

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГЕОХИ РАН Б.Ф. Мясоедову, А.П. Новикову и В.С. Файнбергу за полезное обсуждение методики экспериментов и предоставленные модельные пробы смесей актиноидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елохин В.А., Чернецкий С.М., Чопоров Д.Я. Масс-спектрометрия с ионизацией в индуктивно-связанной плазме: основы метода и области применения. — Журн. анал. химии, 1991, т. 46, вып. 9, с. 1669—1674.
2. SOLA ICP/GD Mass Spectrometer. Проспект фирмы FINNIGAN MAT, 1993.
3. Pickett D., Murrell M., Williams R. Determination of femtogram quantities of protactinium in geologic samples by thermal ionization mass spectrometry. — Anal. Chem., 1994, v. 66, № 7, p. 1044—1049.
4. Thirlwall M. A triple-filament method for rapid and precise analysis of rare-earth elements by isotope dilution. — Chem. Geology, 1982, v. 35, p. 155—166.
5. Callis E., Abernathy R. High precision isotopic analyses of uranium and plutonium by total sample volatilization and signal integration. — Intern. J. Mass Spectrom. Ion Proc., 1991, v. 103, p. 93—105.
6. Беляев Б.Н., Туз В.Т., Фирсанов Г.А. Изотопный анализ трансплутониевых элементов на масс-спектрометре с одномерным позиционно-чувствительным детектором. — ПТЭ, 1988, № 5, с. 121—123.
7. Майселл Л., Глэнг Р. (ред.). Технология тонких пленок. Справочник, т. 1. М.: Сов. радио, 1977.
8. Murphy D., Mauersberger K. A highly sensitive mass spectrometer detector system. — Intern. J. Mass Spectrom. Ion Proc., 1987, v. 76, p. 85—93.
9. Hill J., Biller J., Martin S. e.a. Design considerations, calibration and applications of an array detector for a four-sector tandem mass spectrometer. — Ibid., 1989, v. 92, p. 211—230.
10. Галль Р.Н., Ганзбург-Преснов В.С., Гольдин А.А. и др. Масс-спектрометр МИ-1320 и его аналитические параметры для изотопного анализа в связи с использованием в геологии. — Изв. АН СССР, Сер. геол., 1979, № 10, с. 130—144.
11. Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В., Ефимов И.А. и др. Исследование характеристик детекторов заряженных частиц для аналитических приборов. — Научное приборостроение, 1991, т. 1, № 1, с. 107—114.

Поступила в Редакцию 8.11.95

УДК 504.054.001.5; 504.064

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

*Диденко А.Н. (РАН), Усов Ю.П., Юшков Ю.Г., Григорьев В.П., Поташев А.Г.,
Лукьянов О.В. (НИИ ядерной физики Томского политехнического университета),
Бадулин Н.Н., Бацула А.П., Шошин Е.Л., Мельников А.И.
(Томская академия систем управления и радиоэлектроники), Бойко В.И.,
Шаманин И.В., Андреев О.В. (Томский политехнический университет)*

В последнее время обсуждается возможность применения импульсных радиолокационных станций (РЛС) СВЧ-диапазона для дистанционного контроля радиоактивного загрязнения воздушной среды над объектами ядерной энергетики и ядерно-химического производства [1, 2]. Такие станции в основном используются для навигационного обеспечения воздушного транспорта, и при локации они могут регистрировать отраженные радиосигналы от облаков, дождя, снега, дыма над электростанциями, пара над градирнями и других атмосферных образований. Поэтому при разработке мониторинга загрязнения атмосферы представляет интерес использовать имеющиеся РЛС для независимого контроля промышленных выбросов.

