

УДК 621.396.969.18

ДИСТАНЦИОННЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

В.И. ВЕРЕМЬЕВ, О.А. МАРКЕЛОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

Поступила в редакцию 28 октября 2015

Приведен обзор исследований в области разработки методов радиолокационного мониторинга радиоактивных атмосферных неоднородностей техногенного происхождения. Представлены результаты анализа комплексной физико-математической модели рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) ионизованными образованиями в приземном слое атмосферы. Показаны направления продолжения исследований в части усовершенствования моделей взаимодействия ЭМВ с радиоактивными метеообразованиями.

Ключевые слова: радиоактивные выбросы в атмосферу, радиолокационный мониторинг, физико-математические модели рассеяния ЭМВ.

Введение

В настоящее время при эксплуатации атомных электростанций (АЭС) и других радиационно-опасных объектов используют контактные и дистанционные методы контроля. Существующие контактные средства контроля обладают рядом недостатков, среди которых локальность проводимых измерений, неспособность прогнозирования распространения выбросов, подверженность воздействию загрязненной среды, большая степень риска для операторов при работах в послеаварийных ситуациях, большие интервалы времени между моментом радиоактивного загрязнения и его обнаружением и др. Используемые в настоящее время дистанционные средства контроля (гамма-спектрографы, акустические, оптические) также обладают недостатками, в частности, малым радиусом контроля, зависимостью от погодных условий.

Поэтому представляют интерес исследование и разработка систем обнаружения техногенных образований дистанционными, в частности, радиолокационными средствами, позволяющими избавиться от ряда недостатков существующих средств контроля, и способными осуществлять всепогодное оперативное дистанционное обнаружение и оценку параметров техногенных метеообразований на больших территориях и прогнозировать их распространение.

Обзор результатов исследований по обнаружению радиоактивных метеообразований радиолокационными средствами

Возможность применения радиолокационных средств для мониторинга объектов энергетики основана на том, что появление в нижних слоях атмосферы техногенного выброса приводит к изменению физических параметров среды распространения радиоволн, что создает радиолокационный контраст и дает возможность обнаружения атмосферной неоднородности. Важно отметить, что изменение среды распространения будет существенно отличаться для радиолокационных станций (РЛС) разных частотных диапазонов радиоволн, поэтому одновременное использование станций разных частот позволит существенно повысить

надежность и информативность системы мониторинга. При этом радиолокационные частотно-временные и поляризационные характеристики зондируемых техногенных метеообразований различного физического состава и интенсивности позволяют с высокой степенью достоверности идентифицировать выбросы, производить дистанционную оценку их параметров и степень опасности.

Исследования, направленные на решение задачи обнаружения радиоактивных метеообразований техногенной природы радиолокационными средствами, стали проводиться лишь в последние годы. Вместе с тем, уже несколько десятилетий проводятся исследования, хоть и не связанные непосредственно с данной задачей, но позволяющие оценить характеристики взаимодействия ЭМВ с атмосферными неоднородностями различной природы. Среди этих исследований можно выделить следующие основные направления:

- исследование отражения ЭМВ от частиц;
- исследование рассеяния ЭМВ на турбулентных неоднородностях;
- исследование радиолокационных методов обнаружения термических неоднородностей;
- исследование взаимодействия ЭМВ различных диапазонов с ионизированными метеообразованиями.

При решении задачи обнаружения радиоактивных метеообразований в той или иной мере приходится сталкиваться со всеми перечисленными физическими факторами, определяющими возникновение пространственно-временных неоднородностей в атмосфере, при этом их влияние на рассеяние и прохождение радиосигналов носит комплексный характер.

Изучением вопроса отражения ЭМВ от ионизированных образований природного и техногенного характера занимались исследователи в ряде ситуаций, перечисляемых ниже:

1) отражения ЭМВ от естественных плазменных образований: молний, метеорных следов, выходов радона во время землетрясений, северных сияний и др. метеоцелей, обнаруживаемых с помощью РЛС различных диапазонов волн;

2) отражения ЭМВ от следов космических аппаратов при входе их в атмосферу, отражения от инверсионных следов дозвуковых и сверхзвуковых летательных аппаратов в нижних слоях атмосферы;

3) отражения ЭМВ от плазменных образований при атомных взрывах в атмосфере;

4) распространение и рассеяние радиоволн различных диапазонов в ионосфере.

