

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

На правах рукописи
УДК 539.17. 543.52. 543.53

САЙДУЛЛАЕВ БАХОДИР ЖУРАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ^{222}Rn И ^{226}Ra В
КОСТНЫХ ОСТАНКАХ И ВОЛОСАХ ЛЮДЕЙ ТРЕКОВЫМ
ДЕТЕКТОРОМ CR-39**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по техническим наукам

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Васидов Абдисамат

Ташкент-2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНО–АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА КОСТЕЙ И ВОЛОС ЧЕЛОВЕКА.....	15
§1.1. Исследовательские ядерные реакторы	15
§1.2. Реактор ВВР-СМ и его применение в инструментальном нейтронно-активационном анализе	16
§1.3. Нейтронно-активационный анализ костных образцов	17
§1.4. Волосы и методы анализа	18
§1.4.1. Спектральный анализ волос на микроэлементы	26
§1.4.2. Нейтронно-активационный анализ волос	21
§1.4.3. Естественные радионуклиды в волосах человека.....	22
§1.5. ^{222}Rn и ^{226}Ra в объектах окружающей среды	24
§1.5.1. Общие свойства радона	24
§1.6. Общие свойства ^{226}Ra	29
§1.6.1. Трековый метод определения ^{222}Rn и ^{226}Ra	30
§1.6.2. Определение ^{222}Rn и ^{226}Ra в костях с помощью трекового детектора	32
§1.7. Определение скорости эксхалляции радона пассивными методами....	35
§1.8. Суммарная α -активность радионуклидов	38
Выводы по первой главе.....	39
ГЛАВА II. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	40
§2.1. Объекты исследования	40
§2.2. Техника эксперимента, использованная в ядерном реакторе	40
§2.2.1. Методика ИНАА	40
§2.2.2. Подготовка к анализу образцов костей и почв	42
§2.3. Техника эксперимента при измерении активности радона	43
§2.3.1. Методики измерения объемной активности радона	43
§2.3.2. Методика определения СЭР из костей и волос	44

§2.3.3. Травление детекторов для подсчета α -треков на оптическом микроскопе.....	45
§2.4. Техника эксперимента по измерения суммарной α -активности	47
§2.4.1. Подготовка образцов	47
§2.4.2. Измерения суммарной α -активности радионуклидов	48
Выводы по второй главе	49
ГЛАВА III. НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КОСТНЫХ ОСТАНКОВ.....	50
§3.1. ИНАА доисторических и древних костей	51
§3.2. Оценка коэффициента накопления элементов в костных останках...	57
Выводы по третьей главе.....	60
ГЛАВА IV. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТРЕКОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ АКТИВНОСТЕЙ ^{222}Rn И ^{226}Ra В КОСТНЫХ ОСТАНКАХ И ВОЛОСАХ ЧЕЛОВЕКА	61
§4.1. Измерение объемной активности и скорости эксхалации радона ...	61
§4.1.1. Определения удельной активности ^{226}Ra в костях и окружающих их почвах	63
§4.2. Измерение суммарной удельной α -активности радионуклидов ...	66
§4.2.1. Подготовка образцов к измерению	66
§4.2.2. Условный коэффициент накопления радионуклидов в костях и почве	69
§4.3. Методика определяния удельной активности ^{226}Ra в волосах человека.....	71
§4.3.1. Измерение объемной активности радона в волосах	71
§4.3.2. Определение удельной активности ^{226}Ra в волосах	73
Выводы по четвертой главе.....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	80
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ	92

ВЕДЕНИЕ

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время исследование методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) проводятся во многих ведущих научных центрах мира. Среди радиоаналитических методов инструментальный нейтронно-активационный анализ получил широкое применение благодаря низкому пределу обнаружения элементов и возможности проведения многоэлементного анализа. Для археологов, палеонтологов и радиоэкологов практический и научный интерес представляют сведения об элементном составе костей, а также подвижность и накопление радионуклидов в костях при длительном нахождении скелета в недрах земли. Актуальность инструментального нейтронно-активационного анализа подтверждается исследованиями вариаций содержания элементов в недавно найденных (2000-2014 гг.) костных останках динозавров, южного мамонта, архантропа и стандартных костях овцы и крупного рогатого скота, соответствующих различным возрастным периодам развития жизни на нашей планете. Для определения скорости эксхалации ^{222}Rn и удельной активности ^{226}Ra в костных образцах востребованы методики трекового анализа с применением ядерных твердотельных детекторов (ЯТТД) типа CR-39.

В мире методы измерения альфа излучателей нашли широкое применение в исследованиях, связанных с экологией, производством продуктов питания, охраной здоровья, геологическими и геофизическими изысканиями. Для исследования радона в природных и техногенных объектах широко применяются ядерные твердотельные трековые детекторы. Преимуществами ЯТТД являются их простота, возможность работы в широком диапазоне температур, в условиях больших потоков слабоионизирующих гамма и бета излучений, получение интегральной или усредненной активности радона.

В условиях изменения климата и техногенного воздействия радиоактивных загрязнений на экологическую среду, чрезвычайная роль отводится радиационному контролю уровня радиации в органах человека, так как возникновение заболеваний тех или иных органов человека находится в прямой зависимости от радиационного уровня. Одним из индикаторов состояния здоровья, являются волосы человека. В нашей Республике проводятся работы по определению состава и вариации радиоактивных микроэлементов в волосах, что позволяет ученым радиоэкологам и медикам использовать их как показатель физического состояния организма человека. Направление этих прикладных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны, связаны со Стратегией¹ развития нового Узбекистана на 2022-2026 гг.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной мере соответствуют задачам, обозначенным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-1442 «О приоритетах развития промышленности Республики Узбекистан в 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2010 года, № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии» и VII. «Науки о земле (геология, геофизика, сейсмология и переработка минерального сырья)».

¹Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 г.

Степень изученности проблемы. В настоящее время измерениями объемной активности и скорости эксхалации радона трековыми детекторами типа CR-39 занимаются ученые во многих лабораториях мира, в частности шведские (Akerblom G., Anderson P., Mustonen R.), словенские (Ilic R., Durrani S.A., Vaupotic J.), американские (Fleisher R.L., Hart H.R., Morgo-Campero A.), индийские (Singh S., Malhotra R., Kumar J.), российские (Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Николаев В.А., Антипина Е.Е., Зайчик В.Е. и др.), пакистанские (Said Rahman, Al-Jarallah M.I., Abu-Jarad F., Fazal-ur-Rahman), узбекистанские (Васидова А. и др.).

Исследования с использованием трекового детектора типа CR-39 показали, что в повседневной жизни население планеты получает большие дозы от ^{222}Rn . При этом высокий уровень радона наблюдается в обычных домах и рабочих помещениях, представляющих опасность для здоровья резидентов. Эти результаты привели к широкому спектру мероприятий и интенсивным исследованиям, направленным на ограничение воздействия радона на человека. Согласно данным российских ученых, кости животных и человека достаточно обильны в археологических памятниках, и зачастую являются наиболее многочисленным и долговосхраняющимся материалом на Земле. В работе А.Васидова экспериментальным методом ИНАА определен микроэлементный состав доисторических и древних костей, найденных в 1960–1980 гг. на территории Узбекистана, и показана зависимость возрастания содержания урана и делящихся элементов в костных останках от длительности нахождения скелетов в почвенных слоях Земли.

Однако до сих пор не измерены скорости эксхалации ^{222}Rn и удельная активность ^{226}Ra , а также суммарные альфа активности в костных находках. До сих пор остаются дискуссионными пути поступления и накопления элементов в костях и радиогенное датирование возраста в условиях, происходящих в системе «почва-кость». Научные работы, посвященные исследованию содержания элементов в доисторических и древних костных находках, также отсутствуют. Поэтому исследование основных компонентов

и других микроэлементов в костных находках может дать ценную информацию о возрасте и зарождении жизни млекопитающих и первобытных людей на Земле.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках утвержденной Постановлением Президента РУз № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз на 2020–2024 годы по теме «Разработка радиохимических технологий получения радионуклидов для ядерной медицины и технологии, получение модифицированных и композиционных сорбентов для очистки жидких радиоактивных отходов» (2020-2024).

Целью исследования является разработка методики определения скорости эксхалляции ^{222}Rn , удельной активности ^{226}Ra с помощью CR-39 детектора.

Задачи исследования:

применение инструментального нейтронно-активационного анализа для исследования элементного состава костных останков динозавров, южных мамонтов, архантропа и стандартной кости с целью получения информации, соответствующей различным возрастным периодам развития жизни млекопитающих и первобытных людей на Земле;

разработка методики трекового анализа с использованием CR-39 детектора для определения скорости эксхалляции ^{222}Rn и удельной активности ^{226}Ra в костных останках и окружающих их почвах;

разработка методики определения суммарной удельной α -активности радионуклидов для оценки достоверности результатов трекового анализа;

разработка методики измерения скорости эксхалляции ^{222}Rn с помощью трекового детектора CR-39 для определения удельной активности ^{226}Ra в волосах людей.

Объектом исследования являются кости динозавров, южных мамонтов, архантропа, стандартная или обычная кость барана и крупнорогатого скота, окружающие их почвы, волосы человека, радиоактивный и инертный газ ^{226}Ra и ^{222}Rn .

Предметом исследования являются содержание и распределение химических элементов и их вариации в доисторических и древних костях, суммарные и удельные активности альфа излучающих радионуклидов в биологических образцах, объемная активность и скорость эксхалации ^{222}Rn .

Методы исследования: методы инструментального нейтронно-активационного анализа, измерения суммарной α -активности радионуклидов, трековый детектор CR-39.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана новая методика определения удельной активности ^{226}Ra в древних костных останках и окружающем их слое почвы с помощью трекового детектора CR-39, регистрирующего α -частицы дочернего ^{222}Rn из костей и почвы;

методом трекового анализа установлено, что возраст костных остатков находится в прямой зависимости от корреляций удельной активности ^{226}Ra в них и в окружающей почве;

с использованием инструментального нейтронно-активационного анализа новонайденных костей показано, что почва является основным источником поступления урана в ткань скелета ($1.5 \div 220$ мг/кг), при этом концентрация ^{232}Th в костях меняется незначительно ($0.58 - 0.78$ мг/кг);

впервые разработана методика определения суммарной α -активности радионуклидов в костных останках и показана сходимость результатов трекового анализа и суммарной α -активности радионуклидов;

разработана высокочувствительная методика определения концентрации ^{226}Ra в волосах человека и показано, что волосы служат индикатором радиозагрязнения местности.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

методом инструментального нейтронно-активационного анализа обнаружена корреляционная зависимость между концентрацией ^{238}U в доисторических и древних костных находках и окружающем их слое почвы;

методом инструментального нейтронно-активационного анализа доказано, что концентрация ^{232}Th в костных останках мамонтов и динозавра различается незначительно и составляет: 0.58; 0.69; 0.62 соответственно, и 0.78 мг/кг в костях стандарта, при содержании в окружающем их слое почвы от 13 до 17 мг/кг.

Достоверность результатов исследования основывается на использовании современных высокочувствительных трековых детекторов типа CR-39 и регистрации наведенной активности исследуемых образцов и эталонов из коллекции международных стандартов, схожих по химическому составу и физическим свойствам с анализируемыми пробами, сходимостью результатов измерения активностей, проведенных трековыми и сцинтилляционными методами анализа, а также сравнением полученных данных с аналогичными данными отечественных и зарубежных авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в расширении возможностей определения возраста биологических и археологических находок в области антропологии и археологии, а также в решении задач радиэкологии для контроля радиационной безопасности окружающей среды.

Практическая значимость результатов определяется тем, что они могут использоваться для получения реальных данных о различных этапах развития жизни млекопитающих и первых людей на территории нашей Республики, а также для оценки и изучения динамики радиационного загрязнения местности.

Внедрение результатов исследований. На основе полученных результатов по разработке методик для определения ^{222}Rn и ^{226}Ra с помощью трекового анализа костных останков и волос человека:

методика определения удельной активности ^{226}Ra в древних костных останках и окружающем их слое почвы с помощью измерительной камеры трекового детектора CR-39 была использована в Государственном геологическом музее Министерства горнодобывающей промышленности и геологии (Письмо Государственного геологического музея № 52 от 08.06.2023). Использование результатов разработки позволило уменьшить выход радона с поверхности экспонатов скелетов и поддерживать объемную активность ^{222}Rn в пределах санитарных норм НРБ РУз;

методика определения возраста экспонатов скелетов по удельной активности ^{226}Ra в костях, а также результаты инструментального нейтронно-активационного анализа по определению урана и тория были использованы в Государственном геологическом музее Министерства горнодобывающей промышленности и геологии (Письмо Государственного геологического музея № 52 от 08.06.2023). Использование результатов позволило получить информацию о присутствии в экспонатах скелетов тяжелых радиоктивных элементов, которые пагубно влияют на окружающую среду;

способ определения удельной активности ^{226}Ra в волосах путем регистрации α -частиц дочернего ^{222}Rn трековым детектором CR-39 в изолированной камере зарегистрирован в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (патент РУз на полезную модель № FAP 01941 от 29.04.2022). Использование способа позволило упростить и снизить затраты анализа на предмет обнаружения ^{226}Ra .

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 13 международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации получен 1 патент на полезную модель, опубликованы 18 научных работ, из них 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 2 в зарубежных научных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 89 страниц.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Vasidov A., Akhmadshaev A., Osinskaya N.O., Saydullayev B.J. Neutron activation and track analysis of the newly found bones of the southern mammoths and dinosaurs // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. - Springer (Netherlands), 2016. – pp. 953-958. (№1. Web of Science; IF=1,371).

2. Васидов А., Ахмадшаев А., Осинская Н.С., Сайдуллаев Б.Ж. Инструментальный нейтронно-активационный анализ древних костей, найденных на территории Узбекистана // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2017. – №2(19). – С. 114-119. (01.00.00. № 5)

3. Vasidov A., Saidullaev B. J., Usmanov T. M. α -Activity Measurement for Native Radionuclides in Ancient Bone Remains // Atomic Energy. – Moscow, 2022. – Vol.131, No.5. – pp. 279-283. (№1. Web of Science; IF=0.33)

4. Васидов А., Сайдуллаев Б.Дж., Усманов Т.М. Измерение суммарной альфа-активности естественных радионуклидов в древних костных останках // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2022. – №1(24). – С. 76-79. (01.00.00. № 5)

5. Patent RUz № FAP01941. CR–39 iz detektori yordamida sohdagi radiy–226 solishtirma aktivligini aniqlash usuli / Vasidov A., Saydullayev B. J. // Rasmiy Axborotnoma. - 2022. – №5. – B.139

6. Vasidov A., Akhmadshaev A., Saydullayev B. J. Activation and track analysis of the bone remains found in the territory Uzbekistan // «The seventh Eurasian conference Nuclear science and it's application»: Book of abstracts, October 21-24, 2014. – Baku (Azerbaijan), 2014. – pp. 370-371.

7. Васидов А., Ахмадшаев А., Сайдуллаев Б.Дж. Определение эксхалиции радона из доисторических и древних костных образцов // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Материалы

Республиканской конференции, посвященная 100-летию академика С.А. Азимова 6-7 ноября 2014. – Ташкент, 2014. – С. 34-35.

8. Vasidov A., Akhmadshaev A., Osinskaya N.S., Saidullaev B.J. Neutron activation and track analysis of the newly found bone relicts // The International Conference On Modern Trends In Activation Analysis, 23-28 August, 2015. – Niderland: Delft University of Technology, 2015. – pp. 132.

9. Васидов А., Ахмадшаев А., Сайдуллаев Б.Ж. Янги топилган тарихий ва қадимий суякларнинг инструментал нейтрон активацион таҳлили // «Физика фанининг ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни»: Республика илмий – амалий конференция мақолалари тўплами, 24-25 апрель 2015. – Тошкент, 2015. – Б. 153-159.