Известно, что проблемы мониторинга чрезвычайно сложны и для их решения требуются большие материальные затраты. Тем более это относится к дистанционному мониторингованию радиоактивных выбросов радиоизмерительными методами — радиоволны СВЧ-диапазона отражаются в основном за счет свободных электронов, образующихся при ионизации воздуха, а их плотность при атмосферном давлении небольшая даже при мощном выбросе. Кроме того, выброс радиоактивных веществ обычно

происходит вместе с большим количеством теплого воздуха и аэрозолей, отражения от которых могут во много раз превосходить отражения от следов ионизации. Поэтому при обосновании радиолокационного метода контроля технологических и аварийных выбросов радионуклидов в атмосферу важно иметь возможность выделения полезного сигнала, обусловленного радиацией, на фоне сопутствующих отражений. Для этого необходимо провести более полные теоретические и экспериментальные исследования процессов формирования ионизированной области и ее взаимодействия с электромагнитными волнами.

В настоящей работе приведены некоторые результаты численных расчетов пространственного распределения радионуклидов на выходе вентиляционной трубы реактора, анализа их взаимодействия с воздухом и образования слабоионизированной плазмы при атмосферном давлении, а также данные радиолокационных наблюдений воздушного пространства над промышленной зоной Сибирского химического комбината (СХК) и ИРТ-Т НИИ ядерной физики Томского политехнического университета.

Анализ данных штатных газоаэрозольных выбросов АЭС с различными типами реакторов показал, что активность выбросов в основном определяют благородные радиоактивные газы, распад которых является главным в процессе ионизации воздуха. Поэтому численные расчеты пространственного распределения радиоактивных примесей на выходе вентиляционной трубы проводили на примере стационарного поступления в атмосферу β -активного ^{41}Ag . Для этого использовали модель Пасквилла—Гиффорда, в основе которой лежат схема классификации погодных условий со степенью устойчивости атмосферы, гауссовская модель распределения радиоактивных примесей в облаке выброса, конечный результат решения дифференциальных уравнений переноса, полученных в предположении пропорциональности потока примеси градиенту ее концентрации в атмосфере [3]. Модель широко применяется для оценки локальных эффектов в ближайшей к ядерным объектам зоне радиусом до 10 км, вызванных кратковременным или стационарным выбросом радионуклидов в приземном слое атмосферы. При конкретных условиях состояния окружающей среды и параметрах источника выбросов данная модель позволяет определить плотность генерации первичных электронов β -распада. Эти электроны при термализации в воздухе рожают следующие группы электронов: вторичные, третичные и т.д.

Расчеты показали, что форма области выброса представляет собой деформированный трехосный эллипсоид, большая ось которого изогнута вверх. Ориентация большой оси относительно горизонтальной плоскости в первую очередь определяется скоростью ветра и выхода газов из вентиляционной трубы. При уменьшении скорости ветра и увеличении скорости выхода газов ось эллипсоида стремится к вертикальному положению и наоборот.

Следует отметить, что радиационный эффект радионуклидов, мощность выброса которых равна, различается вследствие различной постоянной распада. В непосредственной близости от источника при большой скорости ветра на высоте выброса различия незначительные, но с уменьшением скорости ветра и на большом удалении они могут быть существенными.

Для примера, характеризующего форму ионизированной области, на рис. 1 показаны два ее сечения горизонтальной плоскостью на высоте среза трубы 100 м (1) и выше 101 м (2). В данном случае расчет проводился для мощности выброса 100 Бк/с и ограничивался областью, где плотность генерации первичных электронов

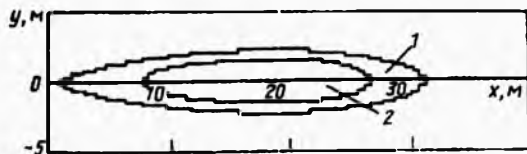


Рис. 1. Расчетная форма ионизированной области около источника штатных выбросов

распада превышала $0,5 \text{ л}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. Размер облака вдоль оси составлял 30 м, а в вертикальном и горизонтальном направлениях 4 и 6 м соответственно. Скорость выхода газов из трубы и ветра 5 м/с.

