



ФЕДЕРАЛЬНОЕ КАЗЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ «ГЕОДЕЗИЯ»



Экз. № 1

141292, Московская область,  
г. Красноармейск  
проспект Испытателей, 14  
Тел. 8-(496)-993-41-47  
Тел./факс 8-(496)-523-36-11  
приемная 8-(496)-523-54-99  
e-mail: info@niigeo.ru

№ \_\_\_\_\_

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора –  
заместитель директора  
по научной работе

ФКП «НИИ «Геодезия»,  
К. Т. н.

М. И. Сидоров

«13» января 2017 года



О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, доцента Викторова Александра Александровича на диссертационную работу Тимофеева Юрия Сергеевича, выполненную на тему: «Гармонизация результатов ЭПР-дозиметрии зубной эмали жителей прибрежных районов реки Теча» и представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.02. – «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ядерный топливно-энергетический комплекс)»

*Цели и задачи диссертационной работы.*

Целью работы является гармонизация измерений доз, полученных в ЭПР исследованиях эмали зубов у жителей прибрежной зоны реки Теча.

Для достижения данной цели автор решил следующие задачи:

1. Разработан единый алгоритм для определения показателей качества методик ЭПР дозиметрии: критическая доза, предел детектирования, неопределенность оценки дозы.

2. Реконструировано распределение фоновых доз в эмали зубов по экспериментальным данным, полученным в результате измерений необлученных образцов и оценить систематические погрешности ЭПР методик.

3. Гармонизированы данные измерений доз у жителей прибрежных районов реки Теча с помощью найденных систематических погрешностей.

*Научная новизна работы.*

Разработан алгоритм для оценки показателей качества ЭПР методик при измерении доз в эмали зубов человека. Применен впервые

статистический метод моментов для реконструкции фоновых доз из экспериментальных данных ЭПР измерений эмали зубов, близких к пределу детектирования, реконструировано распределение фоновых доз для сельских жителей Уральского региона. Проведен впервые анализ гармонизированных данных ЭПР измерений сельских жителей прибрежных районов реки Теча.

#### *Практическая значимость работы.*

В диссертации предложен единый алгоритм для оценки показателей качества методики ЭПР дозиметрии, который был реализован в компьютерной программе (свидетельство о государственной регистрации № 2014610805). Программа позволяет любой лаборатории оценивать показатели качества для своей ЭПР методики и отслеживать их изменение в процессе многолетней эксплуатации оборудования. Использование разработанной программы в разных лабораториях позволит сравнивать показатели качества, в используемых ими методиках. Найденные с помощью программы оценки были использованы для гармонизации дозиметрических данных, полученных разными ЭПР лабораториями в исследованиях на реке Теча.

Оценены параметры логнормального распределения фоновых доз, что позволило получить значение дозового порога (предела индивидуализации), ниже которого результаты измерений нельзя достоверно отличить от фоновых уровней. ЭПР дозы ниже предела индивидуализации принципиально нельзя использовать для определения индивидуальных техногенных доз.

Уточнены оценки систематических ошибок для 12-ти различных методик ЭПР дозиметрии на зубной эмали. Полученные несмещенные оценки доз в эмали зубов жителей прибрежных районов реки Теча, которые могут быть в дальнейшем использованы для валидации доз внешнего облучения, рассчитанных на основе дозиметрической системы реки Теча.

#### *Методология и методы исследования.*

Для построения стохастической модели, имитирующей реальный ЭПР эксперимент, были исследованы данные межлабораторного эксперимента с помощью статистического анализа для выявления зависимостей между различными физическими величинами.

Задача по выделению фонового распределения доз из измерений необлученных образцов была решена с помощью статистического метода моментов при экспертном допущении о форме этого распределения и модели измерений. Система метода моментов для определения параметров фонового распределения была решена численно с использованием математического пакета «Mathematica».