10. Васидов А., Сайдуллаев Б.Ж. Жанубий фил суяк қолдиқларидаги радон эксхалация тезлигини аниқлаш // «Физика фанининг ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни»: Республика илмий – амалий конференция мақолалари тўплами, 24-25 апрель 2015. – Тошкент, 2015. – Б. 111-114.

11. Васидов А., Сайдуллаев Б.Ж. Био намуналарда ^{222}Rn радиоактивлигини ва эксхалация тезлигини аниқлаш методикасини яратиш // «Ядро физикаси ва ядровий технологиялар»: Ўзбекистон ёш физиклари V республика анжумани мақолалари тўплами, 4-5-декабр, 2018. – Ташкент, 2018. – С.159-161.

12. Васидов А., Сайдуллаев Б.Ж. Тарихий ва қадимий суяк топилмаларида радон-222 радиоактивлигини ва эксхалация тезлигини аниқлаш // Ёш олимлар ахборотномаси. – Тошкент, 2019. – №3 (1). – Б. 45-46.

13. Сайдуллаев Б.Дж., Васидов А. Определение скорости эксхалации радона из костных останков // Радиационно –гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: Материалы международной научно-практической конференции 22-23 апреля 2021. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 191-194.

14. Сайдуллаев Б.Ж., Васидов А. Қадимий ва стандарт суяк қолдиқларидаги радон эксхалация тезлигини аниқлаш // «Замонавий

физиканинг долзарб муаммолари»: VII Республика илмий – назарий анжуман материаллари, 19-20 май. – Термиз, 2017. – Б. 207-209.

15. Сайдуллаев Б.Дж., Васидов А., Усманов Т.М. Измерение α -активности естественных радионуклидов в древних костных останках // «Ядерная физика и ядерные технологии»: Сборник докладов VI Республиканской конференции молодых физиков Узбекистана 4-5-декабря 2020. – Ташкент: Институт ядерной физики АН РУз, 2020. – С.203-212.

16. Saydullaev B.J., Vasidov A., Usmanov T.M. Measuring the alpha activity of natural radionuclides in ancient bone remains // “Modern Problems of Nuclear Energetics and Nuclear Technologies”: Book of Abstracts of International Conference, November 23-25, 2021. - Tashkent: Institute of Nuclear Physics, 2021. – pp. 199.

17. Васидов А., Сайдуллаев Б. Дж. Разработка методики измерения радона-222 из волос для определения удельной активности радия-226 в волосах с помощью трекового детектора CR-39 // Сб. материалов Международной научно–практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – залог прогресса и процветания», посвященной 5-летию основания Навоийского отделения Академии наук Республики Узбекистан. – Навои, 2022. – С.67 – 70.

18. Vasidov A., Saydullaev B.J. The measurements of ^{222}Rn and ^{226}Ra activities in human hairs by using CR-39 track detectors // IV International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” September 26-30, 2022. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2022. – pp.192.

ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНО–АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА КОСТЕЙ И ВОЛОС ЧЕЛОВЕКА

§1.1. Исследовательские ядерные реакторы

В настоящее время в 54 странах мира используются более 200 исследовательских ядерных реакторов (ИЯР) [1, 2]. ИЯР являются основными ядерными установками, способствующими развитию национальной инфраструктуры и программ в области ядерной науки и технологий. Благодаря высокому и устойчивому нейтронному потоку, а также вполне достаточному объему облучаемых материалов, установки ИЯР являются наиболее важными нейтронными источниками для нейтронно-активационного анализа (НАА) и инструментального НАА (ИНАА) [3]. В настоящее время хорошо исследованы практически все радиохимические и радиоаналитические характеристики метода НАА. По результатам НАА опубликованы многочисленные монографии, различные фундаментальные труды [3, 4]. Каждые три-четыре года проводятся международные конференции по этой тематике – “Modern Trends in Activation Analysis” и “Regular conference of Radioanalytical and Nuclear Chemistry” [5].

ИНАА является уникальным методом для анализа экологических и биологических объектов. Будучи в значительной степени зависимым от матричных эффектов, метод пригоден для анализа некоторых трудно растворимых (менее активирующихся) материалов, например, керамических. Благодаря этим уникальным преимуществам, а также чувствительности и точности, ИНАА занимает особое место в качестве достоверного метода среди других аналитических методов. ИНАА является чрезвычайно полезным методом при определении следов микроэлементов во многих дисциплинах. В частности, метод нашёл широкое применение в исследованиях, связанных с экологией [4], производством продуктов питания, охраной здоровья [6], геологическими и геофизическими изысканиями, а также в материаловедении [8]. Метод также применяется в

других областях, таких, как археология, криминалистика, фармакология и т.д. Трудно назвать хотя бы одно направление, где бы нельзя применять данный метод.

§ 1.2. Реактор ВВР-СМ и его применение в инструментальном нейтронно-активационном анализе

ИЯР ВВР-С ИЯФ АН РУз (водо-водяной реактор серийный) с мощностью 2 МВт был введен в эксплуатацию в 1959 году, а после модернизации в 1972 году мощность реактора возросла до 10 МВт и он стал именоваться ВВР-СМ (водо-водяной реактор серийный, модернизированный). В 2008 году был переведен на топливо ИРТ-4М с 19.7% обогащением по ^{235}U , количество которого в активной зоне составило 20 ТВС. Исследовательский реактор ВВР-СМ относится к ядерным реакторам бассейнового типа с плотностью потока нейтронов в пределах $10^{12} \div 1.4 \cdot 10^{14}$ нейтр/(см²·с) с энергией $25 \cdot 10^{-9} \div 9$ МэВ и работает на мощности 10 МВт.

В настоящее время реактор ВВР-СМ используется для проведения экспериментов по ядерной физике, физике твердого тела, нейтронно-активационному анализу, производству радиоактивных изотопов и другим научно-прикладным исследованиям [9]. Для выполнения этих экспериментов имеются 9 горизонтальных каналов, графитовая тепловая колонна и вертикальные каналы для облучения в активной зоне и в зоне бериллиевого отражателя [2].

Исходя из целей и задач данной работы, рассмотрено одно из направлений применения данного реактора в решении ядерно-аналитических задач, а именно в использовании инструментального нейтронно-активационного метода для анализа археологических объектов, найденных в 2000–2014 годах на территории Республики Узбекистан.

§ 1.3. Нейтронно-активационный анализ костных образцов

Главное преимущество метода ИНАА при изучении свежих костей и волос (или их останков) состоит в том, что на матричных элементах (С, Н, N, O) образуется очень незначительная активность радионуклидов, излучающих γ -лучи, которые могли бы мешать определению следовых количеств элементов. По реакциям $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ и $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ образуются не излучающие γ - кванты радионуклиды ^{14}C и ^3H с очень незначительной активностью, а по реакциям $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ и $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ образуются очень короткоживущие радионуклиды - ^{19}O ($T_{1/2}=27$ с) и ^{16}N ($T_{1/2}=7.1$ с). Однако, высокая концентрация P в костных тканях уменьшает возможность определения некоторых γ -излучателей, так как ^{32}P , образующийся по реакции $^{31}\text{P}(n, \gamma)$, который хотя сам не является гамма излучателем, но дает распределение тормозного излучения в области спектра γ - лучей 0-1.7 МэВ. Точно так же Na, K и Cl в биологических образцах могут производить высокие активности ^{24}Na ($T_{1/2}=15$ ч), ^{42}K ($T_{1/2}=12$ ч) и ^{38}Cl ($T_{1/2}=37$ мин) [10].

Как свидетельствуют публикации, кости животных и людей являются основным каркасом организма и состоят на 50% из кальция фосфата [11, 12]. Кости животных и человека являются наиболее исследованным материалом [13, 14, 15, 16], также имеется специальный веб-сайт в интернете, посвященный костным находкам [17]. Американскими радио-аналитиками был проведен многоэлементный нейтронно-активационный анализ (НАА) стандартных костей животных и человека [18, 19]. В работах российских авторов [20, 21] исследовано влияние вариаций элементов (Ca, Cl, Mg, Mn, Na и P) на процесс протекания заболеваний в костях методом ИНАА. В работе бразильских ученых метод ИНАА был использован для определения микроэлементов в реберных костях, взятых при вскрытии трупов [22]. В работе [23] проведены измерения удельной альфа-активности естественных радионуклидов ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{226}Ra в костях обычных животных - овцы, коровы и курицы – с использованием трековых детекторов типа CN-85.

Также имеются работы, где проведен ИНАА для определения элементного состава доисторических и древних костных образцов животных и человека [24, 95].

В статье [24] использована методика ИНАА для определения содержания 25 химических элементов в костных останках динозавров, медведя и архантропа, найденных на территории Узбекистана до 1980 г. Были получены данные, что содержание лантаноидов La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu и As, Br, и Mo в костях динозавров достигает очень высоких значений 280÷3200 мг/кг и сделано очень важное заключение о том, что причиной этого феномена является процесс деления ядер ^{235}U , потому что содержание ^{238}U в доисторических образцах составило до 180 мг/кг. Найдено, что содержание урана в костях растет в зависимости от длительности залегания скелета в почве.

Обнаружение новых костей южного мамонта и динозавра в 2005-2014 гг. на территории Узбекистана представляет интерес для исследования элементного состава этих реликтов для радиоаналитиков, археологов, палеонтологов и геологов. Потому, что исследование основных компонентов и других микроэлементов в костях может дать ценную информацию о возрасте, образе жизни и причинах массового исчезновения на Земле доисторических реликтов 65 миллионов лет назад.

§ 1.4. Волосы и методы анализа

Как известно, волосы человека состоят преимущественно из кератина, который представляет собой белок, построенный из аминокислот и богатый сульфгидрильными группами цистеина [25, 26]. Аминокислоты являются строительным материалом для роста здоровых волос, и эти аминокислоты с различными микроэлементами и концентрациями поступают в наш организм с пищей. Они разносятся по всему телу кровотоком и по капиллярам достигают волосяного сосочка [28]. Согласно данным в человеческих волосах найдено более 40 химических элементов, из них 10 являются (45%

углерод, 7% водород, 28% кислород, 15% азот и 5% серы) основными компонентами [27]. Возникновение заболеваний тех или иных систем человека находится в прямой зависимости от состояния окружающей среды, уровня и характера ее загрязнения. Макро- и микроэлементный состав волос человека можно считать индикатором экологического неблагополучия территорий и показателем здоровья населения [28].

Состав и вариации микроэлементов в волосах позволяют ученым использовать их как показатель физического состояния организма человека. В то же время микроэлементы также могут служить индикатором загрязнения окружающей среды [29], в том числе из-за наличия тяжелых радиоактивных элементов природного или техногенного происхождения. Из таковых, природным токсичным тяжелым радиоактивным элементом является ^{226}Ra , который считается очень опасным для здоровья людей [29, 50, 91]. Как показывает литературный обзор по определению ^{226}Ra в биообъектах, имеются публикации и патенты на изобретения, относящиеся к определению концентрации радона и радия в водах, в почвах и в костях животных [23, 30, 31, 32]. Однако работы по определению удельной активности радия в волосах очень скудны [27, 28, 34]. В работе [27] значения эксхалации ^{222}Rn определяли в диапазоне $0.28 \div 0.37$ мБк/м²дн с применением трекового детектора LR-115, а удельную активность ^{226}Ra в $2.3 \div 3.07$ Бк/кг в красках для волос.

Литературы, посвященной измерению ^{222}Rn в волосах, очень мало. Есть работа [34], где образцы волос с известной массой помещают в герметичный контейнер с объемом 0.4 л, затем контейнер герметично закрывают резиновой пробкой и оставляют на 21÷30 дней при комнатной температуре для накопления и достижения радиоактивного равновесия ^{222}Rn с материнским радионуклидом ^{226}Ra . После истечения необходимого времени, накопленный газ радон из контейнера переводят в объем сцинтилляционной ячейки ($V=125$ мл) с помощью мини-насоса. Световые вспышки сцинтилляционной ячейки (СЦЯ) регистрируются фото-умножителем в

импульсах тока. При этом измерение длится в течение 24 часов с интервалом каждые 10 минут.

§1.4.1. Спектральный анализ волос на микроэлементы

В стержне волоса накапливается информация о минеральном составе всего организма, и чем ближе к коже участок волоса – тем более актуальна «информация». Это не только диагностика химического состава волоса, это индивидуальный «минеральный паспорт» всего организма. Анализ волос на микроэлементы особенно актуален, поскольку вода в нашем мегаполисе не лучшего качества, а недостаток полезных элементов и витаминов в комплексе с загрязнённой окружающей средой порой весьма негативно сказывается на здоровье в целом. Благодаря спектрограмме можно выявить предрасположенность к той или иной болезни, т.е. полученный анализ волос является прекрасным подспорьем в обследовании пациента. За год волосы отрастают приблизительно на 15 сантиметров, и разные его участки хранят различную информацию, что позволяет составить наиболее полную картину о состоянии здоровья. Для получения полной информации о минеральном составе организма волосы состригаются с одного или нескольких участков головы (затылка и темени) максимально близко к коже. Полученные пряди волос очищают специальными растворами, затем их помещают в контейнер с кислотной средой для расщепления до необходимой субстанции. По истечению определенного промежутка времени, специалист анализирует содержащуюся в контейнере пробу с помощью спектрометра [28, 30].

По результатам анализа волос становится понятно, каких микроэлементов в организме человека не хватает, а какие – в избытке. Все микроэлементы, содержащиеся в нашем организме, делятся на жизненно необходимые (селен, цинк, кальций, магний и др.) и токсичные (ртуть, свинец, кадмий и др.), также выделяют потенциально токсичные и условно эссенциальные (никель, литий и др.). Токсичные или потенциально токсичные вещества попадают в организм и в структуру волос извне – к

примеру, использование различных косметических средств, химическое воздействие на волосы, влияние окружающей среды и еще множество факторов, которые в определенный момент могут сказаться негативным образом на состоянии здоровья человека. В норме их количество не превышает допустимых пределов, однако, если анализ показывает повышенное содержание в волосах того или иного элемента, это повод провести дополнительные обследования и устранить причину отклонения [29]. Из множества микроэлементов, определяемых посредством спектрального анализа, некоторые имеют особое значение. Это калий, натрий, селен, кальций, железо, цинк, медь, йод, кобальт, кремний. Так, в работе [29] спектральным анализом выявлено умеренное повышение концентрации ртути в волосах. Зачастую такое превышение не является признаком отравления ртутью, а свидетельствует о приверженности к диете, богатой морепродуктами и морской рыбой. В данном случае повышенное содержание этого металла может быть вызвано дефицитом селена – естественного антагониста ртути [30].

§ 1.4.2. Нейтронно-активационный анализ волос

Общеизвестно, что дефицит или избыток микроэлементов может быть вреден для организма, и есть данные о том, что состояние питания и некоторые заболевания сопровождаются специфическими изменениями в составе волос. Считается, что изменения в элементном составе волос зависят от изменений внешней и внутренней среды человеческого тела и что волосы нормальных и здоровых людей содержат каждый элемент в четко определенном диапазоне концентраций.

Анализ волос имеет ряд преимуществ по сравнению с анализом биологических жидкостей (кровь, моча) или тканей, и он выполняется большим количеством лабораторий в коммерческих масштабах.

