

На правах рукописи

МАКАРОВ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**АКТИВНЫЙ МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ДЛЯ ПОИСКА РУД, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
ПОТОКОВ ЧАСТИЦ**

Специальность: 25.00.34. – «Аэрокосмические исследования Земли,  
фотограмметрия»

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2010

Работа выполнена на кафедре аэрокосмических съемок Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

**Научный руководитель:** академик РАН  
**Бондур Валерий Григорьевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
профессор **Ильин Юрий Александрович**

кандидат технических наук  
**Ведешин Леонид Александрович**

**Ведущая организация:** **Геофизический центр  
Российской академии наук**

Защита диссертации состоится 23 декабря 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.01 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва К-64, Гороховский переулок, д. 4, зал заседания Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (105064, Москва, К-64, Гороховский переулок, д. 4)

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Краснопевцев Б.В.

## **Общая характеристика работы**

В настоящее время при аэрокосмических исследованиях Земли используются, в основном, изображения, получаемые в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и радиодиапазонах спектра электромагнитных волн. При этом мало используются методы, основанные на регистрации потоков частиц. Изображения, формируемые путем регистрации элементарных частиц, несут информацию об элементарном составе снимаемых поверхностей и поэтому могут быть использованы при решении ряда задач в областях геологии, экологии и др. Вместе с этим, в настоящее время не существует универсальных аэрокосмических методов, например, позволяющих определять типы руд в широком диапазоне содержащихся в них химических элементов. В связи с этим, необходима разработка новых методов дистанционного зондирования Земли, позволяющих выявить элементарный состав исследуемой руды, что и определяет **актуальность данной работы.**

В настоящей диссертационной работе **объектами исследования** являются процессы получения и дешифрирования изображений, формируемых при облучении геологических объектов высокоэнергетическим протонным пучком. В качестве **предметов исследования** выбраны информативные характеристики изображений, формируемых сигналами-откликами при облучении высокоэнергетическим протонным пучком металлических руд, процессы прохождения частиц через атмосферу, а также технические средства для проведения аэрокосмических исследований Земли.

**Методы исследований,** применяемые в настоящей работе, базируются на методе статистических испытаний Монте-Карло, математических методах преобразований спектров и на методах физического моделирования.

**Цель работы** заключается в разработке активного метода дистанционного зондирования с использованием потоков ускоренных протонов для проведения аэрокосмических исследований Земли.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **задачи:**

- теоретическое обоснование активного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков элементарных частиц в целях поиска металлических руд;
- разработка алгоритмов обработки и дешифрирования данных, полученных с помощью предложенного метода;
- разработка способов практической реализации предложенного метода;
- проведение вычислительных экспериментов для тестирования предложенного метода;
- проведение физических экспериментов для доказательства возможности практической реализации предложенного метода.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- метод дистанционного зондирования Земли, основанный на облучении исследуемых объектов высокоэнергетическими протонами, регистрации и анализе формируемых сигналов-откликов в целях поиска руд и пути его практической реализации;
- алгоритмы обработки и дешифрирования данных, полученных с помощью предложенного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков частиц;
- методика проведения вычислительных экспериментов, основанная на методе статистических испытаний Монте-Карло, для обоснования возможности реализации метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков частиц в целях поиска руд;
- результаты вычислительных экспериментов по поиску руд путем облучения исследуемого объекта ускоренными протонами на примере поиска металлических руд;

– результаты экспериментов по физическому моделированию метода дистанционного зондирования Земли в целях поиска месторождений радиоактивных руд путем облучения высокоэнергетическими протонами массивной свинцовой мишени и регистрации ответных сигналов-откликов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

– разработан новый активный метод дистанционного зондирования Земли в целях поиска руд, основанный на облучении исследуемых геологических объектов высокоэнергетическими протонами с последующей регистрацией эмиссий гамма-квантов и нейтронов;

– разработаны алгоритмы обработки и дешифрирования данных, полученных с помощью предложенного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков частиц, позволяющие выявить наличие различных химических элементов в рудах, в том числе радиоактивных;

– разработаны пути практической реализации активного метода дистанционного зондирования Земли в целях поиска руд, в основе которых лежит зондирование геологических пород протонным пучком ускорителя, расположенного на борту летательного аппарата, а также последующая регистрация сигналов-откликов детекторами, установленными на этом летательном аппарате или спущенными с него на трос-кабеле или штанге;

– разработаны методики проведения вычислительных и физических экспериментов для подтверждения реализуемости предложенного активного метода дистанционного зондирования Земли в целях поиска руд, основанные на методе статистических испытаний Монте-Карло, а также на проведении ядерно-физических измерений на ускорительном комплексе;

– получен набор данных по взаимодействию высокоэнергетического протонного пучка с веществами различных металлических руд, а также с радиоактивным веществом –  $^{238}\text{U}$ , включая сигналы-отклики в виде энергетических спектров и изображений интенсивностей излучения гамма-

квантов, а также зависимости от времени выходов запаздывающих нейтронов из облученной мишени.

**Научная ценность** работы заключается в разработке принципиально нового метода дистанционного зондирования Земли в целях поиска руд, в основе которого лежит использование активных принципов зондирования с применением потоков ускоренных высокоэнергетических протонов.

**Практическая значимость работы.** Результаты диссертационной работы имеют практическое значение для аэрокосмических исследований Земли на больших площадях, в частности в целях поиска месторождений полезных ископаемых, в том числе руд и радиоактивных элементов. Результаты работы могут быть применены не только для дистанционного зондирования Земли, но и для исследования других космических тел.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием апробированных и хорошо себя зарекомендовавших методов научных исследований и отсутствием противоречий с известными общепризнанными научными результатами. Кроме того, достоверность результатов диссертационной работы подтверждается хорошим согласованием данных, полученных в ходе математического моделирования и физического эксперимента.

**Личный вклад автора.** Разработанный метод дистанционного зондирования Земли в целях поиска руд, алгоритмы обработки и дешифрирования данных, полученных с помощью него, пути его практической реализации, а также методика проверки его работоспособности и полученные результаты вычислительных экспериментов принадлежат автору данной работы. Автор также принимал непосредственное участие в постановке физических экспериментов, обработке и анализе данных, полученных в ходе их проведения.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

– конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), г. Москва, 2008;

– научная сессия Московского инженерно-физического института, г. Москва, 2009;

– международная научно-техническая конференция, посвященная 230-летию основания МИИГАиК, г. Москва, 2009;

– международная научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии в нефтегазовом комплексе» РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, 2009.