Построенный единый алгоритм по определению показателей качества методики ЭПР дозиметрии был реализован с помощью метода Монте-Карло в компьютерной программе, разработанной в среде C++ Builder 6. Для генерации псевдослучайных чисел, необходимых для получения реализаций различных распределений, использовался алгоритм из встроенной в среду разработки библиотеки stdlib.h.

На защиту автор выносит следующие положения:

1. Единый алгоритм для определения показателей качества методик ЭПР дозиметрии, включая критическую дозу, предел детектирования, неопределенность оценки дозы. Для исследуемых ЭПР методик критические значения доз (DC) находят в диапазоне 48 - 233 мГр, пределы детектирования (LDD) – от 94 мГр до 635 мГр.

2. Реконструировано распределение фоновых доз из измерений, полученных в результате ЭПР эксперимента на необлученных образцах. При экспертном допущении о логнормальности распределения ( $\text{LogN}[m,s]$ ) фоновых доз, оценены параметры этого распределения для сельских жителей Южного Урала:  $m = 3.9$  и  $s = 0.7$ . Учитывая средний возраст донора, получена средняя фоновая доза – 1 мГр/год.

3. Создана программа ЭВМ по стохастической имитации ЭПР эксперимента, реализующая предложенный универсальный метод и позволяющая оценить показатели качества ЭПР методики и пределы индивидуализации (свидетельство о государственной регистрации № 2014610805).

4. Гармонизированы данные доз в эмали зубов у жителей прибрежных районов реки Теча. Для сел, расположенных дальше 54 км по течению от места сброса отходов, среднее превышение фонового уровня облучения для сельских жителей Уральского региона составляет 65 мГр и попадает в 95 % доверительный интервал для распределения фоновых доз.

#### *Содержание работы.*

Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных первоисточников и приложения.

Во введении обосновывается актуальность и научная новизна работы, поставлена цель диссертационного исследования, приведены публикации по теме диссертации, описана структура работы и кратко изложено ее содержание. Также описана общая проблема последствий радиоактивного загрязнения, методика использования ЭПР как ретроспективного метода оценки доз, полученных в результате техногенных катастроф, и имеющиеся экспериментальные данные.

Первая глава посвящена обзору научной литературы и состоянию изучаемой проблемы. Рассматриваются крупные радиационные аварии и становление норм радиационной безопасности. Описывается радиационная ситуация, сложившаяся на реке Тече, и существующие подходы к оценке доз, полученных жителями прибрежных районов. Обосновывается важность ретроспективных исследований, в том числе, с помощью метода Электронно-Парамагнитного Резонанса (ЭПР). Даётся описание метода ЭПР дозиметрии и обсуждаются проблемы объединения результатов измерений, полученных разными методами, в отсутствие метрологического стандарта. Рассмотрена аналитическая модель (Wieser, 2008) неопределенности ЭПР измерений, на основе которой возможны оценки показателей качества методов ЭПР дозиметрии (критическая амплитуда/доза – AC/DC, предел детектирования амплитуды/дозы – LDA/LDD).

Во второй главе диссертации представлено описание материалов и методов. В основу работы по построению алгоритма для оценки показателей

качества ЭПР методик легли экспериментальные данные, полученные при интеркалибровке трех ЭПР лабораторий: HMGU (Мюнхен, Германия), ISS (Рим, Италия) и IMP (Институт Физики Металлов, Екатеринбург, Россия). Каждая лаборатория, согласно собственному протоколу, подготовила однородную смесь из эмали зубов. Смесь в дальнейшем была разделена на 30 порций (по 95-110 мг каждая). Порции дооблучались согласно общей схеме, принятой в калибровочном эксперименте. Каждая порция трижды повторно измерялась методом ЭПР; результаты усреднялись и нормировались на массу. Для каждой дозы облучения было получено 5 значений интенсивности ЭПР отклика, полученных на основе трех повторных измерений. Затем лаборатории обменивались образцами и опять проводили измерения.