Сотрудники Института ядерной физики АН РУз определили состав микроэлементов в волосах детей, проживающих в густонаселенном

Чиланзарском районе г. Ташкента и страдающих железodefицитной анемией с помощью нейтронно-активационного анализа. Для анализа отбирали прядь волос длиной 2÷4 см от корня с четырех-пяти мест на затылке, тщательно промывали в ацетоне, сушили, взвешивали, а затем упаковывали в маркированные полиэтиленовые пакеты. Облучение образцов проводили на атомном реакторе потоком нейтронов 10^{13} н/см²с и анализировали по методике, описанной в [35]. В результате анализа было установлено, что концентрация определенных химических элементов меняется в зависимости от тяжести заболевания и возраста детей. Авторы предлагают использовать данные для коррекции микроэлементного состава у детей, страдающих железodefицитной анемией.

§ 1.4.3. Естественные радионуклиды в волосах человека

Природные радионуклиды земного происхождения, такие как ²³⁸U, ²³⁵U, ²²⁶Ra, ²²²Rn, ²¹⁰Po и ²¹⁰Pb, в разной степени присутствуют во всех средах окружающей среды, включая организм человека. Они попадают из окружающей среды в организм человека при дыхании и с приемом пищи и воды. В целом гораздо меньшие количества поступают при дыхании, чем при приеме пищи. Поступление естественных радионуклидов в волосы варьируется в зависимости от рациона питания и от геологических особенностей местности. Концентрация радионуклидов в пищевых продуктах сильно зависит от климатических условий и от состава почв.

Как и другие загрязнители, многие естественные радиоактивные вещества также накапливаются в волосах. Если концентрацию активности радионуклида в волосах можно связать с определенным уровнем активности в организме человека, то можно будет использовать волосы в качестве индикатора воздействия радиоактивных материалов. Однако использование волос в качестве биоиндикатора профессионального или экологического воздействия, было предметом некоторых дискуссий. Использование волос в качестве биоиндикатора имеет некоторые преимущества по сравнению с

обычно используемыми биообъектами. Уровни многих элементов в волосах как минимум на порядок выше, чем в других тканях или жидкостях организма. Следовательно, для анализа достаточно небольшого количества волос. Поскольку скорость роста человеческих волос составляет примерно $1 \div 1.5$ см в месяц [36], анализ волос на содержание в них радионуклидов будет отражать поступление нуклидов в организм человека за несколько предшествующих месяцев. Образцы волос легко получить и транспортировать без специальных условий для транспортировки или хранения. Волосы также являются стойким материалом, который не разрушается быстро, поэтому образцы можно хранить в течение длительного времени.

Одна из трудностей при использовании человеческого волоса в качестве биоиндикатора заключается в трудности разделения внутреннего загрязнения от внешнего, возникающего в результате применения шампуня и средств по уходу за волосами, от воды, используемой для мытья волос, и от окружающей атмосферы. Распространенным решением является мытье образцов волос перед анализом. Используемая процедура промывки должна удалять только внешние загрязнения, а не внутренние. Были предложены различные методы промывки, от полного отсутствия промывки или использования только дистиллированной воды до сложных процедур с использованием различных моющих средств и растворителей [37, 38]. Процедура промывки, рекомендованная МАГАТЭ, включающая последовательную промывку ацетоном, водой и ацетоном [39], использовалась во многих исследованиях. При исследовании естественных радионуклидов в волосах вода для мытья может стать значительным источником внешнего загрязнения. При повышенном уровне содержания естественных радионуклидов в хозяйственно-питьевой воде весьма вероятно как внутреннее, так и внешнее загрязнение волос. Другая проблема использования волос в качестве биоиндикатора заключается в том, что скорость накопления радионуклидов в волосах варьируется в зависимости от

расстояния до кожи головы, возраста, пола. Даже если внешнее загрязнение можно удалить с помощью надежного метода, естественные колебания накопления радионуклидов в волосах могут затруднить его использование в качестве точного биоиндикатора.

§ 1.5. ^{222}Rn и ^{226}Ra в объектах окружающей среды

§ 1.5.1. Общие свойства радона

Как известно, радоновый газ имеет три естественных радиоактивных изотопа: ^{222}Rn , ^{220}Rn и ^{219}Rn , являющихся непосредственными продуктами α -распада изотопов радия ^{226}Ra , ^{224}Ra и ^{223}Ra , соответственно. ^{226}Ra , ^{224}Ra и ^{223}Ra образуются от серийной цепочки распадов материнских радионуклидов ^{232}Th ($1.39 \cdot 10^{10}$ л), ^{238}U ($4.5 \cdot 10^9$ л) и ^{235}U ($7.13 \cdot 10^8$ л) и их дочерних продуктов в результате распада с испусканием α , β и γ -излучений.

На рис. 1.1 приведены цепочки распада материнских радионуклидов ^{232}Th , ^{238}U и ^{235}U .

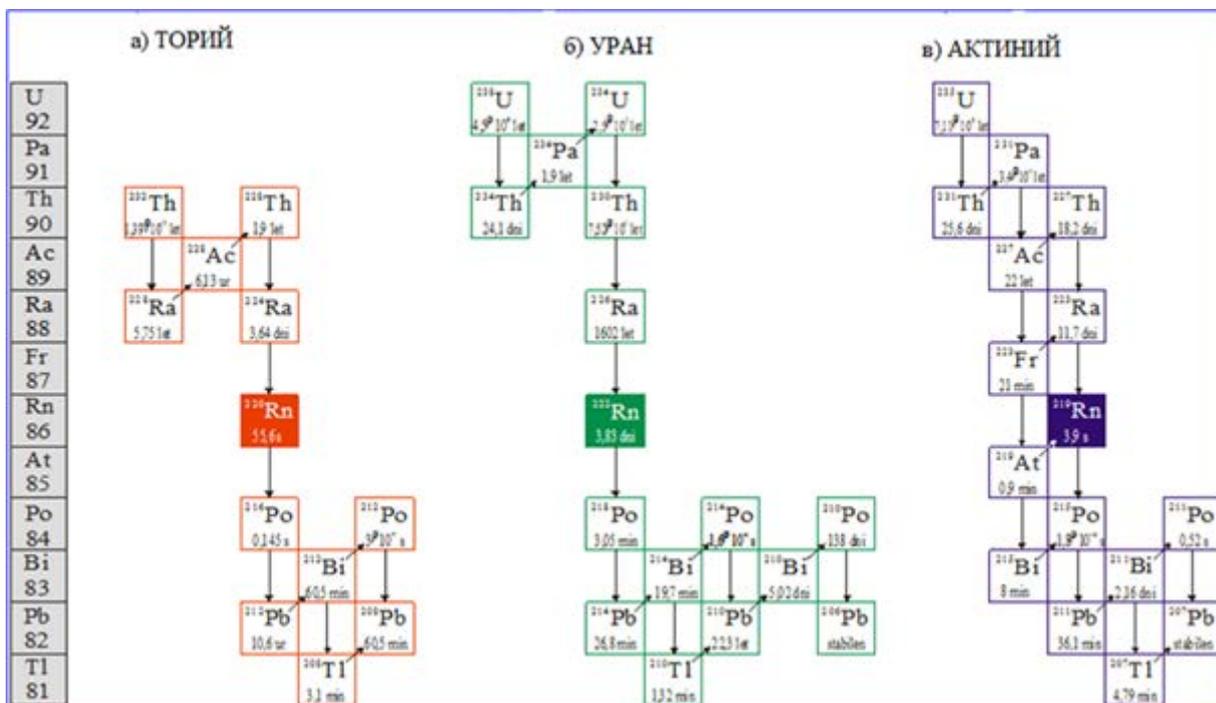


Рис. 1.1. Схемы радиоактивного распада ^{232}Th , ^{238}U и ^{235}U

Как видно из схемы распада ^{232}Th , ^{238}U и ^{235}U и образования их дочерних радионуклидов с испусканием α , β и γ - излучений, в результате образуются стабильные изотопы свинца ^{208}Pb , ^{207}Pb и ^{206}Pb , соответственно. В распаде тория четвертая и пятая цепочки – это $^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn}$, а десятая заканчивается образованием стабильного ^{208}Pb . В ^{238}U и ^{235}U распадах, пятая и шестая цепочки – $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$ и $^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{219}\text{Rn}$, а пятнадцатая заканчивается образованием стабильных изотопов свинца ^{206}Pb и ^{207}Pb , соответственно [40]. При β – распаде атомный заряд увеличивается на единицу, а массовое число не изменяется. При α – распаде атомный заряд уменьшается на две единицы, а масса – на четыре единицы. Изотопы радона $^{219}, ^{220}, ^{222}\text{Rn}$ образуются только при α – распаде изотопов радия $^{223}, ^{224}, ^{226}\text{Ra}$ и поэтому количество изотопов радона и их радиоактивность в среде строго зависят от содержания радия. Обычно изотопы $^{223}, ^{224}, ^{226}\text{Ra}$ являются твердыми металлами и находятся всегда рядом с первоисточниками – ураном и торием. Радиоактивный газ ^{222}Rn непосредственно не представляет опасности для здоровья человека. Наиболее опасными являются его короткоживущие дочерние продукты $^{214}, ^{218}\text{Po}$, ^{214}Pb , ^{214}Bi . В отличие от радона, они представляют собой не газ, а твердые частицы, которые легко оседают на аэрозоли, частички пыли и другие поверхности и проникают в бронхи и легкие во время дыхания. При распаде α -частицы радионуклидов $^{214}, ^{218}\text{Po}$ могут образовать локальные ожоги в легочной ткани. Третьим α – излучателем ^{222}Rn является ^{210}Po , однако он не представляет значительной опасности из-за его большого периода полураспада $T_{1/2}=22$ лет, так как он не может достигнуть в среде равновесной концентрации.

^{220}Rn и его ДПР не вносят существенного радонового вклада в воздух помещения и поэтому не влияют на здоровье человека. Источниками эманации ^{220}Rn могут быть полы, фундамент и материалы стен, однако из-за короткого периода полураспада $T_{1/2}=55.6$ с торон распадается полностью за время диффузии через щели в полу и перекрытия стен. Но при определённых условиях ^{220}Rn может создавать повышенные концентрации, и «тороновый»

фактор необходимо учитывать, особенно в областях, где торий-содержащие породы очень распространены. В случае попадания в легкие человека ^{220}Rn образует три вида α -излучателей: ^{216}Po (0.145 с), ^{212}Po (0.3 мкс), $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ (3.1 мин) и β -излучатель ^{212}Pb (10.6 ч) $\rightarrow ^{212}\text{Bi}$ (60.5 мин).

Короткоживущий изотоп ^{219}Rn (3.9 с) образуется из мало распространенного изотопа ^{235}U (0.07%), и поэтому его считают безопасным для здоровья людей. О его роли в жизнедеятельности человека пока известно очень мало. ^{219}Rn при распаде образует также три вида α -излучателей: ^{215}Po (0.018 с), ^{211}Po (0.52 с), $^{211}\text{Bi} \rightarrow ^{207}\text{Tl}$ (4.79 мин) и β -излучатель ^{211}Pb (36.1 мин) $\rightarrow ^{211}\text{Bi}$ (2.16 дн). Таким образом, доминирующий вклад в полную радоновую дозу в сфере жизнедеятельности человека вносит ^{222}Rn и его ДПР.

Пробеги альфа-частиц радона и ДПР. Пробег α -частиц зависит от начальной энергии и удельной плотности среды. Например, пробег α -частиц ^{222}Rn с энергией 5.49 МэВ в типичных пластиках примерно такой же, как и в воде: 39 мкм в воде ($d=1.0 \text{ г/см}^3$), 32 мкм в полиэтилентерефталате, 31 мкм в полиэтилене, 37 мкм в поликарбонате Лексана ($d=1.2 \text{ г/см}^3$) и 23 мкм в натрий-известковом стекле ($d=2.5 \text{ г/см}^3$).

Во время испускания α -частиц из Ra, Rn и их дочерних радионуклидов ядра в кристаллах минералов получают энергию отдачи ($\sim 100 \text{ кэВ}$), в результате происходят смещения ядер в решетках минералов на несколько сотен межатомных расстояний. Например, в результате α -распада Ra, Rn и Po ядра в кристаллах кварца, слюды, циркона и полиэтилена смещаются, соответственно на 30, 27, 21 и 68 нм [41].

Диффузионные пробеги ^{222}Rn и ^{220}Rn . Диффузионная скорость радона в воздухе и воде очень различается. В таблице 1.1 приведены значения диффузионных пробегов $(D\tau)^{1/2}$ для ^{222}Rn и ^{220}Rn в воздухе, воде, почвенных порах (ПП), насыщенных водой почвенных порах (ППНВ) и их коэффициенты диффузии (D) [42]. Среднее время жизни (τ) ^{222}Rn и ^{220}Rn составляет 5.5 дн и 81 с, соответственно. Как видно из таблицы 1.1, диффузионный пробег ^{222}Rn в воздухе в 10^4 раза больше, чем пробег ^{222}Rn в

воде. Пробег ^{222}Rn в сухих почвенных порах составляет 1.6 м, в то же время в почвенных порах, насыщенных водой, всего 1.6 см.

Таблица 1.1

Диффузионные пробеги ^{222}Rn и ^{220}Rn в воздухе, воде, ПП, ППНВ и их коэффициенты диффузии

Среда	Среднее расстояние		D, см ² /с
	^{222}Rn , см	^{220}Rn , см	
Воздух	220	2.85	10^{-1}
ПП	155	2.0	$5 \cdot 10^{-2}$
Вода	2.2	0.0285	10^{-5}
ППНВ	1.55	0.020	$5 \cdot 10^{-6}$

При увеличении насыщенности сухих почвенных пор водой от 0% до 100%, значение D падает очень быстро от $5 \cdot 10^{-2}$ см²/с до $5 \cdot 10^{-6}$ см²/с [42].

Эманация радона. Известно, что чем меньше частица, в которой образуется атом радона, тем больше вероятность того, что атом покинет ее. Эманация радона зависит от расстояния, на которое атом радона может сместиться из-за действия отдачи ($0.02 \div 0.07$ мкм), и от размера зерна почвы.

В таблице 1.2 показаны размеры зёрен для различных типов почв и глин [44]. Доля атомов радона, эманлирующих из материала, тем выше, чем мельче зерно и чем больше пористость материала.

Таблица 1.2

Размеры зерна для различных типов почв

Тип почвы	Размер зерна
Мелко-зернистая глина	$0.06 \div 0.6$ мкм
Крупно-зернистая глина	$0.6 \div 2$ мкм
Ил	$2 \div 60$ мкм
Песок	$60 \div 2000$ мкм
Гравий	$2000 \div 60000$ мкм

Как видно из таблицы 1.2 размеры зерен глины составляют $0.06 \div 2.0$ мкм, поэтому из нее наблюдается высокая эманация (до $40 \div 70\%$) всех образующихся атомов радона. Более сложно объяснить, как эманация из сухого песка и гравия может достигать высоких значений (до 30%). В этом случае должен иметь место другой эффект, отличный от эффекта отдачи. Авторы работ [45, 46, 47] исследовали концентрацию радия в гравии и крупном песке различной зернистости ($60 \div 6 \cdot 10^4$ мкм). Они обнаружили две причины повышенной эманации: первая – радий абсорбируется в мелких фракциях почв (< 0.15 мм), в которых его концентрация в $3 \div 8$ раз больше, чем в крупных фракциях; другая причина состоит в том, что атомы радия осаждаются на поверхностях зерен и трещин. Оба эти эффекта облегчают эманацию радона. Эти условия возникают в результате селективного выщелачивания, переноса и выветривания зерен минерала.

В таблице 1.3 приведены значения эманации (e) радона в процентном соотношении из различных почв и дробленых пород [48].

Таблица 1.3

Эманация атомов Rn-222 из различных почв и пород, e (%)

Тип почвы	e (%)
Гравий	$15 \div 40$
Песок	$15 \div 30$
Глина	$30 \div 70$
Дробленая порода, размер частиц ($1 \div 8$ мм)	$5 \div 15$
Дробленный ураноносный гранит, размер частиц ($1 \div 8$ мм)	$15 \div 30$

Одним из основных факторов, от которого зависит, какая часть из образуемого радона испускается (эманурует), является форма нахождения урана в породе или почве. Если уран находится в решетке других минералов, например, в полевом шпате, магнетите, апатите или цирконе, эманация радона относительно низка.

