

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. В.Е. ЗУЕВА СИБИРСКОГО  
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**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**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук  
Пенин С.Т.

Томск - 2014

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

	стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>5</b>
<b>1 Расчет концентрации электронов в стационарных атмосферных радиоактивных выбросах АЭС и РХЗ</b>	<b>12</b>
1.1 Источники и состав газоаэрозольных радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ работающих в штатном режиме	12
1.2 Средние характеристики взаимодействия электронов бета-распада $^{41}\text{Ar}$ , $^{85}\text{Kr}$ , $^{133}\text{Xe}$ и $^{131}\text{I}$ с воздухом.	16
1.3 Расчет энергетического распределения электронов в воздухе с учетом деградации энергии	20
1.4 Трековая модель ионизации атмосферы	46
1.5 Выводы по главе «Расчет концентрации электронов в стационарных атмосферных радиоактивных выбросах АЭС и РХЗ»	47
<b>2 Концентрации и мощность радиоизлучений атомарного водорода и гидроксила</b>	<b>49</b>
2.1 Фоновая концентрация атомарного водорода и гидроксила в атмосфере	49
2.2 Источники образования и фотохимические реакции, приводящие к генерации атомарного водорода и гидроксила	50
2.3 Расчет концентраций атомарного водорода и гидроксила в области шлейфа выброса АЭС	53
2.3.1 Тормозное излучение высокоэнергетичных электронов бета-распада	53
2.3.2 Рекомбинация атомарного водорода и гидроксила	55

2.4	Мощность излучения атомарного водорода и гидроксила из шлейфа выброса АЭС на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно	57
2.5	Сравнение мощностей излучения на частотах 1420, 1665 – 1667 МГц из 1 км <sup>3</sup> выбросов АЭС и РХЗ	58
2.6	Выводы по главе «Концентрации и мощность радиоизлучений атомарного водорода и гидроксила»	60
<b>3</b>	<b>Метео- и гео- факторы влияющие на мощность излучения из шлейфа выброса предприятий ЯТЦ. Фактические размеры антенны радиоприемного устройства.</b>	<b>61</b>
3.1	Влияние атмосферной стратификации на интенсивность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС	61
3.2	Оценка расстояния на котором можно зарегистрировать излучение из шлейфа выброса объемом 10 км <sup>3</sup>	70
3.3	Обоснование возможности использования радиочастот 1420 и 1665 – 1667 МГц для дистанционного детектирования радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ	78
3.3.1	Доплеровское уширение	78
3.3.2	Фоновое излучение атомарного водорода и гидроксила и ослабление, обусловленное атмосферным поглощением	78
3.4	Выводы по главе «Метео- и гео- факторы влияющие на мощность излучения из шлейфа выброса предприятий ЯТЦ. Фактические размеры антенны радиоприемного устройства.»	80
<b>4</b>	<b>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.</b>	<b>82</b>

4.1	Технические характеристики АЭС Фукусима-1	82
4.2	Состав аварийного выброса АЭС Фукусима-1	83
4.3	Мощность излучения атомарного водорода на частоте 1420 МГц из шлейфа аварийного выброса АЭС Фукусима-1	86
4.4	Интенсивность ионообразования, радиологические последствия и электрическая проводимость в районе аварийного выброса АЭС	87
4.4.1	Основные источники ионизации тропосферы	89
4.4.2	Интенсивность ионообразования в 80 километровой зоне АЭС Фукусима-1	89
4.4.3	Радиологические последствия аварии на АЭС Фукусима-1	92
4.5	Выводы по главе «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.»	96
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>98</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>100</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – КАТАЛОГ СУММАРНЫХ <math>\beta</math> СПЕКТРОВ РАДИОНУКЛИДОВ</b>	<b>110</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

В последние десятилетия произошло значительное количество техногенных аварий и катастроф на предприятиях ЯТЦ (ядерно-топливный цикл). Список наиболее серьезных радиационных аварий, от 4 до 7 уровня по шкале INES (International Nuclear Event Scale – Международная шкала ядерных событий), включает в себя такие как: Атомный комплекс «Селафилд» (Великобритания), АЭС (атомная электростанция) 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 [1 – 4]. В результате радиационных аварий в атмосферу было выброшено огромное количество радиоактивного материала, общий объем которого сложно корректно оценить. Основными радионуклидами, выбрасываемыми в атмосферу, являются РБГ (радиоактивные благородные газы), часть которых характеризуется длительным периодом полураспада. В течение продолжительного времени зараженная территория не пригодна для проживания человека и ведения сельского хозяйства. Поэтому наиболее первостепенной задачей является оперативное оповещение населения в зоне возможного риска радиоактивного загрязнения. Таким образом, одной из важнейших задач дистанционного детектирования радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ является своевременное обнаружение повышенной концентрации радионуклидов в стационарных выбросах, а также мониторинг распространения радиоактивного шлейфа выброса в режиме реального времени. Необходимо также обратить внимание, на тот факт, что несмотря на аварии и инциденты, связанные с атомной энергетикой, последующие года станут рекордными по вводу в строй энергоблоков АЭС [5, 6].

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, поскольку радиоактивный выброс распространяется со средней скоростью ветра порядка 5 км/ч. Более того, во время аварийных выбросов, радиоактивное облако может забрасываться на высоту сотен метров, а, следовательно, имеющаяся сеть стационарных постов 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 [7]. Ограниченность измерений пространственных параметров радиоактивных выбросов приводит к вполне понятным выводам: необходима комплексная система дистанционного мониторинга распространения радиоактивных атмосферных выбросов в режиме реального времени [8, 9].

#### **Степень разработанности темы.**

В основе широко применяемых сцинтилляционных счетчиков, и гамма спектрометров лежат не дистанционные, а прямые методы. С их помощью обеспечивается контроль радиационной обстановки, основанный на измерениях интенсивности гамма излучения. Однако их низкая разрешающая способность и недостаточная чувствительность не позволяет проводить 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 [10].

В целом анализ методов, рассмотренных в [11 – 13] показывает, что данные методы не позволяют проводить измерения на расстояниях свыше 10 км, не обладают необходимыми пространственным разрешением и мобильностью, а также весьма зависимы от метеоусловий. В этой связи наиболее перспективными выглядят косвенные дистанционные методы детектирования повышенной радиоактивности в атмосфере. Такие методы основаны на вторичном проявлении радиоактивности в воздухе. 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» (атомы и молекулы) повышенной радиоактивности. По излучению этих, не типичных для стандартной атмосферы атомов и молекул, можно судить о наличии в выбросе повышенной концентрации радионуклидов. Рассматриваемый метод основывается на детектировании спонтанного излучения атомарного водорода (H) и гидроксила (OH) из области шлейфа выброса предприятий ЯТЦ на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно.

### **Цели и задачи.**

Разработка и исследование возможностей дистанционного метода пассивного детектирования стационарных и аварийных выбросов АЭС и РХЗ (радиохимический завод) в режиме реального времени на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц.

Основные решаемые задачи:

1. Анализ составов радиоактивных штатных и аварийных выбросов АЭС и РХЗ.
2. Расчет суммарного 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 и гидроксила.
4. Расчет количества тормозной энергии электронов, необходимой для протекания этих реакций.
5. Расчет стационарных концентраций H и OH в шлейфе выбросов АЭС и РХЗ.

6. Обоснование возможности использования спонтанных радиоизлучений Н и ОН на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно, для дистанционного детектирования радиоактивных выбросов.

7. Оценка возможностей использования данного метода для обнаружения аварийного выброса (в работе рассмотрена на примере радиационной аварии 2011 года на АЭС Фукусима-1).

#### **Научная новизна.**

- Определена суммарная функция распределения электронов по энергии для основных 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.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в:

Возможности более корректного, по сравнению с ранее разработанными моделями, расчета стационарной концентрации атомарного водорода и гидроксила в шлейфе радиоактивных выбросов 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.

### **Методология и методы исследования.**

Решение поставленных задач осуществлялось с применением:

- Численного решения деградиационного уравнения Спенсера-Фано, для получения ФРЭЭ;
- Метода математического моделирования пространственного распределения радиоактивной примеси на основе расчетной модели Пасквилла-Гиффорда.
- При выполнении работы применялись специальные программы Mathcad, MS Office, Origin Lab.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. При расчете количества электронов, образовавшихся в результате бета-распада радионуклидов в шлейфе газоаэрозольного радиоактивного выброса, необходимо учитывать процесс размножения электронов, поскольку разница составляет порядка  $10^5$  раз.
2. В области шлейфа стационарного выброса АЭС, под воздействием тормозного излучения электронов образуется повышенная стационарная концентрация Н и ОН, спонтанное излучение которых на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно, может быть зарегистрировано существующими радиометрами.
3. 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.

### **Степень достоверности и апробация результатов:**

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах:

- «Технология и автоматизация атомной энергетики» СГТИ, г. Северск, 2005 г. (соавтор)
- V, VIII, X Международная школа молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» 2006, 2010, 2012 гг.
- XI (соавтор), XII, XIII, XIV, 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 Sept. 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. 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, March 3–8, 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 мая –30 мая 2014 г. г. Томск.
- VI Международная научно-практическая конференция физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности «ФТПАНЭП-14» г. Томск, 5-7 июня 2014 г.

Автор признан победителем и отмечен дипломами в следующих конкурсах:

В 2006 и 2007 году принимал участие в конкурсе аспирантов на «Премии 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, г. Томск; почетная грамота за личный вклад в развитие российской науки и в связи с 40-летием ИОА СО РАН.

Исследования проводились при поддержке гранта РФФИ № 12-05-31506, конкурс «Мой первый грант»; стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (Конкурс СП–2012); "Академическая мобильность" за 2013 год Фонда Михаила Прохорова.

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ (объем одной рукописи  $\geq 3$  страниц); 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.

# 1 РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СТАЦИОНАРНЫХ АТМОСФЕРНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСАХ АЭС И РХЗ

## 1.1 Источники и состав газоаэрозольных радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ работающих в штатном режиме

Предприятия ядерного топливного цикла загрязняющие окружающую среду, такие как атомные электростанции и радиохимические заводы являются основными источниками радиоактивного загрязнения. Другие предприятия ЯТЦ, такие как: заводы по изготовлению ТВЭЛ-ов (тепловыделяющий элемент), конверсии урана и заводы по обогащению, выбрасывают в атмосферу значительно меньшее количество радиоактивности. Оценка выбросов источников радиоактивного загрязнения представлена в таблице 1.1 [14].

Таблица 1.1 Оценка ежегодных выбросов в атмосферу радионуклидов различных предприятий ЯТЦ.

Источники выбросов	Число источников	Выбросы основных радионуклидов, Бк/год
Предприятия по конверсии урана	2	$^{238}\text{U}$ , $2,96 \cdot 10^9$ $^{234}\text{U}$ , $2,96 \cdot 10^9$ $^{234}\text{Th}$ , $2,96 \cdot 10^9$
Предприятия по изготовлению топлива	16	$^{234}\text{U}$ , $2,96 \cdot 10^8$ $^{235}\text{U}$ , $1,11 \cdot 10^7$ $^{236}\text{U}$ , $1,48 \cdot 10^7$ $^{238}\text{U}$ , $3,7 \cdot 10^7$ $^{231}\text{Th}$ , $1,11 \cdot 10^7$ $^{234}\text{Th}$ , $3,7 \cdot 10^7$

Легководные реакторы: - реакторы с кипящей водой  - реакторы с водой под давлением	25  44	РБГ, $2,59 \cdot 10^{14}$ Тритий, $1,591 \cdot 10^{12}$ Галогены, $5,18 \cdot 10^{10}$ РБГ, $4,81 \cdot 10^{14}$ Тритий, $4,07 \cdot 10^{13}$ Галогены, $1,85 \cdot 10^9$
Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (Форт Сент-Врэйн) Ок-Риджские предприятия	1  1	РБГ, $4,07 \cdot 10^{13}$  $^{234}\text{U}$ , $2,22 \cdot 10^9$ $^{131}\text{I}$ , $5,18 \cdot 10^{10}$ $^{85}\text{Kr}$ , $3,182 \cdot 10^{14}$
Газодиффузионный завод в Портсмуте	1	$^{234}\text{Th}$ , $1,85 \cdot 10^9$ $^{234}\text{U}$ , $3,7 \cdot 10^9$ $^{99}\text{Th}$ , $1,665 \cdot 10^{11}$
Газодиффузионный завод в Пэдаке	1	$^{234}\text{U}$ , $7,4 \cdot 10^9$ $^{238}\text{U}$ , $7,4 \cdot 10^9$

Радионуклидный состав и другие радиационные характеристики продуктов деления и актиноидов в значительной степени зависят от типа реактора и других его особенностей. Удобно разделить энергетические реакторы АЭС воспользовавшись классификацией МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии) [15]:

- PWR (pressurized water reactors) – водо-водяной реактор (реактор с водой под давлением);
- BWR (boiling water reactor) – водо-водяной реактор (кипящий реактор);
- FBR (fast breeder reactor) – реактор-размножитель на быстрых нейтронах;
- GCR (gas-cooled reactor) – газоохлаждаемый реактор;
- LWGR (light water graphite reactor) – графито-водный реактор;

- PHWR (pressurized heavy water reactor) – тяжеловодный реактор;

Наиболее распространёнными в мире являются водо-водяные (около 62 %) и кипящие (20 %) реакторы.

Ядерные реакторы – генераторы огромного количества искусственных радионуклидов, основные из которых – продукты деления и актиноиды. К продуктам деления принято относить не только радионуклиды, полученные в результате деления тяжелых ядер, но и те радионуклиды, которые возникли в результате радиоактивных превращений и ядерных реакций на радиоактивных и стабильных продуктах деления. По истечению трех лет эксплуатации в ядерных реакторах генерируется более 600 радионуклидов с массовыми числами от 72 до 166 и около 60 актиноидов (тяжелых ядер) – трансураниевых и трансплутониевых элементов с массовыми числами 231 – 257. Тройное деление тяжелых ядер (вероятность которого очень велика) сопровождается выходом  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$ . Последних два радионуклида,  $^{85}\text{Kr}$  и  $^{129}\text{I}$ , научный комитет ООН по действию атомной радиации выделяют как радионуклиды способные глобально загрязнить биосферу. Как было сказано выше, состав выбросов зависит от типа реактора и других его характеристик, так, например, выбросы АЭС и РХЗ отличаются по набору изотопов и наличию жидких и твердых составляющих в выбросах РХЗ. Последние являются основным источником радиоактивных выбросов высокой активности. Несмотря на то, что наибольшее содержание радиоактивных элементов в жидких отходах РХЗ, выбросам в атмосферу уделяют особое внимание как к менее контролируемым. При переработке 1 тонны топлива на РХЗ образуются газовые выбросы:  $^{85}\text{Kr}$  около  $2,59 \cdot 10^{14}$  Бк,  $^{129}\text{I}$  около  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк, тритий и некоторое количество  $^{14}\text{C}$  [14].

Газообразные выбросы АЭС появляются вследствие разгерметизации оболочек ТВЭЛ-ов. В систему охлаждения проникают газообразные продукты деления. Радиоактивные частицы и радиойод выдерживаются в течение трех месяцев для осуществления распада короткоживущих изотопов, затем пропускаются через угольные фильтры и после этого поступают в окружающую среду. Наиболее значимую роль в формировании радиационной обстановки в районе размещения АЭС играют инертные радиоактивные газы, изотопы йода,

стронция и цезия. В целом, в состав радионуклидов осколочного происхождения входят: 18 изотопов криптона, 15 изотопов ксенона, 20 изотопов йода. Однако многие из них имеют или очень малый период полураспада ( $T_{1/2} \leq 1$  мин), или вносят пренебрежимо малый вклад в суммарную активность радионуклидов данной группы [16]. Основная доля радиации приходится на химически инертные благородные газы: Ar, Kr и Xe, но химическая инертность и малый период полураспада вместе уменьшают биологическую опасность РБГ. Несмотря на то, что выбросы радиоактивного йода ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ) составляют малую долю от общего количества выбросов, он может служить главным источником радиологического риска [17]. Установленные значения стационарных выбросов для ядерных реакторов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Оценка ежегодных стационарных выбросов в атмосферу двух реакторов АЭС электрической мощностью 1000 МВт и РХЗ.

Радионуклид	Выбросы АЭС с реактором BWR, Бк/год	Выбросы АЭС с реактором PWR, Бк/год	РХЗ, Бк/год
$^{41}\text{Ar}$	<b><math>9,25 \cdot 10^{11}</math></b>	$9,25 \cdot 10^{11}$	—
$^{83\text{m}}\text{Kr}$	$< 3,7 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{10}$	—
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$5,55 \cdot 10^{12}$	$5,2 \cdot 10^{11}$	—
<b><math>^{85}\text{Kr}</math></b>	<b><math>1,073 \cdot 10^{13}</math></b>	$1,739 \cdot 10^{13}$	<b><math>6 \cdot 10^{17}</math></b>
$^{87}\text{Kr}$	$7,4 \cdot 10^{12}$	$1,11 \cdot 10^{11}$	—
$^{88}\text{Kr}$	$8,88 \cdot 10^{12}$	$8,51 \cdot 10^{11}$	—
$^{131\text{m}}\text{Xe}$	$6,66 \cdot 10^{11}$	$3,034 \cdot 10^{12}$	—
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	$< 3,7 \cdot 10^{10}$	$4,44 \cdot 10^{12}$	—
<b><math>^{133}\text{Xe}</math></b>	<b><math>1,184 \cdot 10^{14}</math></b>	$4,44 \cdot 10^{14}$	—
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	$2,738 \cdot 10^{13}$	$< 3,7 \cdot 10^{10}$	—
$^{135}\text{Xe}$	$4,07 \cdot 10^{13}$	$3,182 \cdot 10^{12}$	—
$^{138}\text{Xe}$	$5,18 \cdot 10^{13}$	$< 3,7 \cdot 10^{10}$	—
<b><math>^{131}\text{I}</math></b>	<b><math>1,11 \cdot 10^{10}</math></b>	$9,25 \cdot 10^8$	—

$^{133}\text{I}$	$9,07 \cdot 10^{10}$	$8,51 \cdot 10^8$	–
$^{14}\text{C}$	$3,515 \cdot 10^{11}$	$2,96 \cdot 10^{11}$	–
$^3\text{H}$	$1,591 \cdot 10^{12}$	$4,07 \cdot 10^{13}$	–
Суммарная активность	$2,745493 \cdot 10^{14}$	$5,1556177 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{17}$

Из таблицы 1.2 видно, что РБГ:  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  (выделены полужирным шрифтом) вносят доминирующий вклад в величину стационарного радиоактивного выброса. Эти газы и радиоактивный йод  $^{131}\text{I}$ , выбросы которого также вносят значительный вклад в общее количество радиоактивности, являются основными источниками радиационного воздействия на компоненты атмосферы. Поскольку именно они определяют радиационную обстановку в районе АЭС работающей в штатном режиме, в расчетах использовался набор бета-активных радионуклидов, представленный в таблице 1.2 выделенный полужирным шрифтом. В случае РХЗ, набор выбрасываемых радионуклидов совсем немногочисленный, но величина радиоактивности значительно, на 3 порядка величины, превышает таковую для АЭС [18].

## 1.2 Средние характеристики взаимодействия электронов бета-распада $^{41}\text{Ar}$ , $^{85}\text{Kr}$ , $^{133}\text{Xe}$ и $^{131}\text{I}$ с воздухом.

Считаем, что основным фактором воздействующим на компоненты воздуха в области шлейфа выброса являются быстрые (высокоэнергичные) электроны образующиеся в результате бета-распада радионуклидов входящих в состав выбросов [18]. Ниже рассмотрим средние характеристики первичных и вторичных электронов дающих общее представление о процессах взаимодействия с воздухом.

Средний ионизационный потенциал атомов для воздушной среды, без учета кулоновского взаимодействия:  $I \approx I_N \cdot \delta_N + I_O \cdot \delta_O$ , где  $\delta_N$  – доля атомов азота в воздухе;  $\delta_O$  – доля атомов кислорода в воздухе;  $I_N$  – потенциал ионизации атома

азота, эВ;  $I_O$  – потенциал ионизации атома кислорода, эВ. Определим количество атомов в единице объема по формуле:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A} \quad (1.1)$$

где  $N_A$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $\rho$  – плотность вещества, г·см<sup>-3</sup>;  $A$  – атомный вес, г·моль<sup>-1</sup>. Нормальная плотность сухого воздуха  $\rho=1,29 \cdot 10^{-3}$  г·см<sup>-3</sup>, атомный вес азота и кислорода 14 и 16 г·моль<sup>-1</sup>, соответственно. Тогда концентрация атомов кислорода составляет  $1,14 \cdot 10^{19}$  атомов·см<sup>-3</sup>, атомов азота –  $4,26 \cdot 10^{19}$  атомов·см<sup>-3</sup>. Потенциал ионизации атома кислорода  $I_O=13,57$  эВ, атома азота  $I_O=14,6$  эВ;  $N_A \approx 6,02214129(27) \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>;  $\delta_N=1,42$ ;  $\delta_O=5,29$  [19 – 22]. Таким образом средний потенциал ионизации атомов азота и кислорода равен 96,5 эВ. Энергия диссоциации молекул составляет для N<sub>2</sub> – 9,78 эВ, для O<sub>2</sub> – 5,12 эВ, что на порядок меньше среднего потенциала ионизации воздушной среды.

В таблицах 1.3 и 1.4 приведены средние значения параметров, характеризующих процесс термализации быстрых электронов, образующихся в области с повышенной активностью.

Таблица 1.3 Средние значения параметров, характеризующих процесс термализации первичных электронов бета-распада.

Радионуклиды	<sup>41</sup> Ar	<sup>133</sup> Xe	<sup>85</sup> Kr	<sup>131</sup> I
Период полураспада, с	$6,58 \cdot 10^2$	$4,53 \cdot 10^5$	$3,39 \cdot 10^8$	$6,94 \cdot 10^5$
Средняя энергия электронов, образующихся при бета-распаде радионуклидов, кэВ	463,7	100,3	250,7	181,6
Среднее значение пробега первичных электронов в воздухе, м	1,39	0,13	0,75	0,3
Среднее значение энергетических потерь электронов бета-распада в воздухе, кэВ/см	3,3	7,7	3,35	6,05

Среднее значение энергетических потерь соответствует:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) \approx \frac{\bar{E}}{\bar{R}} \quad (1.2)$$

Количество вторичных электронов, образующихся на единицы длины пути первичного быстрого электрона:

$$N_{\delta} \approx \frac{dE/dx}{\bar{I}} \quad (1.3)$$

Таблица 1.4 Средние значения параметров, характеризующих процесс образования и термализации вторичных электронов.

	Радионуклиды	<sup>41</sup> Ar	<sup>133</sup> Xe	<sup>85</sup> Kr	<sup>131</sup> I
$N_{\delta}$	Количество вторичных электронов, образующихся на единице длины пути электрона распада, электрон/м	$3,5 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$
$\bar{E}_{\delta}$	Средняя энергия вторичных электронов, кэВ	230	50	125	90
$\bar{R}_{\delta}$	Средняя значение пробега в воздухе, м	0,17	0,04	0,13	0,11
$\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right)_{\delta}$	Среднее значение энергетических потерь в воздухе, кэВ/м	$1,35 \cdot 10^3$	$1,25 \cdot 10^3$	$0,96 \cdot 10^3$	$0,82 \cdot 10^3$
$N_{\delta\delta}$	Количество третичных электронов, образующихся на единице длины пути вторичного электрона, электрон/м	$14 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$

Естественно ожидать, что все электроны: электрон бета-распада, вторичный, третичный и т.д. термализуются в области, характерный размер которой имеет величину порядка пробега электрона бета-распада (наиболее энергетичного). Полагаем что радионуклид – изотропный источник, что означает, что бета-электроны распада, термализуются в любой точке сферы радиусом  $\bar{R}$ :  $\bar{R} > \bar{R}_\delta > \bar{R}_\delta \dots$

Объём этой области составит:

$$V_T = \frac{4}{3}\pi\bar{R}^3 \quad (1.4)$$

Таблица 1.5 Сводная таблица сферической области термализации для  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{131}\text{I}$ .

Радионуклид	$^{41}\text{Ar}$	$^{133}\text{Xe}$	$^{85}\text{Kr}$	$^{131}\text{I}$
Объём области термализации $V_T$ , м <sup>3</sup>	11,3	9,2	1,8	0,1

Время термализации всей группы быстрых электронов, образованных единичным актом распада, имеет значение порядка времени термализации наиболее быстрого из группы электронов. Последнее можно положить равным  $t_{\text{терм}} \approx \bar{R}/v_0$ , где  $v_0$  – стартовая скорость электрона бета-распада:

$$v_0 = c \cdot \sqrt{1 - \frac{2,61 \cdot 10^5}{(\bar{E} + 511)^2}} \quad (1.5)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$\bar{E}$  – среднее значение энергии электронов, образующихся при распаде, кэВ.

Значение  $v_0$  для рассматриваемой группы радионуклидов можно принять равным  $0,6c$ , что составит около  $1,8 \cdot 10^{10}$  см/с. Таким образом, время термализации  $\approx 7,7 \cdot 10^{-9}$  с (не более 10 нс).

В соответствии с таблицей 1.4 и вышеизложенным, при одновременном распаде четырех ядер:  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{131}\text{I}$  в воздушном объеме около  $10^7$  см<sup>3</sup> (около  $10$  м<sup>3</sup>) образуется и термализуется в течение единиц наносекунд порядка  $10^4 \div 10^5$  электронов [23]. Таким образом, "мгновенная" концентрация быстрых электронов, соответствующая одновременно происшедшим актам бета-распада четырех ядер, составляет около  $10^{-2}$  электрон/см<sup>3</sup>.

При этом пороговая энергия ионизации составляет:

$$E_{\text{пор}} = \left(1 + \frac{m_e}{M}\right) \cdot I \quad (1.6)$$

где  $M$  – среднее значение массы частиц, составляющих воздух (молекул).

Поскольку  $m_e \ll M$ , то  $E_{\text{пор}} = I$ , где  $I$  – потенциал ионизации данных частиц. Наибольшее из имеющегося набора значение  $I$  имеет молекула  $\text{N}_2$  – 15,56 эВ.

Первичные, вторичные и третичные электроны имеют средние значения энергий, значительно превышающие вышеуказанное. Для более точной оценки количества электронов необходимо учитывать следующие поколения электронов.

### 1.3 Расчет энергетического распределения электронов в воздухе с учетом деградации энергии

Следующая задача состоит в том, чтобы оценить количество электронов, возникающих в результате бета-распада и ионизации атмосферы. Быстрые электроны бета-распада распространяясь в воздушной среде теряют энергию в результате ионизации, т.е. выбивания электронов с внешних уровней атомов и молекул среды. Таким образом первоначальный спектр бета-электронов теряет часть своей энергии – деградирует, образуются вторичные электроны, которые все

еще обладают энергией достаточной для ионизации. Процесс ионизации будет продолжаться до тех пор, пока электроны будут обладать энергией достаточной для того чтобы выбить электрон.