**Публикации.** Основное содержание диссертации приведено в 4 печатных работах, 3 из которых опубликованы в журналах, входящих в перечень ведущих периодических изданий ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 133 страницы.

### **Содержание работы**

Во введении обоснованы выбор темы, ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования. Показана научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** рассмотрена классификация месторождений руд, на основании которой определены возможные объекты поиска дистанционными методами. К таким объектам относятся экзогенные месторождения руд любой морфологии рудных тел.

Проанализированы физические поля, регистрация которых лежит в основе современных методов дистанционного зондирования Земли в целях поиска руд, в том числе электромагнитное излучение, магнитное и гравитационное поля, а также потоки элементарных частиц. Рассмотрены различные методы дистанционного зондирования Земли, основанные на регистрации перечисленных физических полей, включая аэрофотосъемку,

съемку с помощью многоспектральных электрооптических систем, активную микроволновую рефлектометрию, терморазведку, аэроэлектроразведку, аэромагниторазведку, аэрогравирозведку. С использованием перечисленных дистанционных методов возможно либо проводить поиск руд небольшого числа химических элементов, обладающих специфическими свойствами (ферромагнетизм в случае поиска железа, радиоактивность в случае поиска урана, тория или калия), либо локализовать перспективные площади для дальнейших исследований и поисков руд традиционными методами без предварительного определения химического элемента, содержащегося в геологических объектах на данных площадях.

На основании проведенного анализа показано, что в настоящее время отсутствуют универсальные методы дистанционного зондирования Земли для поиска руд, в ходе которого возможно определить содержащиеся в данных рудах элементы в широком диапазоне химических элементов.

На примере рассмотрения метода пассивной ядерной спектроскопии, применяемой для определения элементарного состава поверхности космических тел без плотной атмосферы, в целях дистанционного поиска руд показана перспективность разработки активных методов, основанных на регистрации потоков элементарных частиц. Использование источника излучения в данном случае значительно расширяет возможности и границы применения метода, основанного на регистрации потоков элементарных частиц в поисковой геологии. В связи с этим, в данной диссертационной работе выбрано направление исследований, связанное с разработкой активного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков элементарных частиц в целях поиска руд.

**Во второй главе** приводится теоретическое обоснование разрабатываемого активного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков частиц в целях поиска руд. Для его реализации обосновывается выбор компактного высокоэнергетического протонного ускорителя в качестве облучающего источника. Показано, что



информативными сигналами-откликами от облученных протонами геологических объектов являются, прежде всего, гамма-кванты от реакции захвата веществом тепловых нейтронов. Энергетические спектры данных гамма-квантов являются уникальными для каждого химического элемента. Ввиду высокого значения сечения реакции захвата тепловых нейтронов это позволяет эффективно определять наличие в облучаемой геологической области, в первую очередь, металлов, перечисленных в табл. 1. В данной таблице для каждого металла приведены также порядок сечения реакции захвата тепловых нейтронов ядром его химического элемента, а также максимальная энергия испускаемых при этом гамма-квантов.

Таблица 1

Перечень металлов, эффективно определяемых при облучении содержащих их геологических объектов протонами по энергетическим спектрам испускаемых ими гамма-квантов

<b>Исходное ядро</b>	<b>Порядок сечения реакции, барн</b>	<b>Максимальная энергия гамма-квантов, МэВ</b>
<sup>27</sup> Al	1	7,724
<sup>40</sup> Ca	1	6,420
<sup>48</sup> Ti	10	6,760
<sup>51</sup> V	10	6,517
<sup>52</sup> Cr	1	7,938
<sup>56</sup> Fe	5	7,631
<sup>58</sup> Ni	10	8,998
<sup>63</sup> Cu	10	7,916
<sup>64</sup> Zn	1	7,863
<sup>184</sup> W	5	4,572
<sup>207</sup> Pb	1	7,367
<sup>232</sup> Th	10	3,473

Кроме того, информативными сигналами-откликами облученных протонами геологических объектов являются также запаздывающие нейтроны деления в случае содержания в этих объектах руд радиоактивных металлов.

Показано, что наиболее эффективное (с точки зрения соотношения сигнал/шум) исследование геологической области путем облучения ее протонными сгустками длительностью 10 мкс с частотой повторения 5 Гц и регистрации гамма-квантов и нейтронов происходит во временном интервале от нескольких микросекунд до порядка миллисекунды (гамма-кванты) и от

миллисекунды до порядка двухсот миллисекунд (нейтроны) после каждого протонного импульса. Соответствующая поясняющая схема приведена на рис. 1.

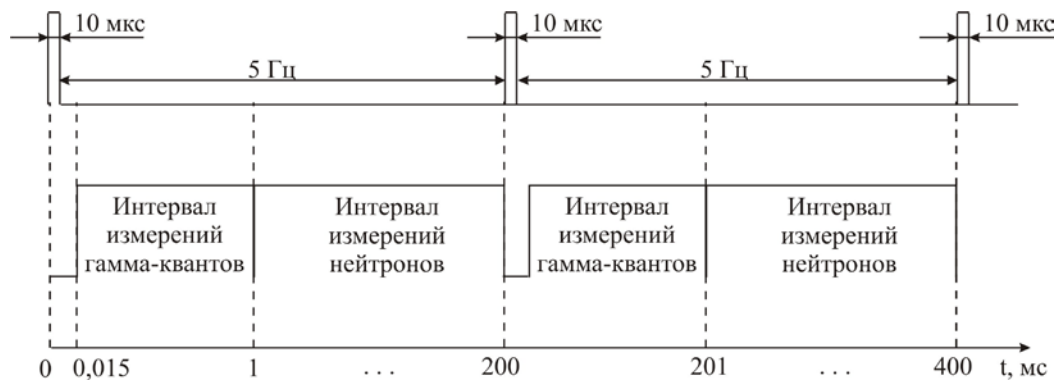


Рис. 1. Схема облучения исследуемой области протонами и регистрации ответного сигнала

На основании используемых теоретических предпосылок предложен метод дистанционного зондирования Земли с использованием потоков ускоренных протонов в целях поиска руд, заключающийся в реализации следующих шагов:

1. Формирование с помощью ускорителя узконаправленных высокоэнергетических импульсов протонов с энергией  $\sim 250$  МэВ, интенсивностью  $\sim 10^{12}$  частиц и длительностью  $\sim 10$  мкс;

2. Облучение с борта летательного аппарата данными импульсами исследуемой геологической области;

3. Регистрация выходов гамма-квантов и их энергии в течение времени  $\sim 1$  мс через несколько микросекунд после облучения исследуемой области протонами;

4. Регистрация нейтронов в течение времени  $\sim 200$  мс после облучения исследуемой области импульсом протонов;

5. Облучение протонным импульсом следующей геологической области через время  $\sim 0,2$  секунды после запуска последнего импульса протонов;

6. Обработка и анализ массивов данных, накопленных за время полетов.