§ 1.6. Общие свойства ^{226}Ra

Изотоп ^{226}Ra с $T_{1/2}=1600$ лет является частью цепочки распада ^{238}U и распадается на газ ^{222}Rn с $T_{1/2}=3.82$ дней. Он подвергается распаду с испусканием альфа-частиц с энергией 4.784 МэВ (94%) и 4.60 МэВ (5.6%), сопровождаемых гамма-лучами 186.2 кэВ с интенсивностью 3.6%. Основной путь поступления природного ^{226}Ra в организм - пищевые продукты. Среднее значение концентрации ^{226}Ra в воздухе составляет 1 мкБк/м³. Годовое поступление ^{226}Ra с пищей колеблется в пределах 9÷40 Бк, а среднегодовое поступление в рацион взрослого человека в мире составляет около 22 Бк. В организм человека радий проникает через пищеварительный тракт и накапливается до 260 мБк/кг в костях и до 4.1 мБк/кг в тканях [29].

Радий представляет собой щелочноземельный металл с атомным номером 88. Он содержится в небольших количествах в урановых рудах. Радий широко применялся в промышленности и медицине в начале 20 века. Он использовался в самосветящихся красках для часов, авиационных переключателях, часах и циферблатах приборов [49]. Радий также был добавкой в таких продуктах, как зубная паста и кремы для волос. Использование радия в красках и продуктах было запрещено властями многих стран после того, как было обнаружено, что он может вызывать серьезные последствия для здоровья, такие как рак костей [50].

§ 1.6.1. Трековый метод определения ^{222}Rn и ^{226}Ra

Для определения концентрации радона непосредственно в биоматериалах существуют активные и пассивные методы измерения. К активным методам измерения радона относятся ионизационные и пропорциональные счетчики, полупроводниковые детекторы и сцинтилляционные ячейки с Zn (Ag) покрытием [51]. Среди этого класса можно выделить переносной ионизационный радономер “Alpha GUARD RQ2000M” [52], который является образцовым, проработанным и получившим мировое признание.

Параллельно с электронным радономером, успешно используются пассивные методы измерения, основанные на ядерных твердотельных трековых детекторах (ЯТТД), которые позволяют получать интегральную по времени информацию о концентрации радона. Преимуществами ЯТТД являются их простота, возможность работы в широком диапазоне температур, в условиях больших потоков слабоионизирующих гамма- и бета-излучений, получение кумулятивной по времени информации, частично исключаяющей влияние временных вариаций радона в среде экспозиции на результаты измерения [51, 53, 54, 55, 56]. Из них наиболее часто применяемыми для регистрации альфа-частиц являются ЯТТД CN-85, LR-115 и CR-39. Из этой группы детекторов CR-39 позволяет проводить массовые измерения в биоматериалах, обнаружить среди них радоноопасные образцы [56]. Недостатком ЯТТД является крайняя медленность измерений, так как требуется 30-40 дневное экспонирование [57].

При использовании детектора CR-39 чувствительность регистрации α -частиц в 3.5 раза выше, чем у других ЯТТД, так как чувствительная область для α -частиц составляет 0.1÷20 МэВ. Пластик CR-39 (полиаллиль-дигликоль карбонат) был открыт вскоре после завершения Второй мировой войны. Благодаря твердости и прозрачности этот материал традиционно используется как заменитель стекла в линзах и очках. В 1978 году было обнаружено, что CR-39 является идеальным твердотельным детектором ядерного излучения и, в первую очередь, для альфа излучения [56]. При прохождении через пластик CR-39 альфа-частицы создают скрытые повреждения молекул его полимера. Эти повреждения можно обнаружить и увеличить после протравливания пластика, например, в растворе NaOH. Типовые размеры проекции трека на плоскость оптического изображения в зависимости от времени и температуры травления составляют от нескольких единиц до нескольких десятков микрон. Метод ЯТТД характеризуется очень низким уровнем фона, если точно выполнять необходимые достаточно простые технологические требования. Так, для пластика CR-39 типичный

фон наблюдается в пределах $5 \div 10$ событий на см^2 в год для всего энергетического диапазона [56, 58]. Для этого существует несколько причин. Во-первых, фон трекового детектора постепенно возрастает со временем эксплуатации через постепенное накопление примесей любого вида, утечки или грязи на внутренних стенках камеры детектора или на самом детекторе. В противоположность этому, в каждом измерении с помощью ЯТТД используется новый детектор. Как результат, фон детектора обусловлен только загрязнением материала детектора, который на практике очень мало загрязняется [56]. Указанные преимущества и доступность CR-39 детектора позволили нам измерить величины объемной активности, скорости эксхалляции ^{222}Rn и определить удельную активность ^{226}Ra в костных останках и волосах людей.

§ 1.6.2. Определение ^{222}Rn и ^{226}Ra в костях с помощью трекового детектора

Работа ЯТТД основана на том факте, что тяжелая заряженная частица будет вызывать сильную ионизацию вещества при прохождении через среду [57]. Прошло четыре десятилетия с момента открытия детекторов ядерных треков, и до сих пор нет единого мнения о механизме формирования треков в этих детекторах, которые, как известно, обычно включают смещения атомов, ионизацию и возбуждение с последующей химической реакцией [60]. В частности, в полимерах мало что известно о внутренней структуре скрытых дорожек [56].

ЯТТД обладают свойствами регистрации заряженных ионизирующих частиц, таких как протоны, альфа-частицы или осколки деления [56, 62]. Широкое использование ЯТТД обусловлено их уникальными характеристиками, т.е. низкая стоимость, незначительный вес, пороговый характер [63]. Одним из наиболее распространенных ЯТТД на полимерной основе является нитрат целлюлозы (CN-85, Kodak) ($\text{C}_6\text{H}_{18}\text{O}_5\text{N}_2$). Это один из полимерных детекторов ядерных треков, широко используемый для

исследования регистрации заряженных ионов, как с низкой, так и с высокой энергией (несколько МэВ) [64].

^{238}U может поступать в организм с пищей – 5 Бк, его удельная концентрация в костях – 0.15 Бк/кг, в мягких тканях – $5 \cdot 10^{-3}$ Бк/кг. При рассмотрении уровня ^{232}Th , который практически сконцентрирован в костях и может увеличиваться с возрастом, его концентрация активности составляет около $4 \cdot 10^{-2}$ Бк/кг в костях и $3 \cdot 10^{-4}$ Бк/кг в мягких тканях [65]. При поступлении урана в организм человека или животного он может концентрироваться в костях; это увеличивает вероятность риска рака костей или красного костного мозга (лейкемии) [66]. Костный мозг представляет собой динамичный тканевый компартмент в полости костей. У взрослых гемопоэтические или кроветворные клетки продуцируются клетками костного мозга в крупных костях, на долю которых приходится 2-5% веса взрослого человека [67]. Радионуклиды, испускающие альфа-частицы, такие как ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{226}Ra , накапливаются в костях, которые оказались критически важным органом для дозиметрии при воздействии радионуклидов на человека и животных. Доля поглощенных радионуклидов в скелете сильно отличается у разных людей [68], около 99% содержания ^{226}Ra в организме человека находится в костях [69]. ^{226}Ra будет присутствовать в костях, поскольку он имеет тенденцию к умеренной переносимости в физической среде. Также изотопы ^{226}Ra и ^{228}Ra считаются наиболее важными природными радионуклидами серии распадов ^{238}U и ^{232}Th соответственно. В организме человека радиоизотопы химически и физиологически ведут себя подобно кальцию и склонны концентрироваться в костях [70]. Уран может попасть в организм через кожу, легкие или кишечник. Как только уран попадает в системный кровоток, он распространяется по всему телу. ^{226}Ra представляет собой костный радионуклид, который накапливается в известковых тканях из-за его химического сходства с кальцием. Важной точкой зрения является измерение

низкого уровня долгоживущих α -излучающих веществ в различных биологических и экологических материалах [70].

Для измерения низкой α -активности биологических образцов выгодно использовать трековые детекторы. Например, в работе для измерения α -активностей ^{226}Ra и ^{210}Po в костях курицы, коровы и овцы применяли ЯТТД CN-85 [74]. Время экспозиция CN-85 детекторов составило 60 дн, травление детекторов проводили в щелочи 2.5N NaOH при 60 °C в течение 40 мин. Полученные результаты авторов приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

**Плотность треков и активность α -излучения в образцах костей
курицы, коровы и овцы**

№	Кости животных	Плотность треков, тр/мм ²	Активность α -излучения, Бк/мм ²
<i>C1</i>		201.9	81.13
<i>C2</i>	Курица	146.1	58.71
<i>C3</i>		159.6	64.13
Среднее значение			67.99
<i>B1</i>		111.5	44.8
<i>B2</i>		117.3	47.14
<i>B3</i>	Корова	177.5	71.33
<i>B4</i>		136.5	54.85
<i>B5</i>		146.1	58.71
<i>B6</i>		180.76	72.64
Среднее значение			58.24
<i>S1</i>		148	59.47
<i>S2</i>		92.3	37.09
<i>S3</i>	Овца	126.9	50.99
<i>S4</i>		125	50.23
<i>S5</i>		115.3	46.33
<i>S6</i>		151.9	61.04
Среднее значение			50.85

Из таблицы видно, что альфа активность меняется в следующих диапазонах: от 56.7 до 81.13 Бк/мм², от 44,8 до 72.64 Бк/мм² и от 37.1 до 61.04 Бк/мм² для курицы, коровы и овцы, соответственно.

На рис. 1.2 приведена гистограмма распределения средних значений α -активности для курицы, коровы и овцы, обозначенных латинскими буквами С, В и S соответственно.

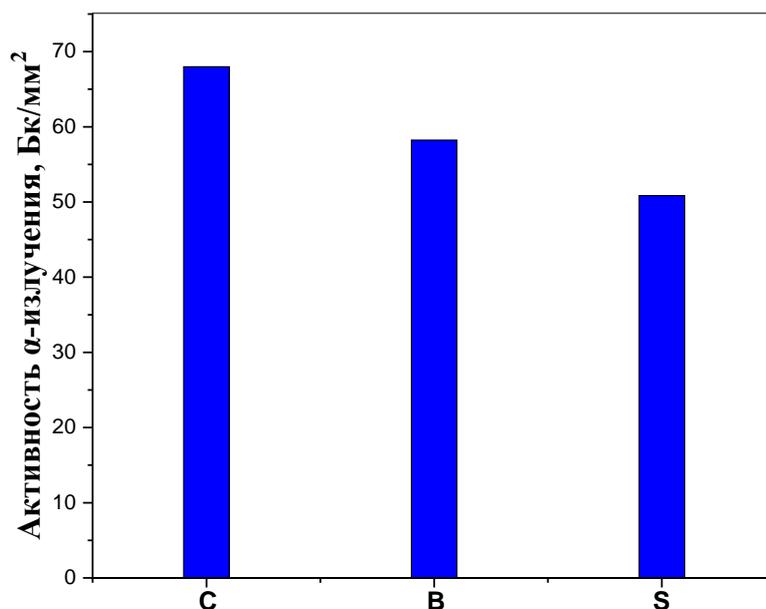


Рис. 1.2. Средние значения α -активности в костях курицы (C), коровы (B), овцы (S)

Как видно из гистограммы, средние значения α -активности в костях распределены в следующем порядке $C=67.99$ Бк/м², $B=58.24$ Бк/м² и $S=50.85$ Бк/м², следовательно, альфа излучающие радионуклиды больше аккумулируются в костях курицы, затем коровы. Такая небольшая разница между костями C, B и S может быть связана с типом кормления животных [74].

§ 1.7. Определение скорости эксхалляции радона пассивными методами

Как показывает анализ работ [56, 57, 58, 95], существуют различные пассивные детекторы для измерения ОАР радона и их ДПР. Исходя из этих данных, их можно классифицировать на 8 групп: 1 - открытые (“bare”)

детекторы, 2 - открытые камеры, 3 - камеры для ^{222}Rn с входным фильтром, 4 - модифицированные радиометры для ^{222}Rn , 5 - многоцелевые радиометры, 6 - радиометры, основанные на комбинации трековых детекторов и электростатического поля, 7 - радиометры, основанные на комбинации трековых детекторов и активированного угля, 8 - устройства для измерения концентрации радона или ДПР по параметрам треков[58].

При проектировании геометрической формы измерительной камеры и расположении детекторов CR-39 внутри камеры, необходимо учесть длину пробега альфа частиц радона и торона. Как известно, в воздухе диффузионная постоянная (D) радона составляет $\sim 0.1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а среднее расстояние диффузионного движения ($L = 1/\sqrt{Dt}$), пройденное в результате диффузии при среднем времени жизни $\tau = 132.15$ час для радона ^{222}Rn составляет 220 см, а для торона ^{220}Rn при среднем времени жизни $\tau = 0.076$ час - 2.9 см [55, 72, 57, 84]. Поэтому при измерениях СЭР из плоских материалов была использована цилиндрическая пластиковая камера объемом 280 см^3 ($d = 5.3 \text{ см}$ и $h = 13 \text{ см}$) [95]. Перед измерением нижнюю часть камеры закрывали бумажным фильтром для защиты детектора от попадания пыли и предохранения его от эффекта осаждения ДПР, являющихся твердыми частицами.

На рис. 1.3 а) и б) приведены схематические изображения измерительных камер, предназначенных для определения СЭР с поверхности различных материалов в лабораторных и полевых условиях [57, 95].

В лабораторных условиях для определения СЭР с поверхности материала, используется измерительная камера а). Внутри пластиковой камеры вертикально закреплены два детектора CR-39, входная часть измерительной камеры плотно прилегает к поверхности где находится исследуемый материал, а наружный круг камеры залепляется пластилином для обеспечения изоляции. В случае сыпучих материалов наружный круг камеры засыпается этим же материалом. Здесь, первый детектор находится на расстоянии 0.5 см, а второй 12 см от поверхности исследуемого

материала. Первый детектор регистрирует альфа-частицы $^{220}\text{Rn} + ^{222}\text{Rn}$ и их ДПР. Второй детектор регистрирует альфа-частицы только ^{222}Rn и его ДПР, так как короткоживущий радионуклид ^{220}Rn до достижения второго детектора успевает распасться.

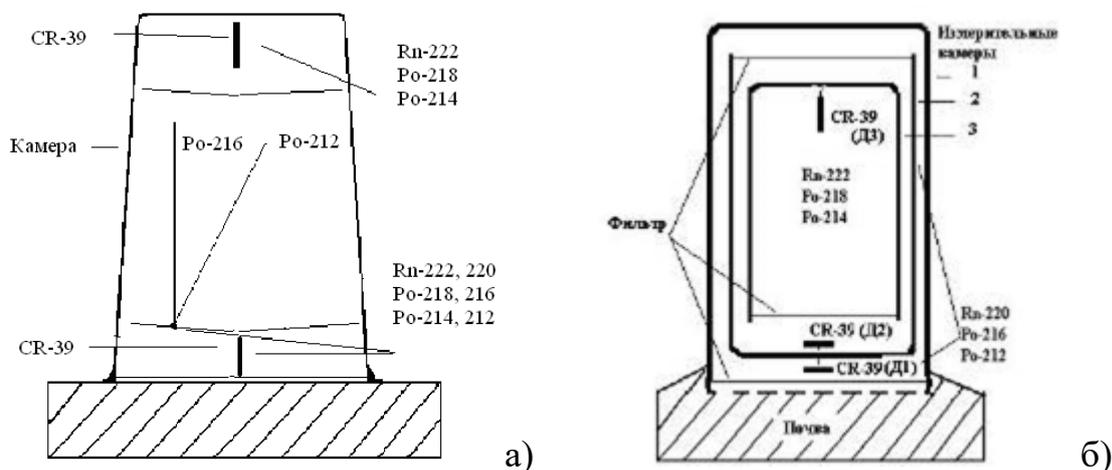


Рис. 1.3. Схематическое изображение измерительных камер, предназначенных для измерения СЭР в лабораторных а) и полевых б) условиях

По разности числа треков между детекторами можно получить плотность треков альфа-частиц от торона.