Численные расчеты для радиоактивных выбросов с типичным составом благо-

родных газов позволили установить, что на один электрон распада в воздухе при атмосферном давлении в среднем образуется следующее количество ионов и плазменных электронов, 10^4 : $\bar{N}(N_2^+) = 0,9381$, $\bar{N}(O_2^+) = 0,3476$, $\bar{N}_e = 1,2857$.

Вводя удельную активность A_y , можно записать удельную скорость ионизации $J = A_y \bar{N}_e$ и определить скорость наработки молекулярных ионов и плазменных электронов. Одновременно с рождением электронов происходит и их гибель, обусловленная прилипанием к молекулам кислорода при тройных столкновениях: $e + 2O_2 \rightarrow O_2^- + O_2$ и диссоциативной рекомбинацией с положительными ионами N_2^+ и O_2^+ . В установившемся режиме плотность плазменных электронов будет определяться следующим выражением:

$$n_e = \left(\frac{v_n^2}{4\alpha_r^2} + \frac{J}{\alpha_r} \right)^{1/2} - \frac{v_n}{2\alpha_r}, \quad (1)$$

где $v_n = K_n n_{O_2}^2$ — частота тройного прилипания; $K_n = 1,4 \cdot 10^{-41} (0,026/T_e) \times \exp(-0,052/T_e)$, м⁶/с [4]; $\alpha_r = 2,2 \cdot 10^{-13} (0,026/T_e)^{0,5}$, м³/с — коэффициент диссоциативной рекомбинации; T_e — температура электронов, эВ; n_{O_2} — плотность молекул кислорода в воздухе.

При нормальном давлении и $T_e \sim 1$ эВ [5] имеем $v_n \sim 6,8 \cdot 10^7$ с⁻¹, $\alpha_r \sim 0,35 \cdot 10^{-13}$ м³/с. Отсюда следует, что в условиях атмосферы для реальных выбросов выполняется неравенство $J \ll v_n^2/4\alpha_r$, и плотность электронов из выражения (1) определится соотношением $n_e = J/v_n$. Таким образом, для существования электронного компонента плазмы с $n_e \sim 10^{12}$ м⁻³ необходимо, чтобы скорость ионизации была не менее $J \sim (10^{19} - 10^{20})$ 1/(м³·с). Такая скорость характерна только для аварийных выбросов $A_y \sim 3,7 \cdot 10^{15}$ Бк/м³ [6—8].

Для выбросов с более низкой активностью до предельно допустимой $A_y \sim 3,7 \cdot 10^7$ Бк/м³ [8, 9] будем иметь плазму, состоящую в основном из положительных и отрицательных ионов. Плотность электронного компонента в этом случае можно оценить, если учесть реакцию разрушения отрицательных ионов $O_2^- + O_2 \rightarrow 2O_2 + e$ с постоянной $K_p \sim 1,7 \cdot 10^{-15} \sqrt{T_g} \exp(-0,482/T_g)$ м³/с [4], где T_g — температура газа, эВ; $n_e = (K_p/K_n) (n_{O_2^-}/n_{O_2})$, для $T_e \sim 1$ эВ в атмосфере $n_e \sim (10^{-7} - 10^{-6}) n_{O_2^-}$. Плотность положительных ионов можно оценить так: $n^+ = (J/\alpha_r)^{1/2}$.