Полученные с помощью метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков элементарных частиц данные предложено представлять в виде графиков энергетических спектров или изображений интенсивностей излучения для различных энергий в случае гамма-квантов. В обоих случаях энергия гамма-квантов и интенсивность их излучения являются надежными дешифровочными признаками для определения мест концентраций различных химических элементов в исследуемых геологических областях. В случае нейтронов предложено представлять полученные данные в виде изображений интенсивностей излучения данных частиц. Интенсивность излучения нейтронов является дешифровочным признаком для определения мест концентраций радиоактивных элементов в исследуемых геологических областях.

Разработаны две схемы для практической реализации предложенного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков элементарных частиц в целях поиска руд. В соответствии с первой схемой (см. рис. 2, а) мобильный ускоритель протонов размещается на борту летательного аппарата, например, вертолета. Исследуемая область облучается с высоты  $\sim 100$  м протонами с энергией  $\sim 250$  МэВ. Облучение проводится сгустками протонов с частотой 5 Гц. Образующиеся при этом сигналы-отклики от облучаемого геологического объекта регистрируются детектором на борту летательного аппарата. Далее сигналы с детектора преобразуются в удобный для анализа цифровой вид и сравниваются с базой данных ожидаемых сигналов-откликов от руд различных металлических химических элементов. На основании сравнительного анализа определяются химические элементы, содержащиеся в облученных геологических объектах, в том числе и радиоактивные.

В соответствии со второй схемой (см. рис. 2, б) детекторы можно буксировать на трос-кабеле в выносной гондоле или установить на длинной выносной штанге. Это позволит повысить соотношение сигнал-шум, во-первых, из-за меньшего ослабления сигнала-отклика, который пройдет до

детектора меньшее расстояние, а, во-вторых, из-за того, что фоновые сигналы от части атмосферы, пройденной протонным пучком и расположенной выше детекторов (рис. 2, б), не будут попадать на детекторы.

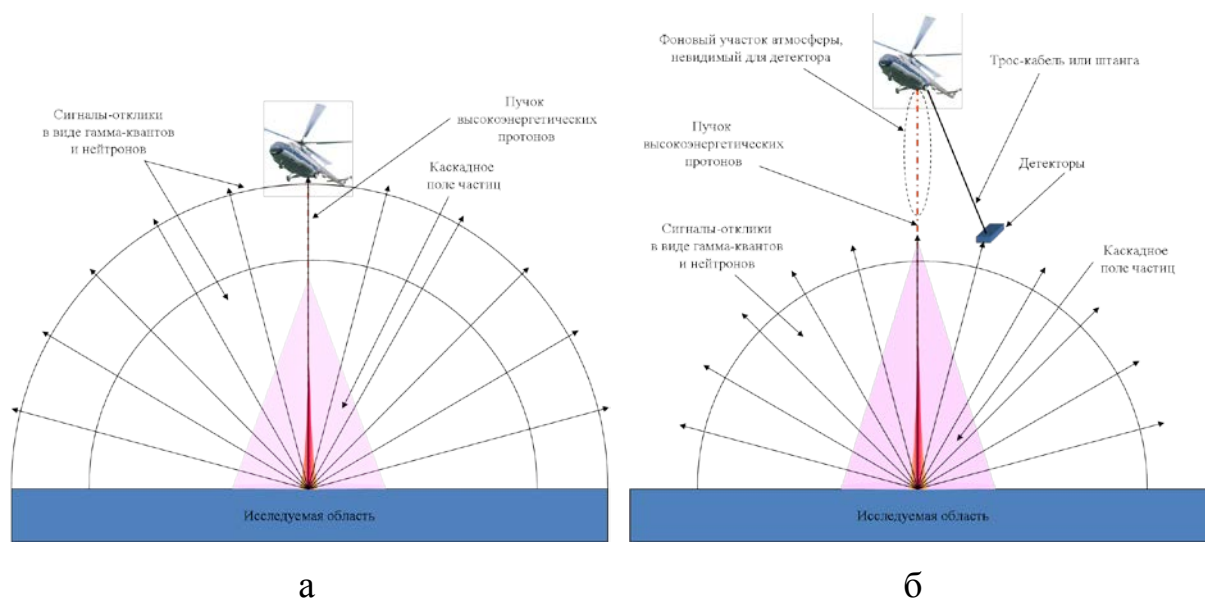


Рис. 2. Схемы практической реализации активного метода дистанционного зондирования Земли с использованием протонного ускорителя в целях дистанционной георазведки (а – детекторы на борту летательного аппарата, б – детекторы на трос-кабеле или штанге)

**Третья глава** посвящена проведению вычислительных экспериментов методом Монте-Карло для подтверждения возможности реализации активного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков частиц в целях поиска руд.

Вычислительные эксперименты, моделирующие поиск месторождения простых руд, проводились для месторождения минерала магнетита, в котором минерал состоит из минимального числа химических элементов, а окружающие минерал породы не содержат основных химических элементов, входящих в состав минерала руды. Кроме того, был рассмотрен более общий случай, когда искомый минерал имеет сложный элементный состав, а основной элемент руды искомого минерала, представляющий промышленный интерес, содержится также и в окружающих породах. В качестве такого месторождения было рассмотрено месторождение минерала боксита.

Для получения сигналов-откликов гамма-квантов от облученных протонным пучком месторождений магнетита и боксита был использован программный пакет GEANT4, основанный на методе Монте-Карло. В качестве исходных данных для расчетов были использованы геометрия месторождения, высота и энергия источника протонов – соответственно 100 м и 250 МэВ. Облучение проводилось одиночным протонным сгустком длительностью 10 мкс. Регистрация гамма-квантов осуществлялась в различных плоскостях, расположенных на высотах 0 м, 50 м и 100 м. На рис. 3 слева изображен геологический разрез месторождения магнетита, на основе которого формировалась геометрия месторождения, используемая в вычислительном эксперименте, которая приведена на этом рисунке справа. Для магнетита было проведено 2 расчета. В первом случае область 1 на рис. 3 была заполнена магнетитом, во втором – гранитом.

