

Колотков Геннадий Александрович

**ДИСТАНЦИОННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ В
АТМОСФЕРУ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА НА ЧАСТОТАХ
СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА (H) И ГИДРОКСИЛА (OH)
1420 И 1665-1667 МГц**

Специальность:

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Пенин Сергей Тимофеевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Романов Андрей Николаевич

доктор технических наук
ФГБУН Институт водных и экологических
проблем Сибирского отделения Российской
академии наук (г. Барнаул)
ведущий научный сотрудник

Тихомиров Александр Алексеевич

доктор технических наук
ФГБУН Институт мониторинга
климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии
наук (г. Томск)
заведующий лабораторией экологического
приборостроения

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники»

Защита состоится «09» декабря 2014 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7 ауд. 215.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат технических наук, доцент

Васендина Е.А.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние десятилетия произошло значительное количество техногенных аварий и катастроф на предприятиях ядерно-топливного цикла. Список наиболее серьезных радиационных аварий, от 4 до 7 уровня по международной шкале ядерных событий, включает в себя такие как: Атомный комплекс «Селафилд» (Великобритания), атомная электростанция (АЭС) Три-Майл-Айленд (США), Чернобыльская АЭС (СССР), АЭС Фукусима-1 (Япония) и т.д. С 1980 по 2011 года произошло 197 радиационных аварий и инцидентов. В результате радиационных аварий в атмосферу было выброшено огромное количество радиоактивного материала, общий объем которого сложно корректно оценить. Основными радионуклидами, выбрасываемыми в атмосферу, являются радиоактивные благородные газы, часть которых характеризуется длительным периодом полураспада. Значительное время зараженная территория не пригодна для проживания человека и ведения сельского хозяйства. А наиболее первостепенной задачей является оперативное оповещение населения в зоне возможного риска.

Существующие системы мониторинга радиационного фона основаны на сети стационарных постов расположенных в пределах территорий загрязняющих предприятий, на уровне дыхания (2 метра над поверхностью земли), на трубах и крышах прилегающих зданий. Данные об уровне радиоактивности воздуха поступают в центр обработки информации и выводятся оператору на монитор. В среднем данные обновляются один раз за один час – что не позволяет рассматривать такую систему, как работающую в режиме реального времени. Более того, во время аварийных выбросов, радиоактивное облако может забрасываться на высоту сотен метров, а, следовательно, имеющаяся сеть стационарных постов практически не способна контролировать подобные ситуации. Учитывая скорость и направление ветра, радиоактивное облако может опуститься на территории прилегающего населенного пункта, как например это случилось на «Маяке» в 1957 году. Ограниченность измерений пространственных параметров радиоактивных выбросов приводит к вполне понятным выводам: необходима комплексная система мониторинга распространения радиоактивных атмосферных выбросов в режиме реального времени.

Характеристики основных методов регистрирующих радиоактивность.

Широко применяемые сцинтилляционные счетчики и гамма спектрометры относятся к не дистанционным, а прямым методам. С их помощью обеспечивается контроль радиационной обстановки, основанный на измерениях интенсивности гамма излучения. Однако их низкая разрешающая способность и недостаточная чувствительность не позволяет производить измерения с расстояний более 200 метров. Другие типы ионизирующих излучений, такие как альфа- и бета- обладают значительно меньшей проникающей способностью и не могут быть зарегистрированы дистанционно.

Методы лазерной оптико-акустической спектроскопии основаны на оптико-акустическом эффекте, заключающемся в возникновении акустических колебаний в образце при воздействии на поглощенную газовую среду модулированного по амплитуде (или частоте) лазерного излучения. В результате поглощения газ нагревается, и в среде возникают колебания давления (звук) на частоте модуляции источника излучения. Дальность от 10 до 100 м.; к другим недостаткам можно отнести низкую чувствительность во время работы в реальном режиме времени.

Лазерно-оптические методы основаны на поглощении лазерного излучения, позволяют проводить идентификацию молекул радиоактивного вещества благодаря особенностям их электронно-колебательных спектров и детектировать малые концентрации примесей дистанционно на расстояниях не более 10 км. Необходимо отметить, что эти методы помимо высокой стоимости очень сильно зависят от погодных условий.

Метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), основан на измерении спектров флуоресценции, индуцированной в объекте при его освещении монохроматическим излучением. Анализ спектров флуоресценции позволяет идентифицировать вещество и определить его концентрацию в объекте. Возможно применение ЛИФ для уранила –

компонента аварийного выброса на предприятиях ЯТЦ. Существенным недостатком здесь является необходимость проведения для каждого конкретного случая специальной калибровки при дистанционном определении концентрации. Предельное расстояние не более 1 км. Применение ЛИФ для других компонентов выброса автору не известно.

Первые эксперименты по радиолокации радиоактивных выбросов АЭС были проведены во время Чернобыльской аварии. Но последующие научные исследования выявили многие недостатки и преждевременность некоторых выводов о перспективе их быстрого внедрения в практику дистанционного контроля. В частности, выводы о свечении шлейфа выброса в видимом диапазоне не нашли убедительного подтверждения.

В целом анализ рассмотренных методов показывает, что данные методы не позволяют проводить измерения на расстояниях свыше 10 км, не обладают необходимыми пространственным разрешением и мобильностью, и весьма зависимы от метеоусловий.

В этой связи наиболее перспективными выглядят косвенные дистанционные методы детектирования повышенной радиоактивности в атмосфере. Эти методы основаны на вторичном проявлении радиоактивности в атмосфере. Т.е. в результате выброса в атмосферу радионуклидов, в ней образуется повышенная концентрация электронов. Сами электроны и их тормозное излучение инициируют фотохимические реакции, в результате которых появляются так называемые маркеры повышенной радиоактивности. По излучению этих, не типичных для стандартной атмосферы, атомов и молекул можно судить о наличии в атмосфере повышенной концентрации радионуклидов.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование возможностей дистанционного метода пассивного детектирования стационарных и аварийных выбросов АЭС и РХЗ в режиме реального времени на частотах 1420 МГц и 1665-1667 МГц.

Основные решаемые задачи:

1. Анализ составов радиоактивных штатных и аварийных выбросов АЭС и РХЗ (радиохимический завод).
2. Расчет количества электронов, образовавшихся в результате взаимодействия электронов бета-распада радионуклидов с атомами и молекулами атмосферы, и получения ФРЭЭ (функция распределения электронов по энергии).
3. Анализ фотохимических реакций в тропосфере, приводящих к образованию атомарного водорода (H) и гидроксила (OH).
4. Расчет количества тормозной энергии электронов, необходимой для протекания этих реакций.
5. Расчет стационарных концентраций H и OH в шлейфе выброса предприятий ЯТЦ.
6. Обоснование возможности использования спонтанных радиоизлучений H и OH на частотах 1420 МГц и 1665 – 1667 МГц соответственно, для дистанционного детектирования радиоактивных выбросов.
7. Оценка возможностей использования данного метода для обнаружения аварийного выброса (на примере радиационной аварии на АЭС Фукусима-1 в 2011 году).

Методы исследований. Решение поставленных задач осуществлялось с применением: для оценки количества электронов, образовавшихся в результате взаимодействия с компонентами атмосферы численного решения деградиационного уравнения Спенсера-Фано, метода математического моделирования пространственного распределения радиоактивной примеси на основе расчетной модели Пасквилла-Гиффорда. При выполнении работы применялись специальные программы Mathcad, MS Office, Origin Lab.

Основные положения, выносимые на защиту:

- При расчете количества электронов, образовавшихся в результате бета-распада радионуклидов в шлейфе газоаэрозольного радиоактивного выброса, необходимо учитывать процесс размножения электронов, поскольку разница составляет 10^5 раз.
- В области шлейфа стационарного выброса АЭС, под воздействием тормозного излучения электронов образуется повышенная стационарная концентрация H и OH, спонтанное излучение которых на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно, может быть зарегистрировано существующими радиометрами.

- Излучение в диапазоне частот 1,4 – 1,8 ГГц может быть использовано для дальнего обнаружения повышенной радиоактивности и зарегистрировано на расстоянии до 60 – 70 км от источника радиоактивного выброса (АЭС или РХЗ) работающего в штатном режиме.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- определена суммарная функция распределения электронов по энергии для бета-радионуклидов в выбросах АЭС и РХЗ;
- впервые подробно исследованы этапы генерации атомарного водорода в тропосфере в результате стационарных радиоактивных выбросов АЭС и РХЗ, в том числе и с учетом процесса размножения электронов;
- впервые проведены оценки количественного образования гидроксила в шлейфе выбросов АЭС и РХЗ, в том числе и с учетом процесса размножения электронов;
- теоретически обоснована возможность дистанционного мониторинга шлейфа выброса АЭС и РХЗ по радиоизлучению на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц;
- проведен сравнительный анализ радиологических последствий аварий на АЭС Фукусима-1 и Чернобыльской АЭС.

Практическая ценность работы заключается в:

Возможности более корректного, по сравнению с ранее разработанными моделями расчета стационарной концентрации атомарного водорода и гидроксила в шлейфе радиоактивного выброса АЭС и РХЗ;

Для создания автоматизированных систем более высокой степени оперативности мониторинга и оценке пространственного распределения, направления распространения стационарных и аварийных радиоактивных выбросов;

Предложенный метод измерения мощности излучения на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц в сочетании и с учетом конкретных метеоусловий, позволит прогнозировать уровень радиоактивного загрязнения в исследуемой зоне и может служить в качестве дополнительного критерия при принятии управленческих решений в случае аварийного выброса.

Личный вклад автора. Результаты работ, изложенные в диссертации, получены лично автором.