Если ионизированную область рассматривать как случайное тропосферное образование [10, 11], то, зная пространственные и плазменные характеристики этой области, можно оценить ее эффективную поверхность рассеяния электромагнитных волн:

$S_3 \sim 0,2 \left(\frac{V_3 |\Delta\epsilon|^2}{(L_0^2 \lambda)^{1/3}} \right)$, где S_3 — эффективная поверхность рассеивания; V_3 — эффективный рассеивающий объем; $\Delta\epsilon$ — отклонение диэлектрической проницаемости ионизированной области от воздушной среды; L_0 — внешний масштаб случайной неоднородности; λ — длина зондирующей электромагнитной волны. Для тропосферы обычно L_0 составляет несколько десятков метров, отклонение диэлектрической проницаемости ионизированной области от воздушной среды

$$\Delta \varepsilon = \frac{\omega_e^2}{\omega^2 + \nu_e^2} + \sum_k \frac{\omega_{ik}^2}{\omega^2 + \nu_{ik}^2} + i \frac{\omega_e^2 \nu_e}{\omega(\omega^2 + \nu_e^2)} + i \sum_k \frac{\omega_{ik}^2 \nu_{ik}}{\omega(\omega^2 + \nu_{ik}^2)},$$

где ω_e, ω_{ik} — плазменная частота электронов и ионов; ν_e, ν_{ik} — частота столкновений электронов и ионов с нейтральными частицами; ω — круговая частота электромагнитной волны.

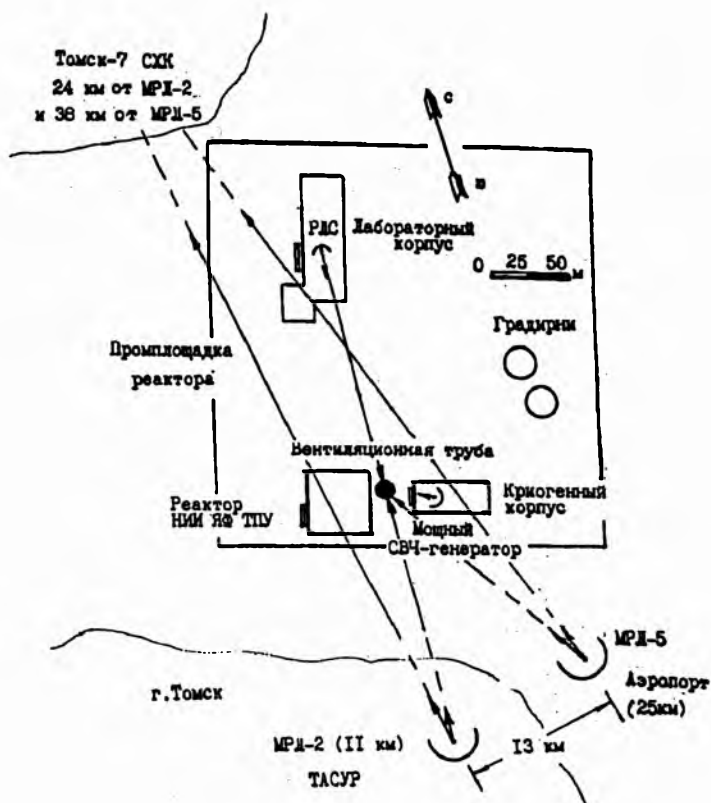
Теперь, если оценить эффективную поверхность рассеивания, например, для радиоактивного облака в свободном пространстве, имеющего длину $L \sim 100$ м ($L_0 \sim 0,2L$), эффективный рассеивающий объем $V_3 \approx 10^4$ м³ и $A_y \sim 3,7 \cdot 10^7$ Бк/м³, то при зондировании электромагнитной волной с $\lambda = 0,1$ м $S_3 \sim 2 \cdot 10^{-16}$ м². Очевидно, что при такой эффективной поверхности рассеивания на большом расстоянии (≥ 10 км) радиоактивное воздействие на отраженный отклик радиосигнала будет слабым. При аварийных же выбросах, когда $A_y \sim 3,7 \cdot 10^{15}$ Бк/м³ [8, 9], эффективная поверхность рассеивания значительно возрастает $S_3 \sim 2,2 \cdot 10^{-8}$ м² и такое облако можно обнаружить на большом расстоянии.