На рис. 4 сверху изображен геологический разрез месторождения боксита и сформированная на его основе геометрия месторождения, используемая в вычислительном эксперименте (см. рис. 4 снизу). Для боксита было проведено три расчета, в каждом из которых область II на рис. 4 была заполнена соответственно бокситом, известняком или глиной.

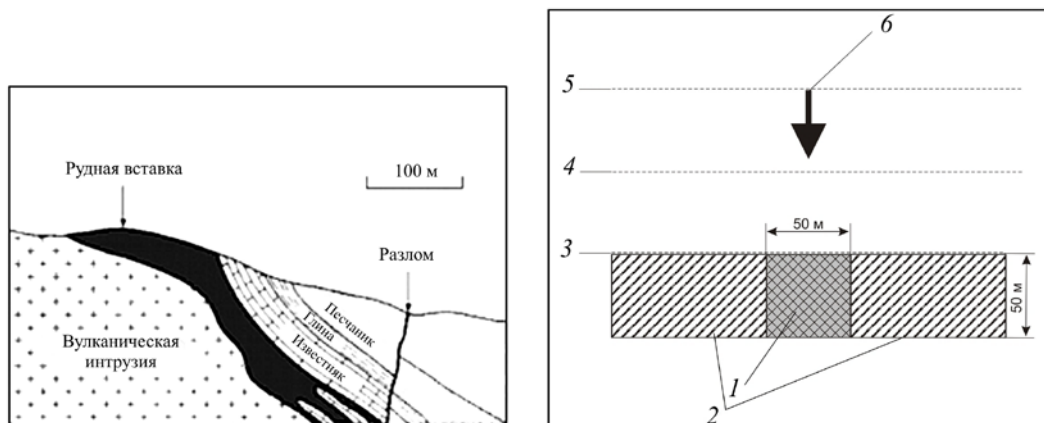


Рис. 3. Геологический разрез месторождения магнетита (слева); используемая в вычислительных экспериментах геометрия месторождения магнетита (справа): 1 – исследуемый участок, состоящий из гранита либо магнетита; 2 – фоновый участок гранита; 3, 4, 5 – счетные плоскости детекторов на высотах 0 м, 50 м, 100 м соответственно; б – источник 250 МэВ-ных протонов на высоте 100 м

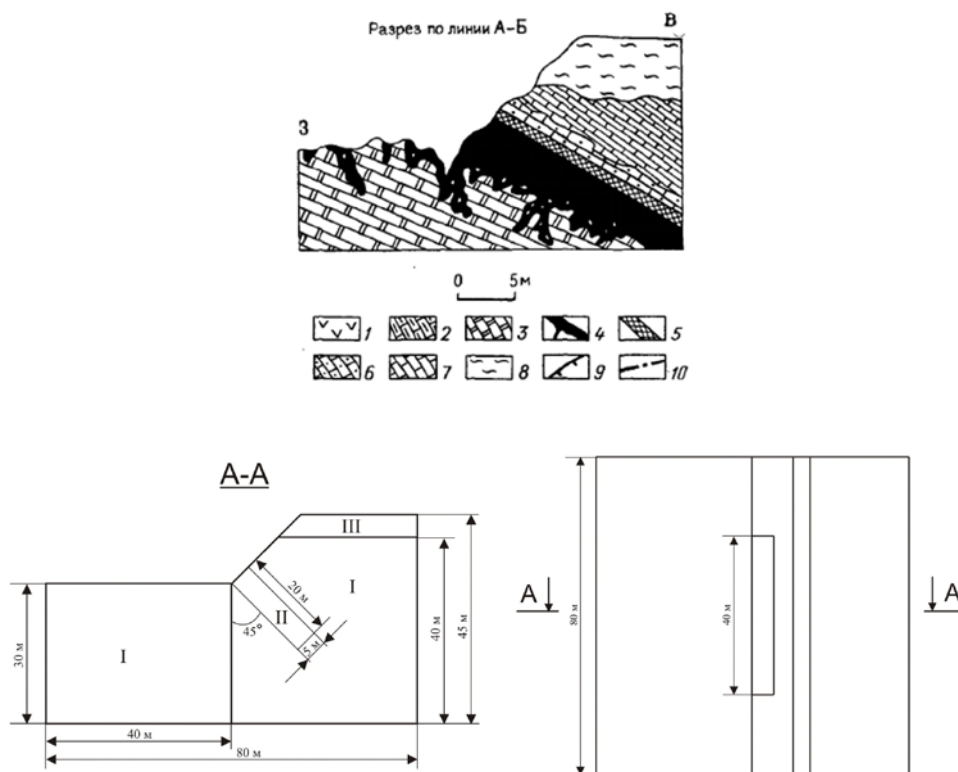


Рис. 4. Геологический разрез месторождения боксита «Красная Шапочка» (сверху): 1 – вулканогенно-осадочные породы верхнего силура, 2–3 – известняки (2 – слоистые, 3 – массивные), 4–5 – бокситы (4 – красные, 5 – зеленовато-серые), 6 – мергели, 7 – известняки надрудной толщи среднего девона, 8 – кайнозойские глинистые отложения, 9 – надвиги, 10 – сбросы; используемая в вычислительном эксперименте геометрия месторождения (снизу)

В процессе вычислительных экспериментов регистрация гамма-квантов проводилась сначала плоскостями – идеальными детекторами, что означало регистрацию всех частиц, проходящих через такие детекторы. Использование идеальных детекторов позволило получить промежуточную картину формирования сигналов-откликов на нужных высотах без привязки к конкретному типу детектора, а также увеличить набор статистических событий для конечных энергетических гамма-спектров реального детектора.

Далее энергетические спектры гамма-квантов, полученные для идеальных детекторов, преобразовывались в спектры реального детектора, в качестве которого была использована матрица в виде 56 цилиндрических кристаллов из материала  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO), обладающих размерами диаметра 127 мм и высоты 150 мм, а также суммарной площадью приблизительно  $1 \text{ м}^2$

(рис. 5). Для этого частицы, зарегистрированные сначала идеальными детекторами, были запущены на вход матрицы BGO. В результате моделирования взаимодействия гамма-квантов с веществом активного объема детектора программный код GEANT4 воссоздавал реальные энергетические спектры, которые далее были обработаны с помощью математического аппарата – свертки линий спектра Гауссовой функцией:

$$F_{fep}(E, E_{fep}) = G(E; E_{fep}, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E - E_{fep})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1),$$

где  $E_{fep}$  – полная энергия фотопика,  $\sigma$  – стандартное отклонение:

$$\sigma(E_{fep}) = \frac{\Delta_{1/2}(E_{fep})}{2\sqrt{2\ln 2}} \approx 0.4246609\Delta_{1/2}(E_{fep}) \quad (2),$$

где  $\Delta_{1/2}(E_{fep})$  – полная ширина на полувысоте, которая в нашем случае равна энергетическому разрешению детектора, зависящему от энергии гамма-кванта.