Апробация результатов работы. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах:

- «Технология и автоматизация атомной энергетики» СГТИ, Северск 2005 г. (соавтор)
- V, VIII, X Международная школа молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» 2006, 2010, 2012 гг.
- XI (соавтор), XII, XIII, XVI, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX Joint International Symposium «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics». Tomsk. IAO SB RAS. 2004 – 2013 гг.
- SPIE Europe Remote Sensing, Cardiff, UK, 14 – 18 September 2008. (Приглашенный доклад).
- European Research Course on Atmosphere, 12 January – 13 February 2009, France, Grenoble.
- ENVIROMIS, 2010, Tomsk.
- NATO advanced study institute on Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing, Kyiv, Ukraine 12 – 25 September 2010.
- Рабочая группа "Аэрозоли Сибири" 29 ноября – 2 декабря 2011 г., г. Томск.
- 3, 4 Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», 2010, 2012 гг. г. Томск.
- IV, V Всероссийская конференция молодых ученых "Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии", 2009, 2012 гг. г. Томск.
- 2, 3 Школа-конференция Молодых атомщиков Сибири «Перспективные направления развития атомной отрасли», 2011, 2012 гг., г. Томск.
- International conference 7th Dresden symposium hazards – detection and management, 3 – 8 March 2013, Dresden, Germany.
- EGU General Assembly 2013, 07 – 12 April 2013, Vienna, Austria.

- IV Всероссийская научно-практической конференция студентов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», 26 – 30 мая 2014 г. г. Томск.

- VI Международная научно-практическая конференция физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности «ФТПАНЭП-14», 5 – 7 июня 2014 г. г. Томск

Автор признан победителем и отмечен дипломами в следующих конкурсах:

В 2006 и 2007 году принимал участие в конкурсе аспирантов на «Премия имени академика Владимира Евсеевича Зуева» (3 и 2 место соответственно); в 2011 г. 1 место на конкурсе «Лучший молодой научный сотрудник» ИОА; в конкурсе на лучшую НИР среди молодых сотрудников; в конкурсе на лучшую презентацию своих научных результатов среди молодых ученых ТНЦ СО РАН; в 2011 г. 3 место за доклад на конференция-школе молодых атомщиков Сибири, Томск; почетная грамота за личный вклад в развитие российской науки и в связи с 40-летием ИОА СО РАН.

По теме диссертационной работы выполнены следующие госбюджетные научно-исследовательские работы: «Геофизик РАН», по приоритетным программе СО РАН «Новые оптические материалы и приборы, и применение», проект «Развитие лидарных методов излучение атмосферы и подстилающей поверхности» (краткий итоговый, 2004 - 2006) № госрег. 0120.0406058. Исследования проводились при поддержке гранта РФФИ № 12-05-31506 (конкурс «Мой первый грант») и стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (конкурс СП – 2012), «Академическая мобильность – 2013».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ (объем одной рукописи ≥ 3 стр.), в российских изданиях, рекомендуемых ВАК для защиты кандидатских диссертаций – 6; в зарубежных изданиях, индексируемых Web of Science – 4; 27 опубликованных докладов на российских и международных конференциях и симпозиумах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 87 источников; изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков и 28 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, положения, выносимые на защиту и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения об их апробации.

В первой главе выполнен анализ выбросов предприятий ЯТЦ, таких как АЭС и РХЗ. Состав выбросов зависит от типа реактора и других его характеристик, например выбросы АЭС и РХЗ отличаются по набору изотопов и наличию жидких и твердых составляющих в выбросах РХЗ. Показано, что радиоактивные благородные газы (РБГ): ^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe и ^{131}I вносят доминирующий вклад в величину стационарного радиоактивного выброса. Поскольку именно они определяют радиационную обстановку в районе АЭС работающей в штатном режиме, расчеты были проведены для этого набора бета-активных радионуклидов. В случае РХЗ, набор выбрасываемых радионуклидов ограничивается только ^{85}Kr , однако уровень радиоактивности значительно превышает таковую для АЭС.

В следующей задаче рассчитано количество электронов возникающих в результате бета-распада и ионизации атмосферы. Кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергиям, в однородной среде, без влияния внешних полей, с равномерно распределенными источниками, записывается в виде уравнения Спенсера-Фано:

$$\Sigma(E)\Phi(E) - \int_E^{E_0} \Sigma_s(E' \rightarrow E)\Phi(E')dE' = S(E), \quad (1)$$

Допущения, принятые при расчете распределения электронов по энергии: основным процессом генерации электронов является ионизация; электрон-электронными и электрон-ионными столкновениями, ударами второго рода пренебрегаем; диссипативные процессы не рассматриваются; атомы воздуха после столкновения неподвижны; среда взаимодействия однородна (N_2 , O_2).

Это уравнение является интегрально-дифференциальным уравнением Вольтера второго рода. Решение уравнения (1) проводилось с использованием численного метода по следующим рекуррентным соотношениям:

$$\Phi_0 = \frac{S_0}{\Sigma_0}, \quad \Phi_n = \frac{\left[S_n + \Delta E \left(\sum_{i=1}^{n-1} (\Sigma_{in} \Phi_i) + \frac{1}{2} \Sigma_{0n} \Phi_0 \right) \right]}{\Sigma_n},$$

Порядок решения задачи – нахождения общего распределения электронов по их энергиям, состоит из следующих этапов:

1. спектр первичных электронов бета-распада для каждого радионуклида известен;
2. определение спектра термализующихся в воздухе первичных электронов;
3. определение спектра вторичных электронов;
4. далее процедура по п. 2, 3 повторяется для следующих поколений электронов;
5. суммирование рассчитанных для ^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{131}I спектров электронов 9-ти поколений.

Распределение на первом графике выполнено для АЭС и 4-х радионуклидов. На втором для РХЗ, только для криптона.

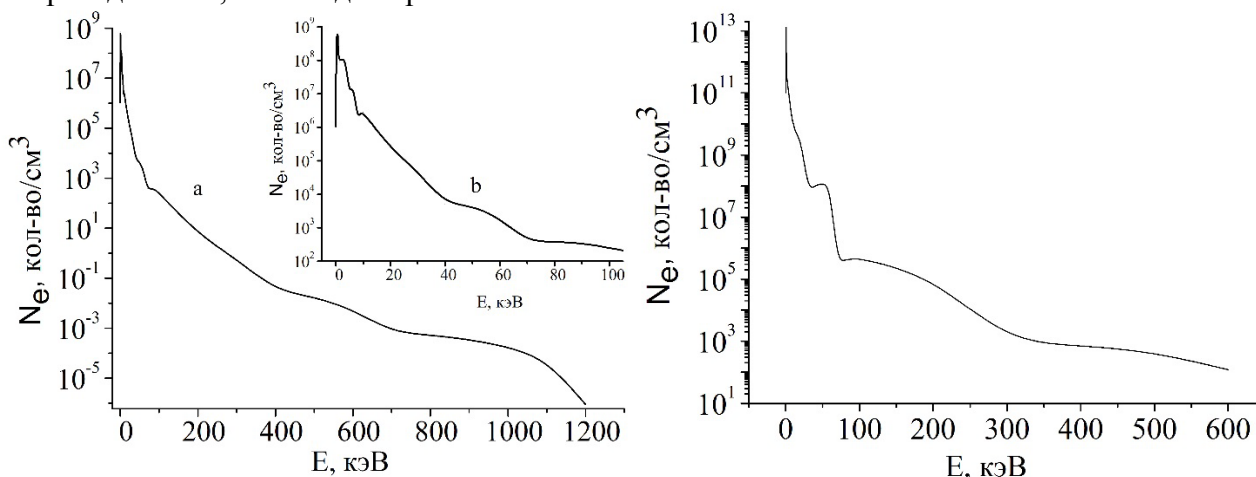


Рис. 1 Суммарное распределение количества электронов по энергии в выбросах АЭС: ^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{131}I и РХЗ: ^{85}Kr .

Количество электронов с относительно малыми энергиями < 100 кэВ, составляет существенную долю от общего количества электронов. Для большей наглядности на рисунке 1б показано распределение энергетического спектра электронов с малыми энергиями. Эти электроны вносят ощутимый вклад в величину тормозного излучения – основного механизма воздействия радиации на компоненты воздуха. Под его воздействием, происходят фотохимические реакции, приводящие к образованию атомарного водорода и гидроксила, которые спонтанно излучают в радиодиапазоне. Резкий спад, наблюдаемый при малых энергиях, объясняется тем, что в этом случае необходимо учитывать эффекты прилипания электронов, которые не учитываются в рамках принятой модели. Таким образом, на графиках практически построено количество актов взаимодействия, а радиоактивный шлейф, представляет из себя слабоионизированную, низкотемпературную плазму: $T \leq 10^5 \text{ K}$, $N_e \ll N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Проведено сравнение концентраций электронов, вычисленные различными подходами, разных авторов. Например, в статье «Пенин С.Т., Чистякова Л.К., Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. №1. С. 73-81.» была рассчитана концентрация электронов для РХЗ, но не учитывался процесс размножения электронов. При одинаковой мощности выброса ^{85}Kr – $6 \cdot 10^{17}$ Бк/год разница на 5 порядков больше и составляет 10^{13} см^{-3} . В случае АЭС приведено сравнение с работами «Боярчук К.А., Кононов Е.Н., Ляхов Г.А., ПЖТФ, 1993. Т. 19. вып. 06. С. 67-72.» и «Бойко В.И., Шаманин И.В., Шепотенко Н.А., Юшков Ю.Г., Известия вузов. Физика. 1997. Т.40. № 6. С.111.», разница на 3 и 2 порядка соответственно.