При полевых измерениях на эксхалляцию влияет много природных факторов, связанных с самой почвой и окружающей средой. Значения СЭР зависят от давления, температуры, влажности, ветра, пористости и размеров зерен, а также от времени года. В результате воздействия этих факторов, конвекционные пробеги радона и торона в воздухе могут увеличиваться. Для предотвращения и учета влияния внешних природных факторов автором работы [95] был предложен трехдетекторный регистратор радона. На рис. 1.3 б) приведено схематическое изображение полевого регистратора радона, который представляет собой три вставленные друг в друга пластиковые камеры с детекторами CR-39 (Д1÷Д3); входные плоскости камер закрыты бумажными фильтрами. Камеры имеют цилиндрическую форму ($\varnothing=9, 8$ и 7 см и $h=20, 15$ и 10 см) и расположены внутри друг друга, но входные

плоскости камер установлены в противоположных направлениях для создания искусственных барьеров на пути ^{220}Rn . Принцип работы камер таков: детектор Д1 в первой камере регистрирует одновременно обе частицы – и радона, и торона; Д2, закрепленный в нижней части камеры 2, регистрирует только ^{222}Rn и его ДПР, т.к. ^{220}Rn ($T_{1/2}=56$ с) и его ДПР распадаются, не достигнув детектора Д2. Детектор Д3 в камере 3 установлен для дополнительного контроля [95]. Единица измерения СЭР с поверхности исследуемых материалов выражается в Бк/м²·ч.

§ 1.8. Суммарная α -активность радионуклидов

Наша жизненная сфера постоянно окружена источниками ионизирующего (радиоактивного) излучения - природного и искусственного происхождения. Часть из них представляет естественный природный фон, к которому приспособился наш организм. Среди этих разновидностей ионизирующих излучений существует α -излучение, представляющее собой поток положительно заряженных тяжелых α -частиц (ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов). Основными источниками α -излучения являются радиоактивные изотопы веществ со слабыми атомными связями, подвергающимися дальнейшему радиоактивному распаду. Альфа-частицы обладают крайне низкой проникающей способностью. Их энергии не хватает на то, чтобы преодолеть поверхностный слой кожи, поэтому человек может не опасаться внешнего α -облучения - кроме ситуаций, когда источником α -частиц является ускоритель (энергия частиц 10 МэВ и выше).

В нашем случае объектами исследования являются α -излучающие радионуклиды, присутствующие в костных находках и окружающих их почвах. Основным генератором долгоживущих альфа-излучающих радионуклидов является почва и породы, в которых происходят естественные процессы взаимообмена радионуклидов со скелетом в течение длительного периода времени. Удельную суммарную α -активность радионуклидов можно

измерить электронными приборами или трековыми детекторами с учетом пробега и энергии α -частиц в среде [75, 76].

Совокупность вышеперечисленных причин ставит задачу разработки и практической реализации методик по определению вклада альфа-излучающих компонентов из ряда урана, тория, радия, радона и их дочерних продуктов распада в костях, почвах и волосах.

Выводы по первой главе

По результатам литературного обзора можно сделать вывод об отсутствии исследований по определению и распределению радона и ^{226}Ra в антропологических останках и волосах людей методом трекового анализа. Для решения этой задачи необходимо разработать методику трекового анализа для корректного измерения концентрации радона и определения радоноопасных биологических источников. Выполнение работ по совокупности этих проблем требует решения большого объема экспериментальных и прикладных исследований, включающих в себя следующие этапы:

1. Разработка концепции использования ряда ядерно-физических методов анализа для экспериментального определения элементов и радиоизотопов в костных останках и волосах людей;
2. Применение ИНАА для исследования химических элементов в новых костных останках животных и первобытных людей, что очень важно для определения антропологической ценности этих находок для нашей страны;
3. Разработка методики трекового анализа с использованием CR-39 детектора, позволяющей изучать уровни ^{222}Rn и ^{226}Ra в костных останках животных и первобытных людей;
4. Разработка методов и создание устройств, для выполнения всех этапов работы в полном объеме.

ГЛАВА II. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты наших исследований, изложенные в Главе II, опубликованы в оригинальных работах [77, 78, 79, 80].

§2.1. Объекты исследования

Объектами исследования являются археологические костные останки и почва, взятые из мест обнаружения на территории Узбекистана, а также волосы людей, взятые выборочно у населения городов Ташкента и Ангрена для изучения содержания ^{222}Rn и ^{226}Ra .

Предмет исследования – применение нейтронно-активационного анализа для разработки метода определения объемной активности ^{222}Rn и ^{226}Ra и разработка методики измерения суммарной α -активности естественных радионуклидов.

Разработка ряда радиоаналитических методов требует применения различных технических средств и оборудования, принципиально отличающихся по характеристикам эксплуатации и функционирования. Данная работа включала в себя применение ядерного реактора, а также средств измерения активности образцов, излучающих мягкие и жесткие гамма-кванты и альфа-частицы. Для проведения трекового анализа радона необходимо было создать измерительные камеры для экспозиции следов радона и оптическую установку для подсчета треков α -частиц.

§ 2.2. Техника эксперимента, использованная в ядерном реакторе

§ 2.2.1. Методика ИНАА

При определении элементов ИНАА необходимо заранее планировать количество определяемых элементов, подбирать аналитические радионуклиды, а также оценивать временные параметры, связанные с облучением, выдержками и измерением наведенной активности образцов.

В ИНАА существует три вида мешающих факторов, которые влияют на определение элементного состава вещества: конкурирующие ядерные

реакции, интерференция гамма-линий разных радионуклидов и комптоновский фон от высокоэнергетических γ -линий, который поднимает фон выше аналитической линии обнаруживаемого элемента и тем самым ухудшает соотношение сигнал/фон [3].

В активационном анализе содержание неизвестного элемента определяют двумя способами – абсолютным и относительным. Абсолютный способ определения – это прямое непосредственное измерение наведенной активности искомого радионуклида без использования какого-либо стандартного образца, определяемое по следующей формуле:

$$C_x = \frac{nM_x(1-\exp(-\lambda t_{обл}))}{N_A f \sigma \theta t_{изм} \varepsilon i_\gamma} \quad (2.1.)$$

где C_x – содержание искомого элемента, мг; σ – сечение активации тепловых нейтронов, мбарн (10^{-27} см²); n – площадь фотопика, имп; M_x – массовое число изотопа, мг; $t_{обл}$ и $t_{изм}$ – время облучения и измерения радиоактивности, соответственно, с; ε – эффективность детектора; i_γ – интенсивность γ -кванта; f – поток тепловых нейтронов, н/см²с; θ – распространенность нуклида, на котором идет реакция; N_A – число Авогадро.

Как видно из формулы, при абсолютном методе определения содержания элемента, кроме наведенной активности, необходимо знать значения следующих ядерно-физических величин: абсолютная эффективность регистрации детектора в зависимости от энергии излучения радионуклида; сечение активации ядерной реакции или выхода радионуклида, интенсивность потока частиц облучения. Недостатком абсолютного метода является необходимость знания априорной информации об облучаемой матрице: ее составе, перечне содержащихся радионуклидов, энергетическом спектре излучений и плотности потока облучения. На основе этой информации вводится ряд поправок к результатам измерений.

Для получения правильных аналитических результатов необходимо провести тщательный отбор образцов и подготовку их к анализу. На точность

результатов анализа влияют многие факторы: изменение элементного состава образцов по истечении времени; окружающая среда; техника отбора проб и способы их подготовки, включающие сушку до воздушно-сухого состояния, озоление, хранение, удаление поверхностных загрязнений, выпаривание жидких сред и многое другое [77]. При ИНАА состав эталонного и исследуемого источников должны быть одинаковы, условия измерений также должны быть полностью идентичны [78, 79]. Это означает, что при измерении образца и стандарта должны быть полностью воспроизведены геометрия и режимы измерений с использованием одной и той же гамма-спектрометрической аппаратуры. Метод относительного определения очень удобен при массовых измерениях однородных образцов и ближе к истинному значению содержания элемента. В данном методе некоторые трудно учитываемые погрешности сокращаются, например, связанные с эффективностью регистрации спектрометрического детектора, с плотностью потока облучения, с сечением активации ядерной реакции и выходом радионуклида.

Относительный способ определения содержания элемента реализуется на основе сопоставления результатов измерений исследуемого образца и эталонного (стандартного, образцового, с известным содержанием элемента) образца с аттестованным значением активности, и определяется по следующему соотношению:

$$C_x = \frac{N_x}{N_s} C_s \quad (2.2.)$$

где C_x и C_s - содержание искомого элемента и эталона, мг/кг; N_x и N_s - площадь фотопика искомого элемента и эталона, имп/с.

§ 2.2.2. Подготовка к анализу образцов костей и почв

Для подготовки образцов на облучение был использован метод сушки образцов на воздухе в чистой изолированной среде. Поверхностное

загрязнение исследуемых костей очищали путем протирки тампоном, смоченным этанолом. После этого фрагменты костей и почвы измельчали, перемешивали и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм для получения однородного гомогенного порошкового образца. Измерение наведенной активности облученных образцов проводили в аналитическом центре ИЯФ АН РУз с применением особочистого германиевого HPGe детектора фирмы Canberra Industries, (США). Энергетическое разрешение HPGe детектора по линии 1332 кэВ ^{60}Co составило 1.8 кэВ. Результаты обрабатывали с помощью программного комплекса Genie-2000 (Canberra Industries USA). Точность сравнительного анализа составила $\pm 10\text{-}\pm 12\%$ [77, 78].

§ 2.3. Техника эксперимента при измерении активности радона

§ 2.3.1. Методики измерения объемной активности радона

В настоящее время существуют различные приборы и методики измерения естественной радиоактивности радона, основанные на активных и пассивных принципах регистрации излучения. Активные методы связаны с прокачкой воздуха и накоплением его в течение короткого времени в замкнутом объеме, или пропусканием его через фильтр для последующего измерения активности дочерних продуктов распада или прямого измерения активности отфильтрованного радона. Такие измерения удобны и полезны для изучения вариации радона, происходящей в течение относительно короткого промежутка времени [52].

К их числу относятся: автоматизированные ионизационные (импульсные газовые) камеры для измерения концентрации радона и ДПР в воздухе, почвенном газе, воде, минеральном сырье, строительных и отделочных материалах за 3÷24 часа; полупроводниковые и сцинтилляционные радиометры быстрого (10÷60 мин) измерения уровня радона, торона и ДПР.

Пассивный метод измерения осуществляется с применением ядерных твердотельных трековых детекторов, электретных и сорбционных детекторов на основе активированного угля [57, 82]. Эти измерения длительны (1 месяц и более) и носят интегрирующий характер. Пассивные детекторы применяются как интегрирующие детекторы радона, и они удобны для определения уровня радона, усредненного в течение длительного времени. Именно длительные измерения имеют прямое отношение к интегральной и средней дозе облучения, получаемые человеком.

В наших измерениях параллельно с пластиковыми детекторами CR-39 был использован сцинтилляционный альфа-радиометр МКГБ-01 «РАДЭК» [83] для проверки правильности и достоверности полученных результатов.

§ 2.3.2. Методика определения СЭР из костей и волос

В параграфе 1.7 было отмечено, что для определения СЭР с поверхности природных и строительных материалов, авторами [57, 82, 84] разработаны и применены цилиндрические пластиковые камеры с трековыми детекторами CR-39. Эти измерительные камеры (см. Рис. 1.3) предназначены для определения СЭР из материалов в лабораторных и полевых условиях. СЭР – это физическая величина выхода потока радонового газа с поверхности любого материала в единицу времени, выражающаяся в Бк/м²·ч. Однако, когда объем пробы меньше, чем объем накопительной камеры, или проба состоит из гранул или из тонких волосообразных веществ и не имеет определенной формы, в таких случаях целесообразно определять СЭР в Бк/кг·ч [57].

Поэтому при измерении эманации радона из порошка костей и прядей волос учитывали их массу и геометрическую форму. Для измерения СЭР использовали цилиндрические пластиковые камеры объемом 280-370 см³ (Ø=6-7 см и h=13-15 см). На рис. 2.1 дано схематическое изображение этой измерительной камеры.

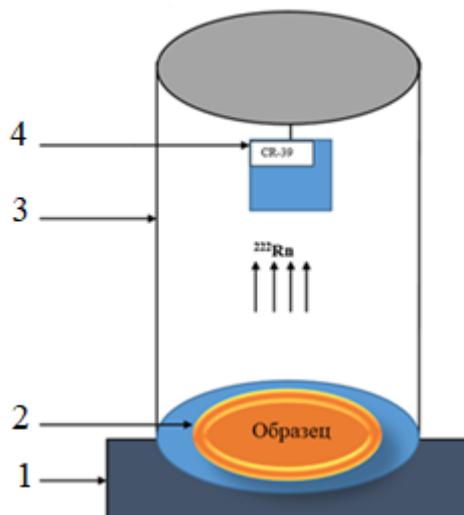


Рис. 2.1. Схематическое изображение пластиковой камеры для измерения ОАР: 1 – подставка, 2- образец, 3- камера, 4- детектор CR-39

Как видно, внутри камеры по вертикали закреплен детектор CR-39. На дно камеры, в маленькую пластиковую чашку помещается порошок из костей или прядь волос. Массу исследуемых образцов подбирали в зависимости от биологического типа и варьировали в интервале от 1 до 10 грамм. При длительных регистрациях α -частиц радона и ДПР на CR-39 детекторах необходимо учитывать рабочий фон измерительной камеры, эманлирующий из окружения подложки. Поэтому для учета вклада рабочего фона были параллельно проведены экспонирования с образцами и без образца в нескольких измерительных камерах.

§2.3.3. Травление детекторов для подсчет α -треков на оптическом микроскопе

Детектор CR-39 толщиной более 100 мкм (иногда до 1000 мкм), прозрачен и чист, удобен в применении, обладает низким собственным фоном, высокой чувствительностью к альфа-частицам в широком диапазоне энергий. Результаты экспериментов показали, что оптимальный режим травления для детектора CR-39 следующий: раствор 6М NaOH [85]; температура травления 70 °С, время травления 7 часов. На рис. 2.2 приведен общий вид ванны для травления CR-39 детекторов.



Рис. 2.2. Общий вид ванны для травления CR-39 детекторов

При этих условиях диаметр образовавшихся треков достигает размеров $5 \div 10$ мкм, что удобно для наблюдения под микроскопом и подсчета. Подсчет числа треков производится с экрана монитора, связанного с оптическим микроскопом через телекамеру.

На рис. 2.3 приведен общий вид оптической системы для подсчета треков α -частиц, где изображение из микроскопа “Биолам” выводится с помощью телекамеры на экран монитора.



**Рис. 2.3. Общий вид оптического устройства, для подсчета трекова-
частиц на детекторе CR-39**

Основным узлом системы является микроскоп. Приемная телекамера (цифровая) размещена на микроскопе вместо окуляра. Видеосигнал с

телекамеры подается на видеоконтрольное устройство или монитор компьютера, откуда можно вести подсчет треков альфа частиц [57].

