

04; 09; 12

© 1993

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ
ЛОКАЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ПРИЗЕМНЫХ СЛОЯХ
АТМОСФЕРЫК.А. Б о я р ч у к, Е.Н. К о н о н о в,
Г.А. Л я х о в

Дистанционное зондирование следов ионизации в больших объемах газовой среды имеет широкий круг физико-химических, геофизических и экологических приложений, актуальнейшим из которых представляется обнаружение и идентификация радиоактивных источников. Существующие разнообразные методы (гамма-телескопия, тепловидение, спектроскопия электромагнитного излучения от радио- до ультрафиолетового диапазонов, контактный химический анализ) здесь достаточно продвинуты [1, 2], однако имеют ограничения — в приложении, например, к важной задаче обнаружения радиоактивных выбросов атомных электростанций (АЭС) — по совокупности параметров эффективности (дальность действия, чувствительность, время обработки данных, пространственное разрешение). Большая часть используемых методов основана на измерении вторичных эффектов радиоактивности; здесь, однако, существенно, что собственно поражающую способность выброса точнее всего характеризует именно его ионизирующее действие. Естественно поэтому обращение к радиолокационным методам, в широком диапазоне метеоусловий фактически прямо измеряющим степень ионизации облученного объема и обладающих возможностями повышения дальности, чувствительности и пространственного разрешения в реальном масштабе времени.

Первые наблюдения радиолокационного отклика от облака радиоактивного выброса осуществлено группой В.Б. Богданова в 1986 г. в районе Чернобыльской АЭС. Цикл представленных здесь экспериментов, проведенных в 1989–1992 г. в нескольких регионах, продемонстрировал работоспособность метода в различных погодных условиях и позволил наметить направления дальнейших исследований физических механизмов отклика.

Все наблюдения проведены с использованием локаторов штатных радиовысотометров и станций наведения сантиметрового и дециметрового диапазонов [3]. Общее число наблюдений составляет несколько сотен; объектами их служили Южно-Украинская, Запорожская, Ленинградская, Балаковская, Удомленская, Чернобыльская АЭС. По команде с АЭС о начале технологического выброса локатор начинал слежение от верхнего среза трубы; выделение сигнала от облака выброса на фоне гидromеторов осуществляла система селекции движущихся целей. Основной объем измерений

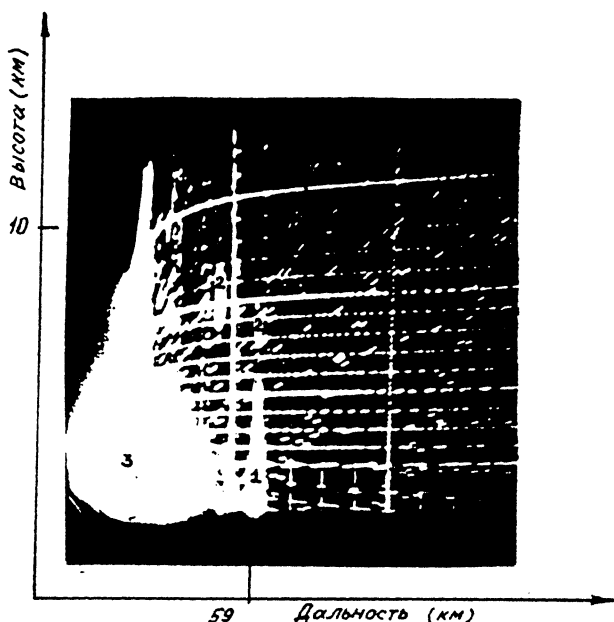


Рис. 1. Радиолокационное изображение радиоактивного выброса Запорожской АЭС 30.10.89 г (9⁰⁰). 1 – выброс над трубой АЭС. 2 – облако, отделившееся от трубы в 6⁰⁰. 3 – отражения от местных предметов, „местники“.

эффективной отражающей поверхности σ (включающих измерение величины σ контрольного объекта и отношения сигнал/шум приемно-передающего тракта) проведен на дальностях 11–65 км; отдельные измерения получены на дальности до 485 км. Типичная картина выброса (рис. 1) на экране локатора включает вертикальную „свечу“ 1 высотой до 10 км на дальности трубы (59 км), от которой со временем отделяются сдвигающиеся фрагменты 2. С повышением интенсивности выброса (параллельно контролируемой наземными датчиками) высота „свечи“ над трубой и число фрагментов ее деления увеличиваются (рис. 2, дальность 42 км, высота верхнего фрагмента 14 км).