Во второй главе рассмотрены источники образования и фоновая концентрация атомарного водорода (H) и гидроксила (OH) в атмосфере, а также рассчитана мощность

излучения из шлейфа выброса АЭС и РХЗ на частотах спонтанного излучения Н и ОН 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно. Приводится обоснование возможности дистанционного детектирования радиоактивных выбросов на этих частотах и сравнение мощности излучения из шлейфа выброса с результатами работ других авторов.

Концентрация Н в атмосфере (ниже 10 км) пренебрежимо мала в результате фотолиза атмосферных газов с образованием атомов кислорода, излучение с $\lambda < 2900 \text{ \AA}$ полностью поглощается озоновым слоем стратосферы между 10 – 30 км и того что атомы водорода способны избежать гравитации Земли и улететь в космос из-за своего легкого веса. Необходимо заметить, что интерес представляют только те реакции, которые проходят с образованием атомарного водорода.

Таблица 1. Основные фотохимические реакции приводящие к образованию Н:

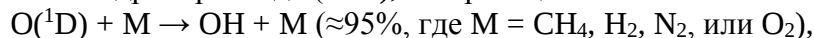
Метан	$\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}$ $\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}_2$, $\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow \text{CH} + \text{H}_2 + \text{H}$,	$\lambda = 1100 - 1600 \text{ \AA}$
Аммиак	$\text{NH}_3 + h\nu \rightarrow \text{NH}_2 + \text{H}$ $\text{NH}_3 + h\nu \rightarrow \text{NH} + \text{H}_2$ $\text{NH}_3 + h\nu \rightarrow \text{NH} + \text{H} + \text{H}$	$\lambda < 2800 \text{ \AA}$ $\lambda < 2240 \text{ \AA}$ $\lambda < 1470 \text{ \AA}$
Формальдегид	$\text{CHO} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{HCO}$	$\lambda = 3500 \text{ \AA}$
Сероводород	$\text{H}_2\text{S} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{SH}$	$\lambda < 3170 \text{ \AA}$
Вода	$\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{OH}$	$\lambda < 1357, 2420 \text{ \AA}$
Молекулярный водород	$\text{H}_2 + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{H}$	$844,7 \text{ \AA} - 1108 \text{ \AA}$
Суммарный диапазон длин волн		844,7 – 3500 $\text{\AA}$
Суммарная концентрация молекул этих веществ в атмосфере $\sim 10^{19} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$		

Данные фотохимические реакции будут протекать, если на эти вещества воздействовать излучением в диапазоне длин волн 844,7 – 3500 $\text{\AA}$.

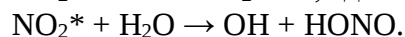
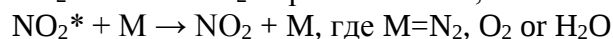
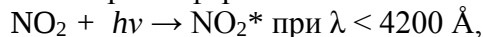
Образование **ОН** в стандартной атмосфере происходит в результате следующих реакций: $\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{O}(^1\text{D})$, $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH} (\approx 5\%)$.

Заметим, что скорость реакции образования радикала ОН фотолизом O_3 ограничена малым количеством солнечного излучения $< 320 \text{ нм}$ в тропосфере.

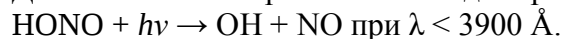
Возможны и другие источники образования ОН, такие как: азотистая кислота (HONO), перекись водорода (H_2O_2), перекись метана (CH_3OOH), реакция окиси азота (NO) с радикалами гидропероксида (HO_2), или реакция алкенов и озона:



но как было показано в работе Li et al. (2008), основным естественным источником образования тропосферного ОН является реакция: NO_2^* с парами воды:



Дополнительно образование ОН дает реакция фотолиза HONO :



На основании рассмотренных реакций можно заключить, что основной вклад в образование Н и ОН вносит излучение в диапазоне 844,7 – 4200 $\text{\AA}$.

Ранее мы вычислили, сколько электронов и с какой энергией образуются в результате бета-распада радионуклидов и ионизации и определили условия, при которых будут протекать реакции с образованием Н и ОН.

Для протекания реакций образования Н и ОН необходимо чтобы в частотный интервал 844,7 – 4200 $\text{\AA}$ поступала энергия диссоциации $E_d = \frac{hc}{\lambda}$. Для атомарного водорода $\lambda(\text{H}) = 844,7 - 3500 \text{ \AA}$ это $2,352 \cdot 10^{-11} - 5,676 \cdot 10^{-12}$ эрг, для $\lambda(\text{OH}) = 844,7 - 4200 \text{ \AA}$ это $2,352 \cdot 10^{-11} - 4,730 \cdot 10^{-12}$ эрг. Таким образом, энергия диссоциации лежит в диапазоне 2,95 – 14,68 эВ. Следующий этап расчетов состоит в определении количества тормозного излучения электронов в данный интервал длин волн.

Для расчета энергии, излучаемой электроном в заданный спектральный интервал, воспользовались приближенными соотношениями классической электродинамики. Формула для количества энергии, излученной электроном при торможении в частотный интервал dv в 1 секунду, имеет вид:

$$dQ_v = \frac{8}{3} \frac{e^2 v_e^3 N \sigma_{tr}}{c^3} dv$$

где e – заряд электрона, СГСЭ; v_e – скорость электрона, см/с; c – скорость света, см/с; N – концентрация атомов в 1 см^3 ; σ_{tr} – транспортное сечение передачи энергии.

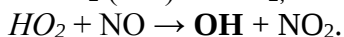
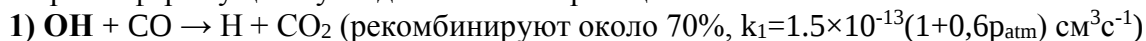
Считаем рассеяние изотропным и время торможения одного электрона равным 10^{-6} с , и учитывая распределение концентраций электронов по энергиям, приведенное на рисунке 1, получим, что в спектральный интервал $\lambda=844,7 \text{ \AA} - 3500 \text{ \AA}$ будет излучена энергия $0,131 \text{ эрг/см}^3$ или $8,2 \cdot 10^{10} \text{ эВ/см}^3$. Таким образом, в результате распада радиоизотопов ^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe и ^{131}I в области шлейфа выброса будет образовываться $5,571 \cdot 10^{15} - 2,308 \cdot 10^{16}$ атомов водорода и гидроксидов в $\text{м}^3 \cdot \text{с}$.

Равновесная же концентрация H и OH будет определяться процессами генерации и рекомбинации. Стационарную концентрацию атомов водорода определили по формуле:

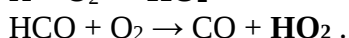
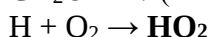
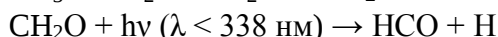
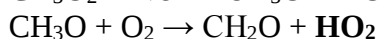
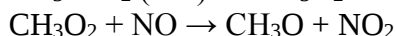
$N_{\text{H}} = (N_{\text{H(нестаб)}} / 2k)^{0,5}$, k – коэффициент рекомбинации - $10^{-13} - 10^{-14} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. В этом случае стационарная концентрация H около 10^{14} м^{-3} .

Гидроксил водорода является важнейшим химическим соединением семейства HO_x и играет ключевую роль в атмосферной химии. Очень высокая реактивность гидроксидов водорода и сильная зависимость от времени суток, высоты и влажности затрудняют точное определение концентрации OH . Среднее фоновое значение 10^{12} атомов в м^3 .

В тропосфере существуют две основные реакции стока OH :



Необходимо принять во внимание, что OH восстанавливается в первом цикле реакций:



Три образовавшихся радикала HO_2 взаимодействуют с NO с появлением 3х молекул OH , что приводит к цепной реакции: $\text{HO}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{OH} + \text{NO}_2$. Поскольку скорость рекомбинации OH меньше чем скорость образования, тогда можно предположить, что концентрация OH немного увеличится или остается на том же уровне. Т.о. концентрация OH будет порядка 10^{15} м^{-3} .

Расчет мощности излучения из шлейфа выброса АЭС и РХЗ.

При самопроизвольном переходе атома из верхнего, n - энергетического состояния в нижнее k , излучается квант. Мощность линии излучения определяется вероятностью радиационного перехода A_{nk} по следующей формуле: $S = E_{nk} A_{nk}$, где $A_{nk} = 3 \cdot 10^{-15} \text{ с}^{-1}$ – вероятность радиационного перехода, $E_{nk} = h\nu_0 = 9,412 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$ – энергия сверхтонкого расщепления для $\nu_0 = 1420,41 \text{ МГц}$. Тогда мощность линии излучения атомарного водорода при одном акте радиационного перехода S равняется $2,824 \cdot 10^{-37} \text{ Вт}$. Так как концентрация атомов водорода в одном кубическом метре шлейфа составляет $\sim 1,7 \cdot 10^{14} - 10^{15}$ атомов, то мощность излучения из 1 км^3 на частоте 1420 МГц составит величину 10^{-13} Вт .

Молекула гидроксидов имеет большее количество линий излучения, которое объясняется наличием ядерного спина у атома водорода.

Таблица 2. Линии излучения гидроксидов:

Частота (МГц)	Коэффициент Эйнштейна A (10^{-11}с^{-1})	Энергия сверхтонкого расщепления (10^{-25} Дж)	Энергия излучения (10^{-35} Вт)
1612,231	1,289	10,7	1,3792
1665,40	7,103	11,0	7,8133
1667,358	7,698	11,0	8,4678
1720,533	0,940	11,4	1,0716

Главными линиями спонтанного излучения являются 1665 - 1667 МГц, что соответствует мощности излучения 10^{-35} Вт. Т.о. объем выбросов 1 км³ будет излучать порядка 10^{-11} Вт.