Несмотря на низкие значения эффективной поверхности рассеивания, полученные расчетным путем для штатных режимов работы ядерных объектов, натурные экспериментальные исследования необходимо проводить. Во-первых, расчеты имеют приближенный характер, во-вторых, сложные процессы распада радионуклидов и их взаимодействие с молекулами воздушной среды, плазменные нелинейные явления могут вызвать аномально высокие отражения радиоволн. Кроме того, большие отражения радиосигналов можно создать искусственно, если, например, ионизированную область облучать дополнительной электромагнитной волной от внешнего сверхмощного СВЧ-генератора. В настоящее время такие генераторы созданы на основе принципов релятивистской электроники СВЧ и импульсной микроволновой компрессии [12]. Тогда можно стимулировать или подавлять соответствующие плазмохимические реакции и тем самым увеличить плотность электронного компонента плазмы и, следовательно, эффективную поверхность рассеивания. Так, если внешняя волна имеет напряженность поля $E \sim (7-10) 10^2$ кВ/м, $K_n \sim 10^{-43}$ [3], то появляющиеся возбужденные атомы $O^*(S)$; $O^*(D)$ и молекулы $O_2^*(\Delta)$ существенно ускоряют процесс отрыва электронов от O_2^- . В результате при общей концентрации частиц $O, O^*(S), O^*(D), O_2^*(\Delta), O_3 \sim 0,01-0,1 \% n_{O_2}$ плотность электронов в образующейся плазме и O_2^- выравняется. В этом случае для приведенных параметров плазменного облака эффективная поверхность рассеивания увеличивается до $S_3 \sim 10^{-12}$ м².

В качестве объектов исследований нами использовалась промышленная зона ядерно-химических производств СХК, ИРТ-Т НИИ ЯФ ТПУ и некоторые неядерные объекты Томска. Зондирование проводилось радиолокатором МРЛ-5, работающим в 3- и 10-сантиметровых диапазонах, и 3-сантиметровым локатором МРЛ-2. Кроме того, в процессе исследований был создан опытный образец мобильного радиолокатора на базе МРЛ-2. Схема расположения основных зданий ядерного реактора, направления и расстояние от него до СХК и радиолокаторов показаны на рис. 2.

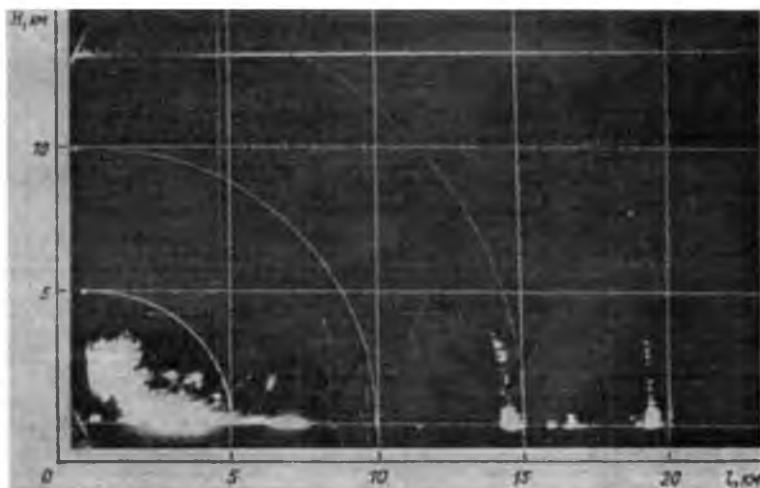
В работе [1] сообщалось, что при радиолокационном зондировании выбросов АЭС на экранах локаторов отклики от них наблюдались в виде вертикальных прерывистых «свечей». Природа свечей не объясняется. Поэтому было уделено много времени поиску ядерных объектов, дающих такого вида отраженные радиосигналы.