Что касается непосредственно задачи обнаружения радиоактивных метеообразований техногенной природы радиолокационными средствами, то сведения как о теоретических, так и экспериментальных исследованиях в данном направлении крайне незначительны, а опубликованные материалы разных авторов, как правило, недостаточно убедительны и зачастую противоречивы. Среди первых работ в этом направлении следует отметить исследования, проведенные ЦНПО «Комета» под руководством Е.Н. Кононова. Авторами проведены многочисленные экспериментальные работы по исследованию возможностей радиолокационного обнаружения областей локальной ионизации в приземных слоях атмосферы с использованием ведомственных РЛС различного назначения, получен большой объем экспериментальных данных по зондированию атмосферных участков над рядом промышленных предприятий, использующих радиоактивные технологии. Сделана попытка разработать модель отражения ЭМВ ионизированными образованиями [1, 2]. Основное доказательство плазменного характера отражения, по мнению авторов, базируется на проведенных ими теоретических расчетах эффективной площади рассеяния (ЭПР) от областей повышенной ионизации. В ходе этих расчетов получена квадратичная зависимость величины ЭПР от длины волны (в отличие от релеевского рассеяния), поэтому экспериментальные данные, имеющие положительную зависимость ЭПР от длины волны, трактуются авторами как однозначно обусловленные плазменной природой рассеяния. Здесь следует отметить, что положительная зависимость ЭПР от длины волны может быть и в других случаях (например, при рассеянии ЭМВ на термических неоднородностях), поэтому доказательства авторов не являются достаточно убедительными.

В [1, 3] авторы исследуют возможность обнаружения радиоактивных слоев в атмосфере по изменению реакции ионизированного атмосферного воздуха на электромагнитное излучение по радиолокационному отклику. Однако для получения надежных измерений на больших

расстояниях и идентификации радионуклидного состава загрязнений необходима более полная информация о структуре и ионно-электронном составе плазменных облаков, образующихся в результате радиоактивного распада. Существующие модели ионизации воздуха при радиоактивном распаде не в полной мере учитывают основные плазмохимические процессы при атмосферном давлении – образование комплексных ионов, как положительных, так и отрицательных. Поскольку рекомбинация комплексных ионов происходит значительно быстрее, чем простых молекулярных ионов, это существенно изменяет плазменный состав и характеристики плазмы.

Более обширный учет основных плазмохимических реакций, сопровождающих процессы ионизации в атмосфере, инициируемые радиоактивными выбросами, лег в основу модели, разработанной учеными Томского политехнического института [4]. Естественным развитием этой модели представляется учет влияния внешнего электромагнитного поля на процессы ионизации и влияние ионизационных процессов на стимулирование конденсации.

В [5] предложена модель, позволяющая описывать поведение ионно-молекулярных комплексов в ионизированной среде под действием внешнего электрического поля. Особое внимание уделяется электрическим характеристикам среды, определяющим отражение электромагнитных волн. Результаты моделирования свидетельствуют о сильной частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн сантиметрового диапазона. Показано, что характер зависимости проводимости от частоты аналогичен зависимости, предсказываемой теорией нелинейного отклика. Проведены расчеты электропроводности как функции параметров среды, содержащихся в ней гидратированных ионов и внешнего поля на примере земной атмосферы.

В начале 90-х гг. исследованиями в этом направлении начали заниматься группы ученых г. Санкт-Петербурга (АОЗТ «Финн-Трейд», Главная геофизическая обсерватория (ГГО) им. А.И.Воейкова, НИЦ дистанционного зондирования атмосферы, АО «Инстар»). Была сделана попытка разработки физической модели собственного теплового радиоизлучения и рассеяния радиоволн областями атмосферы, возмущенными в результате вентиляционных выбросов продуктов функционирования атомных объектов с учетом влажности и турбулентности. Обоснована методика наблюдения радиоактивных выбросов обзорными и прицельными РЛС противовоздушной обороны (РЛС ПВО). На базе экспериментального радиолокационного поста проведен ряд наблюдений за участками атмосферы в районе расположения Ленинградской АЭС (ЛАЭС). Проведен сравнительный анализ результатов индикации радиоактивных выбросов ЛАЭС в атмосферу с использованием метрологически аттестованного стационарного радиолокационного комплекса и дозиметрических данных региональной автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), ЛАЭС и Научно-исследовательского технологического института им. А.П. Александрова (НИТИ). По мнению авторов, экспериментально измеренные значения удельной ЭПР радиоактивных выбросов в основном обусловлены двумя механизмами:

- рассеяние на турбулентных неоднородностях воздуха в окрестностях вытяжной трубы АЭС;
- рассеяние на макроскопических частицах (водяных каплях, аэрозолях, кластерах), причем наличие радиоактивности способствует образованию кластеров, которые, в свою очередь, влияют на рост крупных капель.

Отличительным признаком сигналов, отраженных от радиоактивных атмосферных образований является их стабильное местоположение на экранах РЛС. В то же время, наблюдаемые на экранах постоянные отметки могут быть вызваны и отражениями по боковым лепесткам от местных предметов (в частности, труб).