Обоснование возможности использования радиочастот 1420 и 1665 – 1667 МГц для дистанционного мониторинга радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ.

Тропосфера практически прозрачна для микроволнового излучения для этих частот. Атмосферное затухание мало в микроволновом диапазоне от 1 до 10 GHz. Уровень шума в спектральном диапазоне 1 – 10 ГГц (фон) 10^{-21} Вт·м⁻² меньше чем уровень сигнала. Ослабление атмосферным поглощением меньше чем 2дБ. Хорошо известен факт уширения спектральной линии излучающей частицы движущейся по направлению к наблюдателю.

Уширение определяется по формуле: $\Delta\nu = 7,16 \cdot 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}}$.

Доплеровская ширина линии ОН (1665-1667 МГц) при температуре 300 К равна 31,5 кГц. Для линии Н не превышает 150 кГц потому что поступательное движение атома водорода меньше < 2 эВ. В соответствии с федеральным законом о связи любые активные излучатели, работающие в диапазоне длин волн 1,42 – 1,427 ГГц, 1,6605 – 1,668 ГГц запрещены.

Таблица 3. Сравнение мощностей излучения на частотах 1420, 1665 – 1667 МГц из 1 км³ выбросов РХЗ и АЭС.

	Теория (1420 МГц)	Эксперимент (1420 МГц)	Теория (1665 – 1667 МГц)	Эксперимент (1665 – 1667 МГц)
РХЗ (Вт)	$8 \cdot 10^{-18} - 2 \cdot 10^{-17}$ [1] $10^{-13} - 7 \cdot 10^{-13}$	Наблюдалось увеличение интенсивности излучения [2]	$3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$	—
АЭС (Вт)	$6 \cdot 10^{-7}$ [3], 10^{-13} [4, 5]	—	$2 \cdot 10^{-10}$ [5]	—

Пояснения к таблице 3: значения, выделенные полужирным шрифтом, рассчитаны автором.

1. Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Формирование и динамика излучений атомарного водорода в атмосфере и шлейфе выбросов ядерно-перерабатывающих предприятий // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 1. С. 73-81.
2. Chistyakov V.Yu., Losev D.V., Chistyakova L.K., Penin S.T., Tarabrin Yu.K., Yakubov V.P., Yurjev I.A. Microwave radiation of atomic hydrogen in plumes of radioactive emissions from nuclear reprocessing plants // J. Microwave and Optical Technology Letters. 1997. V. 16. № 4. P. 255-260.
3. Протасевич Е.Т. Метод обнаружения радиоактивных загрязнений среды по свечению воздуха // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 5. С. 697-700.
4. Колотков Г.А., Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Возможность определения активности выбросов АЭС по микроволновому излучению на частоте 1420 МГц // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 09. С. 793-797.
5. Kolotkov G.A., Penin S.T. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time // JENR. 2013. V. 115. P. 69-72. DOI: 10.1016/j.jenrvrad.2012.07.004.

В таблице 3 приведено сравнение с результатами работ других авторов. Для РХЗ расчет проводился по выше упомянутым формулам. Разница для АЭС на 4-6 порядков, что объясняется тем, что автор учитывал размножение электронов. Сравнить по гидроксилу не представляется возможным поскольку ни эксперимента, ни теоретических выкладок других авторов обнаружено не было. Рассмотренный метод будет работать и для АЭС поскольку эксперимент, проведенный ИОА СО РАН показал превышение регистрируемой мощности

сигнала из шлейфа выброса РХЗ. Рассчитанная автором мощность излучения для РХЗ объяснила натурный эксперимент проведенный в работе [2].

В третьей главе рассмотрен вопрос о влиянии атмосферной стратификации на интенсивность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС, представлена структурная схема радиометрического комплекса, оценено расстояние на котором можно зарегистрировать излучение из шлейфа выброса объемом 10 км³, исследован вопрос о зависимости мощности излучения из 10 км³ шлейфа выброса от диаметра антенны и расстояния от источника.

Для определения параметров пространственного распределения радиоактивной примеси, поступающей в атмосферу, использовалась расчетная модель Пасквилла-Гиффорда. 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. Общая формула расчета средней концентрации радионуклида в воздухе с учетом обеднения атмосферной примеси имеет вид:

$$q_A(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)v_{cp}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - h_{эфф})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z + h_{эфф})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] \right\}$$

Соотношение для определения эффективной высоты выброса: $h_{эфф} = h + \Delta h$

Дополнительная высота подъема струи за счет теплового и динамического факторов:

$$\Delta h = A_1 \cdot \left(2,61 \cdot \frac{\sqrt{Q_h}}{v_h} + 0,029 \cdot \frac{v_s \cdot D_0}{v_h} \right)$$

Данные в таблице 4 соответствуют стандартным техническим характеристикам АЭС и параметрам атмосферы.

Таблица 4. Исходные данные для проведения расчета.

стратификация атмосферы		нейтральная
вентиляционной трубы	высота диаметр	100 м 1 м
средние скорости ветра в направлении переноса примеси	на высоте 1 м на высоте флюгера на высоте 10 м на высоте выброса	5м/с
скорость выхода воздуха (газов) из устья трубы		
тип радиоактивной примеси	элементарная примесь (атомарная)	

Рядом авторов выделяются четыре основных класса устойчивости атмосферы: А - неустойчивое, С – слабо неустойчивое, D - нейтральное, F – умеренно устойчивое состояния. Также можно выделить наиболее общие типы подстилающих поверхностей:

Таблица 5.1. Сильно пересеченная неровная местность.

Класс устойчивости	P_y	Φ_y	P_z	Φ_z
A	0,23	1,00	0,10	1,16
C	0,22	0,94	0,25	0,89
D	0,22	0,91	0,40	0,76
F	5,38	0,58	0,40	0,62

Дисперсии для данного случая вычисляются по формулам $\sigma_z = P_z x^{\Phi_z}$, $\sigma_y = P_y x^{\Phi_y}$.

Таблица 5.2. Городские условия.

Класс устойчивости	a_1	b_1	a_2	b_2	c_1
A	0,32	$4 \cdot 10^{-4}$	0,24	10^{-3}	0,5
C	0,22	$4 \cdot 10^{-4}$	0,2	0	0
D	0,16	$4 \cdot 10^{-4}$	0,14	$3 \cdot 10^{-4}$	-0,5
F	0,11	$4 \cdot 10^{-4}$	0,08	$1,5 \cdot 10^{-4}$	-0,5

$$\sigma_y = a_1 x (1 + b_1 x)^{-\frac{1}{2}},$$

$$\sigma_z = a_2 x (1 + b_2 x)^{c_1}.$$

Таблица 5.3. Открытая ровная поверхность с небольшой шероховатостью.

Класс устойчивости	a_1	b_1	α_1	β_1
--------------------	-------	-------	------------	-----------

A	0,40	0,4	0,91	0,90
C	0,36	0,33	0,86	0,86
D	0,32	0,22	0,78	0,78
F	0,31	0,06	0,71	0,71

$$\sigma_y = a_1(x)^{\alpha_1}, \sigma_z = b_1(x)^{\beta_1}.$$

Расчет проводился по вышеприведенным формулам со временем осреднения 1 час. Результаты расчетов объединены по классам устойчивости атмосферы и представлены ниже:

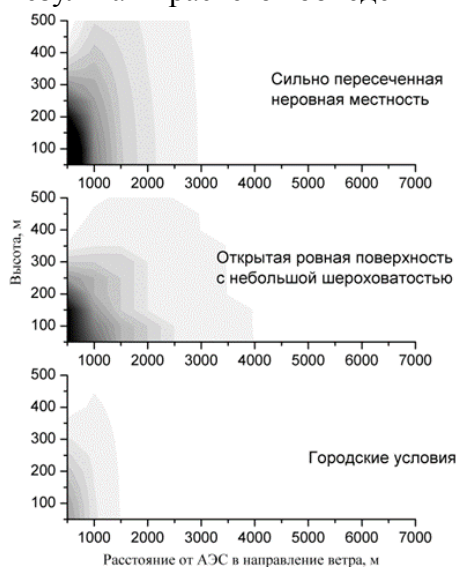


Рис. 2. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода в выбросах АЭС при устойчивом состоянии атмосферы.

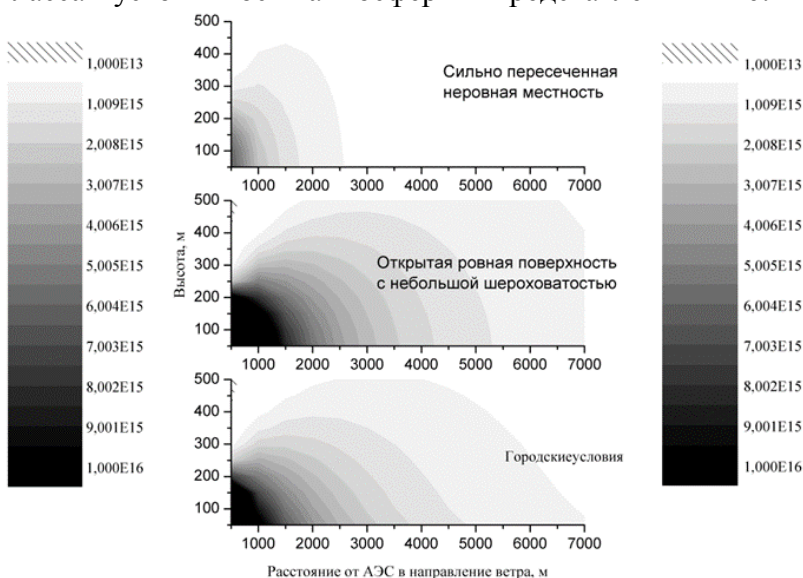


Рис. 3. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода в выбросах АЭС при слабо неустойчивом состоянии атмосферы.