В результате установлено, что подобные свечи можно получить на экране при зондировании пространства над многими высокими объектами, в том числе и не свя-



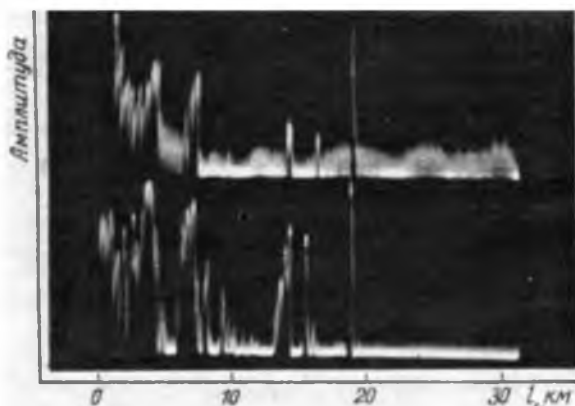
Р и с. 2. Схема расположения основных зданий реактора НИИ ЯФ ТПУ, направление и расстояние от него до радиолокаторов и объектов СХК

занными с радиационным производством. Так, на рис. 3 приведен снимок с индикатора «дальность—высота», когда радиолокатор был направлен в сторону телевизионной башни, расположенной на расстоянии 19 км от МРЛ-5 в городской черте. Хорошо просматривается прерывистая свеча, изображение ее было устойчивым и наблюдалось постоянно, менялось только число элементов свечи. Нижние элементы часто сливались в один сплошной фрагмент.



Р и с. 3. Снимок с индикатора «дальность l —высота h » при направлении антенны радиолокатора в сторону телевизионной башни

Было сделано предположение, что подобные изображения являются следствием облучения и прisma отраженных целью радиосигналов через боковые лепестки диаграммы направленности антенны. Энергопотенциал радиолокатора достаточен для наблюдения крупных целей через них.



Р и с. 4. Развертка по дальности при ориентации антенны МРЛ-5 одним боковым лепестком на телевизионную башню

и соответственно со случайной амплитудой, т.е. должен быть шумоподобным. Подобный сигнал, наблюдаемый по всей линии развертки по дальности, был обусловлен слабым снегопадом во время проведения эксперимента.

Эксперименты по радиолокационному зондированию пространства над вентиляционными трубами реактора и СХК велись длительное время. Ближайший сеанс наблюдений по времени с момента аварии 6.04.93 г. был проведен 7.04.93 г. с 12.00 по 12.40 местного времени. Методика эксперимента предусматривала получение радиолокационного изображения участка размером $2,5 \times 3$ км, расположенного на высоте 600 м от поверхности земли. Радиолокационное изображение отражало совокупность сигналов из элементов пространства, каждый из которых соответствовал пространственному разрешению радиолокатора (300×420 м). Регистрация и документирование полученных данных осуществлялось ЭВМ.

Данные радиолокационных измерений показали, что серийные РЛС в отличие от утверждений в работе [1] нельзя использовать для контроля радиационного состояния воздушной среды над объектами, работающими в нормальном режиме, если, конечно, нет аварийного состояния объекта, когда выброс аэрозолей превышает допустимый. Даже после повышения энергопотенциала МРЛ-2 за счет увеличения чувствительности приемного устройства на 20 дБ при некогерентном накоплении 10^4 импульсов отраженные сигналы из пространства над вентиляционными трубами были такими слабыми, что не позволяли сделать однозначное заключение, что это связано с радиоактивными выбросами. Поэтому было решено провести локацию пространства над ИРТ-Т НИИ ЯФ ТПУ с предельно близкого расстояния (200 м). Для этого был разработан специальный мобильный радиолокатор, который установили на крыше соседнего здания реактора примерно на уровне среза вентиляционной трубы (см. рис. 2). Энергетический потенциал локатора доведен до максимально возможного за счет соответствующих схемных решений и использования некогерентного накопления импульсов. Параметры радиолокатора следующие:

импульсная мощность, кВт . . .	10
длина волны излучения, см . . .	3,2
пороговая чувствительность, дБ/Вт . . .	150
длительность импульсов, мкс . . .	0,4
ширина диаграммы направленности антенны по уровню 3 дБ, град . . .	4

На рис. 4 приведены развертки по дальности, зарегистрированные на выходе приемников 3- (верхняя развертка) и 10-сантиметрового диапазона (нижняя развертка) при ориентации антенны МРЛ-5 одним боковым лепестком на телевизионную башню, т.е. на один из фрагментов свечи, изображенной на рис. 3.