В 1986 г. в период аварии на Чернобыльской АЭС сотрудниками ГГО им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург) был проведен ряд работ, направленных на исследование и разработку методов контроля естественно развивающейся конвективной облачности и осадков, а также облаков, образующихся над перегретыми участками земной поверхности, зараженных радиоактивными аэрозолями. Разработана методика, позволяющая по информации метеорологических РЛС (МРЛ) об облачности, границах слоев и прослоек прогнозировать зоны вымывания радиоактивного аэрозоля на почву при аварийных ситуациях на АЭС [6].

С 1992 г. исследования, направленные на разработку радиолокационных методов обнаружения радиоактивных загрязнений атмосферы, проводятся в НИИ систем

прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций «Прогноз» СПбГЭТУ (ЛЭТИ). Созданы теоретические модели взаимодействия ЭМВ различных частотных диапазонов с ионизированными образованиями в нижних слоях атмосферы. Разработаны алгоритмы обнаружения и оценки параметров радиоактивных выбросов радиолокационными средствами. Показаны возможности практической реализации радиолокационных систем дистанционного радиационного контроля. Результаты работ освещены в ряде публикаций [7, 8]. На базе экспериментального радиолокационного поста проведены наблюдения за участками атмосферы в районе расположения ЛАЭС.

Анализ результатов физико-математического моделирования, осуществленного в СПбГЭТУ

Физическая основа возможности обнаружения зон высокой радиоактивности в атмосфере в первую очередь базируется на том, что происходит изменение диэлектрической проницаемости среды за счет повышенного содержания заряженных частиц (электронов и ионов), обусловленного процессами ионизации. При взаимодействии с ионизированными образованиями происходит рассеяние ЭМВ, сопровождающееся изменением спектральных и поляризационных характеристик излучаемых сигналов. По интенсивности рассеянных сигналов, зависящей от ионно-электронной концентрации, можно судить о степени загрязнения воздушного пространства радионуклидами и осуществлять оценку отклонения функционирования радиационноопасных объектов от штатного режима.

Задача обнаружения и измерения величины ЭПР выброса относится в радиолокации к задачам обнаружения пространственно-распределенной цели (техногенного атмосферного образования) на фоне пространственно-распределенных помех (природных метеообразований) и переотражений радиоволн от земной поверхности. Первоначальная постановка задачи приводит к обобщенной модели ЭПР выброса, описываемой достаточно сложной зависимостью от ряда физических параметров P_i , характеризующих выброс:

$$\sigma_{\Sigma} = F(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n). \quad (1)$$

Эта зависимость определяет пространственно-временное нелинейное и параметрическое взаимодействие всех физических составляющих, определяющих изменение диэлектрических характеристик атмосферы, с электромагнитным полем: экранный эффект, поглощение, усиление и другие эффекты при распространении и отражении ЭМВ в объеме воздуха, занимаемом выбросом. Поскольку теоретический анализ нелинейной модели представляет значительные трудности, на первой стадии исследований рассматривалась аддитивная модель ЭПР:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4, \quad (2)$$

где σ_1 – ЭПР за счет ионизации воздуха; σ_2 – ЭПР турбулентностей в атмосфере; σ_3 – ЭПР тепловых неоднородностей; σ_4 – ЭПР аэрозолей и других частиц.

В СПбГЭТУ, при участии авторов статьи, разработана комплексная аналитическая модель рассеяния ЭМВ техногенными метеообразованиями, подробно описываемая в монографии [7]. При разработке моделей особое внимание уделялось выявлению зависимостей значений ЭПР от частоты зондирующего сигнала для различных типов техногенных метеообразований.

Анализ представленной комплексной аддитивной физико-математической модели показал:

– значения ЭПР ионизированных образований при уровнях интенсивности радиационной ионизации 1...10000 Р/ч имеют порядок –60...–40 дБ для частоты ЭМВ 150 МГц, –80...–60 дБ для частоты 3 ГГц, –90...–70 дБ для частоты 10 ГГц и в значительной степени зависят от пространственного распределения ионов в облаке выброса;

– значения ЭПР, обусловленной рассеянием на частицах, содержащихся в технологических выбросах, варьируются в широких пределах в зависимости от концентрации частиц и их распределения по размерам. Кроме этого, ЭПР существенно зависит от частоты

используемых сигналов, а именно увеличивается с возрастанием частоты пропорционально f^4 . Так, для суммарной массы частиц средним диаметром 10 мкм, находящихся в объеме разрешения РЛС, равной 10 кг, ЭПР изменяется от –150 дБ до –75 дБ при увеличении частоты зондирующего сигнала со 150 МГц до 10 ГГц соответственно. При увеличении среднего диаметра частиц до 20 мкм (в 2 раза) значения ЭПР для той же суммарной массы увеличивается приблизительно на 10 дБ;