Данная свертка позволила учесть некоторые явления статистического характера, в том числе такие, как образование оптических фотонов и др.

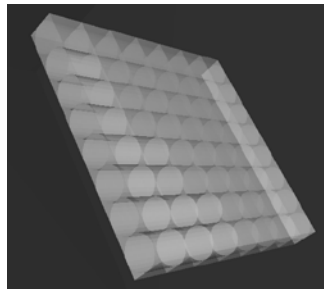


Рис. 5. Изображение матрицы из 56 BGO-кристаллов, используемой в качестве реального детектора в вычислительном эксперименте

На рис. 6, а, б и в, приведены результаты вычислительного эксперимента по поиску магнетита. Здесь представлены энергетические спектры соответственно идеального детектора, реального детектора, смоделированного с помощью программного кода GEANT4, а также окончательные спектры с учетом свертки функцией Гаусса для высоты расположения детекторов 50 м. По оси абсцисс на графиках отложена энергия в МэВ, по оси ординат – число гамма-квантов, попавших на 1 м<sup>2</sup> детектора из расчета на один протон.

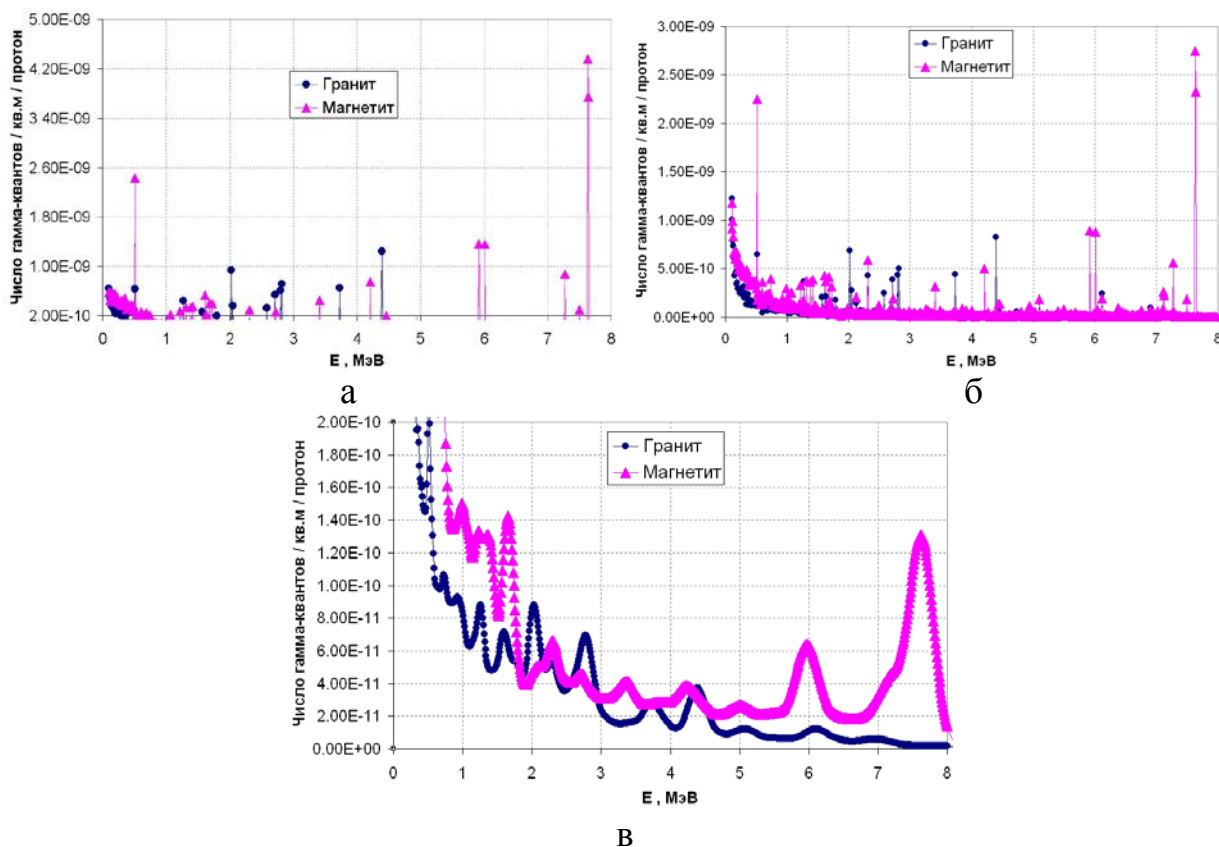


Рис. 6. Энергетические гамма-спектры месторождения магнетита (спектры: а – идеального детектора, б – реального детектора, посчитанный GEANT4, в – окончательный с учетом свертки Гауссовой функцией)

Из рис. 6, в, видно, что на реальных энергетических спектрах гамма-квантов магнетит отчетливо распознается на фоне гранита благодаря двум основным пикам. Первый пик является суммой пиков гамма-линий железа – 7,63 и 7,64 МэВ (см. рис. 6, б, в). Второй пик находится в районе 6 МэВ и является суммой пиков гамма-линий железа – 5,92 и 6,42 МэВ (см. рис. 6, б, в). Отношения сигнал/шум для первого и второго пиков в данном случае равны  $\sim 6,5$  и 3 (см. рис. 6, в).

Из рис. 6, в, видно также, что для меньшего из двух основных идентифицирующих магнетит пиков (в районе 6 МэВ) на один падающий протон приходится  $\sim 6 \times 10^{-11}$  гамма-квантов на  $1 \text{ м}^2$  детектора. Таким образом, для хорошего распознавания данного пика в реальном спектре необходимо, чтобы зондирующий сгусток протонов содержал минимум  $10^{12}$  частиц. В этом случае высота пика составит несколько десятков событий.

На рис. 7, а, б и в, приведены результаты вычислительного эксперимента по поиску боксита.