Таким образом, всего было получено 9 пулов экспериментальных данных, которые использовались для сравнения показателей качества ЭПР методов лабораторий и установления универсальной и стандартной процедуры для их оценки. Дополнительно к тем 30 образцам, которые подготавливались и измерялись каждой лабораторией, лаборатория IMP дополнителью подготовила и измерила 22 образца.

Для решения задачи по реконструкции фонового распределения доз были проанализированы ЭПР измерения зубов 167 доноров 1908 - 1968 годов рождения. На момент удаления зубов они проживали в селах, расположенных на территориях Южного Урала, не подвергавшихся радиоактивному загрязнению (помимо глобальных выпадений). Согласно опросникам, они никогда не проживали в загрязненных районах. В рамках настоящего исследования доноры не группировались по национальному либо по половому признаку. Зубы удалялись по медицинским показаниям в сельских стоматологических клиниках в период с 1997 по 2008 годы. Возраст доноров на момент удаления зубов был от 37 до 93 лет, причем большинство возрастов (70%) принадлежали узкому интервалу от 50 до 70 лет. Средний возраст составил 62 года. Всего было исследовано 199 премоляров и моляров (некоторые доноры предоставили по нескольку зубов) и 135 резцов. Измерения проводились тремя лабораториями: ИФМ, HMGU и ISS.

Сформулированы критерии, по которым можно судить о применимости аналитической модели к различным ЭПР методикам.

В третьей главе показано, что аналитическая модель (Wieser, 2008) неопределенности ЭПР дозиметрии не является универсальной и не может быть использована для оценки показателей качества любой методики ЭПР измерений эмали зубов. Для создания единого для разных методик алгоритма оценки неопределенности был проведен анализ экспериментальных данных построения калибровочных кривых. Стохастическая модель калибровочного ЭПР эксперимента основана на моделировании амплитуды ЭПР сигнала ( $A$ ) с помощью метода Монте-Карло с последующей ее калибровкой в значение дозы ( $D$ ) с учетом погрешностей от различных источников. Положено, что ошибка измерения аддитивна относительно истинной амплитуды и нормально распределена.

В главе четыре решается задача реконструкции фонового распределения доз в популяции по измеренным необлученным образцам

эмали зубов человека. В модели ЭПР измерений необлученных образцов использовались следующие предположения: распределение фоновых доз логнормально с неизвестными параметрами  $m$  и  $s$  ( $D=LogN[m,s]$ ,  $D$  – измеряемое значение дозы); ошибка измерения имеет нормальное распределение с неизвестным средним  $C$ , которое зависит от ЭПР метода, и зависящего от дозы стандартного отклонения  $g(D)$ . Форма этой зависимости определяется экспериментатором на основе анализа данных с помощью программы «EPR-dosimetry performance». Таким образом, окончательная модель измерений принимает вид:

$$Dj=LogN[m,s]+N[Cj,gj(D)],$$

где  $j = 1, 2, \dots, 6$  – номер ЭПР методики.

Неизвестные параметры  $m$  и  $s$  определяются с помощью статистического метода моментов.

В заключение главы отмечается, что параметры логнормального распределения фоновых доз сельских жителей Уральского региона –  $m=3,9$ ;  $s=0,7$  – соответствуют среднему значению дозы  $61\pm47$  мГр. Найденное среднее значение фоновой дозы было использовано в качестве суррогата референтного образца для оценки систематических ошибок исследуемых ЭПР методик.

Глава пять посвящена гармонизации ЭПР измерений, проведенных на реке Теча различными методиками. С помощью, найденных в предыдущей главе, систематических ошибок, была проведена гармонизация данных. В данной работе под гармонизацией понимаем вычет систематической ошибки из результата измерений. Гармонизированные данные были объединены в общий пул, который был далее исследован.