Наиболее полное представление о спектре электронов по всей области энергий дает кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергиям. В однородной среде, без влияния внешних полей, с равномерно распределенными источниками уравнение можно рассматривать независимо от пространства и времени и интерпретировать как изменение потока электронов вдоль энергетической оси, вызываемое различными процессами. Математическая формулировка данной задачи была дана в работах Фано и Спенсера, которые получили уравнение, описывающее деградацию электронов в среде и провели расчет прохождения электронов через алюминий и свинец, ограничиваясь областью надпороговых энергий [24–31]. Данный подход можно реализовать для следующих поколений электронов. Схожий принцип развит у Фаулера [32], одноименное уравнение которого описывает вероятность образования ион – электронной пары, а уравнение Спенсера – Фано [30] определяется вероятностями следующих столкновений электронов.

Вопросам деградации электронов в газах был посвящен специальный выпуск журнала *Radiation Research* [33], где опубликованы обзоры в которых обсуждаются результаты работ, выполненных до 1975 г. Конкретные расчеты были выполнены позже, для газов, для которых имелись наиболее полные данные по сечениям элементарных процессов столкновений электронов с молекулами: гелия, аргона, молекулярного водорода и т.д.

Быстрые (высокоэнергетичные) электроны появляются в результате бета-распада радионуклидов в шлейфе выброса. В процессе распространения они ионизируют компоненты газо-аэрозольной атмосферы, что приводит к их лавинообразному размножению, и вызывают диссоциацию молекул. Для нахождения ФРЭЭ используем уравнение Больцмана, которое дает наиболее полную информацию об электронном спектре во всем интервале энергий. Для определения кинетической температуры быстрых электронов необходимо

определить их функцию распределения по скоростям. Причем важной задачей является задача определения кинетической температуры вторичных (дельта –  $\delta$ ) и т.д. электронов. Порядок решения задачи нахождения общего распределения электронов по их энергиям, состоит из следующих этапов:

- 1) определение спектра первичных электронов в воздухе (спектр электронов бета-распада для каждого радионуклида известен [34, приложение А]);
- 2) определение спектра термализующихся в воздухе первичных электронов;
- 3) определение спектра вторичных электронов без учета диссипативных процессов, протекающих при их термализации в воздухе;
- 4) далее процедура по пунктам 2, 3 повторяется для следующих поколений (генераций) электронов;
- 5) суммирование рассчитанных для  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{I}$  спектров электронов 9-ти поколений.

Кинетическое уравнение Больцмана для стационарной функции распределения электронов по энергиям можно рассматривать как одномерное стационарное уравнение, которое оценивает изменение потока электронов вдоль энергетической оси при условиях:

- 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 ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ),

и записывается в следующем виде:

$$\Sigma(E)\Phi(E) - \int_E^{E_0} \Sigma_s(E' \rightarrow E)\Phi(E')dE' = S(E) \quad (1.7)$$

где  $\Sigma, \Sigma_s$  – интегральное и дифференциальное макроскопическое сечение передачи энергии, получаемые умножением соответствующих микроскопических сечений на концентрацию атомов в однородной среде:

$$\Sigma_s(E' \rightarrow E) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot N \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon = E' - E$  – энергия, теряемая частицей в одном акте взаимодействия;  $S(E)$  – спектр электронов бета-распада, электрон/см<sup>3</sup>·с;  $\Phi(E)$  – плотность потока электронов, имеющих энергию  $E$  (искомая функция), электрон/см<sup>2</sup>·с.

Как было показано в предыдущем разделе, кинетическая температура всех групп электронов, образованных единичным актом бета-распада, в процессе их деградации энергии (термализации) значительно превосходит таковую для молекул воздуха, т.е. они являются неравновесными. Для решения задачи определения значения кинетических температур, усредненных по спектру термализующихся электронов, необходимы значения дифференциальных и интегральных характеристик взаимодействия электронов с воздухом.

Для оценки дифференциального сечения передачи энергии при взаимодействии быстрых электронов с электронами атомов (молекул) воздуха можно использовать выражение [24]:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \approx \left( \alpha \cdot \sqrt{\frac{\mu}{m_1 + m_2}} \right)^{\frac{2}{n}} \cdot E^{-\frac{1}{n}} \cdot \varepsilon^{-1-\frac{1}{n}} \quad (1.9)$$

где  $\alpha$  – неизвестная константа;  $\mu = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$  – приведенная масса;  $E$  – кинетическая энергия быстрого электрона;  $\varepsilon$  – энергия, переданная при взаимодействии;  $n$  – неизвестная константа;  $m_1, m_2$  – массы налетающей и бомбардируемой частиц (в нашем случае это массы электронов  $m_1 = m_2 = m_3$ ).

По определению тормозную способность среды для быстрых заряженных частиц можно представить в виде:

$$f(E) = \int_{E_{min}}^{E_{max}(E)} \varepsilon \cdot \Sigma \cdot d\varepsilon \quad (1.10)$$

где  $f(E)$  – тормозная способность – количество энергии, теряемой частицей на единице длины пути;  $\Sigma$  – макроскопическое сечение взаимодействия частицы с энергией  $E$ , в результате которого она теряет энергию  $\varepsilon$ .

Для макросечения имеем:

$$\Sigma = N \cdot \frac{d\sigma}{dE} \quad (1.11)$$

где  $N$  – концентрация частиц среды.

При взаимодействии быстрых электронов с электронами частиц среды в процессах ионизации и возбуждения:

$$E_{max}(E) = E \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{E \cdot m_e^2}{4 \cdot m_e^2} = \frac{E}{4}, \quad (1.12)$$

$$\mu = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_e}{2} \quad (1.13)$$

Таким образом:

$$f(E) = \int_{E_{min}}^{E/4} \varepsilon \cdot \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2/n} \cdot \frac{N}{E^{1/n} \cdot \varepsilon^{1+1/n}} \cdot d\varepsilon \quad (1.14)$$

Из чего после интегрирования получим:

$$f(E) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2/n} \cdot N \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left(\frac{E^{1-2/n}}{4^{1-1/n}} - \frac{E_{min}^{1-1/n}}{E^{1/n}}\right) \quad (1.15)$$

Полагая  $n=3$ , что в конечном итоге обеспечивает хорошее согласие с экспериментальными данными, получим:

$$f(E) = \frac{3}{2} \cdot N \cdot \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{E^{1/3}}{4^{2/3}} - \frac{E_{min}^{2/3}}{E^{1/3}}\right) \quad (1.16)$$

Потери энергии на ионизацию и возбуждение при прохождении быстрых электронов в воздухе составляют  $f=2,2$  МэВ·см<sup>2</sup>/г при энергии электронов  $E=511$  кэВ и  $N=54 \cdot 10^{18}$  атомов/см<sup>3</sup> [24]. Преобразуя (1.16) относительно  $\alpha$  и подставляя в полученное выражение выше указанной величины, имеем  $\alpha=9,81 \cdot 10^{-26}$  эВ·см<sup>2</sup>.

Таким образом, дифференциальное сечение передачи энергии определяется соотношением, см<sup>2</sup>/эВ:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2/3} \cdot E^{-1/3} \cdot \varepsilon^{-4/3} \quad (1.17)$$

При этом процесс термализации быстрых электронов в воздухе (молекулярном газе) рассматривается и будет рассматриваться далее на атомарном уровне.

Интегральное сечение передачи энергии, см<sup>2</sup>:

$$\sigma(E) = \int_{E_{min}}^E d\sigma = 4 \cdot 10^{-17} \cdot E^{-1/3} \cdot \varepsilon^{-1/3} \quad (1.18)$$

Выражения (1.17) и (1.18) получены с целью их использования в дальнейшем при решении кинетического стационарного уравнения (1.7).

Уравнение (1.7) является интегрально-дифференциальное уравнением Вольтера второго рода и его решение проводилось с использованием численного метода по следующим рекуррентным соотношениям:

$$\Phi_0 = \frac{S_0}{\Sigma_0},$$

$$\Phi_n = \frac{\left[ S_n + \Delta E \cdot \left( \sum_{i=1}^{n-1} (\Sigma_{in} \Phi_i) + \frac{1}{2} \cdot \Sigma_{0n} \Phi_0 \right) \right]}{\Sigma_n} \quad (1.19)$$

где  $n$  изменяется от 1 до  $M$ ;

$M$  – количество интервалов шириной  $\Delta E$  на которое разбивается область изменения энергии ( $E_{min}, E_0$ ).

$E_0$  – соответствует максимальной энергии спектра электронов бета-распада;

$E_{min}$  – энергия, ниже которой потери энергии частицей отсутствуют (её недостаточно даже для возбуждения первого уровня атомов среды);

$n$  – индекс, который обозначает левую границу энергетического интервала;

$\Phi_0$  – это плотность потока электронов, имеющих энергию  $E_0$ ;

$S_0$  – плотность генерации электронов при бета-распаде, имеющих энергию  $E_0$ ;

$\Sigma_0$  – макроскопическое интегральное сечение передачи энергии, обеспечивающий переход электрона из энергетического интервала с левой границей  $E_2 = E_0 - 2 \cdot \Delta E$  (причем  $\Sigma_{in}$  при  $i = n$  равны 0).

Плотность электронов в однородной среде, имеющих энергию  $E$  определяется как:

$$n(E) = \frac{\Phi(E)}{v(E)} \quad (1.20)$$

где  $v$  – стартовая скорость электрона с энергией  $E$ .

Определенная таким образом функция распределения  $n(E)$ , позволяет рассчитать значение длины свободного пробега электронов относительно потерь энергии:

$$\lambda_e = \frac{1}{n_\Sigma} \cdot \sum_{i=0}^M \frac{n_i}{\Sigma_i} \quad (1.21)$$

время пробега между актами передачи энергии:

$$\tau_e = \frac{1}{n_\Sigma} \cdot \sum_{i=0}^M \frac{n_i}{\Sigma_i v_i} \quad (1.22)$$

частоты передачи энергии:

$$\nu_e = \frac{1}{\tau_e} \quad (1.23)$$

среднюю кинетическую энергию термализующихся электронов, образующихся при бета-распаде:

$$\overline{E_e} = \frac{1}{n_\Sigma} \cdot \sum_{i=0}^M n_i E_i \quad (1.24)$$

Следующей задачей является определение спектра  $S_\delta(E)$  вторичных электронов, образующихся при термализации в воздухе электронов бета-распада электрон/см<sup>3</sup>·с.

По определению, количество взаимодействий быстрых электронов имеющих энергию  $E$ , лежащую в интервале  $\Delta E$ , с атомами среды в единице объема в единице времени есть, взаимодействий/см<sup>3</sup>·с:

$$\Sigma(E \rightarrow (E - \varepsilon)) \cdot \Phi(E) \quad (1.25)$$

где  $\varepsilon$  – энергия, теряемая электроном в результате взаимодействия.

В каждом из взаимодействий образуется  $\left(\frac{\varepsilon}{I}\right)$  вторичных электронов с энергией (в среднем)  $\frac{\varepsilon}{3}$ . Таким образом:

$$S_{\delta}\left(\frac{\varepsilon}{3}\right) = \Sigma(E \rightarrow (E - \varepsilon)) \cdot \Phi(E) \cdot \frac{\varepsilon}{I} \cdot \Delta E \quad (1.26)$$

Дискретный набор возможных значений  $\frac{\varepsilon}{3}$  известен и задается в соответствии со значениями  $E_0$  и  $M$ :

$$\varepsilon_i = \frac{E_i - E_M}{3} \quad (1.27)$$

где  $i$  – изменяется от 1 до  $M - 1$ .

Таким образом, левая граница (максимальное значение) энергетического диапазона, в котором генерируются вторичные электроны, есть энергия

$$\varepsilon_0 = \frac{(E_0 - E_M)}{3},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{(E_1 - E_M)}{3}$$

и т.д. до

$$\varepsilon_{M-1} = \frac{\Delta E}{3} \quad (1.28)$$

После определения значений  $S_{\delta 0}, S_{\delta 1}$  вновь проводится решение задачи (1.7). В результате имеем (по соотношениям 1.21 – 1.24) все искомые характеристики для вторичных и третичных электронов:  $\lambda_e, \tau_e, \nu_e, \bar{E}_e$ .

Результаты численного решения задачи (1.7) для случая стационарного поступления в атмосферу радионуклидов различной мощностью из реактора типа BWR, при нормальных условиях дают следующие значения параметров (таблицы 1.6 – 1.9):

Таблица 1.6. Выброс  $^{41}\text{Ag}$  мощностью  $2,9 \cdot 10^4$  Бк/с.

Средние характеристики электронов	Первичные электроны	Вторичные электроны	Третичные электроны
Длина свободного пробега относительно потерь энергии, см	0,022	0,011	$5,487 \cdot 10^{-3}$
Время свободного пробега между актами передачи энергии, с	$1,204 \cdot 10^{-12}$	$6,321 \cdot 10^{-13}$	$3,048 \cdot 10^{-13}$
Частота передачи энергии, 1/с	$8,304 \cdot 10^{11}$	$1,582 \cdot 10^{12}$	$3,28 \cdot 10^{12}$
Средняя кинетическая энергия, кэВ	437,76	177,19	61,879

Таблица 1.7. Выброс  $^{133}\text{Xe}$  мощностью  $3,8 \cdot 10^6$  Бк/с.

Средние характеристики электронов	Первичные электроны	Вторичные электроны	Третичные электроны
Длина свободного пробега относительно потерь энергии, см	$7,497 \cdot 10^{-3}$	$3,687 \cdot 10^{-3}$	$1,733 \cdot 10^{-3}$
Время свободного пробега между актами передачи энергии, с	$4,165 \cdot 10^{-13}$	$2,049 \cdot 10^{-13}$	$9,629 \cdot 10^{-14}$
Частота передачи энергии, 1/с	$2,401 \cdot 10^{12}$	$4,882 \cdot 10^{12}$	$1,039 \cdot 10^{13}$
Средняя кинетическая энергия, кэВ	137,136	45,846	14,132

Таблица 1.8 Выброс  $^{85}\text{Kr}$  мощностью  $7,4 \cdot 10^5$  Бк/с.

Средние характеристики электронов	Первичные электроны	Вторичные электроны	Третичные электроны
Длина свободного пробега относительно потерь энергии, см	0,011	$5,288 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$
Время свободного пробега между актами передачи энергии, с	$5,9 \cdot 10^{-13}$	$2,938 \cdot 10^{-13}$	$1,384 \cdot 10^{-13}$
Частота передачи энергии, 1/с	$1,695 \cdot 10^{12}$	$3,404 \cdot 10^{12}$	$7,228 \cdot 10^{12}$
Средняя кинетическая энергия, кэВ	217,835	75,989	23,613

Таблица 1.9 Выброс  $^{131-133}\text{I}$  мощностью  $3,23 \cdot 10^3$  Бк/с.

Средние характеристики электронов	Первичные электроны	Вторичные электроны	Третичные электроны
Длина свободного пробега относительно потерь энергии, см	0,011	$5,884 \cdot 10^{-3}$	$2,754 \cdot 10^{-3}$
Время свободного пробега между актами передачи энергии, с	$6,312 \cdot 10^{-13}$	$3,269 \cdot 10^{-13}$	$1,53 \cdot 10^{-13}$
Частота передачи энергии, 1/с	$1,584 \cdot 10^{12}$	$3,059 \cdot 10^{12}$	$6,535 \cdot 10^{12}$
Средняя кинетическая энергия, кэВ	201,655	77,247	23,535

На рисунках 1.1 – 1.12 представлены спектры первичных, вторичных и третичных электронов, а также их деградационные характеристики для выброса АЭС с реактором типа ВВР [25, 35]:

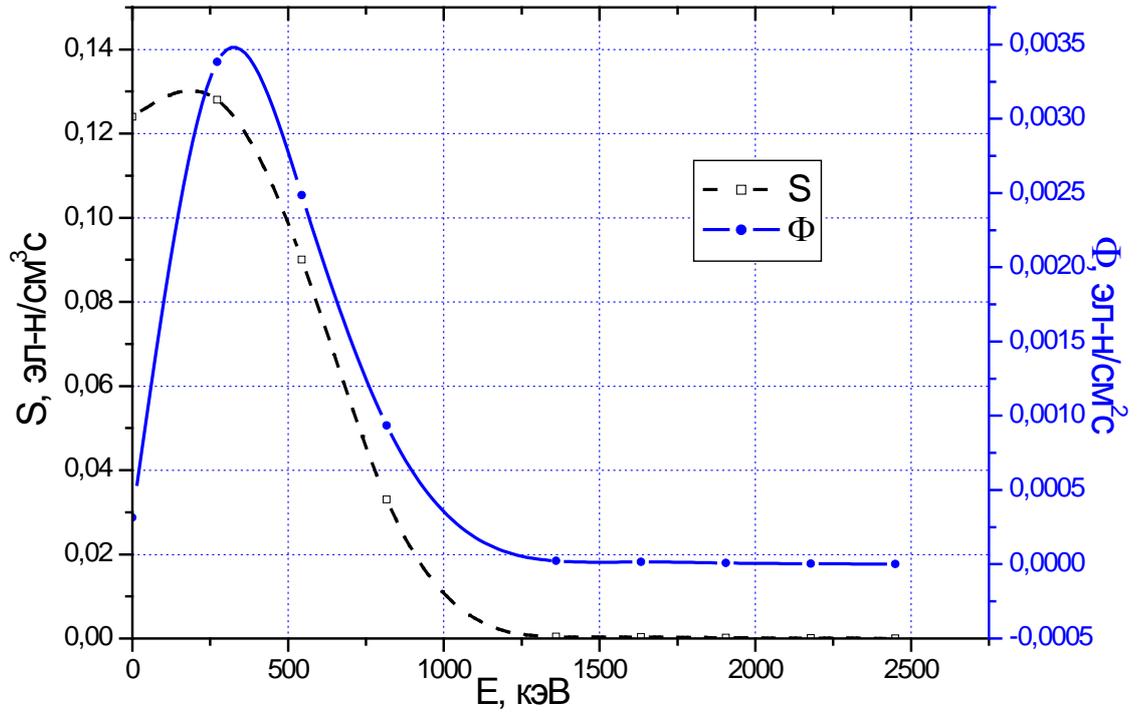


Рисунок 1.1.  $S$  – спектр электрона бета-распада ядер  $^{41}\text{Ar}$ ;  
 $\Phi$  – деградационный спектр указанных электронов в воздухе;

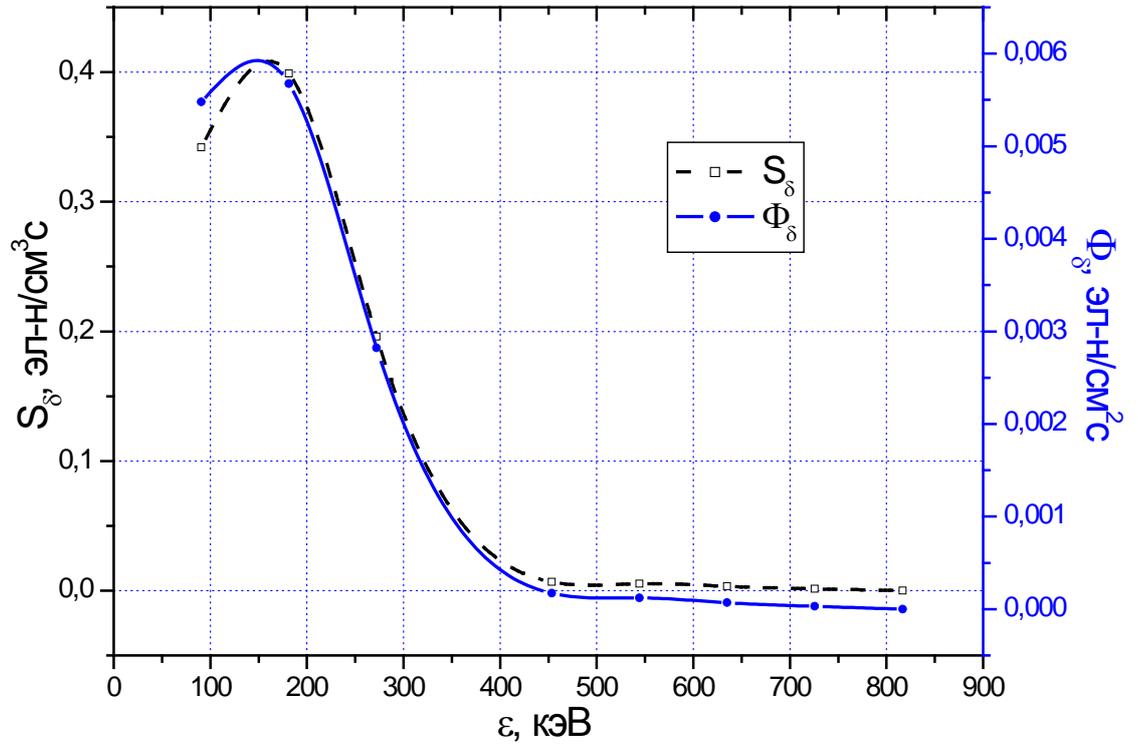


Рисунок 1.2.  $S_\delta$  – спектр вторичных (дельта) электронов, образующихся при термализации в воздухе электронов бета-распада  $^{41}\text{Ar}$ ;  $\Phi_\delta$  – деградационный спектр вторичных электронов в воздухе.

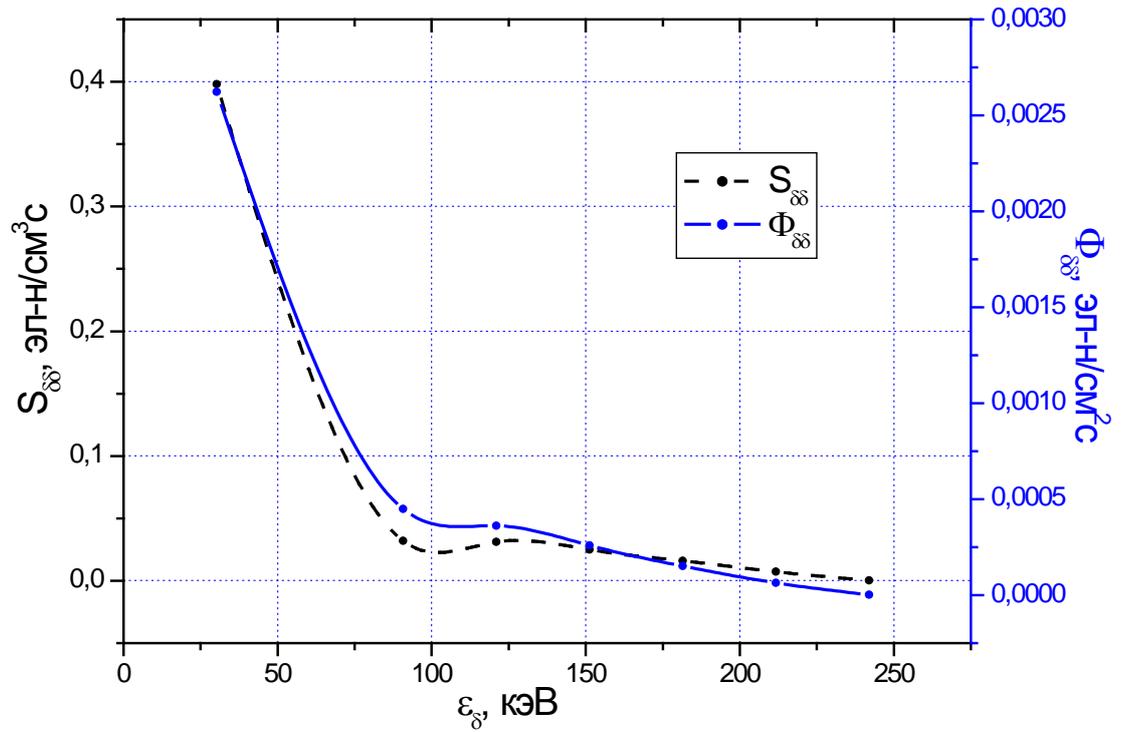


Рисунок 1.3.  $S_{\delta\delta}$  – спектр третичных электронов, образующиеся при термализации в воздухе вторичных электронов;  $\Phi_{\delta\delta}$  – деградационный спектр третичных электронов в воздухе.