– составляющая ЭПР, обусловленная рассеянием ЭМВ на термических неоднородностях, имеет порядок –100...–120 дБ при перепаде температур на границе 2-х сред 0,5...5 К при нормальных значениях температуры окружающей среды, влажности и давления. От частоты зондирующего сигнала величина ЭПР может зависеть в том случае, когда протяженность слоя, в котором происходит изменение температуры (а, следовательно, и диэлектрической проницаемости) будет больше четверти длины ЭМВ. В данном случае ЭПР будет увеличиваться с уменьшением частоты пропорционально градиенту температуры;

– ЭПР турбулентных образований техногенного происхождения может намного превышать ЭПР естественных турбулентностей и для рассматриваемой в работе модели имеет порядок –90...–50 дБ на частоте 10 ГГц при градиенте температуры на активном участке формирования струи 3...100 К соответственно. При уменьшении частоты сигнала до 150 МГц значения ЭПР уменьшаются на 7 дБ;

– в зависимости от того, насколько преобладают в техногенном метеообразовании те или иные физические факторы, определяющие возмущение диэлектрической проницаемости среды, значения ЭПР могут как возрастать, так и убывать при изменении частоты зондирующего сигнала, что может быть использовано при решении задачи идентификации обнаруженных образований.

Поскольку, согласно произведенным расчетам, значения ЭПР техногенных метеообразований даже при аварийных выбросах очень незначительны, возникают трудности при выделении отраженных от них сигналов на фоне интенсивных помех от подстилающей поверхности и мешающих метеообразований. Поэтому возникает необходимость в разработке методов, позволяющих при этих условиях подойти к практическому решению задачи радиолокационного мониторинга нижних слоев атмосферы.

Заключение

Радиолокационные средства дистанционного радиационного контроля нижних слоев атмосферы, несомненно, могут являться эффективным инструментом в единой системе экологического мониторинга в районах расположения АЭС и других промышленных объектов, использующих ядерные технологии. Ввиду низкого уровня ЭПР ионизованных метеообразований необходимы алгоритмы и средства выделения информативных сигналов на фоне пассивных помех. В процессе исследований следует подробнее рассмотреть косвенные эффекты взаимодействия ЭМВ с ионизованными неоднородностями, которые могут приводить к увеличению радиолокационной отражаемости (например, кластеризация молекул воды при повышенной ионной концентрации). В то время, как довольно подробно исследованы механизмы рассеяния ЭМВ на ионизованных метеообразованиях, имеются значительные трудности в решении «обратной задачи» – определения состава выброса и оценки интенсивности радиационной составляющей по данным радиолокационного зондирования. При разработке радиолокационных систем мониторинга радиоактивных выбросов необходимо использовать комплексную информацию от радиолокационных датчиков различных частотных диапазонов, что необходимо для адекватного решения задачи идентификации и оценки параметров радиоактивных метеообразований. Целесообразно, и даже необходимо, проведение натурных экспериментальных исследований для верификации и развития разрабатываемых моделей и методов.

REMOTE RADAR CONTROL OF RADIOACTIVE EMISSIONS TO ATMOSPHERE

V.I. VEREMJEV, O.A. MARKELOV

Abstract

An overview of scientific research in the field of methods for radioactive atmosphere heterogeneities with anthropogenic origin radar monitoring is given bellow. The results of analysis of the complex physic-mathematical model of electromagnetic waves scattering from ionized formations in atmospheric surface layers are presented. The directions for future research in improvement of electromagnetic wave interaction with radioactive meteorological formations model are shown.

Список литературы

1. *Боярчук К.А., Кононов Е.Н., Ляхов Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т.19, Вып. 6. С. 67–72.
2. *Елохин А.П., Кононов Е.Н.* // Атомная энергия. 1996. № 1. С. 47–54
3. *Диденко А.Н., Усов Ю.П., Юшков Ю.Г. и др.* // Атомная энергия, 1996. Т. 80, вып. 1.
4. *Григорьев В.П., Томашова О.В.* // Изв. Томского политехнического университета. 2003. Т. 306, № 5. С. 16–18.
5. *Бауман Е.Г., Шевкунов С.В.* // Матем. моделирование. 2000. № 9. С. 45–54.
6. Применение радиолокационных данных, аэрологической и метеорологической информации для оценки аэрозольного радиоактивного загрязнения при аварийных ситуациях на АЭС (на примере Чернобыльской АЭС) / Под ред. В.Д. Степаненко. СПб, 1997.
7. *Веремьев В.И., Коновалов А.А., Бархатов А.В.* Радиолокационный мониторинг нижних слоев атмосферы. СПб, 2014.
8. *Kutuzov V.M., Kalenitchenko S.P., Veremjev V.I. et. al.* // Proc. of the IEEE Russia. North-West Section. 2012. Vol. 3. P. 7–10.