Представлено сопоставление результатов ЭПР измерений доз облучения эмали до и после гармонизации. В среднем после гармонизации дозы понизились на 9 – 45 %. Исчез ничем не оправданный дозовый пик в области Муслюмово и Курманово (78 - 88 км).

Для сел, расположенных дальше 110 км по течению от места сброса радиоактивных отходов, среднее превышение фонового уровня облучения для сельских жителей Уральского региона составляет 65 мГр и попадает в 95% доверительный интервал для распределения фоновых доз.

Техногенные дозы, достоверно отличающиеся от фоновых уровней, были зафиксированы только у 23 % всех жителей прибрежных районов реки Теча. Для сел Метлино и Надырово, где наблюдались наиболее высокие дозы, этот показатель превышает средний уровень и равен 35% и 60% соответственно. Максимальные индивидуальные дозы также зафиксированы в селах Муслюмово и Надырово: 2,7 Гр и 2,6 Гр соответственно. Высокие дозы, полученные жителями сел Метлино и Надырово, обусловлены тем, что села частично расположены на непроточных участках речной системы с заболоченной поймой, которая из-за повышенной сорбции и слабого вымывания радионуклидов накапливала радионуклиды (главным образом  $^{137}Cs$ ).

Таким образом, были получены оценки техногенных доз в эмали зубов жителей прибрежных территорий реки Теча. Следует отметить, что

накопленная техногенная доза в эмали сформирована как внешним облучением (главным образом за счет  $^{137}\text{Cs}$  в окружающей среде), так и внутренним облучением (главным образом за счет остеотропного  $^{90}\text{Sr}$ ). ЭПР-дозиметрия эмали зубов используется для измерения доз внешнего облучения. Поэтому полученные результаты в дальнейшем будут использоваться для расчета доз внешнего облучения путем вычитания вклада внутренней компоненты.

### *Выводы*

1. Разработан универсальный алгоритм для оценки показателей качества ЭПР методик.

2. Показатели качества: критические значения амплитуд ЭПР сигнала (AC) находятся в интервале 16 - 85 отн. ед., а пределы детектирования (LDA) – 30 - 253 отн. ед. Критические значения доз (DC) – 48 - 233 мГр, и пределы детектирования (LDD) – в интервале от 94 мГр до 635 мГр для методик GSF/GSF и IMP/GSF соответственно.

3. Предложенная универсальная схема по оценке показателей качества ЭПР методик была реализована в компьютерном программном комплексе (свидетельство о государственной регистрации № 2014610805 от 17.01.2014 г.).

4. Предложен метод по оценке параметров фонового распределения доз для жителей Уральского региона.

5. Установлено, что средняя фоновая доза, накопленная жителями, равна 61 мГр, что дает оценку среднегодового фонового облучения на уровне 1 мГр/год, что хорошо согласуется с известными ранее оценками.

6. Найдены оценки систематических ошибок различных ЭПР методик, которые находятся в диапазоне от 64 мГр до 136 мГр.

7. Пределы индивидуализации могут находиться в достаточно широком диапазоне: от 185 мГр до 744 мГр.

8. Проведена гармонизация данных, полученных в результате исследований на реке Теча, и установлено, что для сел, расположенных дальше 110 км по течению от места сброса отходов, среднее превышение фонового уровня для этого региона составляет 65 мГр и попадает в 95 % доверительный интервал для распределения фоновых доз.

9. Превышение пределов индивидуализации было зафиксировано для 23 % жителей всех прибрежных населенных пунктов, но для сел Метлино и Надырово этот показатель превышает средний уровень и равен 35 % и 60 % соответственно.