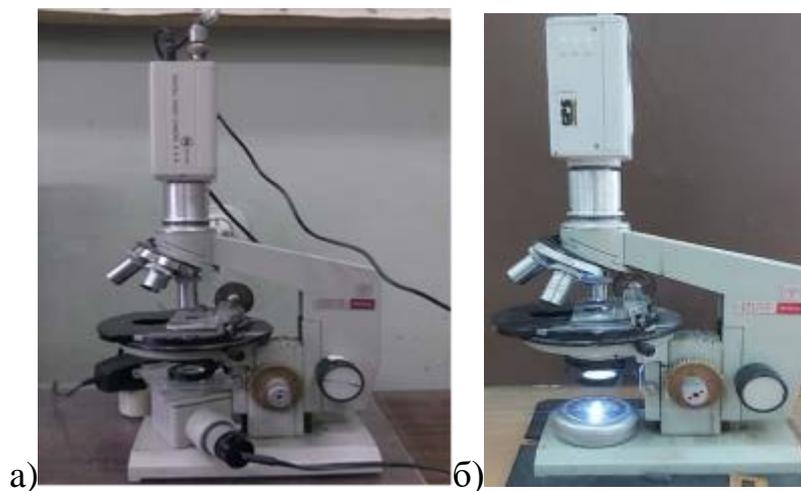


Рис. 2.4. Микроскоп с освещением лампы накаливания (а) и со светодиодным освещением (б)

Для улучшения визуализации и качественного подсчета α -треков лампа накаливания (Рис. 2.4 а) была заменена на более простую и экономичную светодиодную лампу (Рис. 2.4 б).

§ 2.4. Техника эксперимента по измерению суммарной α -активности

§ 2.4.1. Подготовка образцов

Существует множество природных факторов, которые могут влиять на проникновение α -излучающих радионуклидов в костные останки. К ним можно отнести питательную среду млекопитающих, природные катаклизмы, связанные с метеоритами или неизвестными источниками, а также естественную миграцию α -излучающих радионуклидов из почвы в ткань костей в течение длительного времени нахождения скелетов в недрах Земли. При решении данной задачи не исследуются причины и следствия влияния природных факторов на их образование и накопление в костных останках.

Очищенные и измельченные образцы костей и почвы были выдержаны в течение 40÷50 сут в лаборатории для избавления от влаги и остаточной активности ^{222}Rn , а также для достижения состояния радиоактивного равновесия между материнским (^{226}Ra) и дочерним (^{222}Rn) радионуклидами.

§ 2.4.2. Измерения суммарной α -активности радионуклидов

Для определения удельной активности α -излучающих радионуклидов в костных образцах измеряли суммарную α -активность сцинтилляционным альфа-радиометром МКГБ-01 «РАДЭК» [83]. Основные технические характеристики альфа-радиометра МКГБ-01 «РАДЭК» следующие: сцинтилляционный детектор $\text{ZnS}(\text{Ag})$ диаметром 60 мм, детектируемый интервал энергии α -частиц 2÷10 МэВ, эффективность регистрации α -частиц не менее 60 %, диапазон измерения суммарной α -активности 0.1 Бк÷ $5 \cdot 10^4$ Бк при погрешностях не более $\pm 20\%$ [83].

Выводы по второй главе

Обоснован и разработан комплекс технических средств для решения поставленных задач, а именно:

1. Для получения данных об элементном составе доисторических и древних костных находок обоснованы подходы по подготовке образцов, их облучению в каналах ядерного реактора ВВР-СМ и измерение наведенных активностей с применением HPGe детектора.

2. Для измерения ОАР и определения ^{226}Ra в исследуемых образцах разработана простая конструкция измерительной камеры с CR-39 детектором.

3. Разработана методика для измерения удельной суммарной альфа-активности радионуклидов в доисторических и древних костных находках.

4. Улучшена визуализация оптической установки для получения информации о количестве α -треков в пластиковых детекторах CR-39.

ГЛАВА III. НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

КОСТНЫХ ОСТАНКОВ

Результаты наших исследований, изложенные в Главе III, опубликованы в оригинальных работах [77, 78, 94, 105, 107].

Исследование древнейших периодов зарождения и развития человечества всегда были в центре внимания геологов, археологов, антропологов, историков, палеонтологов всего мира. Такие исследования особенно актуальны в нашем регионе, так как они направлены на получение информации об особенностях древних поселений на территории нашей страны. Кости животных и человека, как правило, обильно представлены в археологических памятниках и зачастую являются наиболее многочисленными материалами [88, 89]. Поэтому исследование макро- и микроэлементов в костях может дать ценную информацию о возрасте и образе жизни на Земле доисторических реликтов.

Объектами исследования являлись доисторические кости динозавров из Кызылкума КД и южных мамонтов (КЮМ), которые были обнаружены в 2000÷2014 гг. на территории Узбекистана, вблизи г. Ангрена (КЮМ-А) и в селе Гиштли Кашкадарьинской области (КЮМ-К), а также кости архантропа (КА) и медведя (КМ), найденные в пещере Сельунгур в 1970 гг. в Ферганской долине [89]. Образцы костей и окружающих их почв были предоставлены Археологическим институтом и геологическим музеем Республики Узбекистан [12, 14]. В качестве стандарта и для сравнения были взяты кость барана (СТК < 10 лет) и свежая кость (СК) крупнорогатого скота (декабрь 2022 г.).

Найденные кости по сохранности имели разное состояние прочности и ветхости. Поэтому специалисты из Института археологии РАН оценивают естественную сохранность остеологических материалов по пятибалльной системе [91]. Высший балл 5 - естественное состояние кости, при котором костная ткань сохраняет достаточную прочность, так что для ее разлома

требуются ощутимые усилия, низший балл 1 - состояние кости, при котором костная ткань рассыпается при попытках ее почистить или вымыть, балл 4 - костные остатки при направленном действии легко ломаемые, но без направленного воздействия сохраняющие форму и в особенности поверхностный слой, балл 3 и 2 - костные остатки, которые в той или иной степени рассышаются и растрескиваются на более мелкие фрагменты после их очистки и мытья.

Останки костей КД-1, КД-2, КЮМ-А и КЮМ-К были взяты из геологического музея Республики Узбекистан. После отламывания костей поверхностное загрязнение очищали путем протирки тампоном, смоченным этанолом, до образования чистой поверхности. Однако после смачивания на поверхности осколков появились следы трещин, и они получили 2 балла по естественной сохранности. После очистки и высыхания образцы костей измельчали до порошкообразного состояния и перемешивали. Для облучения брали навески по 30÷40 мг каждого образца и стандартные образцы сходные, сходные по химическому составу и физическим свойствам с анализируемыми пробами, из коллекции. В качестве эталона использовали стандарты из коллекции Национального Института Стандартов и Технологии (США), а именно, стандартные образцы сравнения для почв (SRM-1572) и (SRM-1575) МАГАТЭ. Для сравнения и интерпретации костных образцов по элементному составу мы провели ИНАА образцов почв, взятых из мест обнаружения скелетов.

§ 3.1. ИНАА доисторических и древних костей

В таблице 3.1 приведены ядерно-физические характеристики аналитических радионуклидов, образующихся в результате (n, γ) реакции при облучении образцов костей и почв в атомном реакторе.

Таблица 3.1

Ядерно-физические характеристики определяемых элементов в костях и почвах при облучении на реакторе ВВР-СМ по реакции (n, γ)

№	Элемент и атомный номер		Радионуклиды	T _{1/2}	Eγ, кэВ и выход, %
1	11	Na	²⁴ Na	15 ч	1368.6(100), 2754(100)
2	19	K	⁴² K	12.4 ч	1524.7(17.9)
3	20	Ca	⁴⁷ Ca→ ⁴⁷ Sc	3.35 д	1297.1(74.9); 489.2(6.74)
4	21	Sc	⁴⁶ Sc	83.8 д	889.3(100); 1120.5(100)
5	25	Mn	⁵⁶ Mn	2.58 ч	846.7(98.9); 1810.7(27.2)
6	26	Fe	⁵⁹ Fe	44.5 д	1099.2(56.5); 1291.6(43.2)
7	27	Co	⁶⁰ Co	5.27 г	1173.2(99.9); 1332.5(100)
8	33	As	⁷⁶ As	1.10 д	559.1(45.0); 657.0(6.16)
9	38	Sr	⁸⁵ Sr	64.8 д	514.0(99.3)
10	42	Mo	⁹⁹ Mo	2.75 д	140.5(88.8); 739.1(12.1)
11	51	Sb	¹²⁴ Sb	60.2 д	602.7(97.8); 1691.0(47.3)
12	55	Cs	¹³⁴ Cs	2.06 г	604.7(97.6); 795.8(85.4)
13	56	Ba	¹³¹ Ba	11.8 д	496.2(47.2)
14	57	La	¹⁴⁰ La	1.68 ч	1596.5(95.4); 487.0(45.);
15	58	Ce	¹⁴¹ Ce	32.5 д	145.4(48.5)
16	60	Nd	¹⁴⁷ Nd	11.0 д	531.0(13.1); 91.1(27.9)
17	62	Sm	¹⁵³ Sm	1.94 д	103.2(28.3)
18	63	Eu	¹⁵² Eu	13.6 ч	1408.0(21.0); 121.8(28.8)
19	70	Yb	¹⁶⁹ Yb	32.0 д	198.0(34.9);
20	71	Lu	¹⁷⁷ Lu	6.71 д	208.4(11.7); 113.0(6.50)
21	72	Hf	¹⁸¹ Hf	42.4 д	482.2(80.6)
22	90	Th	²³³ Th→ ²³³ Pa	27.0 д	311.9(38.6)
23	92	U	²³⁹ U→ ²³⁹ Nd	2.36 д	228.2(10.8);

Облучение образцов осуществляли в 2 временных режимах в полиэтиленовых пакетиках и в алюминиевых контейнерах в вертикальном и горизонтальном каналах атомного реактора. Определяемые элементы были разделены на три группы в зависимости от периода полураспада образующихся радионуклидов. Первую группу облучали до 20 с, для определения элементов Mn, Na, K. Вторую группу облучали 15 часов в потоке тепловых нейтронов $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для определения элементов Ca, Sm, Mo, Lu, U, Yb, As, Nd, La, Cd. Третью группу составили те же образцы, облученные по группе 2, но выдержанные для остывания 30 суток для определения элементов: Ce, Th, Hf, Ba, Sr, Cs, Sc, Fe, Co, Eu, Sb. Время измерения наведенной γ -активности радионуклидов составило от 100 до 400÷600 секунд, в зависимости от периода полураспада радионуклидов. Содержание элементов находили сравнительным методом по соотношению величин наведенной активности образцов и эталонов (формула 2.2.).

Результаты ИНАА и их обсуждение. Полученные результаты ИНАА элементного состава доисторических и стандартных костей и их почв приведены в таблице 3.2. В костях были обнаружены 23 элемента с содержанием в диапазоне $10^{-2} \div 63.2 \cdot 10^3$ мг/кг. Содержание Na и Ca в костях составило 3350 мг/кг ÷ 4420 мг/кг и 27.4%÷41.6%. Для элементов Sc, Cr, Mn, Fe и Co в КС и КЮМ содержание колеблется от 0.47 мг/кг до 63200 мг/кг [77, 78].

Соотношение средних значений элементов ядерного деления в доисторических костях (КЮМ-А, КЮМ-К и КД) к стандартной кости (СТК) составило для Sc -17, As -20, Sr -20, Mo -68, Ba -19, La -248, Ce -30, Sm -18, Eu -18, Yb -67.

Для оценки соотношения средних значений элементов ядерного деления, образующихся в древних костях, в результате облучения тепловыми нейтронами реактора были использованы данные из работ А.Васидова и др. [24, 95].

Таблица 3.2

**ИНАА доисторических костей динозавров, южных мамонтов и
окружающих их почв**

Элементы	Стандартная кость, мг/кг		Доисторические кости, мг/кг					
	СТК	Почва	КЮМ-А	Почва	КЮМ-К	Почва	КД	Почва
Na	3350	8800	3500	11500	3610	6800	4420	7200
K	1210	20000	1100	23500	500	21300	1290	18500
Ca(%)	29.2	9.8	40	2.9	41.6	6.2	27.4	5.1
Sc	0.47	8.8	13	9.8	3.1	15	7.5	9.2
Cr	8.7	56	3.5	63	6.8	77	9.3	53.8
Mn	40	665	37	755	1970	760	49800	640
Fe	1440	25000	69	32300	1250	33400	63200	32000
Co	1.15	9.3	0.054	15	1.6	16	43	11.5
As	1.6	7.5	12	7.1	19	7.0	65	7.8
Sr	104	270	430	240	3400	310	2390	370
Mo	<0.5	2.7	36	3.6	17	1.3	49.5	2.8
Sb	0.85	3.0	0.35	2.1	4.4	2.1	6.2	2.5
Cs	0.34	4.6	0.047	7.2	0.42	8.3	-	-
Ba	360	810	1490	710	18000	655	545	650
La	2.5	42	5.9	54	37	45	1810	42
Ce	3.6	54	74	21	-		140	14.5
Nd	-	-	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02	0.08
Sm	0.32	4.95	7.1	3.1	0.61	5.7	9.9	6.2
Eu	0.071	1.05	0.25	1.3	0.3	1.25	3.6	0.9
Yb	0.12	2.7	3.3	1.8	2.9	0.46	18	1.9
Hf	0.28	5.4	7.6	4.6	0.83	4.9	0.71	5.6
Th	0.58	13	0.69	17	0.62	14	0.78	15
U	<0.01	3.4	220	7.8	180	4.0	35.5	4.1

В таблице 3.3 приведены результаты ИНАА костей архантропа (КА), медведя (КМ), СТК и почв для сравнения с данными [24, 95].

Таблица 3.3

ИНАА древних костей архантропа, медведя и окружающих их почв

№	Элементы	СТК, мг/кг		Древние кости, мг/кг		
		СТК	Почв	КА [24]	КМ [24]	Почва [95]
1.	Na	3350	8800	-	-	-
2	K	1210	20000	-	-	-
3	Ca(%)	29.2	9.8	32.9	48.7	2.7-3.0
4	Sc	0.47	8.8	0.068	0.11	3.4-6.4
5	Cr	8.7	56	1.41	7.18	6.4-11.4
6	Mn	40	665	-	-	-
7	Fe	1440	25000	248.2	148.8	25000
8	Co	1.15	9.3	0.19	1.54	3.3-5.3
9	As	1.6	7.5	8.1	40.4	5-40
10	Sr	104	270	1746	1325	100-2600
11	Mo	≤0.5	2.7	17.2	33	0.5-4
12	Sb	0.85	3.0	0.26	19.9	4.70
13	Cs	0.34	4.6	0.52	0.61	2.2-3.5
14	Ba	360	810	753.8	605.3	106-597
15	La	2.5	42	0.83	8.17	0.04-0.23
16	Ce	3.6	54	4.5	5.94	6.8-11.4
17	Nd	-	-	22.6	20.5	-
18	Sm	0.32	4.95	-	-	-
19	Eu	0.071	1.05	0.092	0.11	0.5-1.8
20	Yb	0.12	2.7	-	-	-
21	Hf	0.28	5.4	-	-	-
22	Th	0.58	13	0.68	≤	2.3
23	U	≤0.01	3.4	1.53	24.4	1.3-2.8

Как показывают результаты ИНАА, количество урана в костях архантропа и медведя составило 1.53 и 24.4 мг/кг [24], соответственно при этом в стандартной кости ≤ 0.01 мг/кг и почве 3.4 мг/кг.