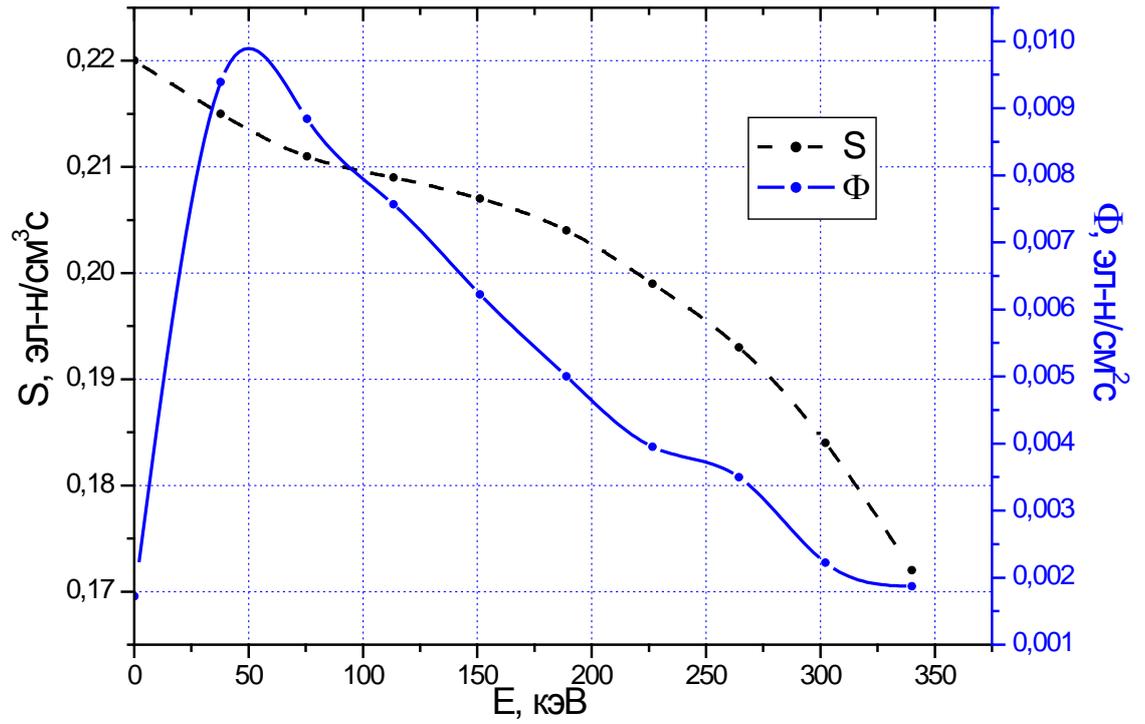


Рисунок 1.4.  $S$  – спектр электрона бета-распада ядер  $^{133}\text{Xe}$ ;  
 $\Phi$  – деградационный спектр указанных электронов в воздухе;

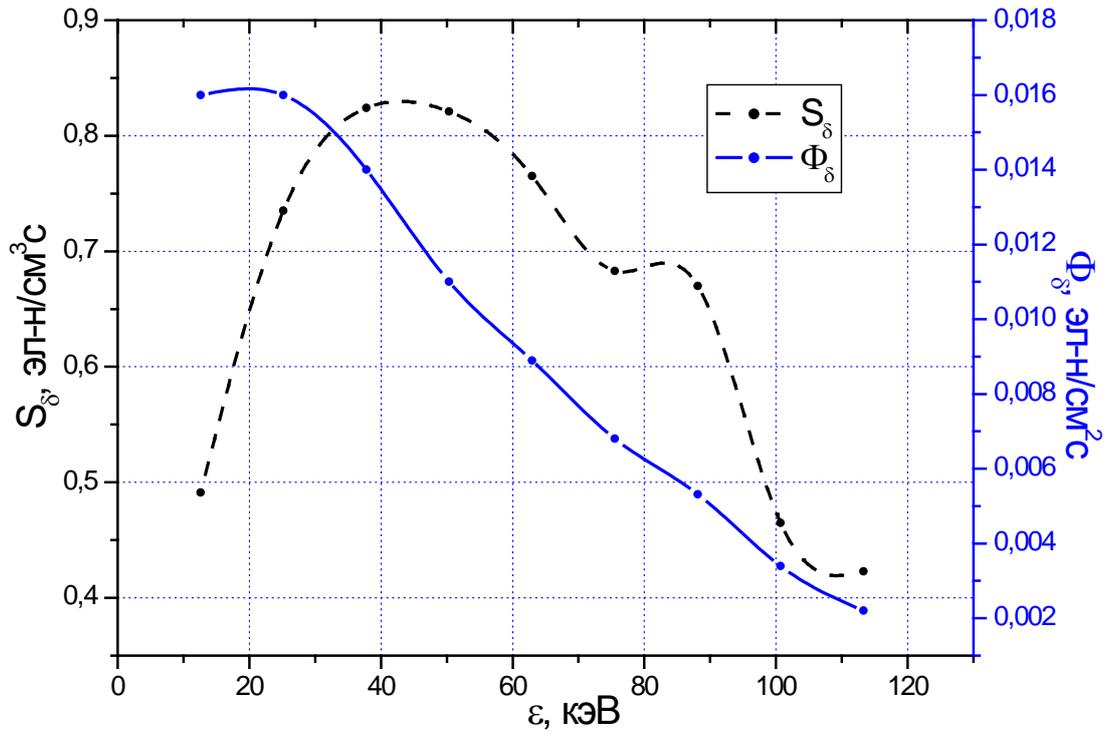


Рисунок 1.5.  $S_\delta$  – спектр вторичных (дельта) электронов, образующихся при термализации в воздухе электронов бета-распада  $^{133}\text{Xe}$ ;  $\Phi_\delta$  – деградационный спектр вторичных электронов в воздухе.

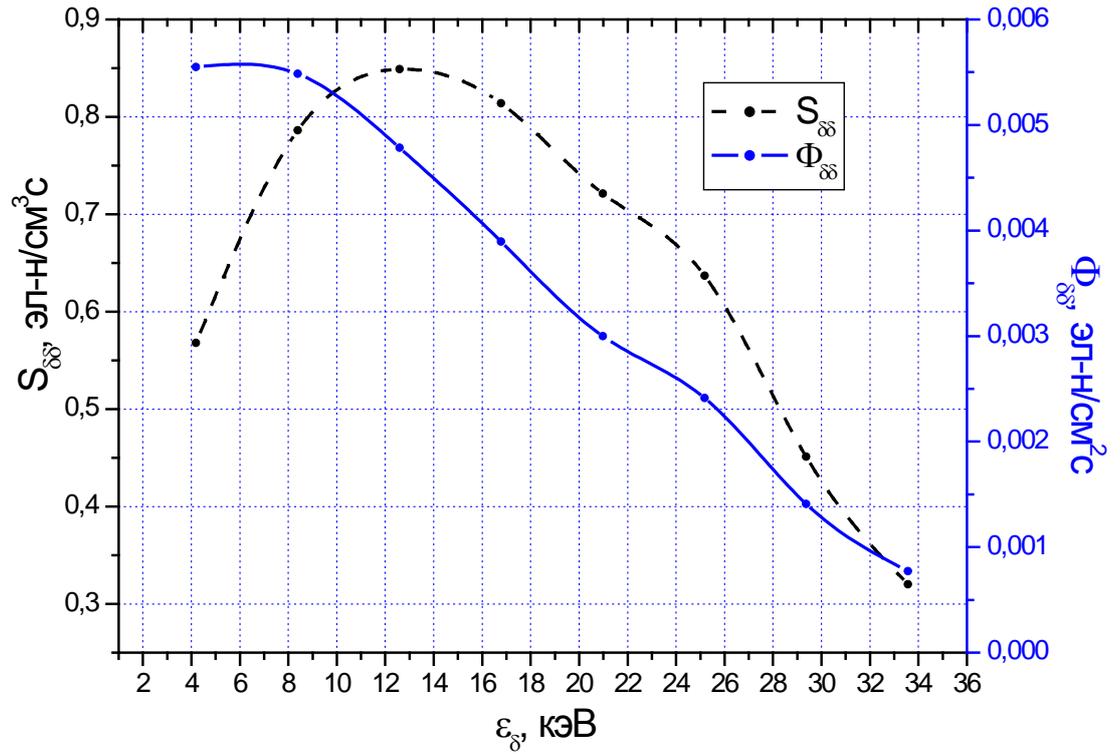


Рисунок 1.6.  $S_{\delta\delta}$ – спектр третичных электронов, образующиеся при термализации в воздухе вторичных электронов;  $\Phi_{\delta\delta}$  – деградационный спектр третичных электронов в воздухе.

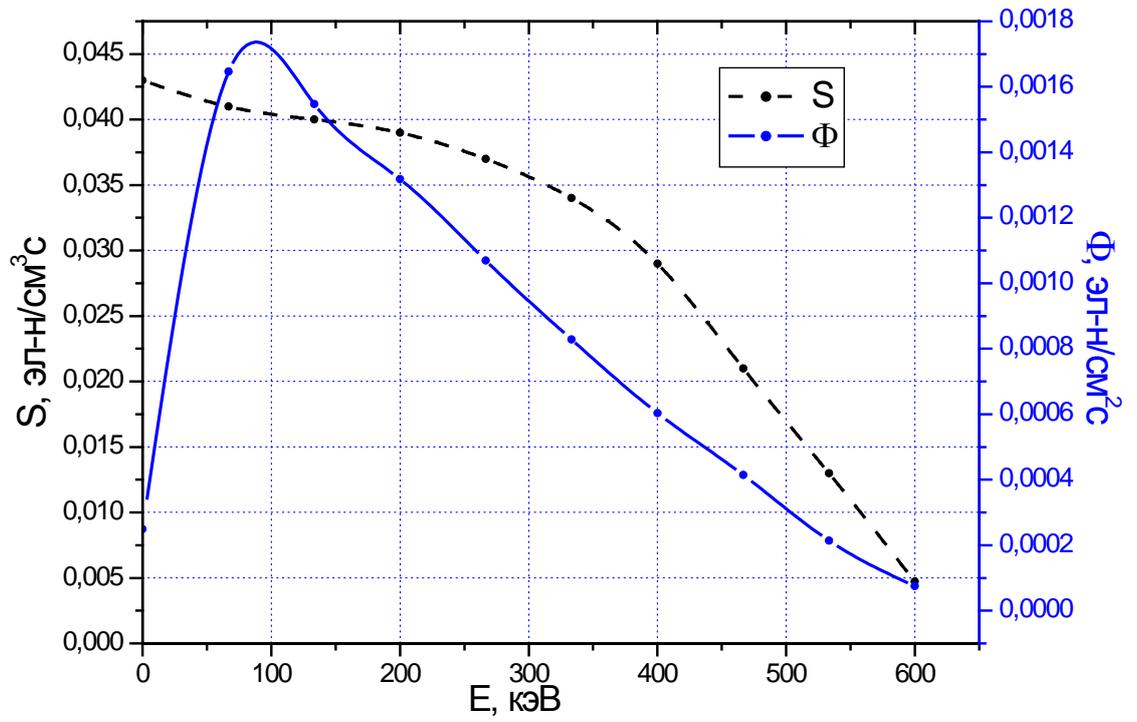


Рисунок 1.7.  $S$  – спектр электрона бета-распада ядер  $^{85}\text{Kr}$ ;  
 $\Phi$  – деградационный спектр указанных электронов в воздухе;

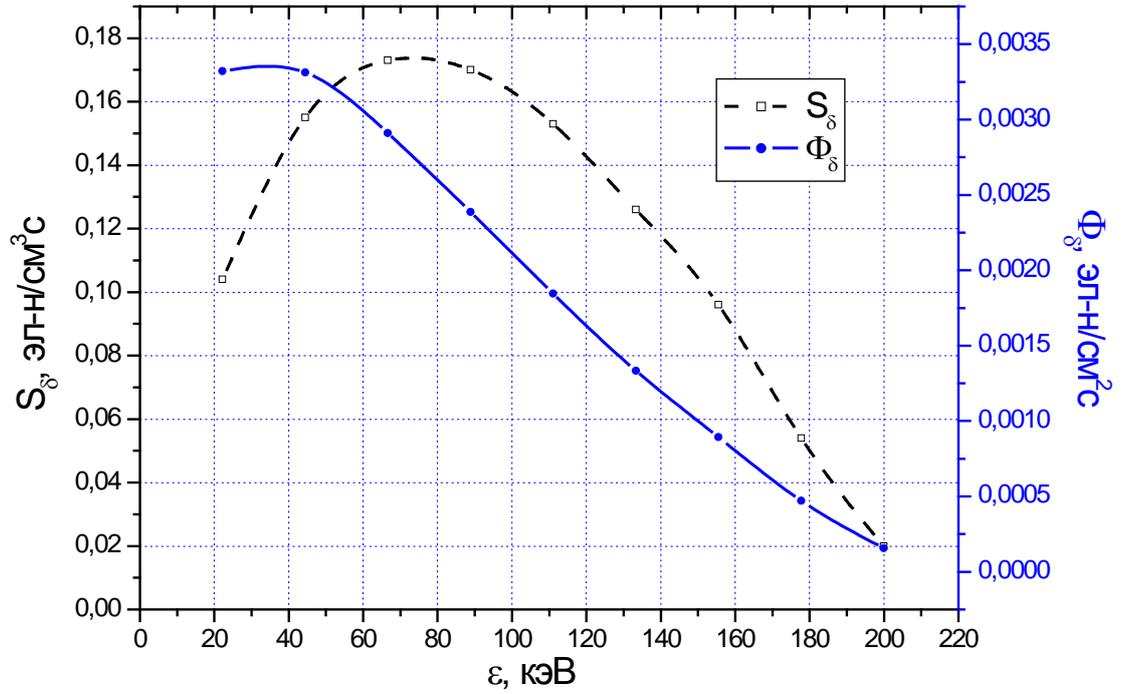


Рисунок 1.8.  $S_\delta$  – спектр вторичных (дельта) электронов, образующихся при термализации в воздухе электронов бета-распада  $^{85}\text{Kr}$ ;  $\Phi_\delta$  – деградационный спектр вторичных электронов в воздухе.

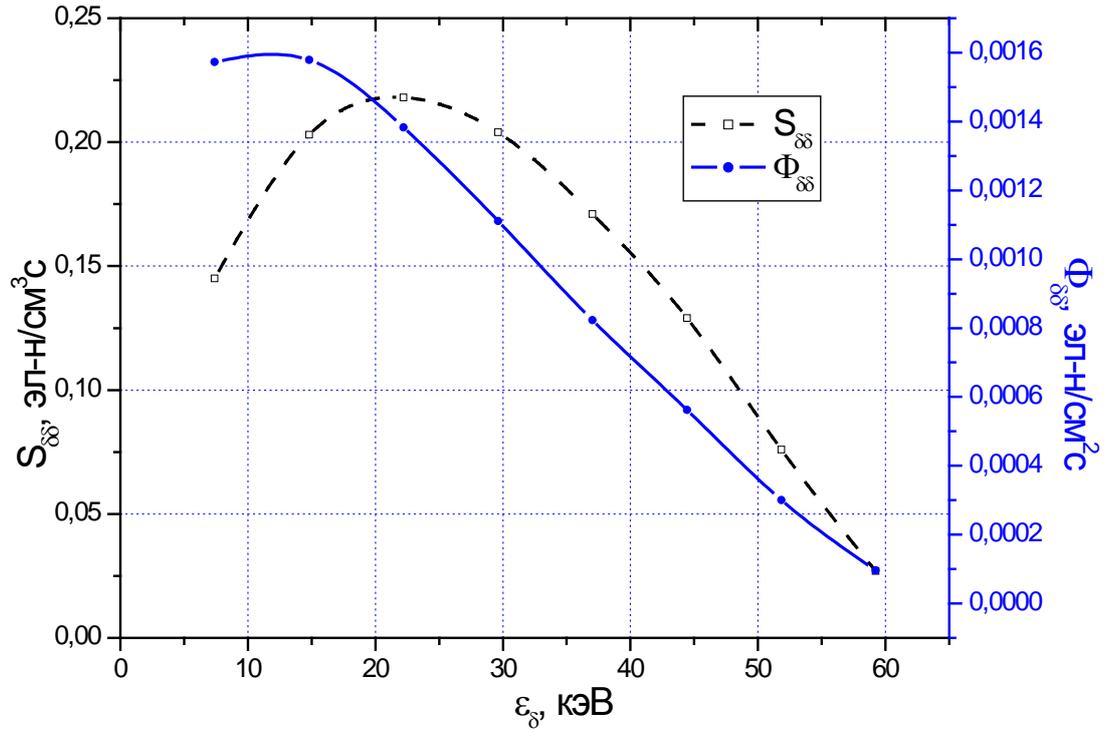


Рисунок 1.9.  $S_{\delta\delta}$  – спектр третичных электронов, образующиеся при термализации в воздухе вторичных электронов;  $\Phi_{\delta\delta}$  – деградационный спектр третичных электронов в воздухе.

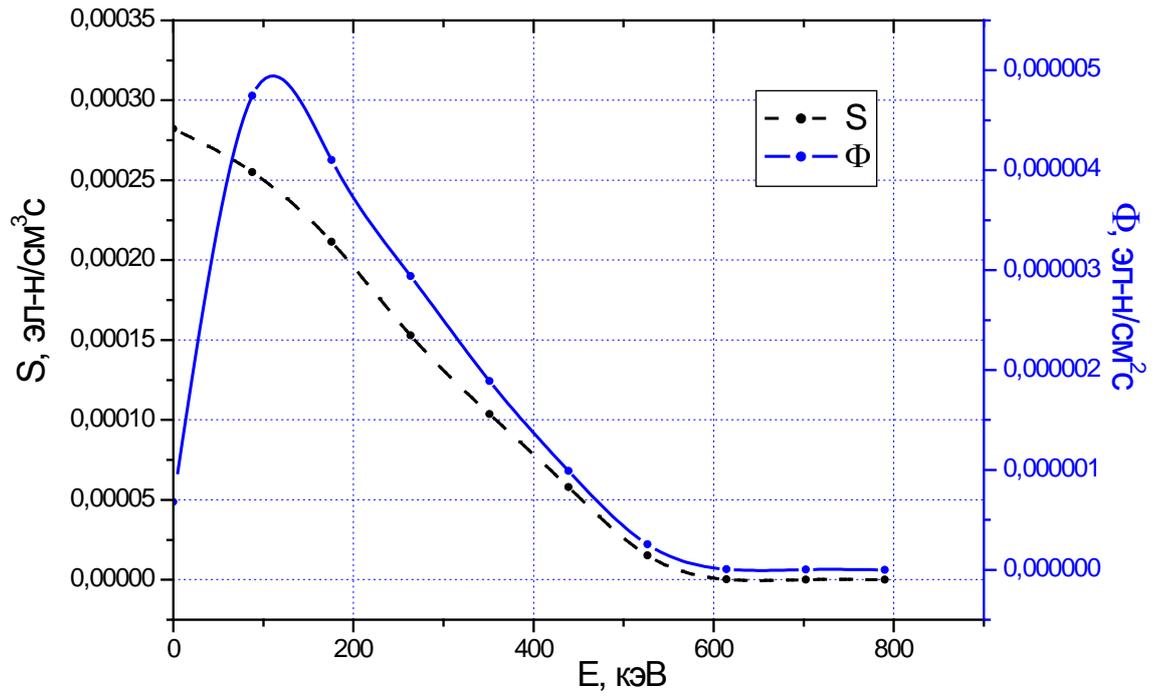


Рисунок 1.10.  $S$  – спектр электрона бета-распада ядер  $^{131}\text{I}$ ;  
 $\Phi$  – деградационный спектр указанных электронов в воздухе;

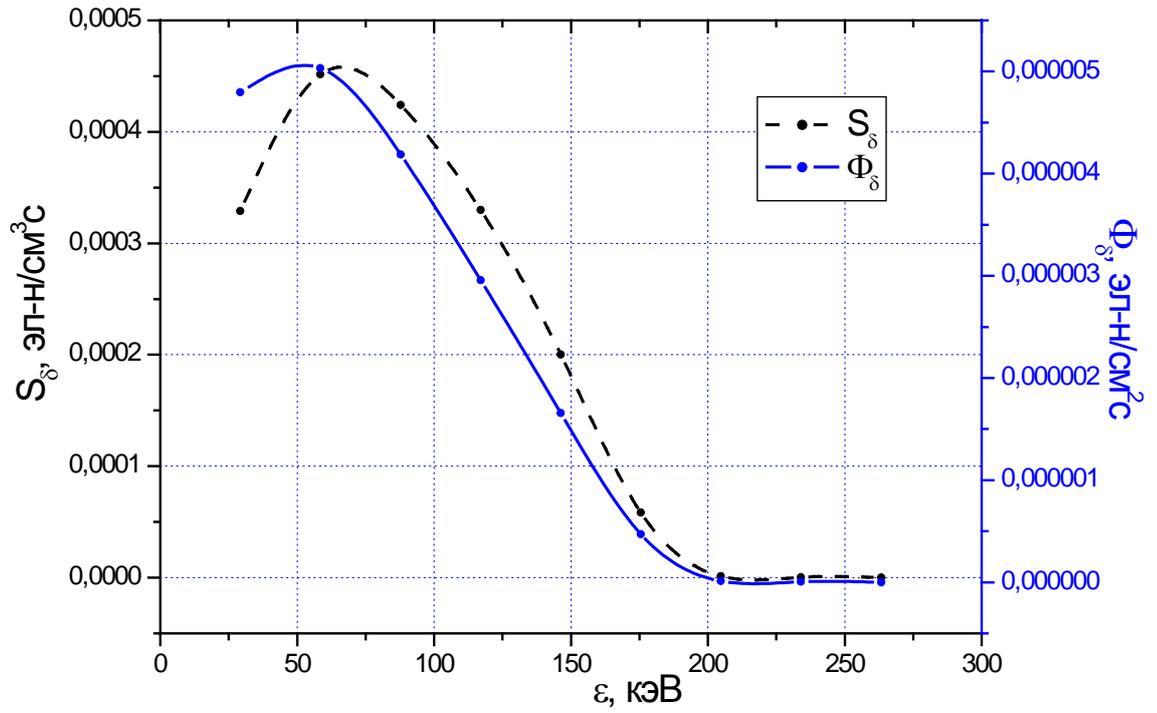


Рисунок 1.11.  $S_\delta$  – спектр вторичных (дельта) электронов, образующихся при термализации в воздухе электронов бета-распада  $^{85}\text{Kr}$ ;  $\Phi_\delta$  – деградационный спектр вторичных электронов в воздухе.

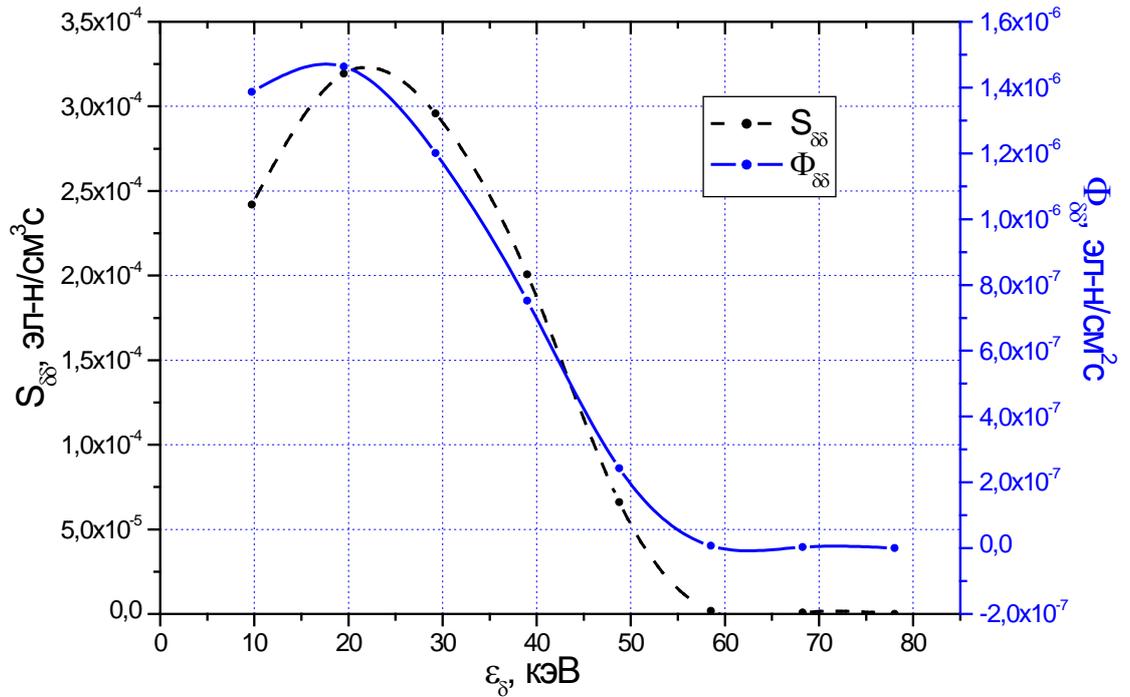


Рисунок 1.12.  $S_{\delta\delta}$  – спектр третичных электронов, образующиеся при термализации в воздухе вторичных электронов;  $\Phi_{\delta\delta}$  – деградационный спектр третичных электронов в воздухе.

Результаты проведенных расчетов, представленные на рисунках 1.1 – 1.12, показывают, что первичные, вторичные и третичные электроны имеют средние значения энергий, значительно превышающие (примерно в  $10^4$  раз) потенциалы ионизации для атомов и молекул компонент воздуха, которые составляют величину порядка 100 эВ. Увеличение количества электронов разных поколений будет продолжаться до тех пор, пока они будут способны к процессу ионизации. Отсюда следует, что процесс ионизации будет продолжаться с увеличением количества электронов разных поколений. Следовательно, необходимо учитывать вклад различных поколений электронов. Учитывая тенденцию поведения спектров, ограничимся девятым поколением электронов. В работе [35] расчет проводился до девятого поколения электронов, с учетом величины потенциала ионизации воздуха. В виду идентичности электронов, общее распределение электронов по

энергиям получено путем суммирования энергетических спектров девяти поколений электронов рассматриваемых радионуклидов.

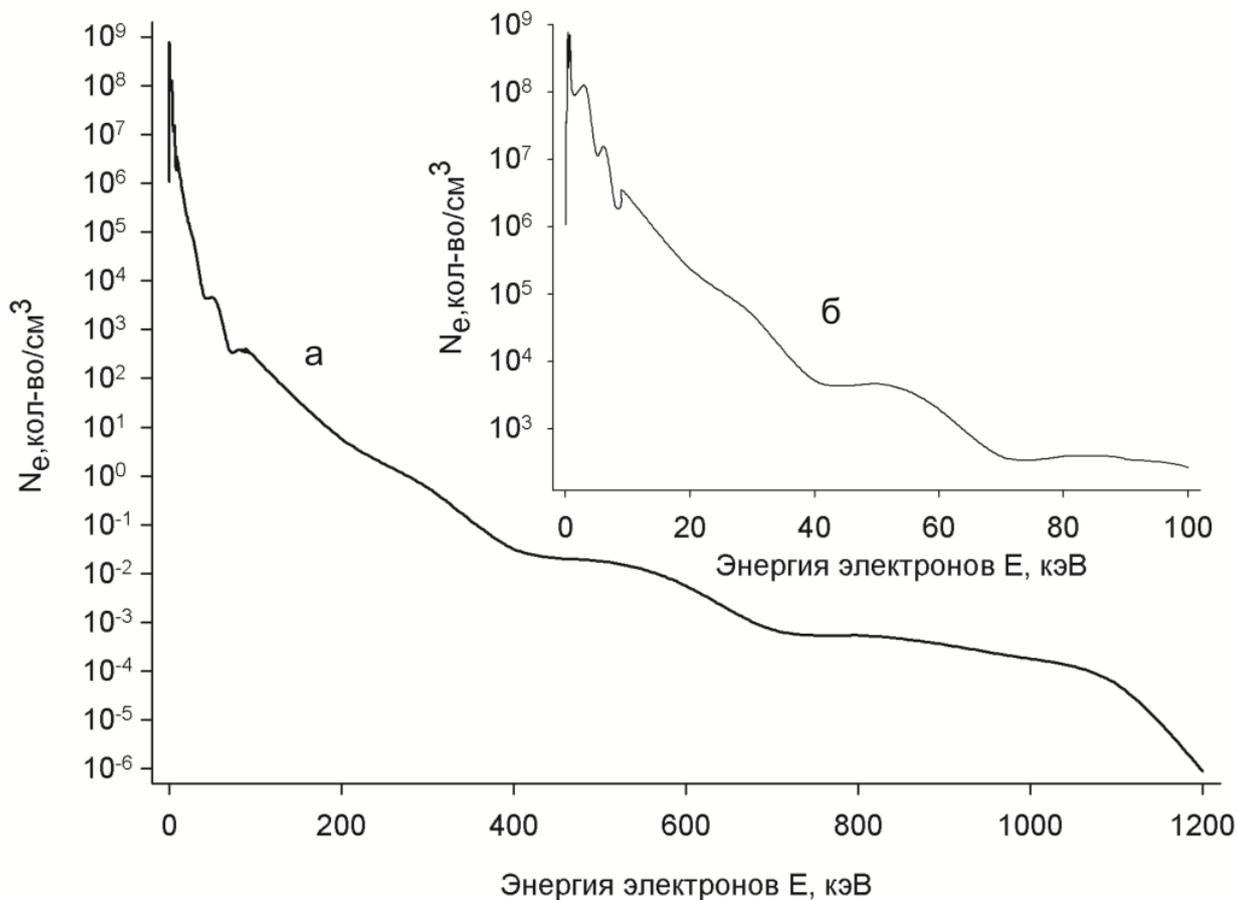


Рисунок 1.13. Суммарный энергетический спектр девяти поколений электронов для рассматриваемых радионуклидов:  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{I}$ .