### *Замечания*

1. Не совсем ясно поставлена задача исследований из-за неопределенности в понимании слова «гармонизация» – «Гармонизация измерений доз, полученных в ЭПР исследованиях эмали зубов у жителей прибрежной зоны реки Теча» (стр.7) или «Гармонизация результатов ЭПР-дозиметрии зубной эмали жителей прибрежных районов реки Теча» (название диссертации)? Гармонизация измерений доз – это задача оценки областей применимости средств измерений, достоверности и надежности результатов измерений на этих средствах, а гармонизация результатов ЭПР-

дозиметрии зубной эмали жителей ... – это более широкая проблема интерпретации результатов измерений доз, полученных жителями района реки Теча, по замерам их зубной эмали методом ЭРП- дозиметрии и включает первую, как частную задачу- необходимую, но недостаточную.

«Гармонизация-оценка и коррекция систематических ошибок, соответствующих каждой из ЭПР методик» (стр. 6).

«В данной работе под гармонизацией понимаем вычет систематической ошибки из результата измерений» (гл. 5)

Есть и другие понятия, содержащие неопределенность в интерпретации, что затрудняет понимание работы. Поэтому необходимо в диссертации ввести раздел «Термины и определения», где один раз определить используемые понятия, чтобы не было повторов с разным толкованием и однозначность понимания, например, такие как: гармонизация, валидация, критическая доза, предел детектирования, неопределенность оценки дозы, реконструкция распределения фоновых доз, фоновая составляющая дозы, доза от внутреннего облучения, доза от внешнего антропогенного облучения, предел индивидуализации и др.

2. Научная новизна (стр. 8) и Положения, выносимые на защиту (стр. 9), содержат тождественные утверждения. Их следовало бы разделить по своим признакам. Например, «единий алгоритм ...», «реконструкция распределения фоновых доз...», «программа ЭВМ...» – это уже есть в научной новизне, а в Положениях, выносимых на защиту, должны указываться только конкретные результаты, полученные при реализации научной новизны.

Далее, наиболее существенно, если в основную задачу (стр. 7 п. 1) входит из 3-х перечисленных определение показателя качества методик ЭПР- дозиметрии-«неопределенность оценки дозы», то куда же делась характеристика этого основного показателя из положений, выносимых на защиту, а остались только две из трех -критические значения доз и пределы детектирования (стр. 9 п. 1)? «Неопределенность оценки дозы» в этом пункте на защиту не вынесена.

3. Из постановленной цели работы, на мой взгляд, следовало бы для гармонизации результатов измерений по зубам оценить погрешности оценки не только фона, но и внутреннего облучения. В работе не оценивалась неопределенность вклада внутреннего облучения, учитывавшего по сравнению с внешним в том числе различия в видах излучений (внешнее- в основном гамма-излучения от Cs-137 ( $T_{1/2} \approx 30$  лет,  $E_\gamma \approx 0,661$  МэВ и внутреннее в основном бета –излучения от Sr-90 ( $T_{1/2} \approx 29$  лет,  $E_\beta \approx 0,556$  МэВ). Эта величина изучалась в диссертации Волчковой А. Ю. (Разработка воксельных фантомов и оценка доз внутреннего облучения (ДВО) эмали зубов жителей Уральского региона, подвергшихся радиационному воздействию. Диссертация кандидата технических наук (05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (ядерный топливно- энергетический комплекс)), место защиты ФГБУ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна, 2015 г. В ней показано, как зависит ДВО от возраста владельца зубов. До 70 км от верховья реки Течи вклад ДВО составляет от 10 до 30 %, ниже 70 км – увеличивается

до 40 %. Значения доз от ДВО составляют по оценкам автора от 75 мГр до 30 мГр от верховьев до низовьев реки Теча для лиц старше 1943 г. рождения. Результаты сильно зависят от возраста владельца зубов. Для зубов с, например, несформировавшейся коронкой (для лиц моложе 1944 г. рождения) доза внутреннего облучения для проживающих в верхнем течении реки Теча составила 10 Гр, в среднем течении – 4 Гр, изменяется в пределах от 0,5 Гр до 30 Гр. В литературном обзоре претендента нет анализа этой работы. Однако, к сожалению, в данной работе такая оценка не входила в задачу исследования, поэтому это замечание остается лишь в качестве пожелания для осуществления в будущем.