Расчетное значение σ , при котором наблюдается отклик, равно [4]:

$$\sigma = (4\pi)^3 R^4 P_n m / P_p G^2 \lambda^2. \quad (1)$$

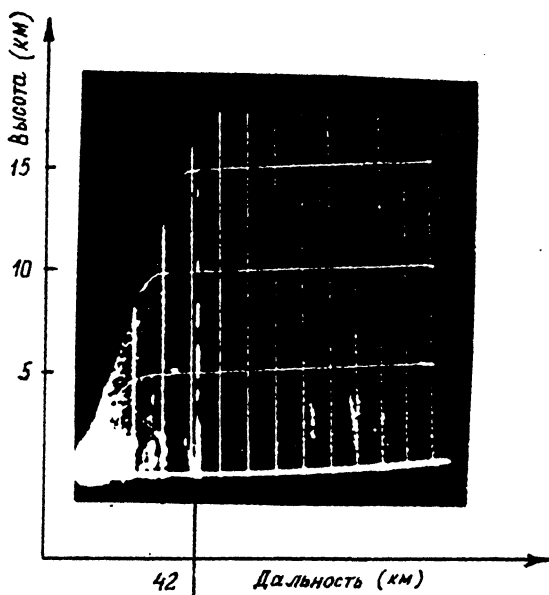


Рис. 2. Радиолокационное изображение радиоактивного выброса Смоленской АЭС 21.08.91 г.

Здесь λ - длина волны излучения, $P_n = Nk_B T \Delta f$ (N - шум-фактор, k_B - постоянная Больцмана, Δf - полоса пропускания), m - отношение сигнал/шум по мощности; импульсная мощность передатчика $P_p = \bar{P} \tau_r / \tau_p$, где \bar{P} - средняя мощность, τ_r и τ_p - время повторения и длительность импульса излучения; коэффициент направленного действия антенны $G = 4\pi A / \lambda^2$, где эффективная площадь антенны $A = \xi \pi \alpha_1 \alpha_2$, ξ - КПД антенны, $2\alpha_{1,2}$ - азимутальный (φ_1) и угломестный (φ_2) размеры антенны: $\alpha_{1,2} = 0.61 \lambda / \Delta \varphi_{1,2}$. Оценка (1) при типичных условиях рис. 2 ($\lambda = 6$ см, $\bar{P} = 300$ Вт, $\tau_r = 2.5$ мкс, $\tau_p = 1.7$ мкс; $R = 42$ км, $m = 2.5 \cdot 10^3$, $N = 12$, $\Delta f = 2$ МГц, $\xi = 0.4$, $\Delta \varphi_1 = 2.3^\circ$, $\Delta \varphi_2 = 0.5^\circ$) дает согласующиеся с контрольными измерениями значение $\sigma = 5.1$ м². При варьировании экспериментальных условий оценка (1) изменяется в диапазоне от 0.1 (уровень, определяющий чувствительность метода) до 100 м². Интересно отметить, что по усредненным экспериментальным значениям σ удается классифицировать АЭС от Балаковской до Смоленской по степени загрязненности технологических выбросов.

Зависимость σ от степени ионизации облака n_i определяют механизмы ионизации и диффузии зарядов, геометрия как облака, так и источника ионизации. В принятой для атмосферы модели случайного распределения плотности зарядов [5] расчет дает:

$$\sigma \approx 0.2 V (\Delta \epsilon)^2 (L_0^2 \lambda)^{-1/3}, \quad (2)$$

где $V = \pi r_0^2 L$ — объем цилиндрического с радиусом r_0 и длиной L облака, $L_0 \approx 0.2 L$. Средний квадрат флуктуаций диэлектрической проницаемости

$$(\Delta \epsilon)^2 = (Z_i^2 n_i \lambda^2 / \pi c^2 m_i)^2, \quad (3)$$

где n_i , Z_i , m_i — концентрация, заряд и масса ионов, c — скорость света. Приравнивая (1) и (2), можно оценить степень ионизации n_i ; для электронов в облаке с $L = 3$ км, $r_0 = 0.1$ км при $\lambda = 6$ см это дает $n_e \approx (10^8 - 10^9) \text{ см}^{-3}$ при $\sigma = (1 - 100) \text{ м}^2$. Доводом в пользу модели (2), (3) отчасти служит экспериментальная зависимость $\sigma(\lambda)$: усредненные данные для района Запорожской АЭС дают $\sigma = 0.9, 3.3$ и 24.7 м^2 при $\lambda = 3, 6$ и 12 см.