В случае с РХЗ расчет суммарного энергетического спектра электронов проводился только для  $^{85}\text{Kr}$ , вследствие своего доминирования в газоаэрозольных выбросах РХЗ.

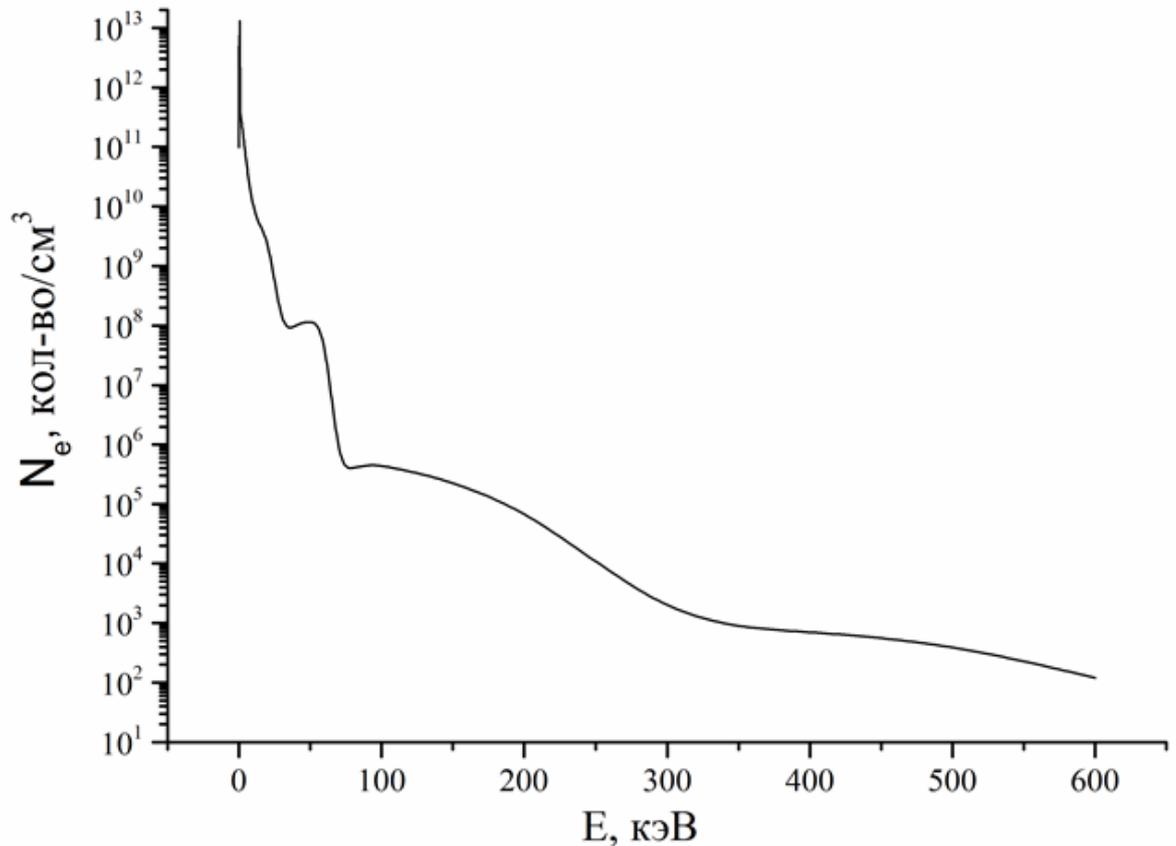


Рисунок 1.14. Суммарный энергетический спектр девяти поколений электронов для  $^{85}\text{Kr}$  [36].

Результаты вычислений, представленные на рисунке 1.13(б) показывают, что количество электронов с относительно малыми энергиями  $< 100$  кэВ, составляет существенную долю от общего количества электронов. Эти электроны вносят ощутимый вклад в величину тормозного излучения – основного механизма воздействия радиации на компоненты воздуха. 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 слабо ионизированную, низкотемпературную плазму:  $T \leq 10^5$  К,  $N_e \ll N_a = 10^{18}$  см<sup>-3</sup> [37].

Таблица 1.10 Сравнение результатов:

	Концентрация электронов, см <sup>-3</sup>	АЭС, мощность выброса: радионуклиды Бк/год	РХЗ, мощность выброса: радионуклиды Бк/год
[38] Пенин С.Т., Чистякова Л.К., Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. №1. С. 73–81.	$6 \cdot 10^8$	–	<sup>85</sup> Kr, $6 \cdot 10^{17}$
[39] Боярчук К.А., Кононов Е.Н., Ляхов Г.А., ПЖТФ, 1993. Т. 19. вып. 06. С. 67–72.	$10^5 - 10^6$	Запорожская АЭС, <sup>133</sup> Xe, <sup>135</sup> Xe, <sup>88</sup> Kr	–
[23] Бойко В.И., Шаманин И.В., Шепотенко Н.А., Юшков Ю.Г., Известия вузов. Физика. 1997. Т.40. № 6. С.111.	$(7-12) \cdot 10^7$	<sup>41</sup> Ar, $3 \cdot 10^9$	–
[35] Колотков Г.А., Пенин С.Т., Чистякова Л.К., Оптика Атмосферы и Океана, 19, №09, 2006. С. 793–797.	$10^9$	<sup>41</sup> Ar, <sup>85</sup> Kr, <sup>133</sup> Xe, <sup>131</sup> I, $10^{14}$	–
[36] Колотков Г.А., Пенин С.Т. Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 02. С. 164–166.	$10^{13}$	–	<sup>85</sup> Kr, $6 \cdot 10^{17}$

Проведено сравнение концентраций электронов, вычисленное 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 <sup>85</sup>Kr  $6 \cdot 10^{17}$  Бк/год разница на 5

порядков больше и составляет  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>. 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.

#### **1.4 Трековая модель ионизации атмосферы**

Учет трековой структуры ионизации воздуха или газов атмосферного давления важен для решения некоторых специфических задач. Например, при анализе активных сред для лазеров с ядерной накачкой, при анализе радиолокационного отражения от ионизированного облака радиоактивного выброса или при пассивном мониторинге радиоактивного выброса предприятий ЯТЦ [27].

При распространении радиоактивного выброса в атмосфере возникает низкотемпературная рекомбинационно-неравновесной плазма, в которой образуются различные заряженные и нейтральные компоненты с концентрациями, не характерными для стандартной атмосферы. Описание процесса ионизации приземного слоя атмосферы зависит и от того насколько точно определены количество и поколения электронов, поскольку основное воздействие на компоненты тропосферы обусловлено вторичными, третичными и т.д. т.е. следующими поколениями электронов. Считается, что во время ионизации эти компоненты (электроны, ионы и т.д.) распределены равномерно, что значительно упрощает моделирование процесса. Однако давление воздуха определяет длину пробега ионизирующей ядерной частицы (кванта), а значит, плотность зарядов в треке [24]. Следовательно, при изучении процессов взаимодействия электронов бета-распада и компонентов воздушной среды при радиоактивном выбросе следует различать ионизацию высокоэнергетическими электронами с учетом трековой структуры.

Считаем, что момент перекрытия треков может служить критерием для необходимости учета трековой ионизации воздушной среды. Если обозначить

величину характеризующую количество треков рождающихся в единице объема в секунду, т.е. объемную плотность активности радионуклидов как  $a_\beta$ , то условие перекрытия треков можно записать как:  $a_\beta V_m t \ll 1$  – перекрытие треков,  $a_\beta V_m t \gg 1$  – треки не перекрываются, где  $V_m$  – область однородной ионизации,  $t$  – время существования элементарного объема однородной ионизации.

Размер трека можно рассчитать из формулы  $V_m = \pi r^2 L_\beta$ , где  $r$  – длина свободного пробега частицы в воздухе, т.е. среднее расстояние между шпорами, а  $L_\beta$  – полный пробег бета-частицей в воздухе. Данные для расчета взяты из статьи [27]. Нетрудно подсчитать, что для бета-активного источника загрязнения граница критерия будет достигнута при концентрации радиоактивных веществ  $a_\beta \sim 10^{-2}$  Ки/см<sup>3</sup>. Т.е. при значительном увеличении степени ионизации, выше границы критерия, трековые очаги сливаются, и ионизация происходит равномерно во всем объеме.

### **1.5 Выводы по главе «Расчет концентрации электронов в стационарных атмосферных радиоактивных выбросах АЭС и РХЗ»**

1. Выполнен анализ радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ, таких как АЭС и РХЗ. Показано, что радиоактивные благородные газы: <sup>41</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>133</sup>Xe и <sup>131</sup>I вносят доминирующий вклад в величину штатного радиоактивного выброса АЭС. Поскольку именно они определяют радиационную обстановку в районе эксплуатации АЭС, работающей в штатном режиме, расчеты были проведены для этого набора бета-активных радионуклидов. В случае РХЗ, набор выбрасываемых радионуклидов ограничивается только <sup>85</sup>Kr, однако уровень радиоактивности значительно превышает таковую для АЭС.

2. Впервые рассчитано суммарное распределение количества электронов по энергии для стационарного выброса АЭС (<sup>41</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>133</sup>Xe, <sup>131</sup>I) и РХЗ (<sup>85</sup>Kr) в виде функции распределения электронов по энергии. Показано что количество электронов с относительно малыми энергиями < 100 кэВ, составляет существенную долю от общего количества электронов.

3. Проведено сравнение концентраций электронов, вычисленное различными подходами, разных авторов, которое показало, что при расчете ФРЭЭ необходимо учитывать процесс размножения электронов.

## 2 КОНЦЕНТРАЦИИ И МОЩНОСТЬ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА И ГИДРОКСИЛА

### 2.1 Фоновая концентрация атомарного водорода и гидроксила в атмосфере

В верхней атмосфере (термосфере) атомарный водород является доминирующим компонентом всего семейства, тогда как ниже уровня 75 км его концентрация намного меньше концентрации других водородосодержащих соединений [40]. Ниже уровня 10 км концентрация атомарного водорода в атмосфере становится пренебрежимо малой, поскольку излучение, ответственное за фотолиз атмосферных газов с образованием Н ( $\lambda < 2900 \text{ \AA}$ ), полностью поглощается озоновым слоем, располагающимся на высотах 10 – 30 км [22]. Дополнительным фактором, влияющим на концентрацию атомарного водорода является тот факт, что атомы водорода способны избежать гравитацию Земли и улететь в космос из-за своего легкого веса [41].

Гидроксил водорода является важнейшим химическим соединением семейства водородных радикалов  $\text{HO}_x$  и играет ключевую роль в атмосферной химии. Очень высокая реактивность гидроксила водорода и сильная зависимость от времени суток, высоты и влажности атмосферы объясняет сложность точного определения его концентрации [42, 43]. Концентрация гидроксила ОН строго зависит от солнечного излучения, и не превышает  $10^6 - 10^7 \text{ см}^{-3}$  [42].

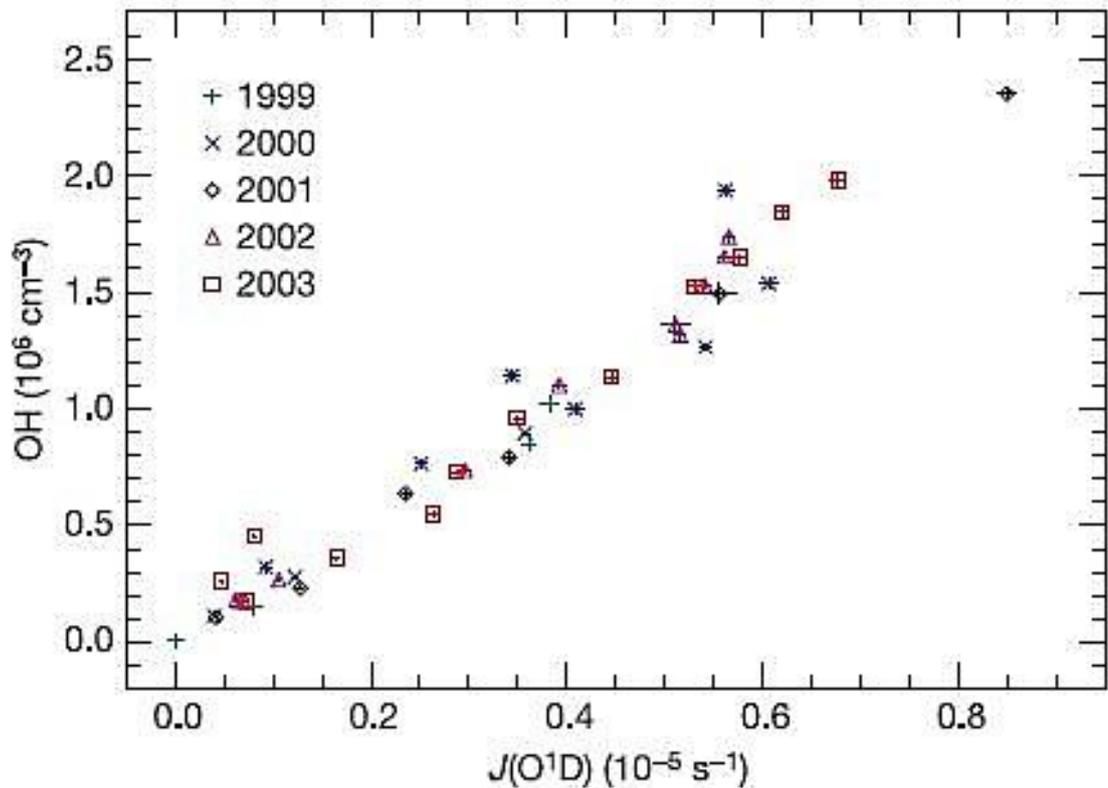


Рисунок 2.1. Среднемесячные значения одновременных наблюдений OH и  $J(O^1D)$ , измеренных в разные годы в метеорологической обсерватории Хоэнзальцбурга. Коэффициент корреляции между гидроксилом OH и кислородом  $J(O^1D)$  равен 0,985 [42].

## 2.2 Источники образования и фотохимические реакции, приводящие к генерации атомарного водорода и гидроксила

Рассмотрим источники образования атомарного водорода в стандартной нижней атмосфере. На основании многочисленных измерений химического состава атмосферы [22], можно сделать вывод, что образование атомарного водорода в атмосфере обусловлено фотолизом следующих соединений: метана  $CH_4$ , аммиака  $NH_3$ , молекулярного водорода  $H_2$ , формальдегида  $HCHO$  и воды  $H_2O$ . Суммарная концентрация молекул этих веществ в атмосфере составляет  $\sim 10^{19} - 10^{20} m^{-3}$ . Интерес представляют только те реакции, которые протекают с образованием атомарного водорода. Остановимся только на этих реакциях и

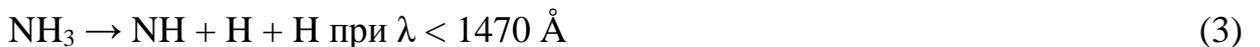
рассмотрим условия их протекания. Пренебрегаем реакциями с меньшими концентрациями.

Первичные процессы фотолиза метана излучением с длиной волны  $\lambda = 1100 - 1600 \text{ \AA}$  можно представить в виде реакций:



причем спектр поглощения в этой области непрерывен.

Для аммиака три основных первичных процесса протекают при фотолизе излучения в области ближнего и вакуумного ультрафиолета:



Процессы (1) и (3) являются более вероятными при диссоциации светом с длиной волны  $< 2800 \text{ \AA}$ .

Основным первичным фотохимическим процессом при фотодиссоциации формальдегида является реакция:



Первичным процессом фотодиссоциации сероводорода, протекающим при поглощении излучения в ближней УФ – области, является вероятно, образование атомов Н и радикалов SH:



Для молекул воды основным первичным процессом при фотодиссоциации в области длин волн  $1200 - 1900 \text{ \AA}$  является образование Н и ОН:

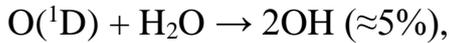


Образующийся в результате второстепенных, по сравнению со всеми указанными выше реакций, молекулярный водород может диссоциировать в атмосфере под действием излучения в диапазоне длин волн  $844,7 \text{ \AA} - 1108 \text{ \AA}$  по схеме:



На основании рассмотренных реакций можно заключить, что в процессе образования атомарного водорода наибольший вклад вносит излучение с  $\lambda$  в диапазоне  $844,7 \text{ \AA} - 3500 \text{ \AA}$ .

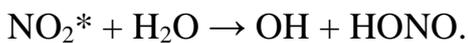
Образование OH в стандартной тропосфере происходит в результате следующей последовательности реакций:



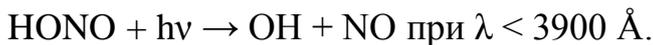
$\text{O}(^1\text{D}) + M \rightarrow \text{OH} + M$  ( $\approx 95\%$ , переход в основное состояние  $\text{O}(^3\text{P})$   $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  в воздухе,  $\text{O}(^3\text{P})$  затем формирует  $\text{O}_3$ ), где  $M$  может быть  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , или  $\text{O}_2$ .

Заметим, что скорость реакции образования радикала OH фотолизом  $\text{O}_3$  ограничена малым количеством солнечного излучения ( $\lambda < 320 \text{ нм}$ ) в тропосфере.

Возможны и другие источники образования гидроксила, такие как: азотистая кислота ( $\text{HONO}$ ), перекись водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), перекись метана ( $\text{CH}_3\text{OOH}$ ), реакция окиси азота ( $\text{NO}$ ) с радикалами гидропероксида ( $\text{HO}_2$ ), или реакция алкенов и озона. Но как было показано в работе [43] основным естественным источником образования тропосферного OH является реакция:  $\text{NO}_2^*$  с парами воды. Т.е. в случае если основная доля  $\text{NO}_2^*$  реагирует с парами воды, то следующие процессы образования OH будут иметь место:



Дополнительно OH дает реакция фотолиза HONO:



На основании рассмотренных реакций можно заключить, что основной вклад в образование атомарного водорода и гидроксила вносит излучение в диапазоне  $844,7 - 4200 \text{ \AA}$ .

## 2.3 Расчет концентраций атомарного водорода и гидроксила в области шлейфа выброса АЭС

Ранее в разделе 1.3, мы вычислили, сколько электронов и с какой энергией образуются в результате бета-распада радионуклидов и ионизации [рисунок 1.13, 35] и определили условия, при которых будут протекать реакции с образованием Н и ОН [44]. Для протекания реакций образования Н и ОН необходимо чтобы в частотный интервал 844,7 – 4200 Å поступала энергия диссоциации  $E_d = \frac{hc}{\lambda}$  [22]. Для атомарного водорода  $\lambda(\text{H}) = 844,7 - 3500 \text{ \AA}$  это  $2,352 \cdot 10^{-11} - 5,676 \cdot 10^{-12}$  эрг, для  $\lambda(\text{ОН}) = 844,7 - 4200 \text{ \AA}$  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.

### 2.3.1 Тормозное излучение высокоэнергетичных электронов бета-распада

В соответствии с законами классической электродинамики, заряженная частица, а в нашем случае высокоэнергетичный электрон, двигаясь в кулоновском поле возбужденного или нейтрального атомного ядра и атомных электронов, излучает энергию. При этом он теряет часть своей энергии, «тормозится», потому такое излучение и называется тормозным [20]. Обычно и при энергии порядка нескольких электрон-вольт эффективность нейтральных атомов в отношении тормозного излучения и поглощения, на один два порядка меньше, чем эффективность ионов. Таким образом, столкновения электронов с нейтральными атомами играют роль только при слабой ионизации газа.

Известно, что спектр тормозного излучения электронов характеризуется равномерным распределением по энергиям. Для расчета энергии, излучаемой электроном в заданный спектральный интервал, необходимо решать сложную квантово-механическую задачу с учетом всех возможных стоков энергии электрона

за счет упругих и неупругих столкновений, усредняя по всем возможным возбужденным состояниям атомов и молекул. Такое решение было бы слишком громоздким и малопригодным для численных оценок. В данном случае, исходя из выводов классической электродинамики [20], можно получить результат, вполне пригодный для оценок. Если столкновения электрона с атомами происходят достаточно редко (по сравнению с частотой излучаемой электромагнитной волны), то последовательные столкновения можно считать независимыми и энергия, излучаемая при многих столкновениях, является просто суммой энергий, излучаемых при отдельных столкновениях. Поскольку сам акт рассеяния происходит очень быстро по сравнению с периодом осцилляции поля, можно записать формулу для количества энергии, излученной электроном при торможении в частотный интервал  $d\nu$  в 1 секунду в виде:

$$dQ_\nu = \frac{8}{3} \cdot \frac{e^2 v_e^3 N \sigma_{tr}}{c^3} d\nu \quad (2.1)$$

где  $e$  – заряд электрона, СГСЭ;

$v_e$  – скорость электрона, см/с;

$c$  – скорость света, см/с;

$N$  – концентрация атомов в 1 см<sup>3</sup>;

$\sigma_{tr}$  – транспортное сечение передачи энергии.

Для того чтобы рассчитать энергию тормозного излучения электронов  $Q_\nu$  в интервале 844,7 – 4200 Å, необходимо просуммировать  $d\nu$  по всем столкновениям. Считаем рассеяние изотропным, время торможения одного электрона равным 10<sup>-6</sup> с и учитывая распределение концентраций электронов по энергиям, приведенное на рисунке 1.13, получим, что в спектральный интервал  $\lambda=844,7 \text{ Å} - 3500 \text{ Å}$  будет излучена энергия 0,131 эрг/см<sup>3</sup> или 8,2·10<sup>10</sup> эВ/см<sup>3</sup> [44]. Таким образом, в результате распада изотопов <sup>41</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>133</sup>Xe и <sup>131</sup>I в области шлейфа выброса будет образовываться 5,571·10<sup>15</sup> – 2,308·10<sup>16</sup> м<sup>3</sup>·с атомов водорода и гидроксила.

Равновесная же концентрация Н и ОН будет определяться процессами генерации и рекомбинации.

### 2.3.2 Рекомбинация атомарного водорода и гидроксила

Зная скорость рекомбинации атомов водорода можно оценить их стационарную концентрацию из уравнения:

$$N_H = \left( \frac{N_{H(\text{нестационар})}}{2k} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

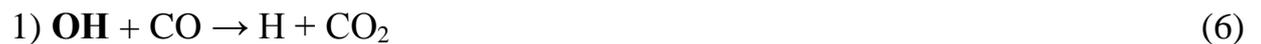
где  $N_H$  – стационарная концентрация атомов водорода,  $\text{м}^{-3}$ ;

$N_{H(\text{нестационар})}$  – нестационарная концентрация атомов водорода,  $\text{м}^{-3}$ ;

$k$  – коэффициент рекомбинации,  $\text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  [22].

Из экспериментальных данных известно, что константа скорости рекомбинации для атомов нейтрального водорода в нормальных условиях порядка  $10^{-13} - 10^{-14} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Формула (2.3) справедлива, когда рекомбинация является основным механизмом исчезновения атомов водорода, что характерно для атмосферных условий. В этом случае стационарная концентрация Н в шлейфе около  $10^{14} \text{ м}^{-3}$ .

В тропосфере существуют две основные реакции стока ОН [45 – 47]:



(рекомбинирует около 70%,  $k_1 = 1,5 \times 10^{-13} (1 + 0,6 p_{\text{атм}}) \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$ ),

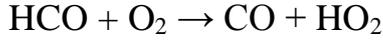
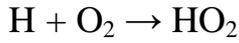
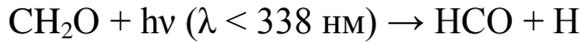
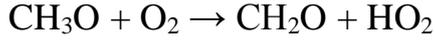
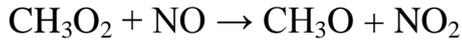


$\text{НО}_2 + \text{НО} \rightarrow \text{ОН} + \text{НО}_2$ , необходимо принять во внимание, что ОН восстанавливается в первом цикле реакции.



(около 30% ОН реагирует, таким образом,  $k_2 = 7 \times 10^{-15} \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$ ),





Три образовавшихся радикала  $\text{HO}_2$  взаимодействуют с  $\text{NO}$  с появлением 3 молекул  $\text{OH}$ , запускается цепная реакция:

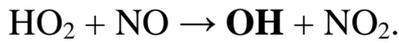


Таблица 2.1 Сводная таблица основных реакций гидроксила в тропосфере.

Образование	Сток	Концентрации веществ
Фоновая концентрация $10^6 \text{ см}^{-3}$ Скорость образования в результате распада молекулы воды (диссоциации, реакция (4)) $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH}(\text{X}^2\text{П})$ [22] $k = 10^9 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	$\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{H} + \text{CO}_2$ удаляется около 70%, $k_1 = 1,5 \times 10^{-13}(1+0,6p_{\text{atm}}) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ $\text{OH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ около 30% $\text{OH}$ реагирует, таким образом, $k_2 = 7 \times 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	$[\text{CO}] = 40 - 200$ $\text{млрд}^{-1}$ , $[\text{CH}_4] = 1750 \text{ млрд}^{-1}$ [45]

Поскольку скорости реакций рекомбинации  $\text{OH}$  малы по сравнению со скоростью образования гидроксила и реакции (6) и (7) входят в циклы реакций, в результате которых может восстановиться молекула  $\text{OH}$ , то можно предположить, что концентрация гидроксила останется на том же уровне, а возможно даже и немного увеличиться. Таким образом концентрация  $\text{N}(\text{OH}) \approx 10^{15} \text{ м}^{-3}$ .

## 2.4 Мощность излучения атомарного водорода и гидроксила из шлейфа выброса АЭС на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно

При самопроизвольном переходе атома из верхнего,  $n$  – энергетического состояния в нижнее  $k$ , излучается квант.

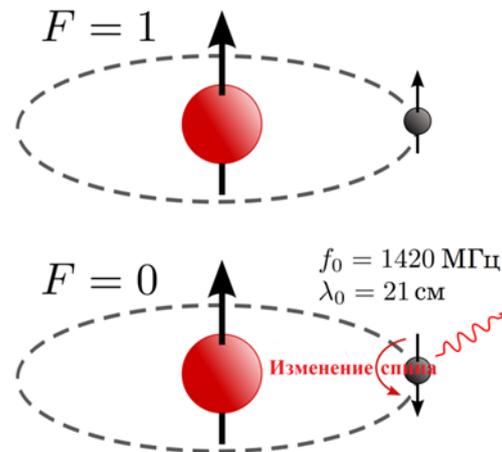


Рисунок 2.2 Радиолиния нейтрального атома водорода [48].