4. На стр. 100, 101 в Заключении автор пишет «Проведена гармонизация данных, полученных в результате исследований на реке Теча. Исследования проводились с целью для оценки уровня облучения жителей прибрежных регионов в результате загрязнения ее вод радиоактивными отходами в 1949-1956 годах». Далее автор приводит значения полученных жителями доз, очевидно уже гармонизированных по методу автора.

Остается не ясным, оцениваются ли или как предполагается оценивать при этом реальные уровни облучения жителей прибрежных регионов на весь организм и /или отдельные органы и ткани от комбинированного облучения, обусловленного дозами, зарегистрированными эмалью зубов от внешнего (Cs-137) и внутреннего (Sr-90) облучения?

5. В Заключении диссертации на стр. 100 указывается, что «для сел, расположенных дальше 54 км по течению от места сброса отходов среднее превышение фонового уровня для этого региона составляет 65 мГр и попадает в 95% доверительный интервал для распределения фоновых доз», что не соответствует точно такому же утверждению в п. 8 Выводов автореферата, где указано расстояние в 110 км.

6. В Заключении стр. 100 в верхней и нижней частях 2-го абзаца записана практически одна и та же фраза:- в верхней части «Максимальные индивидуальные дозы также получены в этих селах (Метлино и Надырово) 2,7 Гр и 2,6 Гр»,- в нижней части «Максимальные индивидуальные дозы также зафиксированы в селах Муслюмово и Надырово: 2,7 Гр и 2,6 Гр соответственно». Дозы одинаковые, а села разные, так или нет?

7. В последнем абзаце (стр. 101) автор отмечает, что «накопленная техногенная доза в эмали сформирована как внешним облучением (главным образом за счет Cs-137 в окружающей среде, так и внутренним облучением (главным образом за счет остеотропного Sr-90). ЭПР-дозиметрия эмали зубов используется для измерения доз внешнего облучения. Поэтому полученные результаты в дальнейшем будут использоваться для расчета доз внешнего облучения путем вычитания вклада внутренней компоненты».

По данным А. Ю. Волчковой значения доз от ДВО составляют по оценкам автора от 75 мГр до 30 мГр от верховьев до низовьев р. Теча для лиц старше 1943 г. рождения, а для лиц моложе 1944 г. рождения доза внутреннего облучения для проживающих в верхнем и нижнем течении реки Теча изменяется в пределах от 0,5 Гр до 30 Гр. Значения этих доз практически соответствуют или существенно превышают оценки фоновых

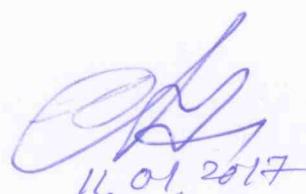
доз, сделанные Ю. С. Тимофеевым. Поэтому, на мой взгляд, «гармонизация» результатов ЭПР- дозиметрии с учетом влияния этой компоненты встретила бы более однозначное понимание среди специалистов.

Отмеченные недостатки не снижают теоретической значимости и практической ценности работ.

### Заключение

Не смотря на сделанные замечания, учитывая поставленные вопросы и пожелания, считаю, что в целом диссертационная работа Тимофеева Ю. С. безусловно актуальна, поставленные в ней цели и задачи выполнены в полном объеме, имеет высокую научную новизну и практическую значимость, сделана на современном техническом уровне и соответствует всем требованиям пунктов 9, 10, 11, 13 и 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.02. – «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ядерный топливно-энергетический комплекс)», а её автор Тимофеев Юрий Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
кандидат физико-математических  
наук, доцент, ведущий научный  
сотрудник



11.01.2017

А. А. Викторов

Подпись официального оппонента Викторова А. А. заверяю.  
Ученый секретарь – начальник  
научно-технического отдела  
ФКП НИИ «Геодезия», кандидат  
технических наук, доцент



В. А. Пырьев