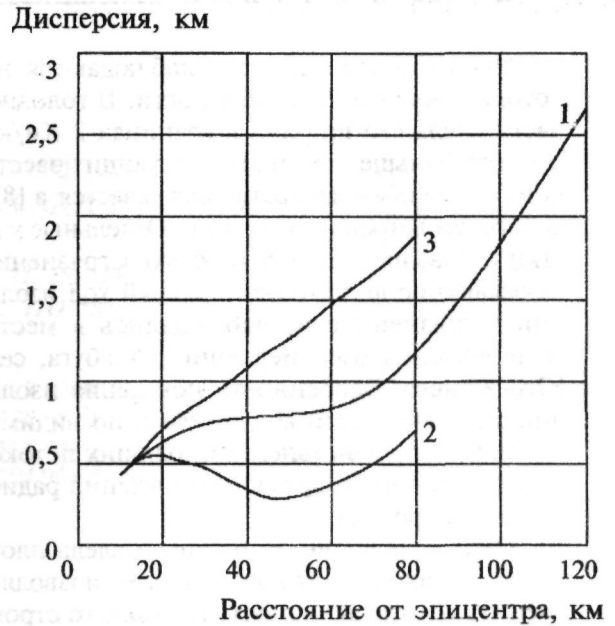


Рис. 4. Эффективная поперечная дисперсия (1) и дисперсии левого (2) и правого (3) крыла следа (км) в зависимости от расстояния от эпицентра

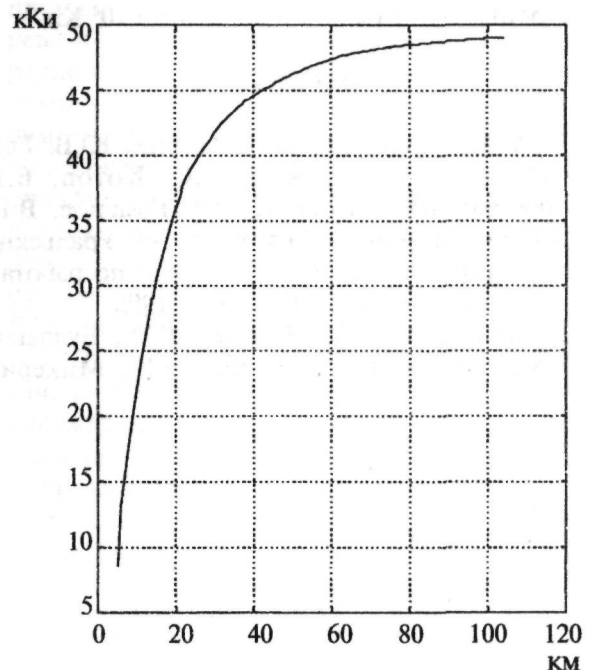


Рис. 5. Интегральное количество Sr-90 (Ки), выпавшего на следе в зависимости от расстояния от эпицентра

В конфигурации следа наблюдаются некоторые локальные особенности. В головной части следа его ширина в границах 2 Ки/км² заметно больше, чем на последующих расстояниях. Это обстоятельство связывается в [8] с действием ветровой миграции. Отдельные участки с повышенной плотностью загрязнения, искажающие достаточно плавный ход изолиний загрязненности, наблюдались в местах расположения озер Бердениш, Алабуга, села Юго-Конева. Особенности поведения изолиний загрязненности вблизи озер, по-видимому, связаны с действием восходящих потоков с их акваторий во время прохождения радиоактивного облака.

Интегрирование по площади следа плотности радиоактивного загрязнения позволяет оценить общую активность выпавшего стронция-90. На рис. 5 показано количество стронция-90, выпавшего на следе до расстояния R от эпицентра.

Полное количество выпавшего на следе стронция-90 можно оценить в $5,4 \cdot 10^4$ Ки.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.И. Авраменко, А.Н. Аверин, Ю.В. Глаголенко, Е.Г. Дрожко, Э.С. Котов, Б.Г. Лобойко, Ю.Г. Мокров, Г.Н. Романов, В.П. Филин. Авария 1957 г и Восточно-Уральский радиоактивный след. (Отчет № 1 по работам в рамках проекта МНТЦ 048), 1995.
2. Никипелов Б.В., Романов Г.Н., Булдаков А.А., Бабаев Н.С., Холина Ю.Б., Микерин Е.И. Радиационная авария на Южном Урале в 1957 г. // Атомная энергия. 1989. т.67. вып.2. С. 74-80.
3. Кыштымская авария крупным планом. Б.В.Никипелов, Е.Г.Дрожко. Взрыв на Южном Урале // Природа, 1990, №5, С.47-75.
4. Кыштымская авария крупным планом. Г.Н.Романов, А.С.Воронов. Радиационная обстановка после аварии // Природа, 1990, №5, С.50-52.
5. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами урана. Под ред. А.И.Бурназяна. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. В. Новоселов, В. Толстиков. Тайна "Сороковки". Екатеринбург: Уральский рабочий, 1995.
7. Е.Г.Дрожко. Формирование радиоактивного загрязнения в районе деятельности ПО "Маяк". Труды Международного экологического семинара под эгидой МНТЦ. Снежинск, 1995.
8. Изучение радиоэкологических, радиационно-гигиенических и социально-хозяйственных последствий радиоактивного загрязнения больших территорий. Отчет ПО "Маяк" (тема "Мираж", том 3.) И.А. Терновский, Г.Н. Романов, Л.П. Сохина, Е.А. Федоров, Е.Н. Теверовский. Радиационная обстановка и динамика поведения радионуклидов в окружающей среде. 1983.
9. Физика взрыва. М. Под ред. К.П.Станюковича. - М.: Наука, 1975.
10. Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер. Физика взрыва - М.: Физматгиз, 1959.