Мощность линии излучения определяется вероятностью радиационного перехода  $A_{nk}$  по следующей формуле:

$$S = E_{nk} A_{nk} \quad (2.3)$$

где  $E_{nk} = h\nu_0 = 9,412 \cdot 10^{-23}$  Дж – энергия сверхтонкого перехода нижнего орбитального энергетического уровня атома водорода для  $\nu_0 = 1420,41$  МГц ( $h$  – постоянная Планка,  $\nu_0$  – частота излучения на данном переходе),  $A_{nk} = 3 \cdot 10^{-15}$ ,  $s^{-1}$  [22, 49].

Тогда мощность линии излучения атомарного водорода при одном акте радиационного перехода  $S = E_{nk} A_{nk} = 2,824 \cdot 10^{-37}$  Вт. Так как концентрация атомов водорода в одном кубическом метре шлейфа составляет  $\sim 1,7 \cdot 10^{14} - 10^{15}$  атомов, то мощность излучаемая объемом в 1 кубический километр на частоте 1420 МГц, равна  $1,5 \cdot 10^{-13} - 9,592 \cdot 10^{-14}$  Вт.

Кроме частоты 1420 МГц, осуществить вышеупомянутое решение задачи можно также и на частотах 1612, 1665, 1667 и 1721 МГц. Такое количество радиолиний ОН объясняется возможными взаимными ориентациями спинов ядра и электронов [50].

Таблица 2.2. Сводная таблица для четырех линий ОН.

Частота (МГц)	Коэффициент Эйнштейна А ( $10^{-11} \text{с}^{-1}$ )	Энергия сверхтонкого расщепления ( $10^{-25}$ Дж)	Мощность 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 две основных частоты спонтанных переходов близко стоящих к друг другу: 1665 – 1667 МГц, что соответствует мощности излучения  $10^{-35}$  Вт. Таким образом объем выбросов  $1 \text{ км}^3$  будет излучать порядка  $10^{-11}$  Вт [44].

### **2.5 Сравнение мощностей излучения на частотах 1420, 1665 – 1667 МГц из $1 \text{ км}^3$ выбросов АЭС и РХЗ**

Одной из первых публикаций была публикация Евгения Трофимовича Протасевича [51] в 1994 году было предложено использовать «свечение» воздуха над объектами ядерной энергетики в качестве надежного индикатора повышения радиационного фона. Под «свечением» подразумевалось спонтанное излучение Н и ОН. Расчеты мощности излучения из шлейфа выброса предприятия ЯТЦ, приведенные в статье [51], имеют поверхностный характер, не учитывался процесс размножения электронов, физико-химические реакции, процессы рекомбинации

атомарного водорода. Теоретические расчеты возможности использования спонтанного излучения гидроксила не приведены.

В работе [38] Сергеем Тимофеевичем Пениным и Лилией Константиновной Чистяковой теоретически рассмотрена возможность использования излучения атомарного водорода на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса РХЗ с учетом распространения шлейфа для трех стратификаций атмосферы и двух типов подстилающей поверхности. В расчете не учитывался процесс размножения электронов, теоретические расчеты выполнены только для атомарного водорода.

В 1997 году был проведен эксперимент по дистанционной диагностике радиоактивных выбросов РХЗ по излучению на частоте 1420 МГц. Было обнаружено изменение излучения на данной частоте и расхождение по мощности сигнала между теоретическими расчетами и экспериментом [52].

Владимиром Петровичем Якубовым и соавторами в лабораторных условиях была получена калибровочная зависимость, которая дает количественную связь изменений уровня флуктуаций радиоволн со значениями уровня радиации в областях, пронизываемых излучением [53].

Далее представлена сводная таблица 2.3 в которой приведено сравнение мощностей излучения на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц из 1 км<sup>3</sup> шлейфа выброса АЭС и РХЗ. Для РХЗ расчет проводился по формулам, что и для АЭС.

Таблица 2.3 Сравнение мощностей излучения на частотах 1420, 1665 – 1667 МГц из 1 км<sup>3</sup> выбросов РХЗ и АЭС.

	Теория (1420 МГц)	Эксперимент (1420 МГц)	Теория (1665 – 1667 МГц)	Эксперимент (1665 – 1667 МГц)
РХЗ (Вт)	8·10 <sup>-18</sup> – 2·10 <sup>-17</sup> [38] <b>10<sup>-13</sup> – 7·10<sup>-13</sup></b> [36]	Наблюдалось увеличение интенсивности излучения [52]	<b>3·10<sup>-5</sup> – 10<sup>-4</sup></b> [54]	—

АЭС (Вт)	$6 \cdot 10^{-7}$ [51] $10^{-13}$ [35, 44]	—	$2 \cdot 10^{-10}$ [44]	—
-------------	---	---	-------------------------	---

Пояснения к таблице 2.3: значения, выделенные полужирным шрифтом, рассчитаны автором диссертации.

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 в доступных источниках обнаружено не было.

## **2.6 Выводы по главе «Концентрации и мощность радиоизлучений атомарного водорода и гидроксила»**

1. 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 из шлейфа выброса РХЗ объяснила натурный эксперимент.

2. В области шлейфа стационарного выброса АЭС, под воздействием тормозного излучения электронов образуется повышенная стационарная концентрация Н и ОН, спонтанное излучение которых на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц соответственно, может быть зарегистрировано существующими радиометрами.

3. Поскольку ОН и Н излучают в одном спектральном диапазоне, то перспективный радиоприемник для регистрации излучения на частоте 1420 МГц может использоваться и без значительных переделок для регистрации излучения на частоте 1665 – 1667 МГц.

### **3 МЕТЕО- И ГЕО- ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ШЛЕЙФА ВЫБРОСА ПРЕДПРИЯТИЙ ЯТЦ. ФАКТИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ АНТЕННЫ РАДИОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА.**

В работе [52] описывается эксперимент в котором была зарегистрирована мощность излучения из шлейфа выброса РХЗ СХК (Сибирский химический комбинат). По результатам эксперимента наблюдали увеличение мощности излучения на частоте 1420 МГц по сравнению с расчетным [38], это объясняется тем что в работе [38] не учитывался процесс размножения электронов, а также сделан вывод что излучение на данной частоте может быть зарегистрировано на расстоянии порядка 25 км. Интересным и целесообразным, по мнению автора, является оценка расстояния, на котором можно зарегистрировать излучение на частотах 1420 МГц и 1665 – 1667 МГц из шлейфа выброса АЭС и РХЗ.

#### **3.1 Влияние атмосферной стратификации на интенсивность излучения на частотах 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС**

Для определения параметров пространственного распределения радиоактивной примеси, поступающей в атмосферу, использовалась расчетная модель Пасквилла-Гиффорда, содержание которой изложено в [55]. В ее основе лежат: схема классификации погодных условий Пасквилла, в соответствии с которой используется шесть классов устойчивости и Гауссова модель распределения радиоактивной примеси в облаке выброса. 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. Модель применима к расстояниям до 10 – 12 км по направлению от источника, а на больших расстояниях дает завышенные оценки.

Общая формула расчета средней концентрации радионуклида в воздухе с учетом обеднения атмосферной примеси имеет вид, Бк/см<sup>3</sup>:

$$q_A(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)v_{cp}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - h_{эфф})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z + h_{эфф})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] \right\} \quad (3.1)$$

где  $Q$  – мощность источника выброса или концентрация частиц, Бк/с;

$x, y, z$  – координаты, отсчитываемые в соответствующих направлениях, м;

$v_{cp}$  – скорость ветра, усредненная по слою перемешивания, м/с;

$h_{эфф}$  – эффективная высота выброса, м;

$\sigma_y\sigma_z$  – дисперсии (стандартные отклонения) в соответствующих направлениях.

В работе [55] приведено соотношение для определения эффективной высоты выброса  $h_{эфф} = h + \Delta h$ , где  $\Delta h$  – дополнительная высота подъема струи за счет теплового и динамического факторов:

$$\Delta h = A_1 \cdot \left( 2,61 \cdot \frac{\sqrt{Q_h}}{v_h} + 0,029 \cdot \frac{v_s \cdot D_0}{v_h} \right) \quad (3.2)$$

где  $Q_h$  – тепловая мощность источника, кВт;

$v_h$  – скорость ветра на высоте выброса, м/с;

$v_s$  – скорость выхода воздуха (газов) из выходного отверстия источника, м/с;

$D_0$  – диаметр выходного отверстия, м;

$A_1$  – безразмерный параметр определяемый классом устойчивости атмосферы (см. таблицу 3.1).

Таблица 3.1. Значения параметров  $m$  и  $A_1$  в зависимости от класса устойчивости атмосферы.

Класс устойчивости	A – B	C	D	E	F
$m$	0,1 – 0,12	0,13	0,13 – 0,15	0,16 – 0,50	0,7 – 0,8
$A_1$	2,1 – 2,6	1,6	1,1	0,9	0,7

Для однородной равнинной местности и данных о скорости ветра на двух уровнях (на высоте уровня  $u_w$  и на возможной высоте подъема струи или выброса  $u_h$ ) вертикальный профиль ветра может быть выражен как  $u_z = u_1(z/z_1)^m$  при  $z_1=10$  (высота флюгера). Значение параметра  $m$  для высоты вплоть до 500 метров зависит от класса устойчивости.

Вентиляционная труба единственный источник всех газовых атмосферных выбросов. Скорость выхода воздуха из такой трубы более чем  $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , что больше чем скорость ветра на той же самой высоте в 1,5 – 2 раза. Диаметр воздуховода может быть до 1,5 метров [56]. Расчет плотности атомарного водорода выполнен при условии стационарного образования атомарного водорода в атмосфере и для условий, представленных в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Исходные данные для проведения расчета.

стратификация атмосферы		нейтральная
вентиляционной трубы	высота	100 м
	диаметр	1 м
средние скорости ветра в направлении переноса примеси	на высоте 1 м	5м/с
	на высоте флюгера	
	на высоте 10 м	

	на высоте выброса	
скорость выхода воздуха (газов) из устья трубы		
тип радиоактивной примеси	элементарная примесь (атомарная)	

Данные в таблице соответствуют стандартным характеристикам АЭС и параметрам атмосферы [56].

Рядом авторов [40, 55, 57] 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:

1. Сильно пересеченная неровная местность.

Таблица 3.3.

Класс устойчивости	$P_y$	$\Phi_y$	$P_z$	$\Phi_z$
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:

$$\sigma_z = P_z x^{\Phi_z} \quad (3.3)$$

$$\sigma_y = P_y x^{\Phi_y} \quad (3.4)$$

2. Городские условия.

Таблица 3.4.

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

$$\sigma_y = a_1 x (1 + b_1 x)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

$$\sigma_z = a_2 x (1 + b_2 x)^{c_1} \quad (3.6)$$

3. Открытая ровная поверхность с небольшой шероховатостью.

Таблица 3.5.

Класс устойчивости	$a_1$	$b_1$	$\alpha_1$	$\beta_1$
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

$$\sigma_y = a_1 (x)^{\alpha_1} \quad (3.7)$$

$$\sigma_z = b_1 (x)^{\beta_1} \quad (3.8)$$

Расчет проводился по вышеприведенным формулам 3.1 – 3.8 со временем осреднения 1 час. Результаты расчетов объединены по классам устойчивости атмосферы и представлены ниже:

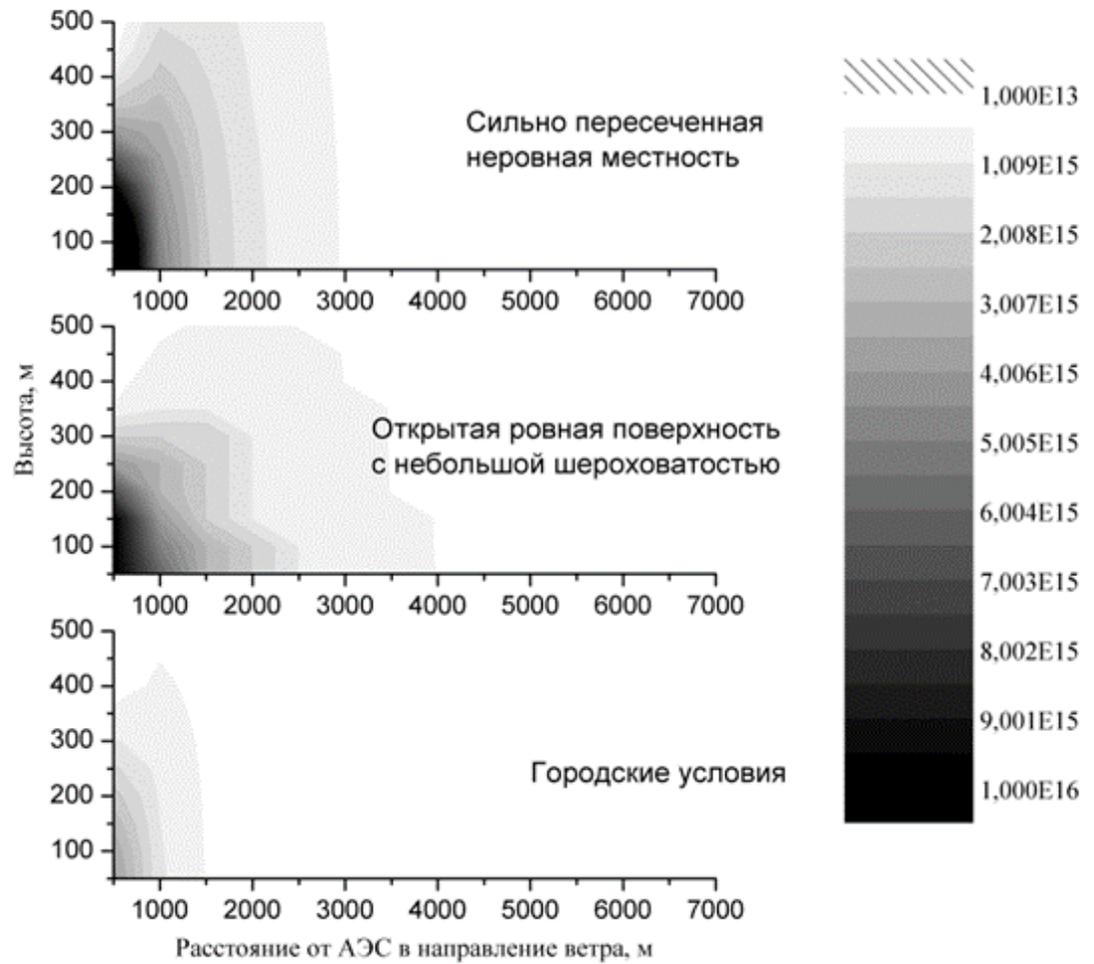


Рисунок 3.1. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода ( $\text{м}^3$ ) в выбросах АЭС при устойчивом состоянии атмосферы.

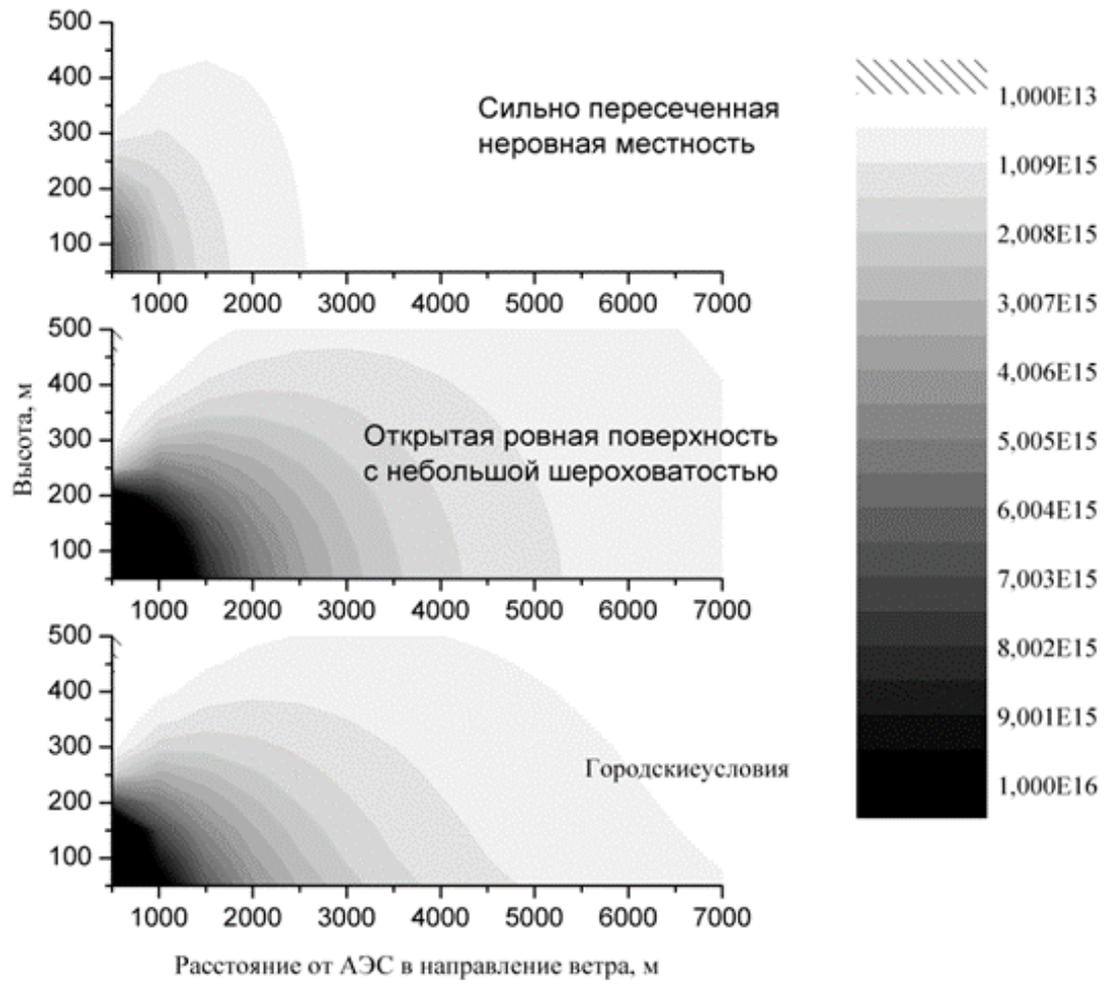


Рисунок 3.2. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода ( $\text{м}^3$ ) в выбросах АЭС при слабо неустойчивом состоянии атмосферы.

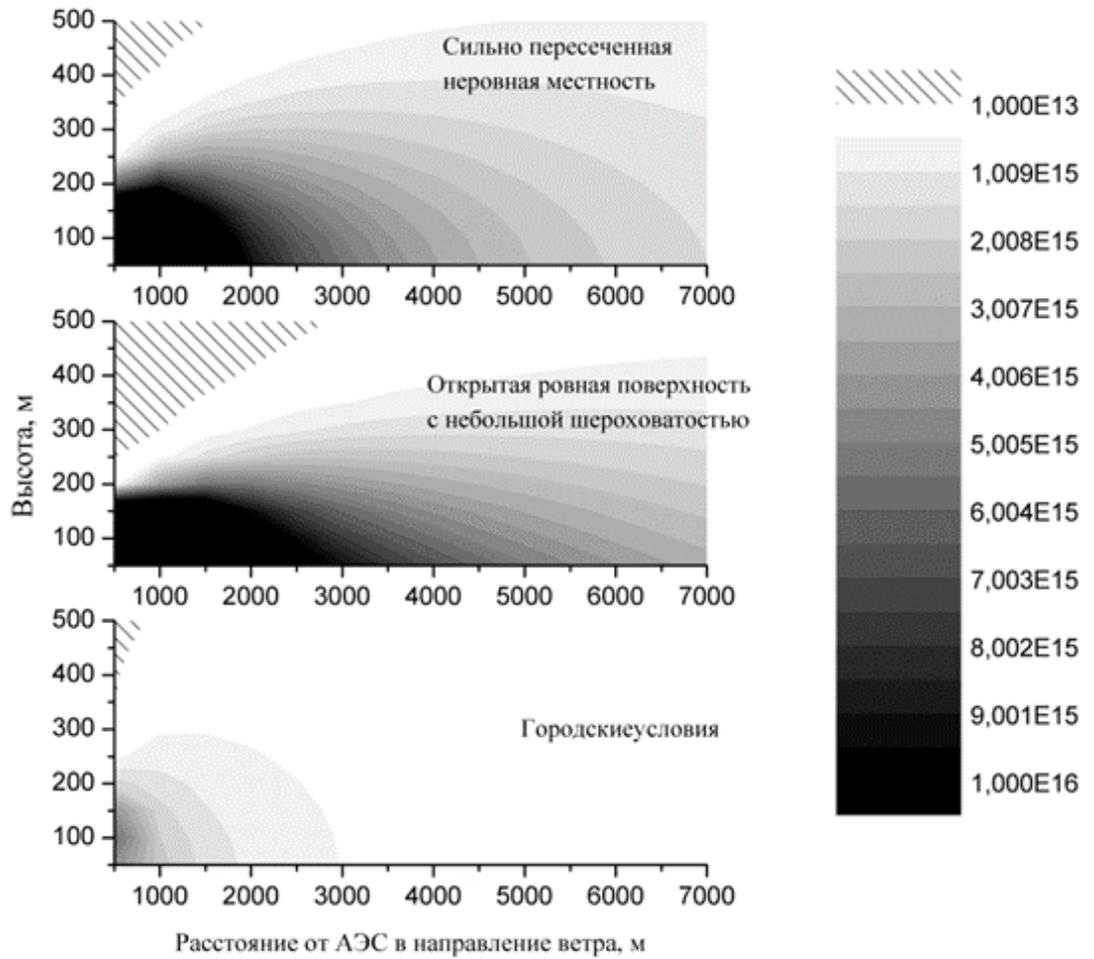


Рисунок 3.3. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода ( $\text{м}^3$ ) в выбросах АЭС при неустойчивом состоянии атмосферы.

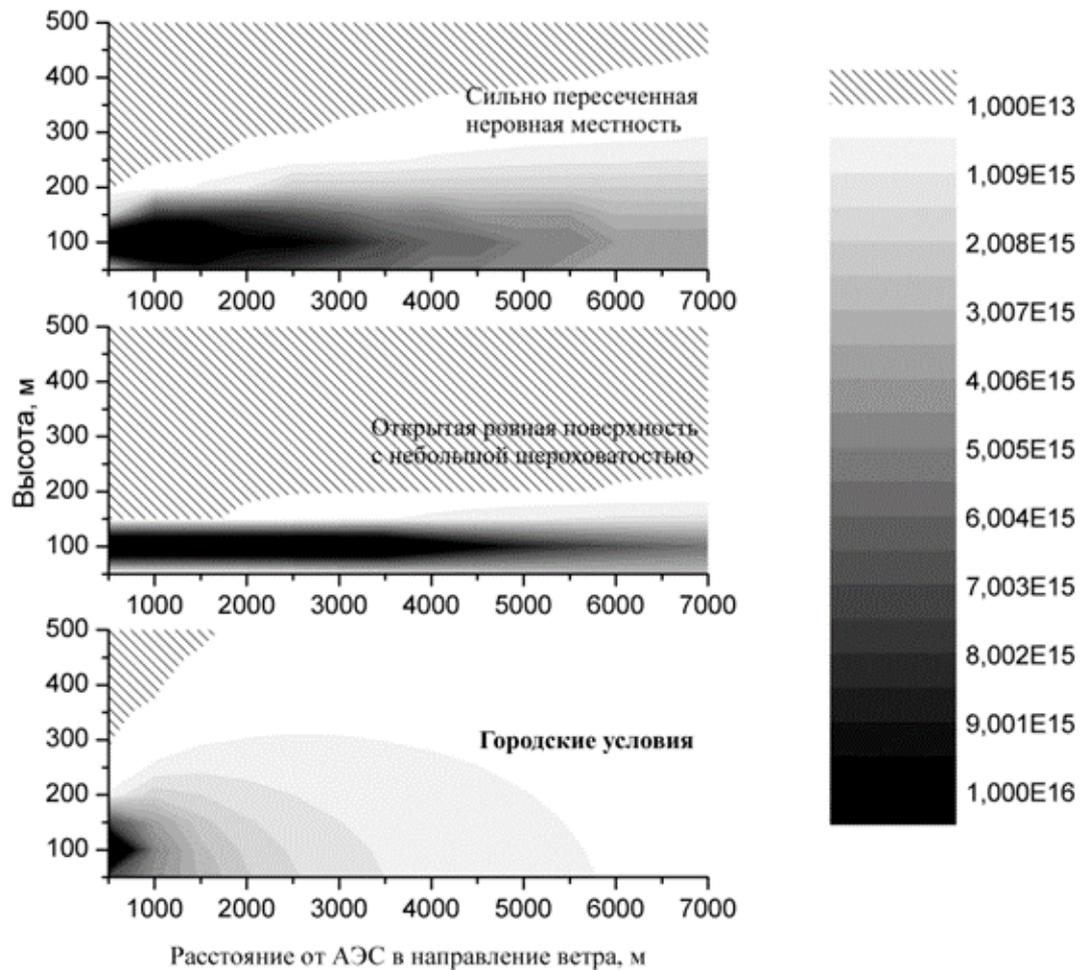


Рисунок 3.4. Распределение стационарной концентрации атомарного водорода ( $\text{м}^3$ ) в выбросах АЭС при нейтральном состоянии атмосферы.

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 смещению её ближе к источнику выброса. 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 [58].

### 3.2 Оценка расстояния на котором можно зарегистрировать излучение из шлейфа выброса объемом 10 км<sup>3</sup> АЭС и РХЗ

Зарегистрировать излучение из шлейфа выброса предприятия ЯТЦ можно с помощью параболической антенны. Созданный в ИОА СО РАН макет радиометра с использованием параболической антенны диаметром 1,6 м с диаграммой направленности 9,8° позволил уверенно регистрировать излучение на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса РХЗ, работающего в штатном режиме, на расстоянии ~ 25 км [52].

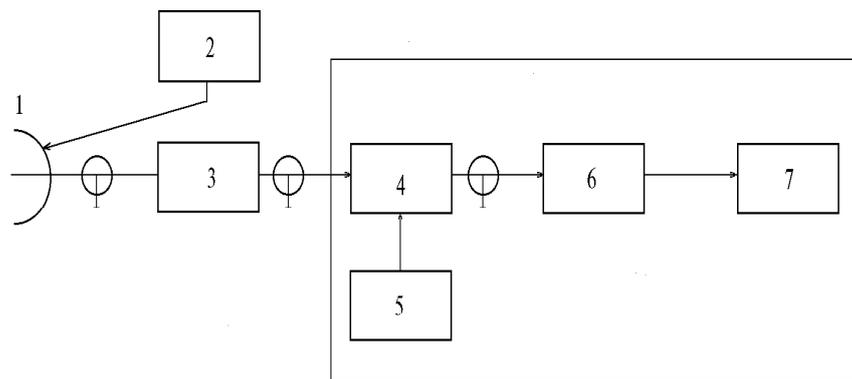


Рисунок 3.5. Упрощенная схема радиоспектрометрического комплекса.