Оценку степени ионизации атмосферы радионуклидным выбросом проводим в основной модели рекомбинации электронов [6]:

$$dn/dt = q - \alpha n^2, \quad (4)$$

где q — объемная скорость образования свободных электронов; эффективный коэффициент рекомбинации, с учетом весьма сложной кинетики зарядов в воздушной среде, принимает значения $\alpha = 3 \times 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3$ [6]. Стационарная концентрация из (4) — $n = (q/\alpha)^{1/2}$, причем оценки по данным [7, 8] указывают на преобладание вклада бета-ионизации $q(\gamma) \approx 10^{-2} q(\beta)$ — пробег гамма-квантов превышает 100 м для основных линий радионуклидного выброса (Xe^{139} , Xe^{135} , Kr^{88}), то есть существенная часть гамма-потока выходит из области шлейфа. Оценку $q(\beta)$ получим в модели непрерывного воздушного длинного ($h \gg r$) цилиндрического шлейфа над срезом трубы с радиусом $r = 2$ м и осевым перемещением со скоростью $v = 10$ м/с. Величину $q(\beta)$ определяет сумма по всем изотопам и их линиям от произведения скоростей выброса A , энергий бета-излучения E и выходов ν бета-излучения на один распад:

$$q = (\pi r^2 \cdot w v)^{-1} \sum A_i E_{ij} \nu_{ij}, \quad (5)$$

где $w = 33.9$ эВ — работа ионизации молекул воздуха [7]. Учет основных изотопов выброса АЭС в технологическом режиме дает из (5) оценку $q(\beta) \approx (10^4 - 10^5) \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$, откуда следует, что

$n \approx (10^5 - 10^6) \text{ см}^{-3}$. В аварийной ситуации значения A увеличиваются в $10 - 10^2$ раз, при этом величина n может вырастать на порядок и более того.

Таким образом, представленные упрощенные модели ионизации воздуха выбросом радионуклидов и радиолокационного отклика ионизированного облака дает оценку β , близкую к данным локационных измерений.

Использованные модели требуют уточнения в понятных направлениях. Это, во-первых, учет более сложной, чем в (4), реальной кинетики слабоионизированного газа (зависимость, к тому же нестационарная, эффективного коэффициента рекомбинации α от концентрации многих сортов ионов), включающей диффузию частиц в реальной, более сложной геометрии шлейфа. Самостоятельного исследования требуют элементарные процессы адсорбции зарядов молекулами и молекулярными комплексами атмосферы. На этой основе, во-вторых, должна быть уточнена модель (2), (3) радиолокационного отклика: корреляция актов переизлучения отдельными зарядами, в том числе связанными, зависит от кинетики их образования. В-третьих, и это требует нового цикла экспериментов, радиолокационную эффективность схемы, особенно по параметру пространственного разрешения, может существенно повысить использование короткоимпульсных передатчиков с большой импульсной мощностью [9]. Их использование, с другой стороны, представляется необходимым в экспериментальных исследованиях кинетики ионизации. Наконец, возможна реализация радиолокационных схем высокой чувствительности с включением в них когерентных оптических источников либо в качестве модуляторов для сверхширокополосных антенн [10], либо даже с переходом к оптическому каналу информации [11]. Здесь требуется, помимо уточнения теоретической модели, проведение модельных лабораторных экспериментов.

Авторы благодарны Ф.В. Бункину, А.Н. Диденко, Ю.П. Кулешову за полезные обсуждения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Баранов В.Ф. Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974. 123 с.
- [2] Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987. 234 с.
- [3] Единая государственная автоматизированная система контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО). Авантпроект, т. 2, кн. 2, М.: ЦНИИ „Комета“, 1990.
- [4] Современная радиолокация / Под ред. Ю.Б. Козырева, М.: Советское радио, 1969. 456 с.
- [5] Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Таттарский В.И. Введение в статистическую радиофизику, ч. 2, М.: Наука, 1978. 386 с.

- [6] Френсис Г. Ионизационные явления в газах. М.: Атомиздат, 1964. 640 с.
- [7] Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник, М.: Атомиздат, 1966. 250 с.
- [8] Бета-излучение продуктов деления. Справочник, М.: Атомиздат, 1978. 120 с.
- [9] Диденко А.Н., Новиков С.А., Разин С.В. Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. // ДАН. 1991. Т. 321. № 3. С. 512-520.
- [10] Бахрах Л.Д., Блискавицкий А.А. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 5. С. 879-914.
- [11] Боярчук К.А., Кулешов Ю.П., Ляхов Г.А., Свирко Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 8. С. 5-8.

Институт общей физики
РАН, Москва

Поступило в Редакцию
24 февраля 1993 г.