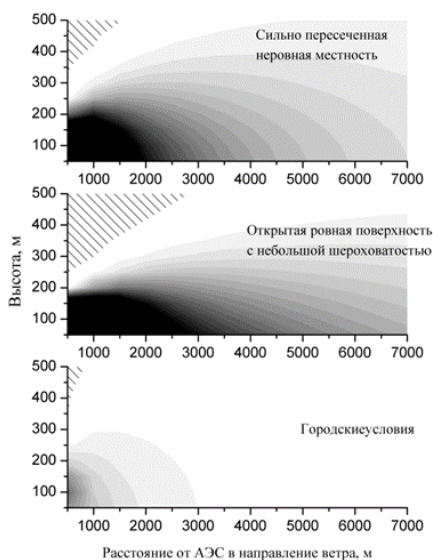


Рис. 4. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода в выбросах АЭС при неустойчивом состоянии атмосферы.

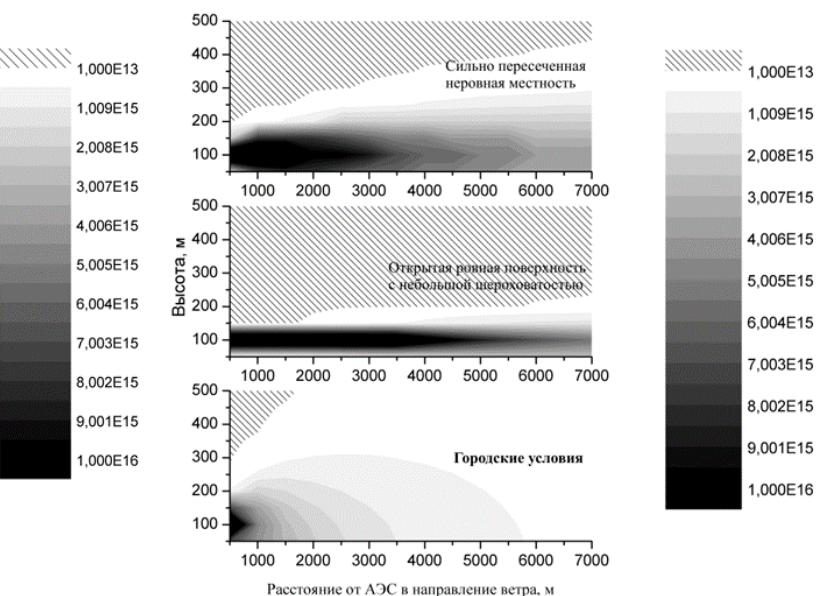


Рис. 5. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода в выбросах АЭС при нейтральном состоянии атмосферы.

Выводы по разделу. Показано, что при устойчивом состоянии атмосферы излучение равномерно распределено по шлейфу для ровной поверхности с небольшой шероховатостью. Увеличение степени шероховатости приводит к размыванию основной излучающей области шлейфа в вертикальной плоскости и смещении её ближе к источнику. Аналогичная картина наблюдается при изменении стратификации атмосферы до абсолютно неустойчивой.

Совместное воздействие этих двух факторов приводит к сильному размыванию излучающей области в вертикальном направлении вплоть до высот 500 метров и расположении её вблизи источника для случая, абсолютно неустойчивой стратификации и условий города. Атмосферная стратификация и шероховатость подстилающей поверхности определяют область шлейфа выброса, в которой будет повышенная концентрация радионуклидов. Вследствие этого интенсивность излучения на частотах 1420, 1665 – 1667 МГц из этих областей будет больше. Таким образом, измеряя мощность излучения на данных частотах и учитывая параметры атмосферы, можно предсказать уровень излучения из зоны радиоактивного загрязнения. Результаты могут быть использованы для решения обратной задачи: оценки активности выброса по интенсивности излучения атомарного водорода.

Фактические возможности радиометрического комплекса.

Созданный в ИОА СО РАН макет радиометра с использованием параболической антенны диаметром 1,6 метра с диаграммой направленности $9,8^\circ$ позволил уверенно регистрировать излучение на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса РХЗ, работающего в штатном режиме, на расстоянии ~ 25 км.

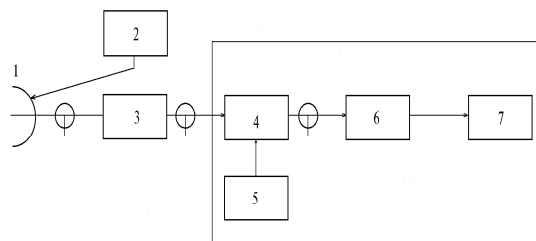


Рис. 6 Упрощенная схема радиоспектрометрического комплекса.

Она состоит из антенны (1) с поворотным устройством (2), набора малошумящих входных конвертеров (3), обеспечивающих прием сигналов в одном из заданных диапазонов частот, их усиление и преобразование в диапазон частот 1–2 ГГц (промежуточные частоты), и базового блока, включающего в себя унифицированный низкочастотный субблок обработки принимаемого сигнала (7) и линейную часть малошумящего супергетеродинного приемника диапазона 1–2 ГГц.

Структурная схема может быть представлена в таком виде:

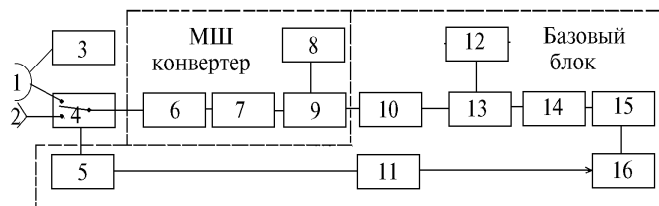


Рис. 7 Структурная схема приемного устройства

1 - антенна; 2 - облучатель; 3 - поворотное устройство; 4 - переключатель; 5 - коммутатор; 6 - малошумящий усилитель; 7 - фильтр; 8, 12 - гетеродины; 9, 13 - частотный преобразователь (ЧП); 10 - высокочастотный усилитель; 11 - генератор опорного напряжения; 14 - фильтр ПУ ПЧ; 15 - УПЧ; 16 - НЧ субблок обработки сигнала. Реализация такой схемы позволит проводить измерения более автоматизировано и точно.

Параболическая антенна имеет диаметр 1,6 м и угол раскрытия 10° , что позволяет получить необходимое усиление (до 20 дБ). У поворотного устройства угол сканирования по азимуту от 0 до 180° и по углу места от 0 до 90° . Зависимость шумовой температуры параболической антенны ($T_{ш.а}$) от угла места изменяется от 21 до 50 К при изменении угла места от 90 до 0° .

Таблица 6. Технические характеристики микроволнового радиометра:

Параболическая антенна	диаметр, м	1,6
	угол раскрыва, град	67
Ширина диаграммы направленности	в Е-плоскости, град	9,8
	в Н-плоскости, град	9,2
Коэффициент	шума МШУ, дБ	0,85
	свободной волны напряжения МШУ	1,6
Полоса пропускания, кГц		10
Выходной температурный дрейф,		мВ/°С ($T \sim 18-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) $\leq 0,4$
Чувствительность измерений, Вт		$9,3 \cdot 10^{-19}$

Чувствительность этого радиометра порядка $P_{\min} \sim 10^{-18}$ Вт. Мощность сигнала $P_{\text{пр}}$ принимаемая антенной площадью S расположенной на расстоянии r от источника излучения вычисляется по формуле:

$$P_{\min} = kT_{a\min}\Delta f - \text{чувствительность приемного устройства, Вт}$$

$T_{a\min} = \frac{\sqrt{2}T_{\text{ш}}}{2\sqrt{\Delta f\tau}}$ - пороговый сигнал приемного устройства радиометра, выраженной в градусах антенной температуры

k – постоянная Больцмана, Δf – полоса принимаемых частот, Гц; $T_{\text{ш}}$ - шумовая температура радиометра, К; τ – время накопления сигнала, с.

$$P_{\min} = 9,382 \cdot 10^{-19}, \text{ Вт для } \Delta f = 10 \text{ кГц}$$

Оценка расстояния на котором можно зарегистрировать излучение из шлейфа выброса объемом 10 км^3

На графике представлены кривые изменения мощности излучения в зависимости от расстояния от источника для АЭС и РХЗ работающих в штатном режиме.

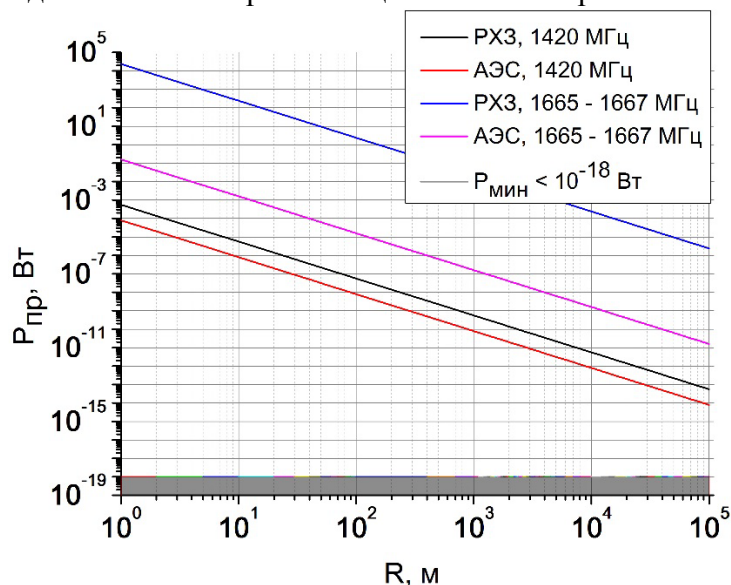


Рис. 8. Зависимость мощности излучения от расстояния от источника.