Видно, что отраженный сигнал имеет стабильный характер и не похож на отраженный от объемно распределенной цели. Отраженный сигнал от ионизированной выбросом области представляет собой сумму большого числа сигналов со случайными фазами

Радиолокатор мог регистрировать объекты на расстоянии 100—1000 м с минимальной эффективной поверхностью рассеивания 10^{-7} м².

Суммируя результаты локации различных объектов, можно сделать несколько выводов.

1. Уровни рассеянных радиосигналов из пространства над ядерными объектами настолько малы, что при имеющемся удалении локаторов (11—38 км) не обнаруживаются. Только после увеличения чувствительности приемного устройства на 20 дБ за счет нескогерентного накопления 10^4 импульсов их регистрация стала возможной. 2. Над вентиляционными трубами ядерных объектов и расположенными рядом градирнями на высоте до 600 м есть области диаметром до 1500 м, отражающие радиолокационные сигналы. Их конфигурация и уровни рассеянных сигналов зависят от скорости и направления ветра. 3. Существенных различий в изображениях до аварии на радиохимическом производстве и после не обнаружено, за исключением аномально большого уровня рассеянных сигналов в ночь на 8 апреля 1993 г. 4. Над ядерными объектами не удалось обнаружить и зафиксировать радиолокационные изображения в виде прерывистых свеч, как это утверждается в работе [1], если, конечно, зондирование и прием сигналов не происходили через боковые лепестки антенны.

В связи с этими исследованиями необходимо отметить следующее. Принципиальная возможность использования радиолокационных средств для контроля за состоянием воздушной среды над радиационными объектами не вызывает сомнений. Однако для этого нужно разрабатывать специальные радиолокаторы и использовать высокоинформативные методы измерений. Необходимо расширять лабораторные исследования, которые могут существенно ускорить решение проблемы. В этом случае применение мощных коротких СВЧ-импульсов, получаемых при микроволновой компрессии, открывает большие возможности, так как можно осуществлять временную селекцию между передающим и приемным сигналами, а ближнюю зону локатора уменьшать до нескольких метров.

В настоящее время проводится работа по подготовке эксперимента, связанного с «подсветкой» выброса реактора мощным СВЧ-излучением. Для этого рядом с трубой реактора на расстоянии 30 м от ее среза установлен наносекундный генератор мощностью до 50 МВт.

В заключение авторы благодарят руководство СХК за большой интерес и постоянную поддержку, Г.С. Шарыгина, В.А. Лысых, Е.Н. Макуху, М.С. Артеева и П.Ю. Чумерина за обсуждения и помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярчук К.А., Кононов Е.Н., Ляхов Г.А. Радиолокационное обнаружение областей локальной ионизации в приземных слоях атмосферы. — Письма в ЖТФ, 1993, т. 19, вып. 6, с. 67—72.
2. Протасевич Е.Т. Метод определения радиоактивного загрязнения окружающей среды по свечению воздуха. — Оптика атмосферы и океана, 1994, т. 7, № 5, с. 697—700.
3. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС. Л.: Гидрометеоназдат, 1990.
4. Александров Н.А. Образование и разрушение ионов O_2^+ и NO^+ в слабоионизированной низкотемпературной плазме. — В сб.: Химия плазмы, вып. 8. М.: Энергоатомиздат, 1981, с. 90—122.
5. Бычков В.Л., Елецкий А.В. Пучковая плазма высокого давления. — Там же, вып. 12. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 119—158.
6. Боровой А.А. и др. Топливо 4-го блока энергоблока Чернобыльской АЭС. Отчет-справочник, Чернобыль, 1983.
7. Методика расчета распространения радиоактивного пылевого облака в атмосфере. Комплексная экспедиция при ИАЭ им. И.В. Курчатова. Чернобыль, 1991.
8. Chernobyl and the consequences in Central Europe. — Radiat. Prot. Dosim., 1987, v. 19, № 4, p. 207—256.
9. Правила проектирования и эксплуатации атомных станций. М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1962.

11. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику, ч. 2. М.: Наука, 1978.
12. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Поступила в Редакцию 8.11.95

УДК 621.039.75

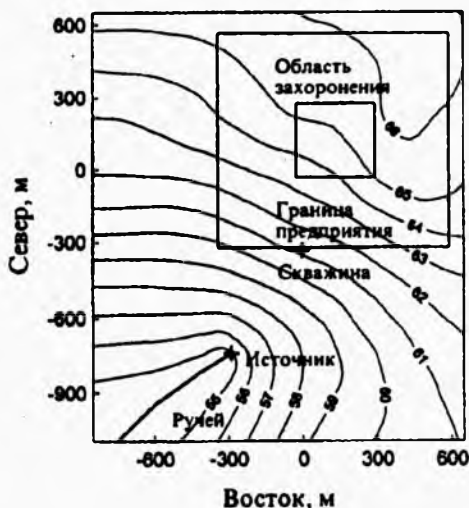
ОЦЕНКА ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Серебряков Б.Е. (ГНЦ РФ — Институт биофизики)

Настоящая работа является естественным продолжением публикации [1], в которой по заданию МАГАТЭ рассчитана миграция радионуклидов из приповерхностных ПЗРО в водоносный горизонт. В ней рассчитана миграция радионуклидов в водоносном горизонте за границу ПЗРО и оценена доза облучения населения при использовании грунтовых вод теми же радионуклидами (^3H , ^{14}C , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{129}I , ^{230}Th и его дочерние продукты: ^{226}Ra , ^{210}Pb и ^{210}Po). В расчетах использованы оценки выхода радионуклидов в водоносный горизонт из бетонных могильников и земляных траншей, представленные в работе [1].

Содержание радионуклидов в грунтовых водах рассчитывалось по модели, разработанной в Институте биофизики. Модель миграции радионуклидов основана на численном решении уравнения переноса [1]. Задача позволяет использовать двумерные решения в горизонтальной плоскости для концентрации, проинтегрированной по мощности водоносного горизонта.

Особый интерес задания МАГАТЭ по расчету дозы состоит в том, что в нем были указаны реальные параметры одного из трех ныне действующих региональных могильников США, расположенного в графстве Барнуэлл (шт. Южная Каролина): геологическое строение района, данные о геохимии, гидрологии, гидрогеологии, географии, демографии и метеорологии. В задании по расчету выхода радионуклидов в водоносный горизонт параметры были однозначно определены, в рассматриваемом же случае оценки дозы некоторые величины не заданы, о других же имелись отдельные экспериментальные данные.



Р и с. 1. Карта пьезоизогипс рассматриваемого района

Пьезометрический напор полагался равным уровню грунтовых вод. К заданию прилагалось около 2 тыс. измерений уровня грунтовых вод 145 скважин. Для расчета эти данные усредняли, полученная таким образом карта пьезоизогипс в локальных географических координатах, принятых в задании, приведена на рис. 1.

В гидрогеологическом строении участка расположения могильника выделяют несколько зон, сложенных различными песчаными породами, которые разделены линзами слабопроницаемых глин. Полагалось, что миграция нуклидов в водоносном горизонте происходит только в верхней зоне 1 мощностью 10 м.

По коэффициентам фильтрации K были даны две группы результатов измерений для отдельных скважин, различающиеся между