Соотношение средних значений элементов деления в костях архантропа и медведя (КА и КМ) к стандартной кости (баран) составило для As -15, Sr -18, Мо -53, Ва - 27, La - 8, Се -20, Sm - 12, Eu -7. Как следует из сравнения с доисторическими костями соотношение средних значений элементов деления всегда в несколько или в десятки раз больше, чем в древних костях. По нашему мнению, элементы деления (As, Br, Мо, La, Се, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu и др.) в исследуемых костях (КД, КЮМ, КА и КМ) могли образоваться в естественных условиях в течение длительного времени под действием надземных и подземных нейтронов на ядрах ^{235}U .

На гистограмме (Рис. 3.1) приведены данные о распределении концентраций урана в костях КЮМ-А, КЮМ-К, КД, КА, и СТК, которые наглядно иллюстрируют характер изменения содержания урана в антропологических объектах.

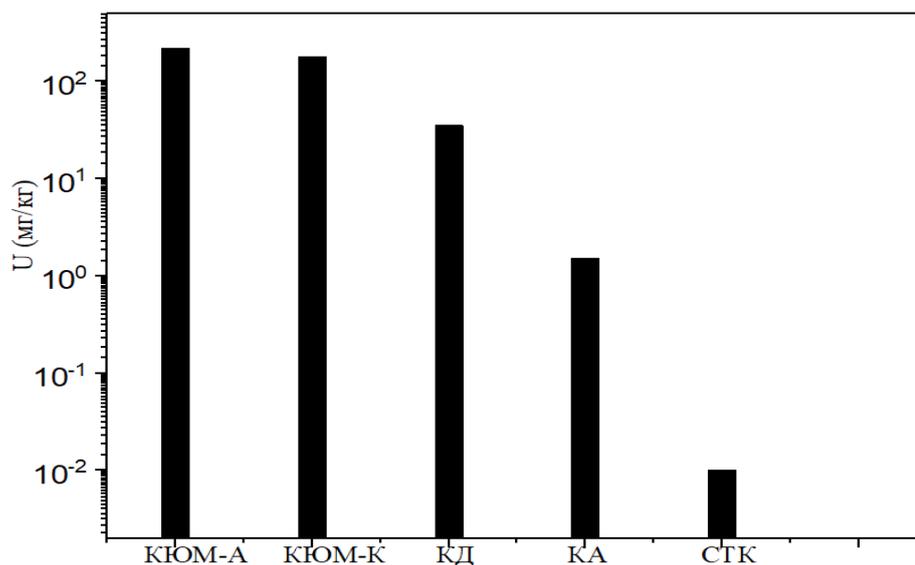


Рис. 3.1. Концентрация урана в КЮМ-А, КЮМ-К, КД, КА, СТК

Таким образом, концентрация ^{238}U в костях динозавров, южных мамонтов, архантропа составляет от 1.5 мг/кг до 220 мг/кг при значении 0.01

мг/кг в стандартной кости. Это показывает, что древние кости соответствуют различным периодам развития жизни на нашей планете.

Надо отметить, что концентрация ^{232}Th в КЮМ-А, КЮМ-К, КД, КА и СТК была равной 0.69, 0.62, 0.78, 0.68 и 0.58 мг/кг, соответственно. Среднее значение ^{232}Th в исследованных образцах составляет 0.67 ± 0.07 мг/кг и лежит в пределах допустимых ошибок ИНАА. Постоянство содержания тория в костях свидетельствует о том, что торий менее подвижен по сравнению с ураном [77, 78].

§ 3.2. Оценка коэффициента накопления элементов в костных останках

Известно, что микроэлементы попадают из почвы в костные останки в результате миграции элементов в системе «почва-кость». Количество накопленных элементов может длительное время оставаться неизменным или, наоборот, количество элементов в останках может увеличиваться в результате прохождения их через почву, или элементы могут переходить из скелета в почву. Основными факторами, влияющими на переход элементов, являются температура и атмосферный градиент, кислотность и элементный состав почв, подвижность и свойства химических элементов.

Таким образом, изучение состава элементов в костях скелета и сравнение его с составом почвенных элементов позволит получить данные о биологическом накоплении химических элементов.

Для оценки величины биологического поглощения в системе «кость-почва» проверяли соотношение элементов, аналогично системе «растительность-почва», определяющий уровень подвижности элементов и интенсивность поглощения растительным организмом [92, 93]. Как было принято в [94], для антропологических исследований в отличие от биологических был введен «условный коэффициент накопления элементов» - УКНЭ:

$$\text{УКНЭ} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{п}}} \quad (3.1)$$

где $[M_{\text{к}}]$ — количество элемента в кости, $[M_{\text{п}}]$ — его количество в почве.

На рис. 3.2 представлена гистограмма УКНЭ для элементов As, Sr, Mo, La, Sm, U и Th в системах КС/почва, КЮМ-А/почва, КЮМ-К/почва, КД/почва.

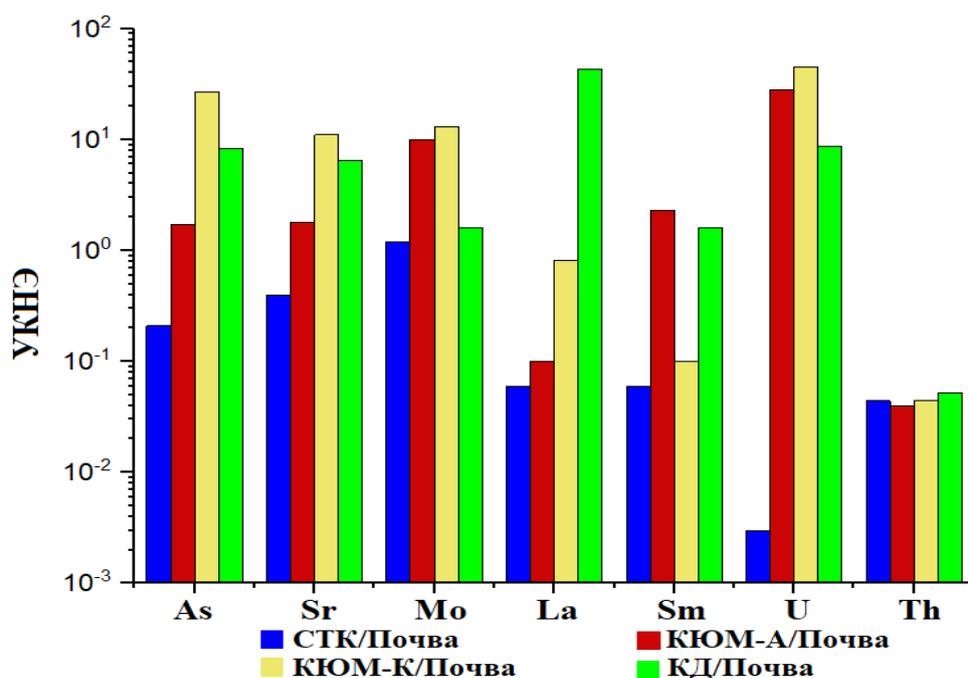


Рис. 3.2. УКНЭ для элементов As, Sr, Mo, La, Sm, U и Th

Видно, что УКНЭ урана в СТК/почва значительно ниже по сравнению с другими образцами костных останков. Возможно, это связано с длительностью нахождения останков в почве. По мере увеличения возраста скелетов эти соотношения также меняются. Судя по этим сравнительным примерам и логическому анализу значений УКНЭ для соотношения Кость/Почва, возраст образцов костей южных мамонтов, найденных в Ангреной и Кашкадарьинской областях, может составлять десятки миллионов лет. Наиболее подвижным элементом в вышеупомянутых костях является уран. Элементы хром, стронций и лантаноиды также имеют наивысший УКНЭ.

Для оценки правильности полученных результатов ИНАА было проведено сравнение элементного состава стандартных костей, полученных нами [77, 78] с результатами других авторов [19, 20, 91].

Таблица 3.4

Сравнение результатов ИНАА стандартных костей, полученных нами с результатами других авторов, мг/кг

Элементы	Наши [77, 78]	Другие [19, 20, 22]	Элементы	Наши [77, 78]	Другие [19, 20, 22]
Na	3350	4925	As	1.6	0.012
K	1210	836-1182	Sr	104	110-224
Ca(%)	29.2	18-36.4	Sb	0.85	0.71
Sc	0.47	0.005-0.065	Cs	0.34	0.1-7.2
Cr	8.7	1.4-5.2	Ba	360	231
Mn	40	17.3	La	2.5	0.04-0.4
Fe	1440	140-600	Th	0.58	0.10
Co	1.15	0.03-0.7	U	<0.01	0.01

Как показывает сравнение из табл. 3.4, содержание элементов Sc, Mn, As и La в стандартных костях отличается, а содержание остальных элементов, таких как Na, K, Ca, Cr, Fe, Co, Sr, Sb, Cs, Ba, Th, U совпадает с данными других авторов в пределах ошибки анализа.

Из вышеизложенного следует, что самым подвижным и аккумулируемым элементом в костях является уран, где его содержание в 26-30 раз выше (КД и КЮМ), чем его кларковое содержание [86].

Выводы по третьей главе

Обнаружено, что содержание урана в костях динозавра и мамонта доходит до очень высокого уровня 35 и 220 мг/кг соответственно, содержание в почве всего 3.7 и 7.2 мг/кг, а в стандартной кости ≤ 0.01 мг/кг.

Показано, что почва является основным донором урана для скелетов.

Доказано, что содержание ^{232}Th в костях динозавров, южных мамонтов, архантропа и стандартных костях различается незначительно 0.58–0.78 мг/кг. Постоянство содержания тория в костях, свидетельствует о том, что торий менее подвижен по сравнению с ураном.

Содержание элементов деления урана, таких как Sc, As, Mo, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Yb и Sc в доисторических и древних костях варьируется от 0.3 до 140 мг/кг и от 3 до 39 мг/кг, соответственно, что больше, чем в стандартных костях, и причиной этого феномена может быть процесс деления ядер ^{235}U в естественных условиях.

Оценены условные коэффициенты накопления элементов в системе «кость-почва» и показано, что наблюдается следующая закономерность $\text{КД/почва} \geq \text{КЮМ/почва} > \text{КА/почва} > \text{СТК/почва}$.

ГЛАВА IV. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТРЕКОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ АКТИВНОСТЕЙ ^{222}Rn И ^{226}Ra В КОСТНЫХ ОСТАНКАХ И ВОЛОСАХ ЧЕЛОВЕКА

Результаты наших исследований, изложенные в Главе IV, опубликованы в 15 оригинальных работах [79–82, 87, 90, 94, 101–108, получен Патент РУз на полезную модель №FAP01941].

§ 4.1. Измерение объемной активности и скорости эксхалиции радона костей

Исследуемые пробы костей и почв с массой 10 г были помещены на поверхность пластиковых чашек, как показано на рис. 2.1. Для изоляции наружный круг измерительной камеры плотно закрывают слоем пластилина или герметика. Стоит отметить, что одновременно в нескольких аналогичных камерах была проведена экспозиция, только без образца, для учета вклада рабочего фона на CR-39 детекторах. Экспозиция для всех камер составила 35 сут, после чего детекторы были помещены в раствор 6М NaOH при температуре 70 °С на 7 ч для травления. В расчетах учитывали рабочий фон детекторов CR-39. Число следов α -частиц определяли с экрана монитора оптической установки, как показано на рис. 2.3.

Объемная активность и скорость эксхалиции радона. Объемная активность радона представляет собой количество самопроизвольных распадов ^{222}Rn в 1 м³ воздуха и определяется по формуле

$$A = \rho/K, \text{ Бк/м}^3 \quad (4.1)$$

где ρ – плотность треков α -частиц в CR-39, трек/(см²·дн); K – калибровочный коэффициент, (трек/(см²·дн))/(Бк/м³). Измерительная камера была откалибрована в специальном контейнере и значение калибровочного коэффициента составило $K=0.17\pm 0.03$ (трек/(см²·дн))/(Бк/м³) [96].

При объеме пробы, меньшем объеме накопительной камеры или в случае, когда проба представляет собой измельченные зерна и не имеет

определенной формы удобно определять скорость эксхалляции радона в единицах Бк/(кг·ч) по формуле [57]

$$E = AV \cdot \lambda / m \cdot T_{эф} \quad (4.2)$$

$$T_{эф} = [t + \lambda^{-1}(e^{-\lambda t} - 1)] \quad (4.3)$$

где A – объемная активность радона, Бк/м³; V – эффективный объем камеры, м³; λ – постоянная распада ²²²Rn, ч⁻¹; m – масса исследуемого материала, кг; t – экспозиция, ч; $T_{эф}$ – эффективное время, ч.

Среднеквадратичная ошибка определения скорости эксхалляции радона в исследуемых образцах не превышает 25% и состоит из погрешностей определения калибровочного коэффициента ≤15%, треков α-частиц детектора ≤10%, учета коэффициента обратной диффузии радона ≤15% [95, 96].

В таблице 4.1 приведены результаты измерения объемной активности (Бк/м³) и скорости эксхалляции ²²²Rn (Бк/кг·ч) с поверхности исследуемых костей и почв.

Таблица 4.1

Объемная активность и скорость эксхалляции ²²²Rn с поверхности исследуемых костей и почв

№	Проба, кость и почва	ρ , трек/см ² д	A , Бк/м ³	E , Бк/кг·ч
1	КЮМ-А*	2766	16180±3794.2	13.7±2.8
	Почва КЮМ-А	239	1398±327.8	1.18±0.23
2	КЮМ-К	508	2970±696.4	2.53±0.6
	Почва КЮМ-К	46	269±63	0.23±0.05
3	КД-1	916	5313±1245.8	4.49±0.9
	Почва КД-1	41	239.8±56.2	0.20±0.04
4	КД-2	220	1276±299.2	1.08±0.22
	Почва КД-2	32	185.6±43.5	0.16±0.03
5	КА	140	812±190.4	0.69±0.13
	Почва КА	39	226±52.9	0.19±0.04
6	СКТ	31	182.4±42.7	0.15±0.03
	Почва СКТ	40	235.3±55.1	0.20±0.05

Как видно из табл. 4.1 значения A и E в доисторических и древних костях изменяются в интервале $812 \div 16180$ Бк/м³ и $0.69 \div 13.7$ Бк/кг·ч, в почве $185.6 \div 1398$ Бк/м³ и $0.16 \div 1.18$ Бк/кг·ч. В то же время E в стандартной кости и почве составило 0.15 Бк/кг·ч и 0.20 Бк/кг·ч при A 182.4 Бк/м³ и 235.3 Бк/м³ соответственно.

§ 4.1.1. Определение удельной активности ²²⁶Ra в костях и окружающей их почве

При определении удельной активности ²²⁶Ra в костях результаты анализа представляются без оценки коэффициента поступления ²²⁶Ra из почв и без проверки сохранения или нарушения радиоактивного равновесия в радиоактивных цепочках распада изотопа ²³⁸U и образования ²²⁶Ra. Изотоп ²²⁶Ra с $T_{1/2}=1600$ лет является частью цепочки распада $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$ и распадается на газ ²²²Rn с $T_{1/2}=3.82$ дней. Здесь нужно упомянуть, что методом ИНАА (Таблица 3.2.) было показано, что содержание ²³⁸U составляет $35 \div 220$ мг/кг в доисторических, $1.5 \div 24$ мг/кг в древних и ≤ 0.01 мг/кг в обычных костях [77, 97]. Не стоит доказывать, что возраст доисторических костей всегда больше 1 млн. лет. И это достаточное время для установления векового равновесия между ²³⁸U и ²²⁶Ra. Для установления равновесия активностей между ²²⁶Ra и ²²²Rn достаточно $25 \div 30$ дней изолирования исследуемых образцов [77]. Потому, что активность ²²⁶Ra эквивалентна активности ²²²Rn и величина удельной активности радия определяется по формуле [95]:

$$C_{Ra} = A_{Rn} V / m, \text{ Бк/кг} \quad (4.4)$$

где C_{Ra} —удельная активность ²²⁶Ra, Бк/кг; A_{Rn} —объемная активность радона, Бк/м³; V - эффективный объем экспозиционной камеры, м³ ($h=15$ см, $D=9.0$ см; $v=9.54 \cdot 10^{-4}$ м³); m - масса исследуемых проб, ($m=10.0$ грамм= 0.01 кг).