Очевидно что мощность сигнала $P_{\text{пр}}$ принимаемая антенной площадью S расположенной на расстоянии R от источника излучения должна быть больше чем чувствительность приемника, т.е. $P_{\text{пр}} > P_{\min}$ и рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}} S_a}{4\pi R^2}, \text{ где } P_{\text{изл}} - \text{мощность излучения из шлейфа выброса предприятия ЯТЦ, Вт} \cdot \text{с/м}^3, S_a = 1 - \text{площадь антенны, м; } R - \text{расстояние от источника излучения, м.}$$

Для приближённого расчёта дальности видимости объектов применяют номограмму Струйского: $D_{BL} = 3,57(\sqrt{h_B} + \sqrt{h_L}) = 3,57(\sqrt{250} + \sqrt{10}) \approx 68 \text{ км}$

Зависимость мощности излучения на соответствующих частотах из 10 км^3 шлейфа выброса АЭС и РХЗ от диаметра антенны УВЧ радиометра и расстояния между ними:

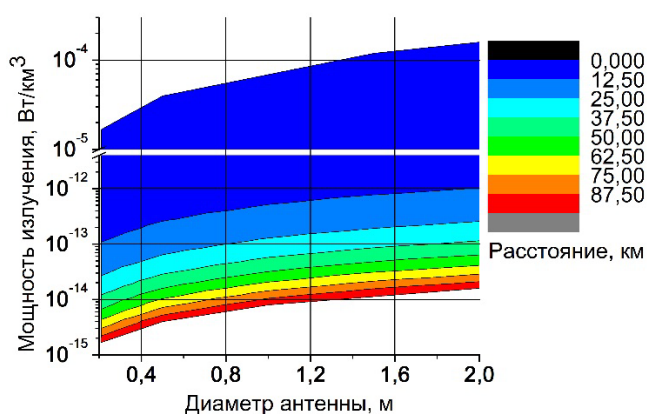


Рис. 9. АЭС, 1420 МГц (Н)

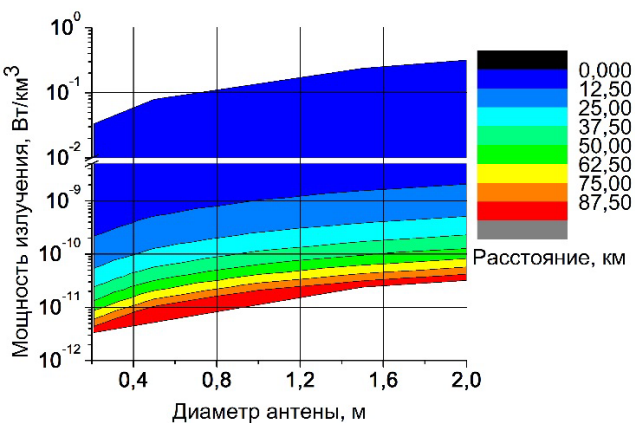


Рис. 10. АЭС, 1665 – 1667 МГц (ОН)

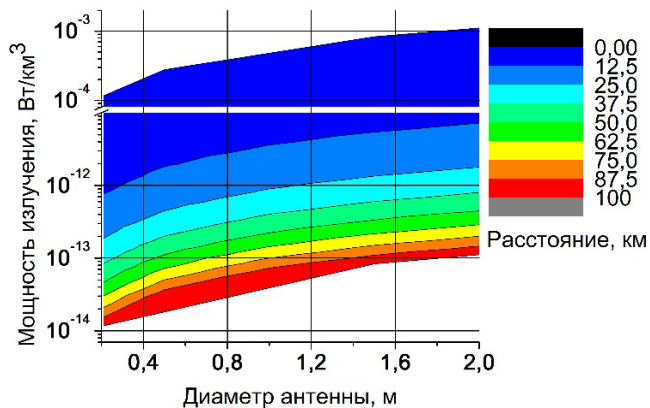


Рис.11. РХЗ, 1420 МГц (Н)

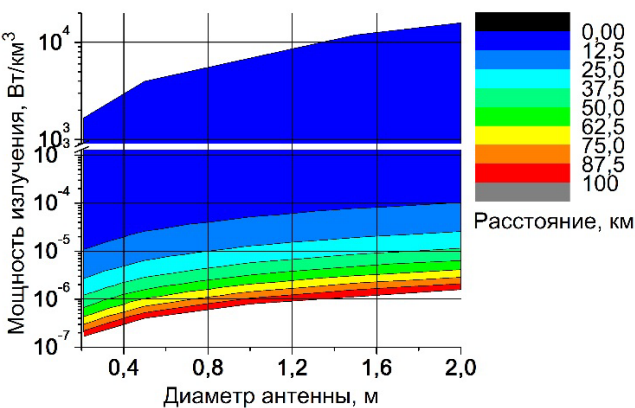


Рис. 12. РХЗ, 1665 – 1667 МГц (ОН)

Выводы по главе 3. Зная два из трех параметров можно определить третий, для тех или иных задач. Например, диаметр антенны нам известен как и расстояние на котором мы собираемся измерять мощность излучения из шлейфа выброса, т.о. можно предсказать уровень радиоактивного выброса.

Излучение в диапазоне частот 1,4 – 1,8 ГГц может быть зарегистрировано существующими радиометрами на расстоянии от 60 до 70 км от источника радиоактивного выброса (АЭС или РХЗ) работающего в штатном режиме.

Глава 4. Возможность использования метода дистанционного детектирования аварийных выбросов АЭС на частотах 1420 и 1665 - 1667 МГц на примере аварии на АЭС Фукусима – 1 в 2011 г.

На современном этапе развития атомной энергетики Японии, используются реакторы на тепловых нейтронах двух видов: корпусный с водой под давлением (тип PWR) и кипящий канальный урано-графитовый с водным теплоносителем (тип BWR).

На момент катастрофы 11 марта 2011 на АЭС Фукусима – 1 работали первые 3 энергоблока с реакторами типа BWR (именно такие, которые использовались в расчетах выше), остальные три были заглушены. Данные по составу аварийного выброса АЭС Фукусима – 1 были получены из источника. IRSN оценил количество радиоактивности, которое было выброшено тремя поврежденными реакторами в период с 12 по 22 марта 2011 года. Оценки основываются на: диагностике состояния трех реакторов, исследовании проведенными IRSN по поведению не охлаждаемых реакторов, информации предоставленной японскими властями о преднамеренной дегазации здания гермооболочки реакторов для защиты от избыточного давления. Детальный состав аварийного выброса рассчитывался IRSN на основе знания реакторов, работавших на тот момент: 1 реактор – 400 ТВЭЛ-ов, 2 и 3 по 548 в каждом.

Табл. 7. Детальный состав выбросов АЭС Фукусима-1.

Изотоп	Кол-во (Бк)	Тип распада	Период полураспада	Изотоп	Кол-во (Бк)	Тип распада	Период полураспада
⁸⁵ Kr	2·10¹⁶	β–	10,73 г	¹³⁴ Cs	10¹⁶	β–, β+	2,065 г
^{85m} Kr	10 ¹⁴	β–	4,48 ч	¹³⁶ Cs	6·10 ¹⁵	β–	13,16 д
⁸⁷ Kr	7·10 ¹¹	β–	1,27 ч	¹³⁷ Cs	10¹⁶	β–	30,2 г
⁸⁸ Kr	5·10 ¹³	β–	2,84 ч	¹³⁸ Cs	3·10 ⁹	β–	32,2 м
^{83m} Kr	10 ¹³	И.П.	1,86 ч	^{134m} Cs	10 ¹²	И.П.	2,91 ч
¹³³ Xe	2·10 ¹⁸	β–	5,243 д	^{133m} Te	4·10 ¹⁰	β–	55,4 м
^{133m} Xe	2·10 ¹⁶	И.П.	2,19 д	¹³⁴ Te	6·10 ⁹	β–	42 м
¹³⁵ Xe	2·10 ¹⁶	β–	9,1 ч	¹²⁷ Te	5·10 ¹⁵	β–	9,4 ч
¹³⁸ Xe	90	β–	14,1 м	^{129m} Te	7·10 ¹⁵	И.П., β–	33,6 д
^{131m} Xe	2·10 ¹⁶	(SF)	11,9 д	^{125m} Te	10 ¹⁴	И.П.	58 д
¹³¹ I	9·10 ¹⁶	β–	8,021 д	^{127m} Te	10 ¹⁵	И.П.	109 д
¹³² I	7·10 ¹⁶	β–	2,28 ч	¹³¹ Te	5·10 ¹⁴	β–	25 м
¹³³ I	2·10 ¹⁶	β–	20,8 ч	^{131m} Te	2·10 ¹⁵	β–, И.П.	1,35 д
¹³⁴ I	4·10 ¹¹	β–	52,6 м	¹³³ Te	7·10 ⁹	β–	12,4 м
¹³⁵ I	2·10 ¹⁵	β–	6,57 ч	¹³⁰ Sb	10 ¹⁵	β–	38,4 м
¹²⁹I	2·10⁹	β–	1,7·10⁷ г	¹²⁵Sb	6·10¹⁴	β–	2,758 г
^{132m} I	2·10 ¹⁰	И.П.	1,39 ч	¹²⁷ Sb	4·10 ¹⁵	β–	3,84 д
¹²⁸ I	4·10 ⁴	β–	25 м	¹²⁸ Sb	10 ¹⁰	β–	9,1 ч
¹³⁰ I	5·10 ¹³	β–	12,36 ч	^{128m} Sb	10 ¹³	β–	10,1 м
⁸³ Br	2·10 ¹²	β–	2,4 ч	¹²⁹ Sb	4·10 ¹³	β–	17,7 м
⁸⁴ Br	7·10 ⁷	β–	31,8 м	¹³¹ Sb	8·10 ⁵	β–	23 м
⁸⁸ Rb	5·10 ¹³	β–	17,7 м	⁸⁹ Rb	3·10 ²	β–	15,4 м

Пояснения к таблице 7: Количество (Бк) – сколько было выброшено радиоактивного вещества за период 12 – 22 марта; Тип распада – наиболее вероятный тип распада для данного радионуклида (β– - радиоактивный бета-распад с испусканием электрона; β+ - радиоактивный бета-распад с испусканием позитрона, И.П. – изомерный переход или гамма излучение); период полураспада – время за которое распадается половина изотопов (г – год, д – день, ч – час, м – минута). Жирным шрифтом выделены радионуклиды, вносящие основной вклад в уровень радиоактивного выброса.