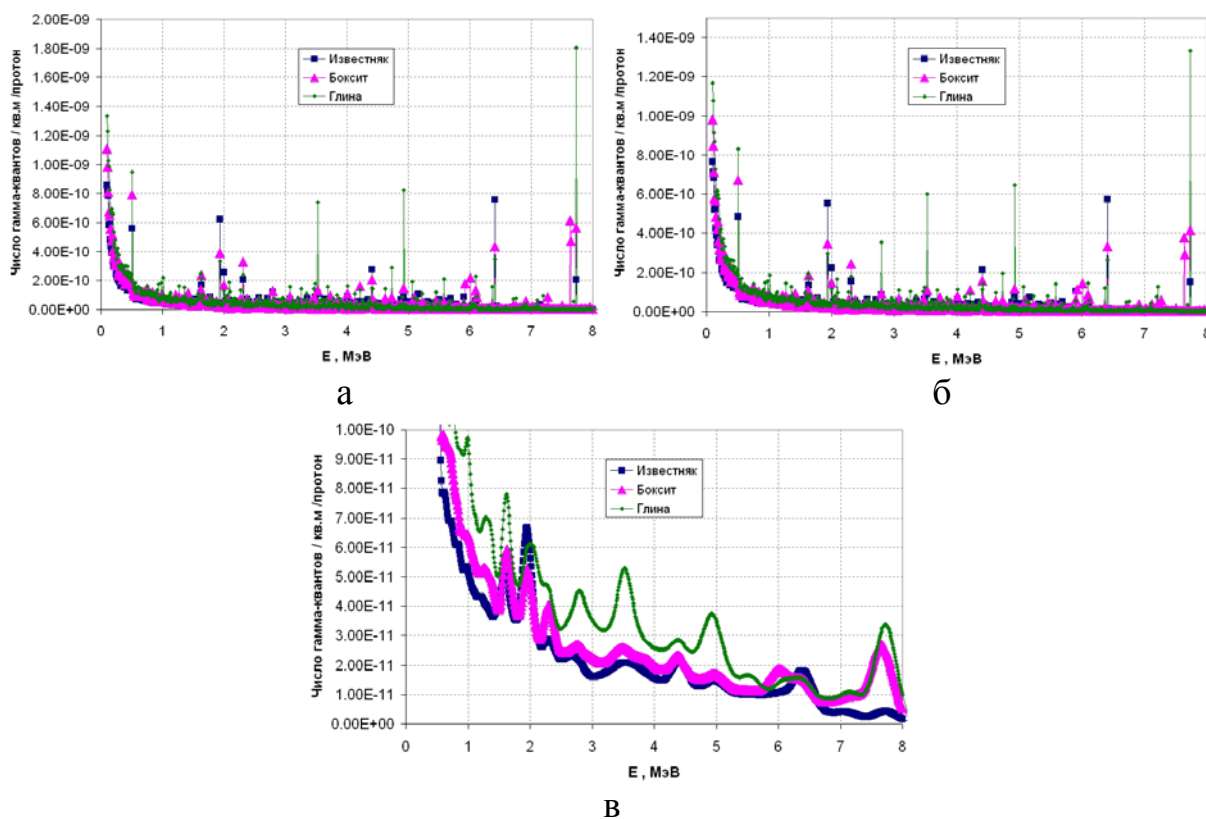


Рис. 7. Энергетические гамма-спектры месторождения боксита (спектры: а – идеального детектора, б – реального детектора, посчитанный GEANT4, в – окончательный с учетом свертки Гауссовой функцией)

Из рис. 7, в, видно, что по реальным энергетическим спектрам гамма-квантов боксит отчетливо распознается на фоне известняка благодаря двум основным пикам. Первый идентифицирующий пик является суммой пиков трех гамма-линий: гамма-линий железа на энергиях 7,63 и 7,64 МэВ, а также гамма-линии алюминия на энергии 7,72 МэВ (см. рис. 7, б, в). Второй пик находится в районе энергии 6 МэВ и является суммой энергетических пиков гамма-линий железа 5,92 и 6,42 МэВ (см. рис. 7, б, в). Отношения сигнал/шум для первого и второго пиков в данном случае равны  $\sim 3$  и  $2$  (см. рис. б, в).

В случае распознавания боксита на фоне глины используются те же основные идентифицирующие пики, что и для распознавания боксита на фоне известняка (см. рис. 7, б, в). В данном случае высота энергетического пика, характерного для боксита (сумма пиков гамма-линий 7,63, 7,64 и 7,72 МэВ) и энергетического пика глины от алюминия (7,72 МэВ) сопоставимы, а интервал между этими пиками составляет менее 100 кэВ. Поэтому для

уверенной дифференциации данных энергетических пиков детектором необходим аналогово-цифровой преобразователь с достаточным числом каналов.

Из рис. 7, в, видно, что для меньшего из двух основных энергетических пиков, идентифицирующих боксит (в районе 6 МэВ), на один падающий протон приходится  $\sim 2 \times 10^{-11}$  гамма-квантов на  $1 \text{ м}^2$  детектора. Таким образом, чтобы данный пик в реальном спектре был хорошо распознаваем, необходимо, чтобы зондирующий сгусток протонов, как и в случае с магнетитом, содержал минимум  $10^{12}$  частиц. В этом случае высота пика составит несколько десятков событий.

На основании сравнения результатов вычислительных экспериментов для месторождений магнетита и боксита показано, что уменьшение поперечных размеров облучаемого месторождения до 5 м x 5 м существенно не изменит уровень регистрируемого сигнала-отклика гамма-квантов. Это свидетельствует о высоком пространственном разрешении (не хуже нескольких метров) предложенного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков частиц.

На рис. 8 приведено сформированное по результатам проведенных вычислительных экспериментов для месторождения магнетита изображение поверхности данного месторождения на фоне гранита. Оно получено в диапазоне энергий 7,63–7,64 МэВ излучения гамма-квантов (основной энергетический пик от железа) с учетом частоты следования протонных сгустков 5 Гц и пространственного разрешения 10 м. Изображение построено в цветовой шкале интенсивности излучения, численные значения которой соответствуют количеству зарегистрированных детектором гамма-квантов в указанном энергетическом диапазоне. Очевидно, что излучение гамма-квантов железа позволяет на данном изображении надежно распознать на фоне гранита месторождение магнетита, а также определить его размеры и границы.