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:

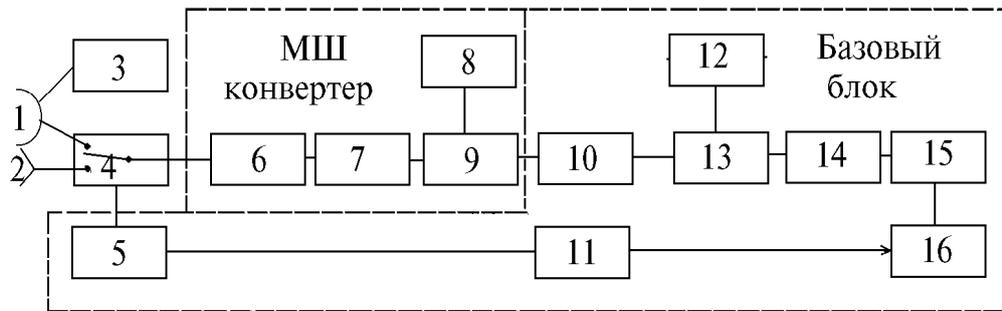


Рисунок 3.6. Структурная схема приемного устройства: 1 – антенна; 2 – облучатель; 3 – поворотное устройство; 4 – переключатель; 5 – коммутатор; 6 – малошумящий усилитель; 7 – фильтр; 8, 12 – гетеродины; 9, 13 – частотный преобразователь (ЧП); 10 – высокочастотный усилитель; 11 – генератор опорного напряжения; 14 фильтр ПУ ПЧ; 15 – УПЧ; 16 – НЧ субблок обработки сигнала.

Реализация такой схемы позволит проводить измерения более автоматизировано и точно.

Чувствительность приемного устройства определяется из соотношения, Вт:

$$P_{\text{мин}} = kT_{a \text{ мин}} \Delta f \quad (3.9)$$

Пороговый сигнал приемного устройства радиометра, выраженной в градусах антенной температуры, определяется как:

$$T_{a \text{ мин}} = \frac{\sqrt{2}T_{\text{ш}}}{2\sqrt{\Delta f \tau}} \quad (3.10)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,

$\Delta f$  – полоса принимаемых частот, Гц;

$T_{\text{ш}}$  – шумовая температура радиометра, которая складывается из шумовой температуры МШУ ( $T_{\text{пр}}$ ) и шумовой температуры антенны ( $T_{\text{ш.а}}$ ), К;

$\tau$  – время накопления сигнала, с.

Рассчитанная по вышеприведенным формулам  $P_{\text{мин}} \approx 9,382 \cdot 10^{-19}$ , Вт для  $\Delta f = 10$  кГц [59].

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.  $P_{\text{пр}} > P_{\text{мин}}$  и рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}} S_a}{4\pi R^2} \quad (3.11)$$

где  $P_{\text{изл}}$  – мощность излучения из шлейфа выброса предприятия ЯТЦ, Вт·с/м<sup>3</sup>;

$S_a = 1$  – площадь антенны, м;

$R$  – расстояние от источника излучения, м.

Расчет мощности излучения на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц из шлейфа выбросов АЭС и РХЗ описан в главах 1 и 2. Исходные данные для расчета приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 Исходные данные и технические характеристики микроволнового радиометра.

Параболическая антенна	площадь, м	1
Коэффициент	шума МШУ, дБ	0,85
	свободной волны напряжения МШУ	1,6
Полоса пропускания, кГц		10
Чувствительность измерений, Вт		$10^{-18}$
АЭС, Вт	$10^{-13}$ (1420 МГц)	
	$2 \cdot 10^{-10}$ (1665 – 1667 МГц)	
РХЗ, Вт	$10^{-13} - 7 \cdot 10^{-13}$ (1420 МГц)	
	$3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ (1665 – 1667 МГц)	

Используем соотношение (3.11) и данные таблицы 3.6 для того чтобы оценить расстояния на котором можно зарегистрировать излучение из шлейфа выброса объемом  $10 \text{ км}^3$ .

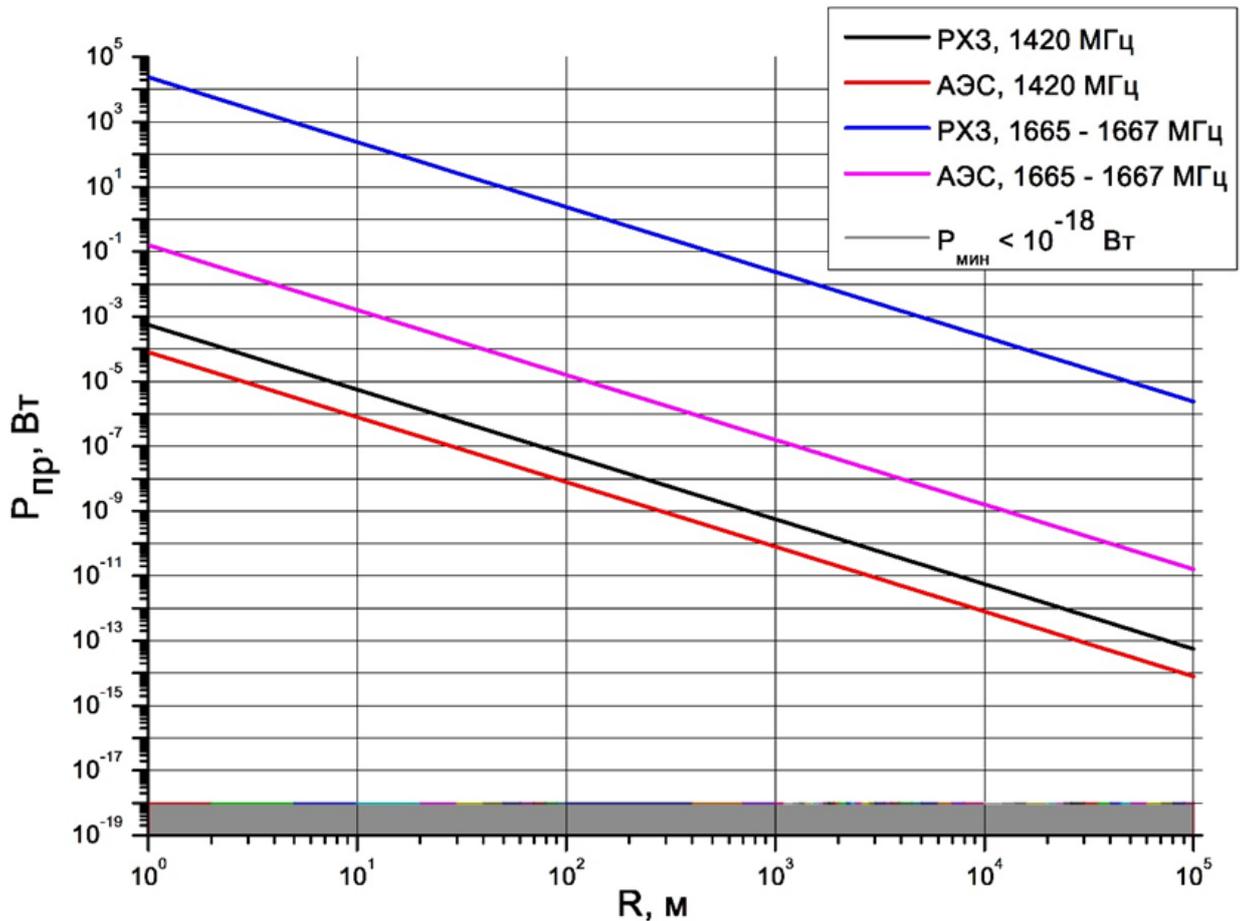


Рисунок 3.7 Кривые изменения мощности излучения в зависимости от расстояния от источника для АЭС и РХЗ работающих в штатном режиме.

Расчет показывает, что детектировать радиоактивность в шлейфе выброса можно до 100 км. Это не совсем верно, поскольку необходимо учитывать земную рефракцию.

Для приближённого расчёта дальности видимости объектов применяют номограмму Струйского [60], км:

$$D_{BL} = 3,57(\sqrt{h_B} + \sqrt{h_L}) \quad (3.12)$$

где  $h_B$  – половина высоты шлейфа выброса, м;

$h_L$  – высота расположения приемного устройства, м.

В нашем случае  $h_B=250$  м и  $h_L=10$  м, получаем  $D_{BL}\approx 68$  км.

Излучение в диапазоне частот 1,4 – 1,8 ГГц может быть зарегистрировано существующими радиометрами на расстоянии до 68 км от источника радиоактивного выброса (АЭС или РХЗ) работающего в штатном режиме. Следующей задачей является расчет зависимости диаметра антенны от расстояния на котором мы собираемся измерять мощность излучения из шлейфа выброса.

Зависимость мощности излучения из  $10 \text{ км}^3$  шлейфа выброса от диаметра антенны и расстояния от источника:

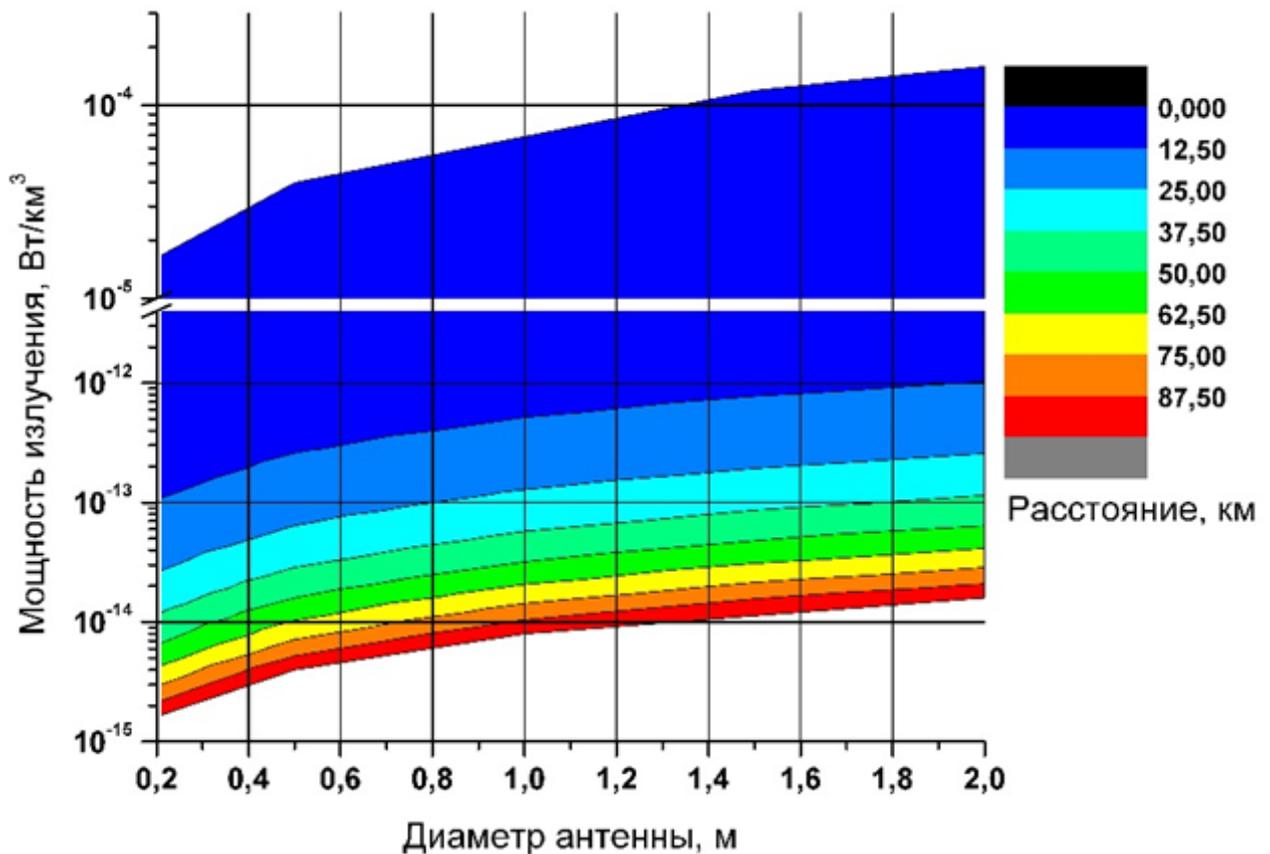


Рисунок 3.8. Зависимость мощности излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС от диаметра антенны УВЧ радиометра и расстояния между ними.

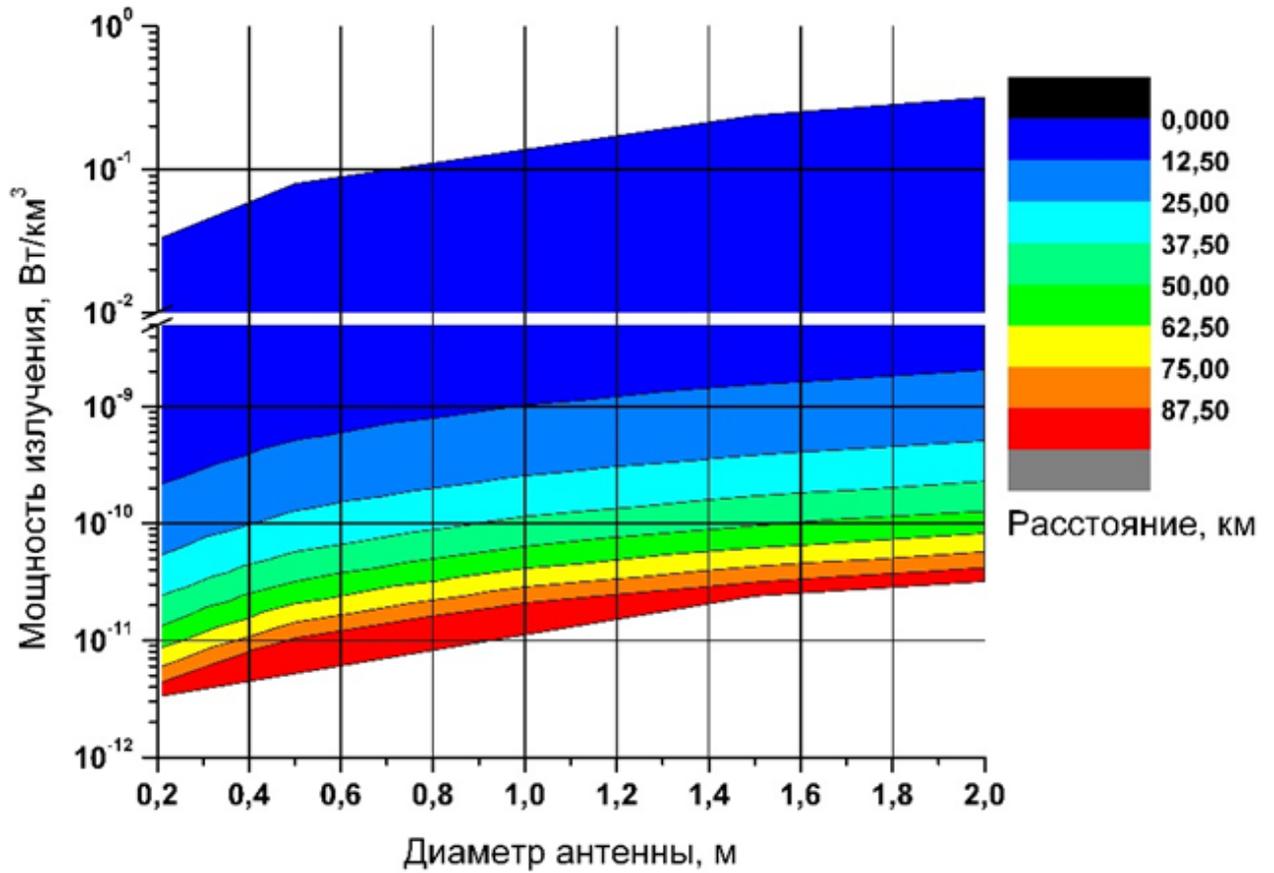


Рисунок 3.9 Зависимость мощности излучения на частоте 1665 – 1667 МГц из шлейфа выброса АЭС от диаметра антенны УВЧ радиометра и расстояния между ними.

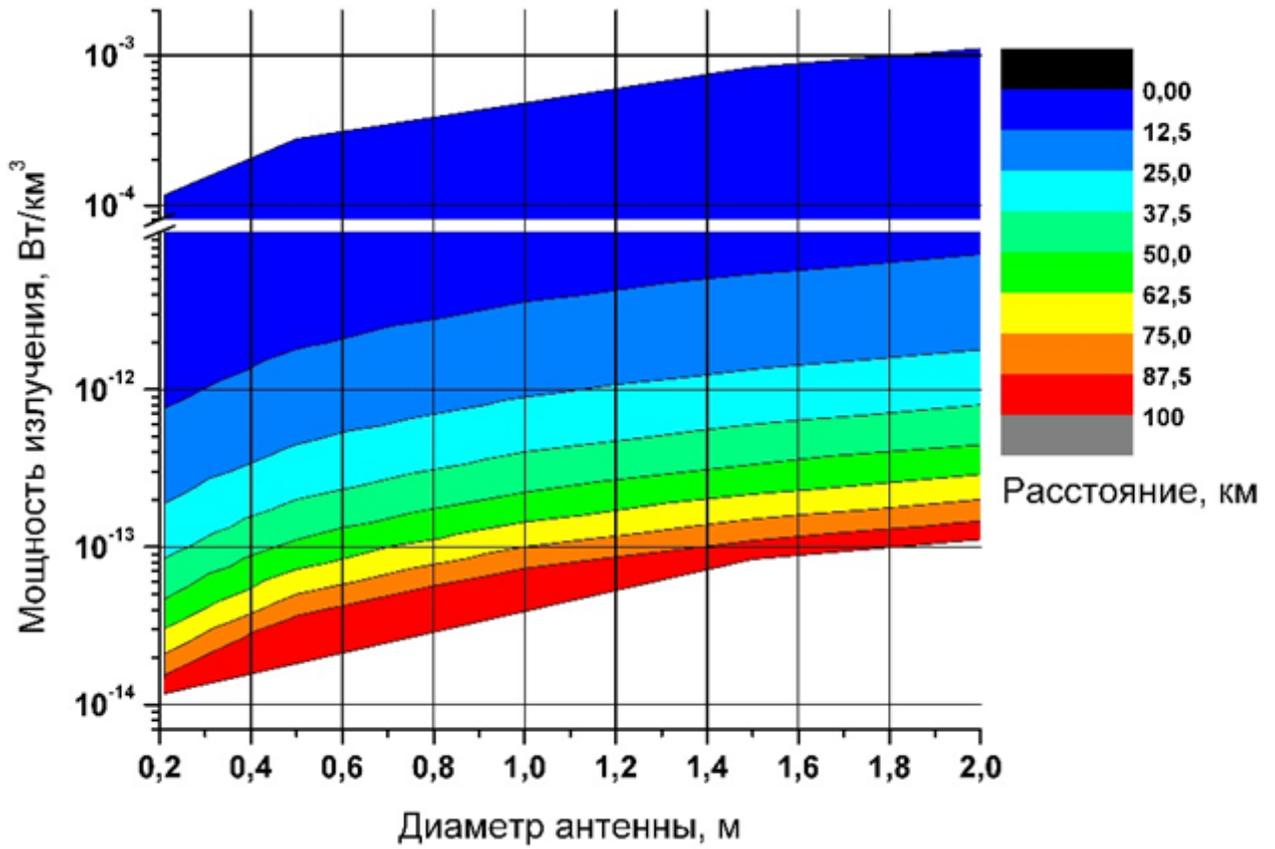


Рисунок 3.10. Зависимость мощности излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса РХЗ от диаметра антенны УВЧ радиометра и расстояния между ними.

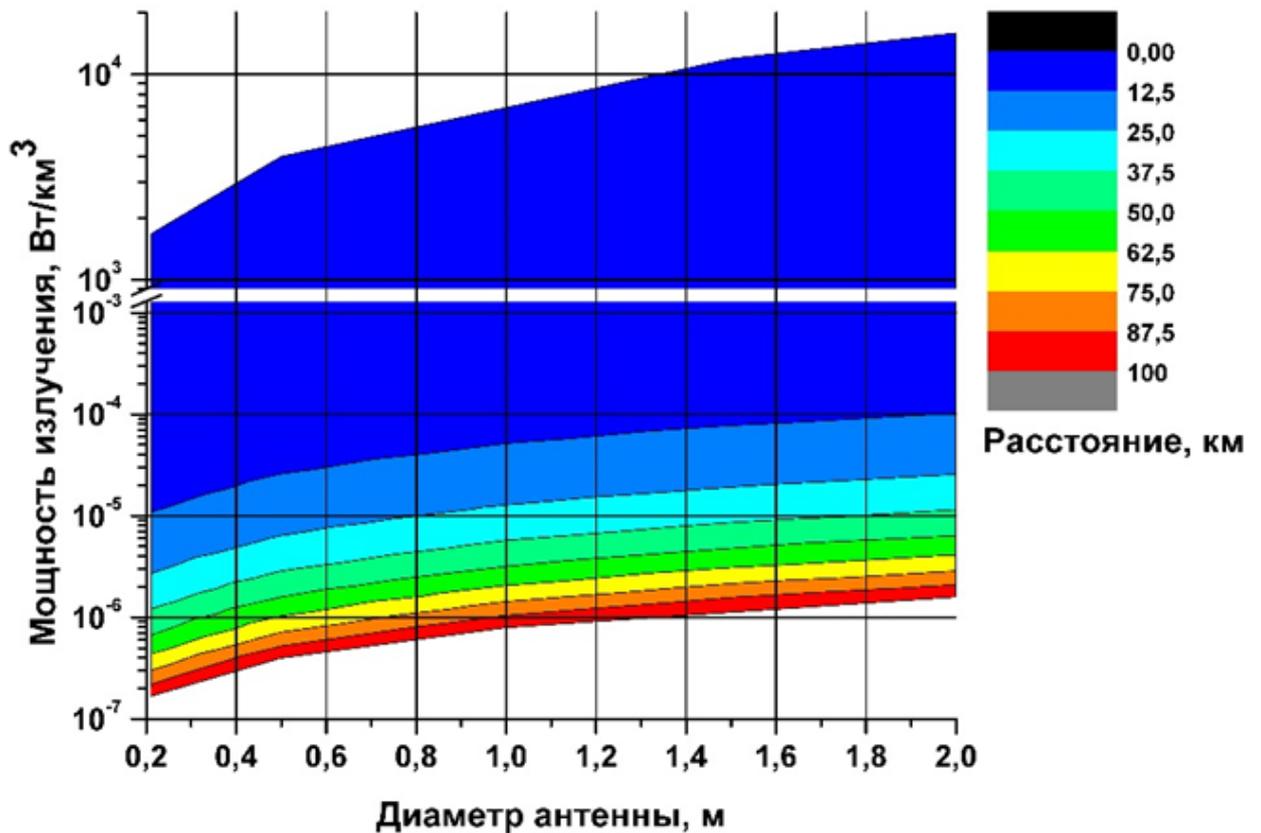


Рисунок 3.11. Зависимость мощности излучения на частоте 1665 – 1667 МГц из шлейфа выброса РХЗ от диаметра антенны УВЧ радиометра и расстояния между ними.

Зная два из трех параметров можно определить третий, для тех или иных целей и задач. Например, диаметр антенны нам известен, как и расстояние на котором мы собираемся измерять мощность излучения из шлейфа выброса, таким образом можно предсказать уровень радиоактивного выброса [61].

### **3.3 Обоснование возможности использования радиочастот 1420 и 1665 – 1667 МГц для дистанционного детектирования радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ.**

#### **3.3.1 Доплеровское уширение**

Хорошо известен факт уширения спектральной линии излучающей частицы движущейся по направлению к наблюдателю. Уширение  $\Delta\nu$  ( $\text{см}^{-1}$ ) определяется по формуле [22]:

$$\Delta\nu = 7,16 \cdot 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (3.13)$$

$\nu_0$  – волновое число, которое соответствует основной частоте излучения;

$T$  – температура газа, К;

$M$  – атомная масса.

Доплеровская ширина рассматриваемых линий ОН (1665 – 1667 МГц) при температуре 300 К порядка  $10,5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$  или 31,5 кГц. Величина уширения спектра много меньше частот спонтанных излучений ОН.

Доплеровская ширина линии атомарного водорода не превышает 150 кГц потому что поступательное движение атома водорода меньше  $< 2 \text{ эВ}$  [38].

#### **3.3.2 Фоновое излучение атомарного водорода и гидроксила и ослабление, обусловленное атмосферным поглощением**

Для начала посмотрим на атмосферу на рассеяние для указанных частот. Из литературных данных [40] известно, что молекулярное рассеяние в микроволновом диапазоне практически отсутствует, общее ослабление излучения определяется его поглощением. При этом поглощение не зависит от состояния поляризации

излучения. В этом диапазоне спектра заметным поглощением обладают лишь газы, молекулы которых имеют дипольные моменты. Из основных газов атмосферы электрический дипольный момент имеет молекула водяного пара и магнитный момент — молекула кислорода. Дипольными моментами обладают также и некоторые малые газовые примеси ( $O_3$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$  и др.), однако их содержание в атмосфере и интенсивность линий поглощения настолько малы, что их вкладом в общее поглощение микроволнового излучения в нижних слоях атмосферы обычно пренебрегают. Таким образом тропосфера практически прозрачна для микроволнового излучения для этих частот.

Также важным обоснованием является «Таблица распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации». Где сказано, что в полосах радиочастот 1,400 – 1,427 ГГц и 1,6605 – 1,6684 ГГц могут проводиться пассивные исследования по программе поиска преднамеренных излучений внеземного происхождения. Это также означает, что любое назначение радиочастот для излучающих РЭС в указанных полосах радиочастот не рекомендуется в соответствии с рекомендацией 702 международного союза электросвязи и запрещено использование во многих странах мира: США, Великобритания, Россия и т.д. [62, 63].

Для большей наглядности, обоснования об использовании рассматриваемого радиодиапазона сведены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7.