Для того чтобы упростить анализ, были рассмотрены радиоактивные элементы, которые вносят значительный вклад в ионизацию атмосферы. В таблице 8 представлены усредненные данные за 11 дней для стационарного и аварийного выбросов АЭС с реактором BWR.

Табл. 8. Сравнение радиоактивных выбросов АЭС, работающей в штатном и аварийном режимах.

Радиоактивные элементы	Штатный выброс (Бк / год)	Аварийный выброс (Бк / 11 дней)
РБГ	8·10 ¹²	2·10 ¹⁸
I	5·10 ⁹	2·10 ¹⁷
Cs	—	3·10 ¹⁶
Te	—	9·10 ¹⁶

Произведя вычисления, о которых было рассказано выше, получаем значения для аварийного выброса.

Табл. 9. Мощность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса объемом 1 км³ для двух режимов работы АЭС с реактором BWR.

	Штатный режим	Аварийный режим
--	---------------	-----------------

Мощность излучения на частоте 1420 МГц из выброса АЭС объемом 1 км ³	10 ⁻¹³ Вт	10 ⁻¹² Вт
---	----------------------	----------------------

Мощность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС для штатного и аварийных режимов работы отличается в 10 раз или на один порядок величины. Это объясняется тем, что не были учтены все выброшенные радионуклиды, представленные в таблице 4.4. Кроме того, объем излучения из шлейфа выброса может достигать десятков км³ что значительно увеличит величину принимаемого сигнала. Рассматриваемый метод детектирования может быть использован при мониторинге загрязнения и для принятия решения при аварийной ситуации, в качестве детектора аварийного выброса и дополнить систему принятия решения.

Интенсивность ионообразования, радиологические последствия и электрическая проводимость в районе аварийного выброса АЭС.

Ученые, занимающиеся проблемами радиоактивного загрязнения окружающей среды, особое внимание уделяют радионуклидам: ⁸⁵Kr, ¹²⁹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹²⁵Sb (в таблице 7 выделены жирным шрифтом), в связи с их большим периодом полураспада. Большинство научных публикаций, вызванных аварией на АЭС Фукусима – 1, направлено на изучение: а) состава выброшенных радионуклидов; б) их распространения в локальном и глобальном масштабах; в) их оседания и замывание в почвах. Кроме того, исследуется радиологическое воздействие нуклидов на человека, в том числе, и через продукты питания. При уровнях ионизации выше 10⁻⁷ см³с⁻¹ наблюдается рост концентрации аэрозолей и молекул примесных газов, а также изменение химизма частиц и появление новых газов. Определение интенсивности ионообразования способствует углублению знаний о физике атмосферных ионов и ионизационных процессов тропосфере (образование молекулярных ионов, шпор и глоб, трековая ионизация). Интенсивность ионообразования определяет пространственную изменчивость, суточный и сезонный ход ионизации.

На примере аварии на АЭС Фукусима–1 проведен анализ аварийных выбросов и изменений физико-химического состава атмосферы. На основе данных полученных МЕХТ и DOE по распределению радионуклидов в 80 км зоне АЭС Фукусима-1 рассчитано распределение интенсивности ионообразования, концентраций аэроионов и электрической проводимости в данной зоне.

Расчет интенсивности ионообразования проводился по формуле: $\nu = \frac{3,7E_p\sigma}{l\varepsilon_i}$, где ν – интенсивность ионообразования, см³с⁻¹; E_i – энергия распада изотопа, эВ; σ – плотность загрязнения, Бк/м²; l – характерная длина пробега электронов бета-распада, см; ε_i – эффективный потенциал ионизации воздуха, эВ.

Полученные результаты ионообразования в районе Фукусимы-1 значительно (на 3 порядка величины) превышают интенсивность ионообразования в районе ЧАЭС, несмотря на то что последняя расценивается как крупнейшая за всю историю мировой атомной энергетики. Это можно объяснить следующими причинами: 1) в случае с ЧАЭС расчеты были проведены только для одного изотопа ¹³⁷Cs, в то время как для Фукусимы-1 двух ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs; 2) вымыванием радионуклидов осадками и степенью заглубления изотопов в почву на момент проведения измерений.

Далее рассчитаем концентрации аэроионов, электрическую проводимость в районе АЭС Фукусима-1 и сравним с существующими санитарно-эпидемиологическими нормами. В результате аварии на АЭС Фукусима-1 в атмосферу было выброшено порядка 10¹⁶ Бк. Основными радионуклидами, входящими в состав аварийного выброса были бета радионуклиды: ¹²⁹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁵Cs, ¹³⁷Cs, ¹²⁵Sb. Известно, что при ионизации атмосферы бета-радионуклидами происходит образование отрицательных ионов благоприятствующих здоровью человека. В случае с альфа-радионуклидами коэффициент униполярности превышает единицу, и вызывают образование положительных ионов неблагоприятствующих здоровью человека. В зоне радиоактивного загрязнения АЭС Фукусима-1 обнаружили следы присутствия изотопов плутония: ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu. Данные химические элементы являются альфа радионуклидами и обладают значительным периодом полураспада от 14,4 до 8·10¹⁵ лет и жестким радиоизлучением.

Таблица 10 Данные об изотопах ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{238}Pu .

Изотоп	Период полураспада (год)	Тип распада	Энергия частицы (МэВ)
^{238}Pu	87,7 г	α	5,3583(1)
	$4,75 \cdot 10^{10}$ г	с.д.	5,465(1)
^{239}Pu	$2,410 \cdot 10^4$ г	α	5,055
	$8 \cdot 10^{15}$ г	с.д.	5,076
^{240}Pu	$6,56 \cdot 10^3$ г	α	5,0212(1)
	$1,14 \cdot 10^{11}$	с.д.	5,1237(1)
^{241}Pu	14,4	β^-	4,853(7)
	—	α	4,8966(7)

Пояснения к таблице 10: тип распада – наиболее вероятный тип распада для данного радионуклида (α – радиоактивный альфа-распад с испусканием альфа частицы, с.д. – самопроизвольное деление); период полураспада – время за которое распадается половина изотопов.

Для определения концентрации аэроионов на практике чаще всего используют следующую формулу: $n_{\pm} = (3,7 E_{\alpha} \sigma_{\alpha} / (l_{\alpha} \epsilon \alpha_{\pm}))^{1/2}$, см⁻³, где E_{α} – энергия распада изотопа, эВ, σ_{α} – плотность загрязнения, Ки/км², l_{α} – характерная длина пробега альфа частиц, см, ϵ – эффективный потенциал ионизации воздуха, эВ, $\alpha_{\pm}$ – коэффициент рекомбинации ионов, см³/с.

Наиболее распространенным источником радиационного загрязнения в районе АЭС Фукусима-1 является ^{238}Pu , плотность загрязнения которым $\sigma_{\alpha} \approx 4$ Ки/км². Таким образом, концентрация легких аэроионов в приземном слое атмосферы $n_{\pm} = 1,3 \cdot 10^9$ см⁻³, при $l_{\alpha} = 4,3$ см, $\epsilon = 30$ эВ, $\alpha_{\pm} \approx 10^{-7}$, см³/с.

После аварийного выброса АЭС Фукусима – 1 (10^{17} Бк ^{131}I и 10^{16} Бк ^{137}Cs), 14 марта 2011 года на станции Какиока, находящейся на расстоянии 150 км, было зарегистрировано резкое уменьшение градиента электрического потенциала на уровне земли. На следующий день резкое увеличение электрического потенциала атмосферы на порядок величины. Аналогичные изменения электрического потенциала происходили и в районах других АЭС во время аварий.

Наибольший вклад в электрическую проводимость атмосферы дают легкие аэроионы за счет большей подвижности $\mu_{\pm} = 0,5 \dots 5$ см²/(В·с), чем средние и тяжелые аэроионы. На практике, для расчета электрической проводимости $\lambda_{\pm}$ используют запись через средние значения подвижности и единичные заряды: $\lambda_{\pm} = q n_{\pm} \mu_{\pm}$, где $\mu_{+} = 1,3$ см²/(В·с) $\mu_{-} = 1,8$ см²/(В·с), $q = e z = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Таблица 11. Сравнение концентраций аэроионов и электрической проводимости полученных результатов.