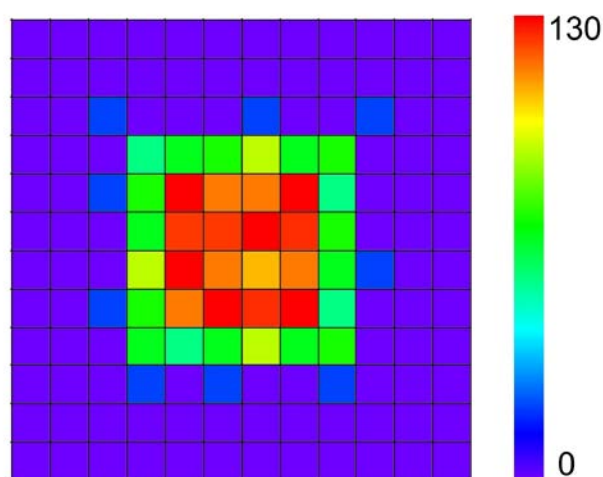


Рис. 8. Изображение поверхности месторождения магнетита на фоне гранита в диапазоне энергий 7,63–7,64 МэВ излучения гамма-квантов

Результаты вычислительных экспериментов по оценке радиационных нагрузок, создаваемых протонным пучком в процессе дистанционного поиска руд, показали необходимость установки радиационной защиты на борту летательного аппарата с целью обеспечения безопасных условий для оператора и обеспечения стабильной работы электронных компонент.

**Четвертая глава** посвящена физическому эксперименту по дистанционному обнаружению естественных радиоактивных руд путем их облучения протонным пучком. Целями эксперимента являлись проверка возможности дистанционного обнаружения таких руд путем их облучения протонным пучком, а также проверка моделей высокоэнергетических взаимодействий, используемых в программном пакете GEANT4. Экспериментальные работы проводились на синхроциклотроне Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук (ПИЯФ РАН).

В проведенном физическом эксперименте протонным пучком синхроциклотрона ПИЯФ РАН с энергией протонов 1 ГэВ облучалась массивная свинцовая мишень, размеры и сечения которой показаны на рис. 9. Облучаемая мишень представляла собой сборный свинцовый параллелепипед с полостью в центре, в которую помещали цилиндры из свинца или  $^{238}\text{U}$ .

Для случаев закладки свинцового или уранового цилиндров были проведены две серии облучения протонным пучком. При облучении массивной свинцовой мишени, содержащей внутри себя урановый цилиндр, моделировался случай облучения геологического объекта, содержащего радиоактивные руды.

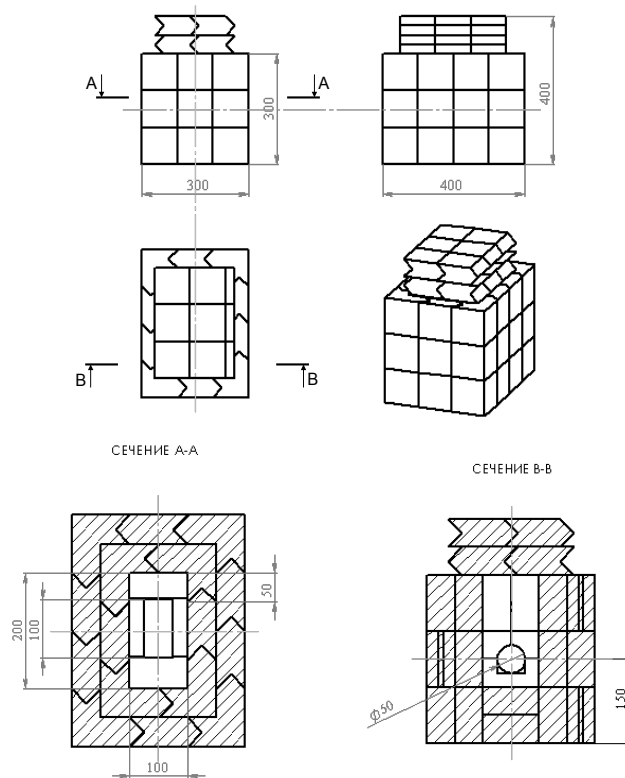


Рис. 9. Размеры и сечения массивной свинцовой мишени

Мишень облучалась протонными сгустками в импульсном режиме. Длительность протонного сгустка составляла около 8 нс. В сгустке содержалось  $\sim 10^{11}$  протонов. После каждого импульса нейтронным детектором на основе  $BF_3$  на расстоянии 2,5 м от центра входной плоскости мишени измерялась нейтронная активность сборки в течение 200 и 30 с в случаях, когда мишень содержала урановый или свинцовый цилиндр соответственно. Для набора достаточной статистики при закладке уранового и свинцового цилиндров было запущено соответственно 106 и 144 сгустка. Схема эксперимента приведена на рис. 10.

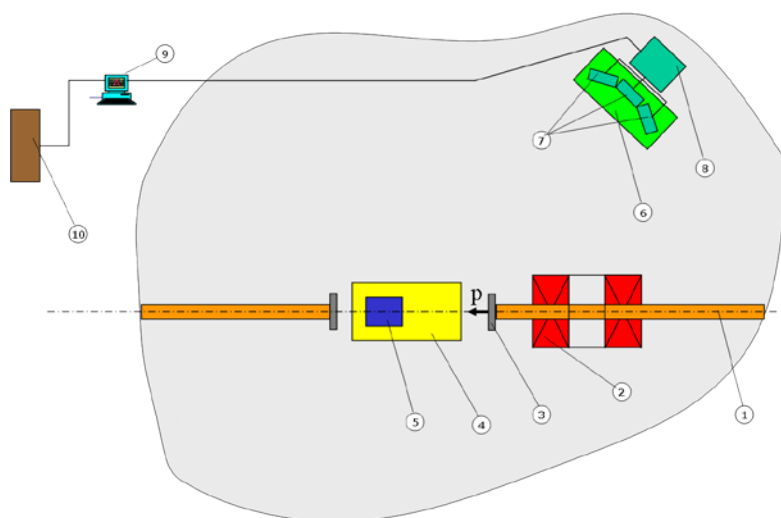


Рис. 10. Схема проведения эксперимента на синхроциклотроне ПИЯФ РАН:  
 1 – канал вывода пучка, 2 – система фокусирующих линз, 3 – место выхода протонного пучка в экспериментальный зал, 4 и 6 – установочные столы, 5 – массивная свинцовая мишень, 7 – детекторы ВF<sub>3</sub>, 8 – измерительное оборудование, 9 – обрабатывающая ЭВМ, 10 – блок управления пучком.