Частота, ГГц	Доплеровское уширение	Уровень шума в спектральном диапазоне 1÷10 ГГц	Ослабление атмосферным поглощением	Таблица распределения полос частот между радиослужбами РФ
1,42	150 кГц, [38]	меньше чем $10^{-21}$ Вт·м <sup>-2</sup> , [40]	меньше чем 2дБ, [38]	1,42 – 1,427 ГГц, 1,6605 – 1,668 ГГц радиоастрономическая, служба космических исследований (пассивная), [63]
1,665 – 1,667	31,5 кГц, [22]			

### **3.4 Выводы по главе «Метео- и гео- факторы влияющие на мощность излучения из шлейфа выброса предприятий ЯТЦ. Фактические размеры антенны радиоприемного устройства»**

1. Рассмотрен вопрос о влиянии атмосферной стратификации на интенсивность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС. Очевидно, что концентрация атомарного водорода прямо пропорциональна активности выброса, т.е. количеству выброшенных радионуклидов в атмосферу. Полученные результаты показывают, 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.

2. Представлена структурная схема радиометрического комплекса.
3. Оценено расстояние на котором можно зарегистрировать излучение из шлейфа выброса объемом  $10 \text{ км}^3$ .
4. Исследован вопрос о зависимости мощности излучения из  $10 \text{ км}^3$  шлейфа выброса от диаметра антенны и расстояния от источника. Результаты могут быть использованы для решения обратной задачи оценки активности выброса по интенсивности излучения атомарного водорода.

#### **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.**

В настоящее время ЯЭУ (ядерная энергетическая установка) с водным теплоносителем весьма распространены в мировой атомной энергетике. Около 90 % действующих, строящихся и разрабатываемых АЭС имеют ЯЭУ на тепловых нейтронах с водой под давлением: PWR (pressurized-water reactor) и BWR (boiling-water reactor). 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) [64, 65].

11 марта 2011 года в Японии произошли сильные землетрясения, вызвавшие разрушения на АЭС Фукусима-1, что привело к радиоактивному выбросу нетипичных для штатного выброса радионуклидов [66]. Информация о мощности радиоактивного выброса и об изотопном составе выброшенных радионуклидов отличается в различных источниках. Например, оценки и измерения количества выброшенных изотопов радионуклидов Cesium - 137 и Iodine - 131 по данным IRSN (Radioprotection and Nuclear Safety Institute) и СТВТО (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) различаются почти на два порядка [66, 67]. Несмотря на это, автором предпринята попытка применить метод дистанционного детектирования радиоактивных выбросов АЭС работающей в штатном режиме для аварийной ситуации на АЭС Фукусима-1.

##### **4.1 Технические характеристики АЭС Фукусима-1.**

На момент катастрофы 11 марта 2011 на АЭС Фукусима-1 работали первые 3 энергоблока с реакторами типа BWR (именно такие, которые использовались в разделе 1), остальные три были заглушены.

Таблица 4.1 Технические характеристики АЭС Фукусима-1 [65, 67 – 69].

Энергоблок	Тип реактора	Мощность (МВт)	Год ввода в эксплуатацию	Закрытие
1	BWR-3	439	26 марта 1971	По окончании ликвидации
2	BWR-4	760	18 июля 1974	По окончании ликвидации
3	BWR-4	760	27 марта 1976	31 марта 2011
4	BWR-4	760	12 октября 1978	31 марта 2011
5	BWR-4	760	18 апреля 1978	
6	BWR-5	1067	24 октября 1979	
7 (план)	ABWR	1380	Отменено, апрель 2011	
8 (план)	ABWR	1380	Отменено, апрель 2011	

#### 4.2 Состав аварийного выброса АЭС Фукусима-1

Данные по составу аварийного выброса АЭС Фукусима-1 были получены из источника [66]. 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.

Таблица 4.2 Детальный состав аварийных выбросов АЭС Фукусима-1 [70, 71].

Изотоп	Кол-во (Бк)	Тип распада	Период полураспада
<b><math>^{85}\text{Kr}</math></b>	<b><math>2 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>\beta^-</math></b>	<b>10,73 г</b>
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$10^{14}$	$\beta^-$	4,48 ч
$^{87}\text{Kr}$	$7 \cdot 10^{11}$	$\beta^-$	1,27 ч
$^{88}\text{Kr}$	$5 \cdot 10^{13}$	$\beta^-$	2,84 ч
$^{83\text{m}}\text{Kr}$	$10^{13}$	И.П.	1,86 ч
$^{133}\text{Xe}$	$2 \cdot 10^{18}$	$\beta^-$	5,243 д
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	$2 \cdot 10^{16}$	И.П.	2,19 д
$^{135}\text{Xe}$	$2 \cdot 10^{16}$	$\beta^-$	9,1 ч
$^{138}\text{Xe}$	90	$\beta^-$	14,1 м
$^{131\text{m}}\text{Xe}$	$2 \cdot 10^{16}$	(SF)	11,9 д
$^{131}\text{I}$	$9 \cdot 10^{16}$	$\beta^-$	8,021 д
$^{132}\text{I}$	$7 \cdot 10^{16}$	$\beta^-$	2,28 ч
$^{133}\text{I}$	$2 \cdot 10^{16}$	$\beta^-$	20,8 ч
$^{134}\text{I}$	$4 \cdot 10^{11}$	$\beta^-$	52,6 м
$^{135}\text{I}$	$2 \cdot 10^{15}$	$\beta^-$	6,57 ч
<b><math>^{129}\text{I}</math></b>	<b><math>2 \cdot 10^9</math></b>	<b><math>\beta^-</math></b>	<b><math>1,7 \cdot 10^7</math> г</b>
$^{132\text{m}}\text{I}$	$2 \cdot 10^{10}$	И.П.	1,39 ч
$^{128}\text{I}$	$4 \cdot 10^4$	$\beta^-$	25 м
$^{130}\text{I}$	$5 \cdot 10^{13}$	$\beta^-$	12,36 ч
$^{83}\text{Br}$	$2 \cdot 10^{12}$	$\beta^-$	2,4 ч
$^{84}\text{Br}$	$7 \cdot 10^7$	$\beta^-$	31,8 м
$^{88}\text{Rb}$	$5 \cdot 10^{13}$	$\beta^-$	17,7 м
<b><math>^{134}\text{Cs}</math></b>	<b><math>10^{16}</math></b>	<b><math>\beta^-, \beta^+</math></b>	<b>2,065 г</b>
$^{136}\text{Cs}$	$6 \cdot 10^{15}$	$\beta^-$	13,16 д
<b><math>^{137}\text{Cs}</math></b>	<b><math>10^{16}</math></b>	<b><math>\beta^-</math></b>	<b>30,2 г</b>

$^{138}\text{Cs}$	$3 \cdot 10^9$	$\beta^-$	32,2 м
$^{134\text{m}}\text{Cs}$	$10^{12}$	И.П.	2,91 ч
$^{133\text{m}}\text{Te}$	$4 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$	55,4 м
$^{134}\text{Te}$	$6 \cdot 10^9$	$\beta^-$	42 м
$^{127}\text{Te}$	$5 \cdot 10^{15}$	$\beta^-$	9,4 ч
$^{129\text{m}}\text{Te}$	$7 \cdot 10^{15}$	И.П., $\beta^-$	33,6 д
$^{125\text{m}}\text{Te}$	$10^{14}$	И.П.	58 д
$^{127\text{m}}\text{Te}$	$10^{15}$	И.П.	109 д
$^{131}\text{Te}$	$5 \cdot 10^{14}$	$\beta^-$	25 м
$^{131\text{m}}\text{Te}$	$2 \cdot 10^{15}$	$\beta^-$ , И.П.	1,35 д
$^{133}\text{Te}$	$7 \cdot 10^9$	$\beta^-$	12,4 м
$^{130}\text{Sb}$	$10^{15}$	$\beta^-$	38,4 м
<b><math>^{125}\text{Sb}</math></b>	<b><math>6 \cdot 10^{14}</math></b>	<b><math>\beta^-</math></b>	<b>2,758 г</b>
$^{127}\text{Sb}$	$4 \cdot 10^{15}$	$\beta^-$	3,84 д
$^{128}\text{Sb}$	$10^{10}$	$\beta^-$	9,1 ч
$^{128\text{m}}\text{Sb}$	$10^{13}$	$\beta^-$	10,1 м
$^{129}\text{Sb}$	$4 \cdot 10^{13}$	$\beta^-$	17,7 м
$^{131}\text{Sb}$	$8 \cdot 10^5$	$\beta^-$	23 м
$^{89}\text{Rb}$	$3 \cdot 10^2$	$\beta^-$	15,4 м

Пояснения к таблице 4.2: Количество (Бк) – сколько было выброшено радиоактивного вещества за период 12 – 22 марта; Тип распада – наиболее вероятный тип распада для данного радионуклида ( $\beta^-$  – радиоактивный бета-распад с испусканием электрона;  $\beta^+$  – 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). Полужирным шрифтом выделены радионуклиды, вносящие основной вклад в уровень радиоактивного выброса.

Сравнение таблиц 1.2 и 4.2 дает представление о том, какое количество и сколько нехарактерных радионуклидов для штатного выброса АЭС содержится в аварийном выбросе. Для того чтобы упростить анализ, были рассмотрены радиоактивные элементы, которые вносят значительный вклад в ионизацию атмосферы. В таблице 4.3 представлены усредненные данные за 11 дней для стационарного и аварийного выброса АЭС с реактором BWR.

Таблица 4.3 Сравнение радиоактивных выбросов АЭС с реактором BWR.

Радиоактивные элементы	Штатный выброс (Бк / 11 дней)	Аварийный выброс (Бк / 11 дней)
РБГ	$8 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{18}$
I	$5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{17}$
Cs	—	$3 \cdot 10^{16}$
Te	—	$9 \cdot 10^{16}$

### **4.3 Мощность излучения атомарного водорода на частоте 1420 МГц из шлейфа аварийного выброса АЭС Фукусима-1.**

Основным механизмом воздействия радиации на компоненты атмосферы, считаем тормозное излучение высокоэнергетичных электронов бета-распада выброшенных радионуклидов. Энергия тормозного излучения приводит к диссоциации водяного пара с образованием атомарного водорода (H) и гидроксила (OH):  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH}$  [раздел 2, уравнение (4)]. За счет сверхтонкого перехода атомарный водород обладает свойством спонтанного излучения на частоте 1420 МГц (21 см). Мощность этого излучения из шлейфа выброса характеризует уровень радиоактивности в выбросе АЭС.

Возможность использования атомарного водорода для дистанционного мониторинга радиоактивных выбросов АЭС работающей в штатном режиме была показана в работе [35]. Авторами была рассчитана мощность излучения атомарного водорода из шлейфа выброса АЭС с реактором BWR работающей в штатном

режиме. Показано что, при оценках воздействия радиации на компоненты атмосферы необходимо учитывать процесс размножения высокоэнергетичных электронов бета-распада. Область максимальных уровней радиоактивности соответствует максимальной мощности излучения атомарного водорода и может быть определена моделированием процесса распространения примеси в атмосфере из локального источника. Произведя вычисления, о которых было рассказано выше [72], получаем значения для аварийного выброса [70]. В данной таблице приведено сравнение:

Таблица 4.4 Мощность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса объемом 1 км<sup>3</sup> для двух режимов работы АЭС с реактором BWR.

Режимы работы АЭС	Мощность излучения на частоте 1420 МГц из выброса АЭС объемом 1 км <sup>3</sup>
Штатный	10 <sup>-13</sup> Вт
Аварийный	10 <sup>-12</sup> 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 4.2. Кроме того, объем излучения из шлейфа выброса может достигать десятков км<sup>3</sup> что значительно увеличит величину принимаемого сигнала.

#### **4.4 Интенсивность ионообразования, радиологические последствия и электрическая проводимость в районе аварийного выброса АЭС**

Ученые, занимающиеся проблемами радиоактивного загрязнения окружающей среды, особое внимание уделяют радионуклидам: <sup>85</sup>Kr, <sup>129</sup>I, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>125</sup>Sb (в таблице 4.2 выделены полужирным шрифтом), в связи с их большим

периодом полураспада. Большинство научных публикаций, связанных с 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.

Известно, что наибольший вклад в изменение интенсивности ионообразования в приземном слое атмосферы вносит уровень радиоактивности подстилающей поверхности. В условиях повышенной ионизации воздуха происходят изменения концентраций ионных, аэрозольных и газовых компонентов атмосферы. При уровнях ионизации выше  $10^{-7}$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup> наблюдается рост концентрации аэрозолей и молекул примесных газов, а также изменение химизма частиц и появление новых газов [73, 74]. 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, приводит к нарушению санитарно-гигиенических требований и норм, к изменению погодно-климатических и геофизических факторов, а также изменению условий радиосвязи. Радиолокационные методы мониторинга радиоактивного загрязнения обладают рядом преимуществ перед прямыми методами: это дальность и пространственная разрешающая способность [13]. Методы дистанционного мониторинга радиоактивного загрязнения могут основываться на определении концентрации молекулярных ионов [75]. Поэтому была поставлена задача рассчитать интенсивность ионообразования в районе аварийного выброса АЭС Фукусима-1.

#### 4.4.1 Основные источники ионизации тропосферы.

Основными источниками ионизации в тропосфере являются: радиоактивность почвы, воздуха и космическое излучение. Ионизация почв обусловлена продуктами распада радона и торона, воздуха – содержанием радиоизотопа  $^{85}\text{Kr}$  и радиоактивного углерода. Космическое излучение представляет из себя потоки высокоэнергетичных частиц проникающих сквозь атмосферу Земли. Средняя интенсивность ионообразования основных источников фоновой ионизации атмосферы Земли и почвы представлена в таблице 4.5 [76].

Таблица 4.5.

Источник ионизации	Почва	Воздух	Космическое излучение
Интенсивность ионизации, $\nu$ , $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$	3–5	3–4	1–2 На высоте 20 км → 5

#### 4.4.2 Интенсивность ионообразования в 80 километровой зоне АЭС Фукусима-1

На рисунке 4.1 представлены результаты самолетного мониторинга уровня радиации выпавшего радиоактивного вещества на поверхность земли:  $^{134}\text{Cs}$  с периодом полураспада 2 года и  $^{137}\text{Cs}$  с периодом полураспада 30 лет. Измерения были проведены МЕХТ (Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологий Японии) и DOE (Министерство энергетики США) внутри 80 км зоны АЭС Фукусима-1 в период 6 – 29 апреля 2011 года [77].

**Results of airborne monitoring by MEXT and DOE**  
**(Total surface deposition of Cs-134 and Cs-137 inside 80 km zone of Fukushima Dai-ichi NPP)**

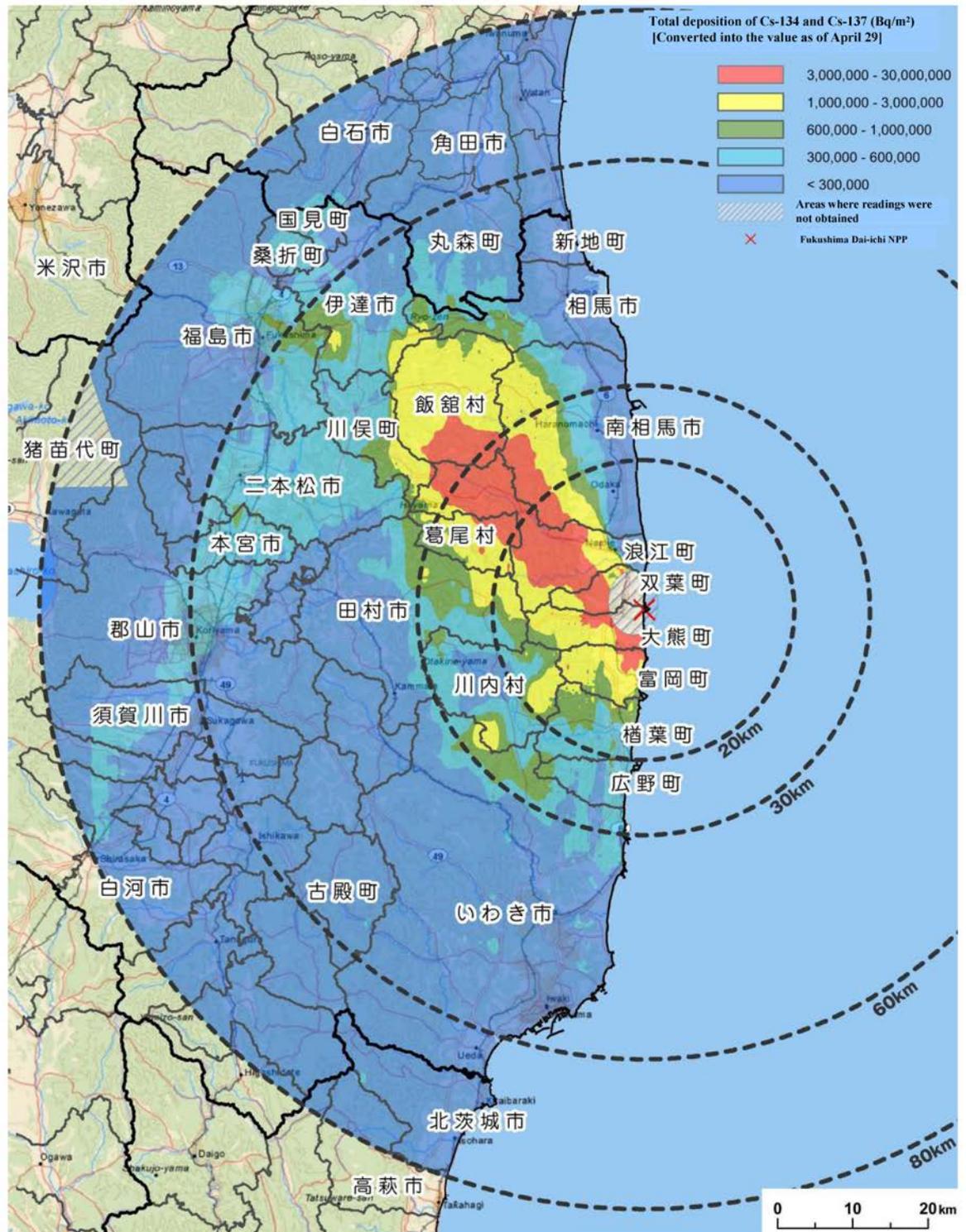


Рисунок 4.1. Общая площадь осаднения  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  внутри 80 км зоны АЭС Фукусима-1 [77].

Для расчетов интенсивности ионообразования в зоне повышенной радиоактивности использовалась практическая формула, показавшая свою достоверность при расчетах для ЧАЭС:

$$\nu = \frac{3,7E_p\sigma}{l\varepsilon_i} \quad (4.1)$$

где  $\nu$  – интенсивность ионообразования,  $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ;

$E_p$  – энергия распада изотопа, осредненная по его спектральному составу, эВ;

$\sigma$  – плотность загрязнения, Ки/км<sup>2</sup>;

$l$  – характерная длина пробега электронов бета-распада, см;

$\varepsilon_i$  – эффективный потенциал ионизации воздуха, эВ.

Данные: для изотопов Cs  $E_p \sim 6 \cdot 10^5$  эВ, для электронов бета-распада характерная длина пробега составляет  $\sim 1$  м,  $\varepsilon_i \sim 30$  эВ [26]. Таким образом, зона в  $3 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$  Бк·м<sup>-2</sup> соответствует интенсивности ионообразования  $6 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^6$   $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ;  $10^6 - 3 \cdot 10^6$  Бк·м<sup>-2</sup> соответствует  $2 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^5$   $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ;  $6 \cdot 10^5 - 10^6$  Бк·м<sup>-2</sup> соответствует  $1,8 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$   $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ;  $3 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^5$  Бк·м<sup>-2</sup> соответствует  $6 \cdot 10^3 - 1,8 \cdot 10^4$   $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ;  $3 \cdot 10^5$  Бк·м<sup>-2</sup>  $< 6 \cdot 10^3$   $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ .

Для наглядности ниже представлена такая диаграмма в соответствии с цветной палитрой на рисунке 4.1:



Т.е. значения загрязнения на рисунке 4.1 пропорциональны значениям интенсивности ионообразования и таким образом получаем распределение интенсивности ионообразования в 80 км зоне АЭС Фукусима-1.

Результаты, полученные для АЭС Фукусима-1 сравнивались с результатами для ЧАЭС [26, 76]. Для большей наглядности данные по последствиям двух аварий сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6.

	ЧАЭС ( $^{137}\text{Cs}$ )	Фукусима-1 ( $^{134}\text{Cs}$ и $^{137}\text{Cs}$ )	Фон
Интенсивность ионообразования, $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$	$\sim 10^3$	$\sim 10^6$	$\sim 10$
Время проведения измерений	Август 1986 г. (через 4 месяца)	Апрель 2011 г. (через 1,5 месяца)	_____
Плотность загрязнения, $\text{Ки}/\text{км}^2$	5	30	$< 0,3$

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  $^{137}\text{Cs}$ , в то время как для Фукусимы-1 двух  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ;
2. вымыванием радионуклидов осадками и степенью заглубления изотопов в почву на момент проведения измерений.

#### 4.4.3 Радиологические последствия аварии на АЭС Фукусима-1

На данный момент в научной литературе практически отсутствует информация о физико-химических процессах в приземном слое атмосферы связанных с радиационной аварией на АЭС Фукусима-1. Эти процессы, вызванные

повышенной радиоактивностью, могут приводить к повышению концентраций атомов, молекул и ионов, увеличению электрической проводимости атмосферы [26]. Известно, что повышенное содержание положительных аэроионов в воздухе пагубно сказывается на здоровье человека [78]. Автором, в работе [76], была рассчитана интенсивность ионообразования  $v \approx 10^6 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$  внутри 80 км зоны АЭС Фукусима-1 и показано что она превышает интенсивность ионообразования в районе Чернобыльской АЭС на три порядка. 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  $10^{16}$  Бк [79]. Основными радионуклидами, входящими в состав аварийного выброса были бета-радионуклиды:  $^{129}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ . 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 [26]. В зоне радиоактивного загрязнения АЭС Фукусима-1 обнаружили следы присутствия изотопов плутония:  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  [80, 81]. Данные химические элементы являются альфа радионуклидами и обладают значительным периодом полураспада от 14,4 до  $8 \cdot 10^{15}$  лет и жестким радиоизлучением [71].

Таблица 4.7. Данные об изотопах  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ .

Изотоп	Период полураспада (год)	Тип распада	Энергия частицы (МэВ)
$^{238}\text{Pu}$	87,7 г	$\alpha$	5,3583(1)
	$4,75 \cdot 10^{10}$ г	с.д.	5,465(1)
$^{239}\text{Pu}$	$2,410 \cdot 10^4$ г	$\alpha$	5,055
	$8 \cdot 10^{15}$ г	с.д.	5,076
$^{240}\text{Pu}$	$6,56 \cdot 10^3$ г	$\alpha$	5,0212(1)

	$1,14 \cdot 10^{11}$	с.д.	5,1237(1)
$^{241}\text{Pu}$	14,4	$\beta^-$	4,853(7)
	—	$\alpha$	4,8966(7)

Пояснения к таблице 1: тип распада – наиболее вероятный тип распада для данного радионуклида ( $\alpha$  – 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 [26]:

$$n_{\pm} = (3,7E_{\alpha}\sigma_{\alpha}/(l_{\alpha}\varepsilon\alpha_{\pm}))^{1/2}, \text{ см}^{-3} \quad (4.2)$$

где  $E_{\alpha}$  – энергия распада изотопа, эВ,  $\sigma_{\alpha}$  – плотность загрязнения, Ки/км<sup>2</sup>,  $l_{\alpha}$  – характерная длина пробега альфа частиц, см,  $\varepsilon$  – эффективный потенциал ионизации воздуха, эВ,  $\alpha_{\pm}$  – коэффициент рекомбинации ионов, см<sup>3</sup>/с.

По данным [81], наиболее распространенным источником радиационного загрязнения в районе АЭС Фукусима-1 является  $^{238}\text{Pu}$ , плотность загрязнения  $\sigma_{\alpha} \approx 4$  Ки/км<sup>2</sup>. Таким образом, концентрация легких аэроионов в приземном слое атмосферы  $n_{\pm} = 1,3 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>, при  $l_{\alpha} = 4,3$  см,  $\varepsilon = 30$  эВ,  $\alpha_{\pm} \approx 10^{-7}$ , см<sup>3</sup>/с [82].

После аварийного выброса на АЭС Фукусима-1 ( $10^{17}$  Бк  $^{131}\text{I}$  и  $10^{16}$  Бк  $^{137}\text{Cs}$ ), 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 [83].

Свободные электроны практически не оказывают влияния на физические характеристики тропосферы, поскольку время жизни в атмосфере составляет  $10^{-10}$  –  $10^{-11}$  с. Под воздействием радиоактивности происходит ионизация атмосферы, т.е. отрыв электрона от молекулы (атома) воздуха. На состояние атмосферной

электрической проводимости также влияет изменение газового состава атмосферы, которое можно описать уравнением баланса ионов:

$$dn_{\pm}/dt + u_{\infty} \Delta n_{\pm} = v - \alpha n_{+} n_{-} - \beta_{\pm} n_{\pm} N_a + \mu_{\pm} \cdot d(n_{\pm} E_{\pm})/dZ + d(K_T \cdot dn_{\pm}/dZ)/dZ \quad (4.3)$$

где  $u_{\infty}$  – скорость ветра,  $n_{\pm}$  – концентрация аэроионов разных знаков,  $\mu_{\pm}$  – электрическая подвижность,  $E_{\pm}$  – напряженность электрического поля,  $K_T$  – коэффициент турбулентной диффузии,  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации ионов,

Существует три основных вида профилей напряженности электрического поля  $E$ . При устойчивой стратификации атмосферы наблюдается экспоненциальный спад  $E$  от 10 В/м на уровне 6 – 10 км до 100 В/м. При неустойчивой стратификации наблюдается максимум  $E \approx 100 \dots 200$  В/м. При нейтральной стратификации атмосферы характерно однородное распределение  $E$  (70 В/м) по высоте 0 – 4 км, с понижением до нуля в слое 4 – 6 км.

Наибольший вклад в электрическую проводимость атмосферы дают легкие аэроионы за счет большей подвижности  $\mu_{\pm} = 0,5 \dots 5$  см<sup>2</sup>/(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  $\mu_{+} = 1,3$  см<sup>2</sup>/(В·с)  $\mu_{-} = 1,8$  см<sup>2</sup>/(В·с),  $q = ez = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл [26, 84].

Таблица 4.8. Сравнение концентраций аэроионов и электрической проводимости полученных результатов.

		ЧАЭС	АЭС Фукусима-1	Нормируемые показатели аэроионного состава воздуха [85]	Фон значения
Концентрация аэроионов,	легкие	$(7 \pm 2) \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10 \pm 5 \cdot 10^4$	–
	средние	$10^3 - 10^4$	–	–	–

см <sup>-3</sup>	тяжелые	(3±2) 10 <sup>4</sup>	–	–	–
Биполярная электрическая проводимость атмосферы, фСм/м		1,4·10 <sup>3</sup>	3,8·10 <sup>4</sup>	–	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. Разницу можно объяснить, как заглублением радионуклидов в почвы, так и выносом за пределы исследуемой территории. Полученные результаты представляют интерес в исследовании образования «респирабельной» фракции аэрозольных частиц, которые практически полностью оседающих в легких и бронхах. Кроме этого, дополнительным маркером радиоактивности может служить изменение электрической проводимости в исследуемой зоне.