		ЧАЭС	АЭС Фукусима-1	Нормируемые показатели аэроионного состава воздуха	Фон значения
Концентрация аэроионов, см-3	легкие	$(7 \pm 2) \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10 \pm 5 \cdot 10^4$	—
	средние	$10^3 - 10^4$	—	—	—
	тяжелые	$(3 \pm 2) \cdot 10^4$	—	—	—
Биполярная электрическая проводимость атмосферы, фСм/м		$1,4 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^4$	—	1 – 5
Коэффициент униполярности		> 1	> 1	0,4 – 1,0	—
Время проведения измерений		май 1987 г. (через 1 год)	14 июня 2011 г. (через 3 месяца)		

Концентрация легких аэроионов, биполярная электрическая проводимость воздуха, коэффициент униполярности в районе АЭС Фукусимы-1 отличается от Чернобыльской АЭС и санитарно-эпидемиологических норм на один, два порядка величины. Полученные результаты представляют интерес в исследовании образования «респиральной» фракции

аэрозольных частиц, которые практически полностью оседающих в легких и бронхах. Изменение электрической проводимости в исследуемой зоне может служить дополнительным маркером радиоактивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые получены функции распределения концентрации электронов по энергиям в области газозольного шлейфа стационарного выброса АЭС (^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{131}I) и РХЗ (^{85}Kr).

2. Показано что в области шлейфа выброса АЭС образуется слабо ионизированная, низкотемпературная плазма и для описания физико-химических процессов в этой области необходимо учитывать процесс размножения электронов.

3. Рассмотренный метод детектирования повышенной радиоактивности будет работать и для АЭС, поскольку эксперимент, проведенный ИОА СО РАН показал превышение регистрируемой мощности сигнала из шлейфа выброса РХЗ. Рассчитанная автором мощность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса РХЗ объяснила натурный эксперимент, описанный в [2, Глава 1].

4. Впервые обоснована возможность использования в качестве «маркера» повышенной радиоактивности в шлейфе выброса АЭС гидроксидов (ОН). На основании этого, рабочий диапазон перспективного радиоприемника составляет 1,4 – 1,8 ГГц.

5. Показано, что атмосферная стратификация и шероховатость подстилающей поверхности определяют область выброса, в которой будет повышенная концентрация радионуклидов. Вследствие этого интенсивность излучения на частотах 1420 МГц и 1665 – 1667 МГц из этих областей будет больше. Таким образом, измеряя интенсивность излучения на данных частотах и учитывая параметры атмосферы, можно предсказать уровень излучения из зоны радиоактивного загрязнения.

6. Исследован вопрос о предельных значениях: расстояния между радиоприемным устройством и источником радиоактивного загрязнения объемом 10 км³; диаметром антенны, принимающей сигнал. Результаты могут быть использованы для решения обратной задачи оценки активности выброса по интенсивности излучения атомарного водорода.

7. Показано, что мощность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС для штатного и аварийных режимов работы отличается на один порядок величины или в 10 раз. Таким образом появляется новый критерий при принятии управленческих решений в случае аварийного выброса.

8. Исследование, проведенное на примере радиационной аварии на АЭС Фукусима–1 и сравнение полученных данных с таковыми для ЧАЭС, показал значительные изменения физико-химического состава воздуха в 80 км зоне АЭС Фукусима–1. Полученные результаты представляют интерес в поиске дополнительных «маркеров» повышенной радиоактивности, как например, изменение электрической проводимости воздуха.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

В российских изданиях, рекомендуемых ВАК для защиты кандидатских диссертаций:

1. Колотков, Г.А. Расчет мощности излучения на частотах 1420 и 1665–1667 МГц из шлейфа штатных радиоактивных выбросов радиохимического завода / Г.А. Колотков, С.Т. Пенин // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 02. – С. 164–166.

2. Колотков, Г.А. Метод дистанционной диагностики аварийных радиоактивных выбросов АЭС в режиме реального времени / Г.А. Колотков, С.Т. Пенин // Известия Вузов Физика. – 2012. – Т. 55. – № 2/2. – С. 170–173.

3. Колотков, Г.А. Интенсивность ионообразования в районе аварийного выброса АЭС «Фукусима-1» / Г.А. Колотков, С.Т. Пенин // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 06. – С. 491–494.

4. Колотков, Г.А. Радиологические последствия аварии на АЭС Фукусима – 1 / Г.А. Колотков // Известия Вузов Физика. – 2012. – № 8/3. – С. 193–194.

5. Колотков, Г.А. Дистанционный мониторинг искусственных ионизированных образований по радиоизлучению H и OH / Г.А. Колотков, С.Т. Пенин // Известия Вузов Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9-3. – С. 222–224.

6. Колотков, Г.А. Возможность определения активности выбросов АЭС по микроволновому излучению на частоте 1420 МГц / Г.А. Колотков, С.Т. Пенин, Л.К. Чистякова // Оптика Атмосферы и Океана. – Т. 19. – №09. – 2006. – С. 793–797.

В зарубежных изданиях, индексируемых Web of Science:

7. Kolotkov, G. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time / G. Kolotkov, S. Penin // JENR. – 2013. – V. 115. – P. 69–72.

8. Kolotkov, G.A. Remote location of the effects of SHF radiation on the stratosphere via radiation of atomic hydrogen at 1420 MHz / G.A. Kolotkov, S.T. Penin // Proceeding of SPIE. – 2007. – V.6681. – 66810S.

9. Kolotkov, G.A. Degradation of fast electrons energy and atomic hydrogen generation in an emission plume from atomic power stations / G.A. Kolotkov, S.T. Penin, L.K. Chistyakova // Proceedings of SPIE. – 2005. – V. 6160. – Chapter 2. – P. 84 – 96.

10. Kolotkov, G.A. Generation of atomic hydrogen in the air under action of beta decay of radioactive elements / G.A. Kolotkov, S.T. Penin, L.K. Chistyakova // Proceedings of SPIE. – 2004. – V. 5743. – P. 372 – 379.

В других изданиях:

11. Kolotkov, G.A. Computation of radiation power from standard radioactive emissions of radiochemical plant at frequencies of 1420 and 1665–1667 MHz / G.A. Kolotkov, S.T. Penin // Atmospheric and Oceanic Optics. – July 2014. – Volume 27. – Issue 4. – pp. 320 – 323.

12. Колотков, Г.А. Оптимальные размеры приемной антенны УВЧ – радиометра для дистанционного детектирования уровня радиоактивности в стационарном шлейфе выброса АЭС и РХЗ на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц / Г.А. Колотков // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2014. – 1, D350 – D354

13. Колотков, Г.А. Методы дистанционного мониторинга радиоактивных выбросов ЯТЦ [Текст] / Г.А. Колотков // XIX Международном симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". 1-6 июля 2013. – Алтай. г. Барнаул. Телецкое озеро. – С.123.

14. Kolotkov, G.A. Radiological and geophysical changes around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant since the accident to the present time / G.A. Kolotkov // EGU General Assembly 2013. – Vienna. Austria. 07 – 12 April 2013. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-8032.pdf>

15. Kolotkov, G.A. Remote monitoring for radioactive emission released from NPP using dual-channel 1.3 – 1.8 GHz radiometric complex [Текст] / G.A. Kolotkov, S.T. Penin // International conference 7th Dresden symposium hazards – detection and management. – March 3 – 8, 2013. – Dresden. Germany. [Http://www.radcourse.ru/files/dresden2013/O11-G.A.Kolotkov/Kolotkov-ga.pdf](http://www.radcourse.ru/files/dresden2013/O11-G.A.Kolotkov/Kolotkov-ga.pdf).

16. Колотков, Г.А. Сравнение перспективных методов мониторинга радиоактивных выбросов ЯТЦ / Г.А. Колотков // Теория и практика актуальных исследований: Материалы III Международной научно-практической конференции. – 30 января 2013г.: Сборник научных трудов. – Краснодар. – 2013. – С.282 – 284.

17. Колотков, Г.А. Электрическая проводимость воздуха в районе АЭС Фукусима – 1 / Г.А. Колотков // Материалы XVIII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". – 2012. – С. D209 – D212.

18. Колотков, Г.А. Радиометр как перспективный прибор мониторинга радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ / Г.А. Колотков // V Всероссийская конференция молодых ученых "Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии". – 2012. – С. 5-58 – 5-60.

19. Kolotkov, G.A. Remote monitoring method for raised and induced ionization areas in the atmosphere [Текст] / G.A. Kolotkov, S.T. Penin // Abstracts. – NATO Advanced Study Institute on Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing. – Kyiv. – Ukraine – 12-25 Sept. 2010. – P.74.
20. Колотков, Г.А. Inspection method of emission activity from NPP / G.A. Kolotkov, S.T. Penin // Volume of Abstract – European Research Course on Atmosphere. – 12 January – 13 February 2009. – France. – Grenoble.
21. Kolotkov, G.A. Remote location of raised and induced ionization areas / G.A. Kolotkov, S.T. Penin // SPIE Europe Remote Sensing. – Cardiff. – UK. – 14 – 18 September 2008. – P.97.
22. Kolotkov, G.A. Effect of atmospheric stratification on radiation intensity on frequency 1420 MHz from the emission plume of atomic power stations / G.A. Kolotkov, S.T. Penin, L.K. Chistyakova // XIII International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”. – Abstracts. – Tomsk: IAO SB RAS. – 2006. – P. 118.
23. Колотков, Г.А. Дистанционный контроль радиоактивных загрязнений в шлейфе выбросов АЭС и РХЗ в атмосферу. / Г.А. Колотков, С.Т. Пенин, Л.К. Чистякова // Технология и автоматизация атомной энергетики: сб.ст. – Северск: Изд. СГТИ. – 2005. – С. 71 – 76.