На рис. 11 представлены полученные в экспериментах спады нейтронной активности для облучаемой массивной свинцовой мишени, содержащей либо урановую, либо свинцовую цилиндрические вставки (соответственно наборы экспериментальных точек фиолетового и зеленого цвета на рис 11). Данные приведены к одному потоку протонов на поверхности мишени.

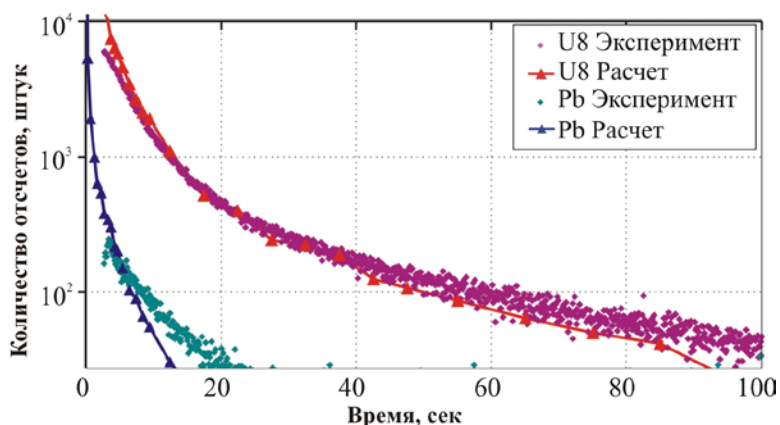


Рис. 11. Спады нейтронной активности массивной свинцовой мишени с урановой (фиолетовые точки) и свинцовой (зеленые точки) вставками. Красная и синяя кривые – результаты вычислительного эксперимента с урановой и свинцовой вставками соответственно

Из рис. 11 видно, что в интервале времен до 20 с уровень нейтронного сигнала-отклика от облученной протонами массивной свинцовой мишени в

случае расположения в ней свинцового цилиндра приблизительно в 40 раз ниже уровня этого же сигнала при расположении в ней уранового цилиндра.

Исходя из полученных результатов физических экспериментов, можно утверждать, что при облучении высокоэнергетическим протонным пучком геологического объекта, содержащего уран, в область открытого пространства, находящуюся в непосредственной близости к облученной зоне, будет излучаться интенсивный поток запаздывающих нейтронов. Данный поток нейтронов можно зарегистрировать дистанционно на некотором расстоянии от облученного объекта.

На рис. 11 для сравнения приведены также результаты вычислительного эксперимента с урановой и свинцовой вставками (красная и синяя кривые соответственно), моделирующего проведенный физический эксперимент. Из рис. 11 видно, что результаты вычислительных и физических экспериментов близки. Из этого следует, что расчетная модель, используемая в вычислительных экспериментах, достаточно адекватно описывает исследуемые процессы, инициируемые высокоэнергетическим протонным пучком. Имеющиеся расхождения (для случая с урановой вставкой – не более нескольких процентов) незначительны в масштабах проводимых экспериментов.

### **Основные результаты работы:**

1. Разработан активный метод дистанционного зондирования Земли в целях поиска месторождений руд, основанный на облучении исследуемых областей пучками высокоэнергетических протонов, регистрации и анализе формируемых изображений для идентификации различных химических элементов, в том числе радиоактивных.

2. Разработаны алгоритмы обработки и дешифрирования данных, полученных с помощью предложенного метода дистанционного зондирования Земли с использованием потоков частиц, позволяющие выявить наличие различных химических элементов в рудах, в том числе

радиоактивных. При этом дешифровочными признаками являются энергия и интенсивность излучения гамма-квантов, а также интенсивность излучения нейтронов.

3. Предложены пути практической реализации активного метода дистанционного зондирования Земли в целях поиска месторождений руд, основанные на облучении с борта летательного аппарата исследуемой геологической области протонным пучком с энергией  $\sim 250$  МэВ, создаваемым компактным ускорителем, а также регистрации ответных сигналов-откликов в виде потоков гамма-квантов и нейтронов с помощью детекторов, расположенных на летательном аппарате или опускаемых на трос-кабеле или штанге.

4. На основании результатов проведенных вычислительных экспериментов с использованием метода Монте-Карло подтверждена возможность реализации активного метода дистанционного зондирования Земли в целях поиска руд с простым и сложным элементарным составом на примере минералов магнетита и боксита. В результате расчетов получены отношения сигнал/шум, составляющие для этих материалов величины от 3 до 6,5, что достаточно для обнаружения месторождений данных металлических руд.

5. Проведены физические эксперименты по облучению высокоэнергетическими протонами массивной свинцовой мишени, содержащей вставки из урана ( $^{238}\text{U}$ ) или свинца, моделирующие процесс поиска месторождения урана, результаты которых показали, что при облучении мишени с урановой вставкой интенсивность излучаемых мишенью запаздывающих нейтронов в 40 больше, чем при облучении этой мишени со свинцовой вставкой. Это подтверждает возможность дистанционного обнаружения радиоактивных руд путем их облучения протонным пучком с последующей регистрацией нейтронных сигналов-откликов.

6. Сравнение результатов физических и вычислительных экспериментов, моделирующих процесс дистанционного поиска месторождений руд радиоактивных металлов, показало их хорошее соответствие (относительное расхождение не более нескольких процентов), что подтверждает адекватность используемых методик и реализуемость предложенного активного метода дистанционного зондирования Земли.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Бондур В.Г., Макаров В.А., Мурынин А.Б. Дистанционный метод поиска минералов с использованием мобильного источника высокоэнергетических протонов // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010, № 3 (перечень ВАК), с. 57–62.
2. Бакаляров А.М., Бондур В.Г., Макаров В.А и др. Характеристики мгновенного, запаздывающего и задержанного излучения при контроле сильноэкранированных делящихся веществ с помощью импульсного фотоядерного метода // Атомная энергия, т. 109, выпуск 1. – 2010 (перечень ВАК), с. 38–46.
3. Макаров В.А., Мурынин А.Б. Численное моделирование в задаче дистанционного поиска минералов с использованием высокоэнергетических протонов // Труды Института системного анализа Российской академии наук, т. 49(1). – 2010 (перечень ВАК), с. 180–187.
4. Бондур В.Г., Макаров В.А. Использование ускорителей протонов для дистанционного зондирования естественных радиоактивных металлов. // Сборник статей по итогам международной научно-технической конференции, посвященной 230-летию основания МИИГАиК. Выпуск 2, часть I. – 2009, с. 27–28.