#### **4.5 Выводы по главе «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.»**

1. 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. Это объясняется тем, что не были учтены все выброшенные радионуклиды, представленные в таблице 4.2.

2. 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.

3. Необходимо отметить, что в рассматриваемом регионе Институтом Оптики Атмосферы СО РАН проводятся систематические комплексные исследования пространственно-временной изменчивости микрофизического и химического состава аэрозоля [86, 87]. Ионный состав аэрозоля в зоне Японского моря до 80% определяется континентальными источниками. А поскольку ионы являются центрами конденсации для образования жидкокапельного аэрозоля, то над загрязненными участками будет повышенная концентрация аэрозоля, в том числе и радиоактивного, что может существенно увеличить концентрацию маркеров. Это позволит обнаруживать меньшие локальные участки с повышенным уровнем загрязнения дистанционными методами.

4. Как показали наблюдения в [83]: изменение электрической проводимости атмосферы на некотором удалении от зоны повышенного уровня радиоактивности может служить дистанционным «маркером» радиоактивности, что позволит существенно увеличить информативность системы мониторинга распространения радиоактивных выбросов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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 [52].

4. Впервые обоснована возможность использования в качестве «маркера» повышенной радиоактивности в шлейфе выброса АЭС гидроксила (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 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 км<sup>3</sup>; 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 дополнительный 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Список радиационных аварий. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_радиационных\\_аварий](http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_радиационных_аварий) (дата обращения: 29.03.2012)
2. Database of Radiological Incidents and Related Events compiled by Wm. Robert Johnston last modified 20 January 2014. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/index.html> (дата обращения: 28.03.2014)
3. Jean-Claude Nenot. Radiation accidents over the last 60 years // J. Radiol. Prot. – 2009. – V. 29. – P. 301 – 320.
4. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Международная шкала ядерных событий. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная\\_шкала\\_ядерных\\_событий](http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная_шкала_ядерных_событий) (дата обращения: 30.03.2013)
5. Официальный сайт Администрации Томской области. [Электронный ресурс]: Новости. Режим доступа: <http://www.aes.tomsk.ru/news-5758.html> (дата обращения: 13.03.2014)
6. Официальный сайт Администрации Томской области. [Электронный ресурс]: Новости. Режим доступа: <http://www.aes.tomsk.ru/news-5637.html> (дата обращения: 13.01.2014)
7. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Маяк (производственное объединение). Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Маяк\\_\(производственное\\_объединение\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Маяк_(производственное_объединение)) (дата обращения: 31.03.2012)
8. Долгих С.О., Власов А.А., Малышкин А.И. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки сибирского химического комбината. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://conf.atomsib.ru/archive/conf2010/section2/7.doc> (дата обращения 1.04.2012)

9. Колотков Г.А., Пенин С.Т. Радиометр как перспективный прибор мониторинга радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии. Матер. V Всерос. конф. мол. уч. 2012. С. 558–560.

10. Чистякова Л.К. Дистанционные методы обнаружения радиоактивных аномалий в приземной атмосфере. // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14. – №5. – С. 465 – 472.

11. Набиев Ш.Ш. Современные тенденции развития методов дистанционного обнаружения радиоактивных и высокотоксичных веществ // Вестник РАЕН. Физика. – 2012. – № 1. – С. 14 – 25.

12. Боярчук К.А., Карелин А.В., Макриденко Л.А. Перспективы мониторинга из космоса радиоактивных загрязнений на поверхности Земли и в нижних слоях атмосферы // Вопросы электромеханики. – 2005. – Т. 102. – С. 183 –209 .

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

14. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. М., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник.–М.: Энергоатомиздат, 1982. 146 с.

15. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Ядерный реактор. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерный\\_реактор](http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерный_реактор) (дата обращения 21.03.2014)

16. Бабаев Н.С., Демин В.Ф., Ильин Л.А. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда / Под ред. А.П. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 1984. 312 с.

17. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Йод-131. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Йод-131> (дата обращения 02.02.2014)

18. Penin S.T., Kolotkov G.A., Chistyakova L.K. Generation of atomic hydrogen in the air under action of beta decay of radioactive elements // Proceedings of SPIE. – 2004. – V. 5743. – P. 372 – 379.
19. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика: Учеб. Для вузов. В 2 кн. Кн. 1. Физика атомного ядра. Ч. 1. Свойства нуклонов, ядер и радиоактивных излучений. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 376 с.
20. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Изд – во физ. – мат. литературы, –1966.– 702 с.
21. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Число Авогадро. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Авогадро](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Авогадро) (дата обращения 02.03.2014)
22. Окабэ Х. Фотохимия малых молекул: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981, 504 с.
23. Бойко В.И., Шаманин И.В., Шепотенко Н.А., Юшков Ю.Г. Формирование аномального атмосферного образования при поступлении в окружающую среду примеси, обогащенной радионуклидами // Известия вузов. Физика. – 1997. – Т. 40. – №6. – С. 111.
24. Квилидзе В.А., Красильников С.С. Введение в физику атомных столкновений – М.: Изд–во Московского унив–та, 1985.
25. Kolotkov G.A., Penin S.T. and Chistyakova L.K. Degradation of fast electrons energy and atomic hydrogen generation in an emission plume from atomic power stations // Proceedings of SPIE. – 2005. – V. 6160. – Chapter 2. – P. 84 – 96.
26. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере // Гидрометеоиздат. 1992. 312 с.
27. Боярчук К.А., Карелин А.В., Ломоносов А.М. Особенности ионизации атмосферного воздуха при радиоактивном загрязнении // ЖТФ. – 2000. – Т. 70. – Вып.1. – С. 139 – 142.
28. Колотков Г.А., Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Метод расчета воздействия радиации на атмосферу // V Международная школа молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» – 2006. – Томск.

29. Никеров В.А., Шолин Г.В. Кинетика деградационных процессов. М.: Энергоатомиздат. 1985. 136 с.
30. Spencer L.V., Fano U. Energy spectrum resulting from electron slowing down // *Phys. Rev.* – 1954. – V. 93. – № 6. – P. 1172 – 1181.
31. Коновалов В.П., Сон Э.Е. Деградационные спектры электронов в газах // *Химия плазмы*. М. Энергоатомиздат, 1987. Вып. 14. С. 194–227.
32. Fowler R.H. Contributions on the theory of the motion of  $\alpha$ -particles through matter. Part 2. Ionizations // *Proc. Camb. Philos. Soc.* – 1923. – V. 21. – № 2. – P. 531 – 540.
33. Symposium on the Distributions of Secondary Electrons from Ionizing Collisions, *Radiation Research*, Volume 64, Issue 1, October 1975.
34. Бета- и антинейтринное излучение радиоактивных ядер. Справочник. Под ред. Рубцова П.М. Энергоатомиздат, 1989.
35. Колотков Г.А., Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Возможность определения активности выбросов АЭС по микроволновому излучению на частоте 1420 МГц // *Оптика атмосферы и океана*. – 2006. – Т. 19. – № 9. – С. 793 – 797.
36. Колотков Г.А., Пенин С.Т. Расчет мощности излучения на частотах 1420 и 1665 – 1667 МГц из шлейфа штатных радиоактивных выбросов радиохимического завода. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27. – № 02. – С. 164 – 166.
37. Князев Б.А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд. Конспект лекций. 2000 г. С.163.
38. Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Формирование и динамика излучений атомарного водорода в атмосфере и шлейфе выбросов ядерно-перерабатывающих предприятий // *Оптика атмосферы и океана*. – 1997. – Т. 10. – №1. – С. 73 – 81.
39. Боярчук К.А., Кононов Е.Н., Ляхов Г.А. Радиолокационное обнаружение областей локальной ионизации в приземных слоях атмосферы. // *Письма в ЖТФ*. – 1993. – Т. 19. – Вып. 6. – С. 67 – 72.
40. Атмосфера. Справочник. / Под ред. Седунова Ю.С. –М.: Гидрометеиздат. 1991. 502 с

41. Tiwary, A., Colls, J. Air Pollution: Measurement, Modelling and Mitigation. 3th edition. Routledge, Taylor & Francis group, Abingdon, Oxon, UK. 2010. P.528.
42. Rohrer F., Berresheim H. Strong correlation between levels of tropospheric hydroxyl radicals and solar ultraviolet radiation. // Nature. – 2006. – V. 442. – P. 184 – 187, doi:10.1038/nature04924.
43. Li Sh., Matthews J., Sinha Am. Atmospheric hydroxyl radical production from electronically excited NO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. // Science. – 2008. – 319 (5870). – P. 1657 – 1660.
44. 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.jenvrad.2012.07.004.
45. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2nd ed. John Wiley & Sons Inc. 2006. P.1232.
46. Plane J. Lecture: Chemistry of the Earth's Atmosphere. A General Introduction. ERCA. Grenoble 2009.
47. Sander S.P., et al., 2011. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies. Evaluation Number 17. JPL Publication 10–6, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.
48. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Радиолиния нейтрального водорода. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиолиния\\_нейтрального\\_водорода](http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиолиния_нейтрального_водорода) (дата обращения: 28.06.14)
49. Astronet. [Электронный ресурс]: Радиолиния водорода 21 см. Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1188602> (дата обращения: 2.02.11)
50. Haar D.T., Pelling M.A. Interstellar hydroxyl and water masers and formaldehyde masers and dasars // Rep. Progr. Phys. – 1974. – 37 (4). P. 481 – 561.
51. Протасевич Е.Т. Метод обнаружения радиоактивных загрязнений среды по свечению воздуха // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7. – № 5. – С. 697 – 700.

52. 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. – 16. – P. 225 – 260.

53. Якубов В.П., Ковтун С.Н., Лосев Д.В. Контроль уровня радиоактивности по изменению интенсивности флуктуаций фонового радиотеплового излучения // Журнал радиоэлектроники. – 2000. – № 7. – С.

54. Kolotkov G.A., Penin S.T. Computation of radiation power from standard radioactive emissions of radiochemical plant at frequencies of 1420 and 1665–1667 MHz // Atmospheric and Oceanic Optics. – July 2014. – Volume 27. – Issue 4. – P. 320 – 323. DOI: 10.1134/S1024856014040083.

55. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС / Под ред. К.П. Махонько Л.: Гирометеоиздат. 1990. 266 с.

56. Маргулова Т.Х. Атомные электростанции М. Издат 1994 г. 296 с.

57. Метеорология и атомная энергия / Под. ред. Бызова Н.Л. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 509 с.

58. Kolotkov G.A., Penin S.T., Chistyakova L.K. Effect of atmospheric stratification on radiation intensity on frequency 1420 MHz from the emission plume of atomic power stations // XIII International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”. Abstracts. Tomsk: IAO SB RAS. 2006. 208 p. P. 118.

59. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Паргийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. Наука, Москва 1973, 415 с.

60. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]: Горизонт. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Горизонт> (дата обращения: 28.06.13)

61. 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 // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XX Международного

симпозиума [Электронный ресурс]. — Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2014. — 1, D350 – D354. ISBN 978-5-94458-145-7.

62. ITU, 2008. Radio Regulations, Edition of 2008, vol. 3.

63. МИНКОМСВЯЗЬ РОССИИ. ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ПОСТАНОВЛЕНИЕ от 21 декабря 2011 г. №1049-34 Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://minsvyaz.ru/ru/doc/index.php?id\\_4=701](http://minsvyaz.ru/ru/doc/index.php?id_4=701) (дата обращения: 8.03.13)

64. Острековский В.А. Эксплуатация атомных станций. М.: Энергоатомиздат, 1999. 987с.

65. International Atomic Energy Agency. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CNPP2010\\_CD/countryprofiles/Japan/Japan2004.htm#\\_ftn1](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CNPP2010_CD/countryprofiles/Japan/Japan2004.htm#_ftn1) (дата обращения 19.03.2012)

66. Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.irsn.fr/EN/news/Documents/IRSN\\_fukushima-radioactivity-released-assessment-EN.pdf](http://www.irsn.fr/EN/news/Documents/IRSN_fukushima-radioactivity-released-assessment-EN.pdf) (дата обращения 19.03.2012)

67. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.zamg.ac.at/docs/aktuell/Japan2011-03-24\\_1600\\_E.pdf](http://www.zamg.ac.at/docs/aktuell/Japan2011-03-24_1600_E.pdf) (дата обращения 19.03.2014)

68. International Atomic Energy Agency. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.powrea.htm?country=JP> (дата обращения 15.05.2012)

69. World Nuclear Association. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.world-nuclear.org/info/inf79.html> (дата обращения 19.03.2012)

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

71. Palatine high school. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.phs.d211.org/science/smithcw/AP%20Chemistry/Posted%20Tables/Table%20of%20Isotope%20Decays.pdf> (дата обращения 19.03.2012)
72. Колотков Г.А., Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Дистанционный контроль радиоактивных загрязнений в шлейфе выбросов АЭС и РХЗ в атмосферу. // Технология и автоматизация атомной энергетики: сб.ст. – Северск: Изд. СГТИ. 2005г. С. 71-76.
73. Корниенко В.И., Смирнов В.В. Исследование стимулированной конверсии газ – частица в атмосфере // Тр. ИЭМ. – 1989. – Вып. 51. – С.
74. Смирнов В.В. Деформации ионного, газового и аэрозольного состава воздуха при его радиоактивном загрязнении // Тр. ИЭМ. – 1992. – Вып. 19. – С.
75. Боярчук К.А., Свирко Ю.П. Оценка концентрации элементарных ионов при радиоактивном загрязнении тропосферы // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22. – Вып. 14. – С. 47 – 52.
76. Колотков Г.А., Пенин С.Т. Интенсивность ионообразования в районе аварийного выброса АЭС «Фукусима-1» // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 06. – С. 491 – 494.
77. Monitoring information of environmental radioactivity level. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://radioactivity.mext.go.jp/en/1280/2011/05/1304797\\_0506.pdf](http://radioactivity.mext.go.jp/en/1280/2011/05/1304797_0506.pdf) (дата обращения: 30.11.2011)
78. Скипетров В.П. Аэроионы и жизнь. Саранск: Тип. Красный октябрь, 2005. – 134 с.
79. Brumfiel Geoff, Fallout forensics hike radiation toll // Nature. – 2011. – V. 478. – P. 435 – 436.
80. Zheng, J., Tagami K., Watanabe Y., Uchida Sh., Aono T., Ishii N., Yoshida S., Kubota Y., Fuma Sh., Ihara S. // Sci. Rep. – 2012. V. 2. – P. 304.
81. Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

[http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_expertise/surete/Documents/IRSN\\_Rapport\\_Fukushima-1-an-apres\\_032012.pdf](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/surete/Documents/IRSN_Rapport_Fukushima-1-an-apres_032012.pdf) (дата обращения: 31.03.2012)

82. Колотков Г.А. Радиологические последствия аварии на АЭС Фукусима – 1 // Известия Вузов Физика. – 2012. – Т.55. – № 8/3. – С. 193 – 194.

83. Takeda, M., Yamauchi M., Makino M., Owada T. Initial effect of the Fukushima accident on atmospheric electricity // Geophys. Res. Lett. – 2011. – V. 38. – L15811. doi:10.1029/2011GL048511.

84. Колотков Г.А. Электрическая проводимость воздуха в районе АЭС Фукусима – 1 // Материалы XVIII Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" 2012. С. D209 – D212.

85. Постановление главного государственного санитарного врача РФ от 22.04.2003 N 64 "О введении в действие Санитарных правил и нормативов СанПиН 2.2.4.1294-03" (вместе с "СанПиН 2.2.4.1294-03. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы", утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 18.04.2003) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 07.05.2003 N 4511) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=42155;dst=0;ts=5E4B10438DB2BB838808056A50FFABD6> (дата обращения: 04.05.2012)

86. Сакерин С.М., Павлов А.Н., Букин О.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Полькин В.В., Столярчук С.Ю., Турчинович Ю.С., Шмирко К.А., Майор А.Ю. Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк-океан» (Приморье и Японское море). Часть 1. Вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы и вертикальные профили // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 8. – С. 691 – 699.

87. Козлов В.С., Полькин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В. Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк-океан» (Приморье и Японское море). Часть 3. Микрофизические характеристики и ионный состав аэрозоля в приземном

и приводном слоях // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 11. – С. 967 – 977.

## Приложение А Каталог суммарных $\beta$ спектров радионуклидов

$^{85}\text{Kr}$

E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$
0	$2,19 \cdot 10^{-3}$	229	$2,02 \cdot 10^{-3}$	458	$1,25 \cdot 10^{-3}$
11	$2,19 \cdot 10^{-3}$	240	$2,00 \cdot 10^{-3}$	469	$1,18 \cdot 10^{-3}$
23	$2,17 \cdot 10^{-3}$	252	$1,98 \cdot 10^{-3}$	481	$1,11 \cdot 10^{-3}$
34	$2,16 \cdot 10^{-3}$	263	$1,97 \cdot 10^{-3}$	492	$1,03 \cdot 10^{-3}$
46	$2,15 \cdot 10^{-3}$	275	$1,95 \cdot 10^{-3}$	504	$9,56 \cdot 10^{-4}$
57	$2,14 \cdot 10^{-3}$	286	$1,93 \cdot 10^{-3}$	515	$8,79 \cdot 10^{-4}$
69	$2,14 \cdot 10^{-3}$	298	$1,90 \cdot 10^{-3}$	527	$8,01 \cdot 10^{-4}$
80	$2,13 \cdot 10^{-3}$	309	$1,88 \cdot 10^{-3}$	538	$7,22 \cdot 10^{-4}$
92	$2,12 \cdot 10^{-3}$	321	$1,84 \cdot 10^{-3}$	550	$6,44 \cdot 10^{-4}$
103	$2,12 \cdot 10^{-3}$	332	$1,81 \cdot 10^{-3}$	561	$5,66 \cdot 10^{-4}$
114	$2,11 \cdot 10^{-3}$	343	$1,77 \cdot 10^{-3}$	572	$4,89 \cdot 10^{-4}$
126	$2,11 \cdot 10^{-3}$	355	$1,73 \cdot 10^{-3}$	584	$4,15 \cdot 10^{-4}$
137	$2,10 \cdot 10^{-3}$	366	$1,69 \cdot 10^{-3}$	595	$3,43 \cdot 10^{-4}$
149	$2,09 \cdot 10^{-3}$	378	$1,65 \cdot 10^{-3}$	607	$2,74 \cdot 10^{-4}$
160	$2,09 \cdot 10^{-3}$	389	$1,60 \cdot 10^{-3}$	618	$2,11 \cdot 10^{-4}$
172	$2,08 \cdot 10^{-3}$	401	$1,55 \cdot 10^{-3}$	630	$1,53 \cdot 10^{-4}$
183	$2,07 \cdot 10^{-3}$	412	$1,50 \cdot 10^{-3}$	641	$1,02 \cdot 10^{-4}$
195	$2,06 \cdot 10^{-3}$	424	$1,44 \cdot 10^{-3}$	653	$6,02 \cdot 10^{-5}$
206	$2,04 \cdot 10^{-3}$	435	$1,38 \cdot 10^{-3}$	664	$2,80 \cdot 10^{-5}$
218	$2,03 \cdot 10^{-3}$	447	$1,32 \cdot 10^{-3}$	676	$7,31 \cdot 10^{-6}$

$^{133}\text{Xe}$ 

E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$
0	0,645	138	0,358	271	0,0656
17	0,625	156	0,316	288	0,0404
35	0,592	173	0,274	306	0,0206
52	0,557	190	0,232	323	0,0007
69	0,521	208	0,192	329	$3,99 \cdot 10^{-5}$
86	0,482	225	0,153	334	$1,79 \cdot 10^{-5}$
104	0,442	242	0,117	340	$4,54 \cdot 10^{-6}$
121	0,401	254	0,0953		

 $^{131}\text{I}$ 

E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$
0	0,343	202	0,237	403	0,0885
40	0,335	242	0,206	444	0,0617
81	0,317	282	0,175	484	0,0378
121	0,294	323	0,145	524	0,0185
161	0,267	363	0,117	790	$2,45E-6$

 $^{41}\text{Ar}$ 

E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$
0	0,0633	457	0,131	914	0,0441
42	0,0758	498	0,128	955	0,0342
83	0,089	540	0,124	997	0,025
125	0,1	581	0,118	1038	0,0168
166	0,11	623	0,111	1080	0,00993
208	0,118	664	0,103	1121	0,00466
249	0,124	706	0,0946	1163	0,00139
291	0,128	748	0,0851	1204	$4,5E-4$

332	0,131	789	0,0751	1246	4,45E-4
374	0,133	831	0,0648		
415	0,133	872	0,0544		

<sup>134</sup>Cs<sub>79</sub>

E, кэВ	N <sub>β</sub> (E)	E, кэВ	N <sub>β</sub> (E)	E, кэВ	N <sub>β</sub> (E)
0	1,04·10 <sup>-2</sup>	485	4,43·10 <sup>-4</sup>	969	4,43·10 <sup>-8</sup>
24	6,93·10 <sup>-3</sup>	509	3,44·10 <sup>-4</sup>	993	4,11·10 <sup>-8</sup>
48	4,07·10 <sup>-3</sup>	533	2,53·10 <sup>-4</sup>	1018	3,80·10 <sup>-8</sup>
73	2,34·10 <sup>-3</sup>	557	1,72·10 <sup>-4</sup>	1042	3,49·10 <sup>-8</sup>
97	1,96·10 <sup>-3</sup>	582	1,05·10 <sup>-4</sup>	1066	3,18·10 <sup>-8</sup>
121	1,92·10 <sup>-3</sup>	606	5,23·10 <sup>-5</sup>	1090	2,87·10 <sup>-8</sup>
145	1,87·10 <sup>-3</sup>	630	1,75·10 <sup>-5</sup>	1115	2,57·10 <sup>-8</sup>
170	1,81·10 <sup>-3</sup>	654	2,79·10 <sup>-6</sup>	1139	2,27·10 <sup>-8</sup>
194	1,74·10 <sup>-3</sup>	678	2,07·10 <sup>-6</sup>	1163	1,99·10 <sup>-8</sup>
218	1,65·10 <sup>-3</sup>	703	1,69·10 <sup>-6</sup>	1187	1,71·10 <sup>-8</sup>
242	1,56·10 <sup>-3</sup>	727	1,35·10 <sup>-6</sup>	1211	1,45·10 <sup>-8</sup>
267	1,46·10 <sup>-3</sup>	751	1,03·10 <sup>-6</sup>	1236	1,21·10 <sup>-8</sup>
291	1,35·10 <sup>-3</sup>	775	7,45·10 <sup>-7</sup>	1260	9,78·10 <sup>-9</sup>
315	1,24·10 <sup>-3</sup>	800	5,02·10 <sup>-7</sup>	1284	7,67·10 <sup>-9</sup>
339	1,13·10 <sup>-3</sup>	824	3,05·10 <sup>-7</sup>	1308	5,77·10 <sup>-9</sup>
363	1,01·10 <sup>-3</sup>	848	1,61·10 <sup>-7</sup>	1333	4,10·10 <sup>-9</sup>
388	8,90·10 <sup>-4</sup>	872	7,59·10 <sup>-8</sup>	1357	2,69·10 <sup>-9</sup>
412	7,74·10 <sup>-4</sup>	897	5,35·10 <sup>-8</sup>	1381	1,55·10 <sup>-9</sup>
436	6,60·10 <sup>-4</sup>	921	5,04·10 <sup>-8</sup>	1405	7,04·10 <sup>-10</sup>
460	5,49·10 <sup>-4</sup>	945	4,74·10 <sup>-8</sup>	1430	1,80·10 <sup>-10</sup>

$^{137}\text{Cs}_{82}$ 

E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$	E, кэВ	$N_{\beta}(E)$
0	$3,41 \cdot 10^{-3}$	391	$9,33 \cdot 10^{-4}$	782	$8,78 \cdot 10^{-6}$
20	$3,37 \cdot 10^{-3}$	411	$7,30 \cdot 10^{-4}$	802	$7,39 \cdot 10^{-6}$
39	$3,27 \cdot 10^{-3}$	430	$5,36 \cdot 10^{-4}$	821	$6,15 \cdot 10^{-6}$
59	$3,18 \cdot 10^{-3}$	450	$3,56 \cdot 10^{-4}$	841	$5,06 \cdot 10^{-6}$
78	$3,09 \cdot 10^{-3}$	469	$2,06 \cdot 10^{-4}$	860	$4,11 \cdot 10^{-6}$
98	$3,00 \cdot 10^{-3}$	489	$9,77 \cdot 10^{-5}$	880	$3,30 \cdot 10^{-6}$
117	$2,92 \cdot 10^{-3}$	508	$4,73 \cdot 10^{-5}$	899	$2,60 \cdot 10^{-6}$
137	$2,83 \cdot 10^{-3}$	528	$4,25 \cdot 10^{-6}$	919	$2,01 \cdot 10^{-6}$
156	$2,74 \cdot 10^{-3}$	547	$3,89 \cdot 10^{-6}$	939	$1,53 \cdot 10^{-6}$
176	$2,65 \cdot 10^{-3}$	567	$3,54 \cdot 10^{-5}$	958	$1,14 \cdot 10^{-6}$
196	$2,54 \cdot 10^{-3}$	587	$3,22 \cdot 10^{-5}$	978	$8,22 \cdot 10^{-7}$
215	$2,43 \cdot 10^{-3}$	606	$2,90 \cdot 10^{-5}$	997	$5,78 \cdot 10^{-7}$
235	$2,31 \cdot 10^{-3}$	626	$2,61 \cdot 10^{-5}$	1017	$3,92 \cdot 10^{-7}$
254	$2,18 \cdot 10^{-3}$	645	$2,33 \cdot 10^{-5}$	1036	$2,56 \cdot 10^{-7}$
274	$2,04 \cdot 10^{-3}$	665	$2,07 \cdot 10^{-5}$	1056	$1,59 \cdot 10^{-7}$
293	$1,89 \cdot 10^{-3}$	684	$1,83 \cdot 10^{-5}$	1075	$9,30 \cdot 10^{-7}$
313	$1,72 \cdot 10^{-3}$	704	$1,60 \cdot 10^{-5}$	1095	$5,04 \cdot 10^{-8}$
332	$1,53 \cdot 10^{-3}$	723	$1,40 \cdot 10^{-5}$	1115	$2,44 \cdot 10^{-8}$
352	$1,34 \cdot 10^{-3}$	743	$1,21 \cdot 10^{-5}$	1134	$9,67 \cdot 10^{-9}$
372	$1,14 \cdot 10^{-3}$	763	$1,03 \cdot 10^{-5}$	1154	$2,28 \cdot 10^{-9}$