Найденные значения удельных активностей ²²⁶Ra в костях динозавров, южных мамонтов, архантропа, барана и окружающих их почв приведены в

таблице 4.2. Видно, что УА ^{226}Ra в почве Ангрена составила 133.4 ± 27.1 Бк/кг, что почти в $5.2 \div 7.5$ раз больше, чем УА ^{226}Ra в других почвах, где значения лежат в пределах $17.7 \pm 3.5 \div 25.7 \pm 5.9$ Бк/кг.

Таблица 4.2

Результаты удельной активности ^{226}Ra в костях и окружающих их почвах

№	Проба, кость и почва	ρ , г/см ³	A_{Rn} , Бк/м ³	C_{Ra} , Бк/кг
1.	КЮМ-А*	2766	16180±3794.2	1543.6±257.2
	Почва КЮМ-А	239	1398±327.8	133.4±27.1
2.	КЮМ-К	508	2970±696.4	283.3±70.8
	Почва КЮМ-К	46	269±63	25.7±5.9
3.	КД-1	916	5313±1245.8	506.9±106.2
	Почва-1	41	239.8±56.2	22.8±4.7
4.	КД-2	220	1276±299.2	121.7±26.0
	Почва КД-2	32	185.6±43.5	17.7±3.5
5.	КА	140	812±190.4	77.5±15.3
	Почва КА	39	226±52.9	21.6±4.7
6.	СТК (КБ)	30	182.4±43.0	17.4
	Почва СТК	40	235.3±55.1	22.4±6.0
7.	Свежая кость 12.2022 г.	2.2	13.0±3.1	6.45±2.1

Такое высокое значение удельной активности радия в кости мамонта, найденного в Ангрене, объясняется тем, что местная почва богата ураном и соседствует с бывшей урановой шахтой [80], а радий является продуктом распада урана. Удельная активность ^{226}Ra в кости мамонта из Ангрена (КЮМ-А) составила 1543.6 Бк/кг, что в 88.7(СТК), 19.6(КА), 12.6(КД-2), 3(КД-1) и 5.4(КЮМ-К) раз больше. Отсюда следует, что почва является основным источником поступления радия в ткань скелета КЮМ-А. Превышение удельной активности радия в $5 \div 8$ раза в КЮМ-А и в почве Ангрена по сравнению с другими данными указывает на присутствие

высоких содержаний тяжелых радиоактивных элементов в этой местности. Отсюда следует, что степень аккумуляции ^{226}Ra в костных останках связана с длительностью нахождения скелетов в почвах и вкладом ^{226}Ra из цепочки распада ^{238}U .

Как показывают наши результаты, в свежей кости крупнорогатого скота удельная активность ^{226}Ra составила 6.45 Бк/кг, что значительно отличается от работ других авторов, например, 0.26–0.50 Бк/кг [29, 49] и ≥ 1 Бк/кг [91].

Распределение УА ^{226}Ra в костях динозавра (КД), мамонтов (КЮМ-А и КЮМ-К) и архантропа (КА), а также в стандарте кости (СТК) представлено на рис. 4.1, где наглядно иллюстрируется характер изменения содержания радия в антропологических находках.

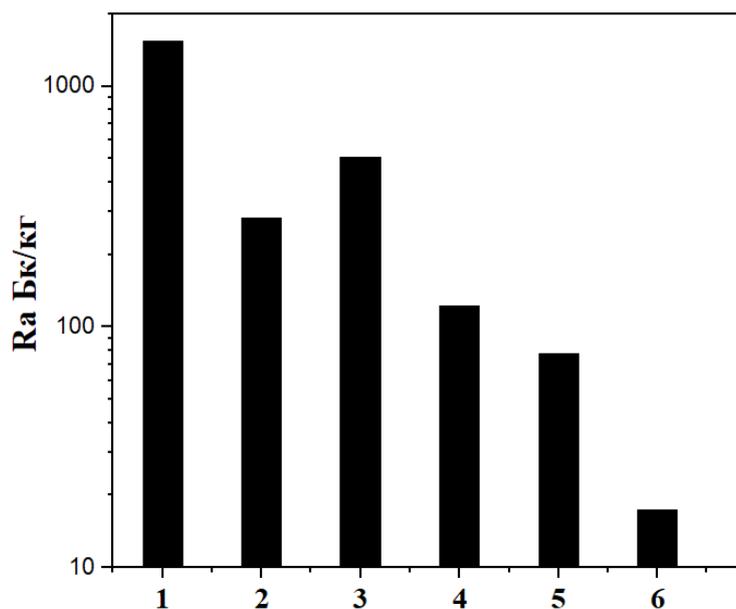


Рис. 4.1. Концентрация Ra-226 в 1-КЮМ-А, 2-КЮМ-К, 3-КД-1, 4-КД-2, 5-КА, 6-СТК

В древних и доисторических костях УА ^{226}Ra находится в интервале $77.5 \div 1543.6$ Бк/кг, что в $5 \div 90$ раз выше, чем УА ^{226}Ra в стандартной кости 17.4 Бк/кг (СТК - кость барана, отлежавшая примерно 10 лет в почве). Из этого следует, чем больше возраст скелета, тем выше УА ^{226}Ra в костях.

На рис. 4.2 показана корреляция между возрастом и удельной активностью ^{226}Ra в доисторических и древних костях.

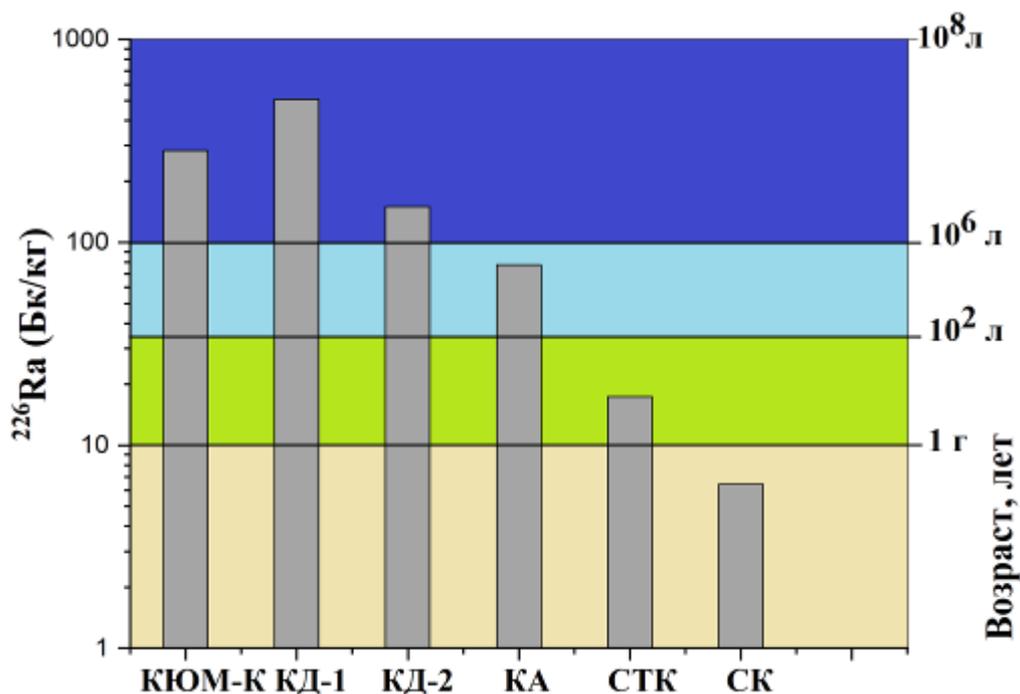


Рис. 4.2. Корреляционная зависимость возраста костей от удельной активности ^{226}Ra

Из гистограммы следует, что можно оценить примерный возраст костей в следующем порядке, если УА ^{226}Ra < 6.45 Бк/кг, тогда возраст < 1 года, если УА ^{226}Ra < 20 Бк/кг, тогда возраст < 100 лет, если УА ^{226}Ra < 100 Бк/кг, тогда возраст < 1 млн. лет, если УА ^{226}Ra > 100 Бк/кг, тогда возраст > 1 млн. лет. Значения УА ^{226}Ra в скелетах динозавров и мамонтов были > 500 Бк/кг, поэтому их возраст оцениваем больше, чем 10 млн. лет.

§ 4.2. Измерение суммарной удельной α -активности радионуклидов

§ 4.2.1. Подготовка образцов к измерению

Как известно естественными α -излучающими радионуклидами являются материнские ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th и их дочерние продукты распада Ra, Rn, Po, Bi и At. Для измерения суммарной удельной α -активности (СУААР) естественных радионуклидов используется низкофоновая методика, где

активность исследуемого образца сравнивается с активностью регламентированного стандартного образца при одинаковых условиях измерения. В качестве контрольного образца сравнения для α -частиц в методике используется стандартный образец ^{243}Am , а в качестве пробы были взяты кости вымерших животных и людей и почвы с места их обнаружения.

Существует множество природных факторов, которые могут влиять на проникновение α -излучающих радионуклидов в костные останки. К ним можно отнести питательную среду млекопитающих, природные катаклизмы, связанные с метеоритами или неизвестными источниками, а также естественную миграцию α -излучающих радионуклидов из почвы в ткань костей в течение длительного нахождения скелетов в недрах Земли. При решении данной задачи не исследуются причины и следствия влияния природных факторов на их образование и накопление в костных останках.

Для определения удельной активности α -излучающих радионуклидов в костных образцах измеряли суммарную α -активность сцинтилляционным альфа-радиометром МКГБ-01 «РАДЭК» [83]. Рабочий фон радиометра МКГБ-01 составлял 20 ± 3 имп/ч по α -каналу. Масса порошков для счетной подложки радиометра составляла 20 мг, время измерения 60 мин. СУААР определяли по следующему соотношению:

$$C_{\alpha} = \frac{N_{\alpha}}{t \cdot m \cdot \varepsilon}, \text{ Бк/кг} \quad (4.5)$$

где N_{α} – число α -частиц, имп; t – время регистрации, ч; m – масса исследуемого образца, кг; ε – эффективность регистрации, %.

Измерение и обсуждение результатов. В табл. 4.3 приведены результаты измерения α -активности кости и почвы в импульсах α /час и суммарной удельной активности Бк/кг.

Как видно из табл. 4.3, C_{α} радионуклидов меняется в интервале $988 \div 10728$ Бк/кг для доисторических и древних костей, и $360 \div 1828$ Бк/кг для почвы.

Таблица 4.3

Суммарная удельная α -активность исследуемых проб

№	Проба, кость и почва	N_{α} , $\alpha/\text{ч}$	C_{α} , Бк/кг
1	КЮМ-А*	447	10728±2000
	Почва КЮМ-А	78	1828±340
2	КЮМ-К	129	3097±560
	Почва КЮМ-К	21	504±90
3	КД-1	120	2877±540
	Почва КД-1	15	360±68
4	КД-2	57	1369±240
	Почва КД-2	16	384±76
5	КА	42	988±190
	Почва КА	17	408±78
6	СКТ (КБ)	46	1104±210
	Почва СКТ	15	360±68

Сравнение C_{α} и C_{Ra} в костях показывает, что C_{α} в $10 \div 100$ раз превышает C_{Ra} , то же самое наблюдается для C_{α} и C_{Ra} в почвах. Значения C_{α} в стандартной кости (1104 Бк/кг) в 3 раза больше, чем C_{α} в почве (360 Бк/кг), в то же время C_{Ra} в стандартной кости (17.4 Бк/кг) оказалась меньше на 20%, чем в почве (23.5 Бк/кг). Отсюда следует, что в обычных костях всегда содержатся естественные α -излучающие ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th и их дочерние радионуклиды [79].

На рис. 4.3 а) и б) приведено сопоставление результатов измерения СУААР радионуклидов и СЭР радона в исследованных костях (КЮМ-А, КЮМ-К, КД-1, КД-2, КА а также в стандартной кости) в виде гистограммы для оценки правильности проведения трекового анализа с CR-39 детекторами.

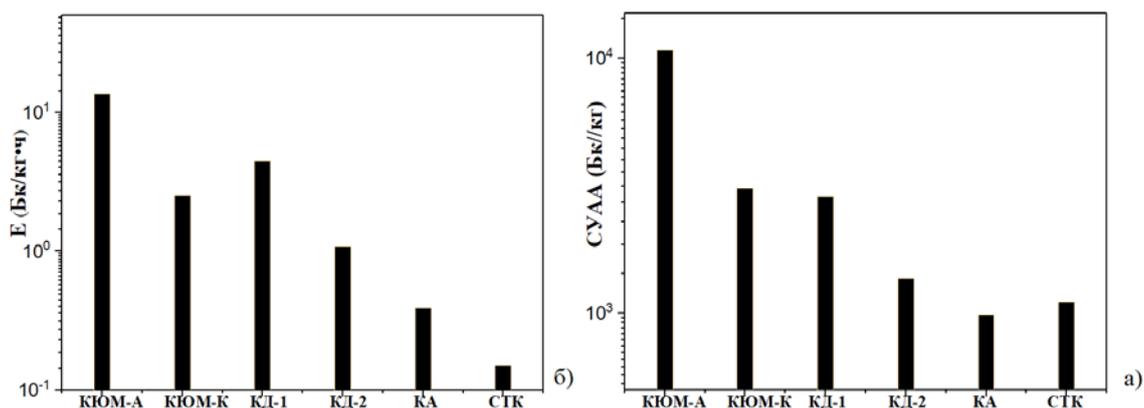


Рис. 4.3. Сравнение результатов измерения СУААР радионуклидов и СЭР радона в костях

Как видно из гистограммы, значения СУААР всегда в 10÷12 раз больше, чем СЭР из-за присутствия в образцах α -излучателей типа ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th и их дочерних продуктов распада Ra, Rn, Po, Bi и At. Сравнение гистограмм СУААР α -радионуклидов и ^{222}Rn наглядно иллюстрирует полное соответствие между сцинтиляционным и трековым методами.

§ 4.2.2. Условный коэффициент накопления радионуклидов в кости и почве

Альфа-излучающие радионуклиды могут поступать в кость из окружающей их почвы. Поэтому интересно знать, сохраняется ли концентрация естественных радионуклидов неизменной по истечении времени длительного нахождения в древних захоронениях, и происходит ли их вымывание из костей или наоборот обогащение в результате поступления из почвы. Множество факторов может влиять на проникновение α -излучающих элементов из почвы в скелет. Наиболее важными являются температурный и атмосферный градиент, влажность, кислотность и элементный состав почвы, длительность залегания скелета. В связи с этим была оценена удельная α -активность радионуклидов в составе костей в сравнении с составом почвы. Исследовали соотношение элементов в системе кость–почва по той же схеме, как и растение–почва для оценки коэффициента биологического поглощения, который является

определяющим фактором интенсивности поглощения и степени подвижности элементов в органах растений [99]. В отличие от биологических в антропологических исследованиях для этих радионуклидов введен условный коэффициент накопления радионуклидов, который для α -излучающих радионуклидов (Y_α) и радона (Y_{Rn}) определяется по следующим соотношениям [99]:

$$Y_\alpha = \frac{C_k}{C_n} \quad \text{и} \quad Y_{Rn} = \frac{E_k}{E_n} \quad (4.6)$$

где C_k и C_n – суммарная удельная α -активность радионуклидов, Бк/кг; и E_k и E_n – скорость эксхалации ^{222}Rn , Бк/кг·ч - из кости и почвы, соответственно.

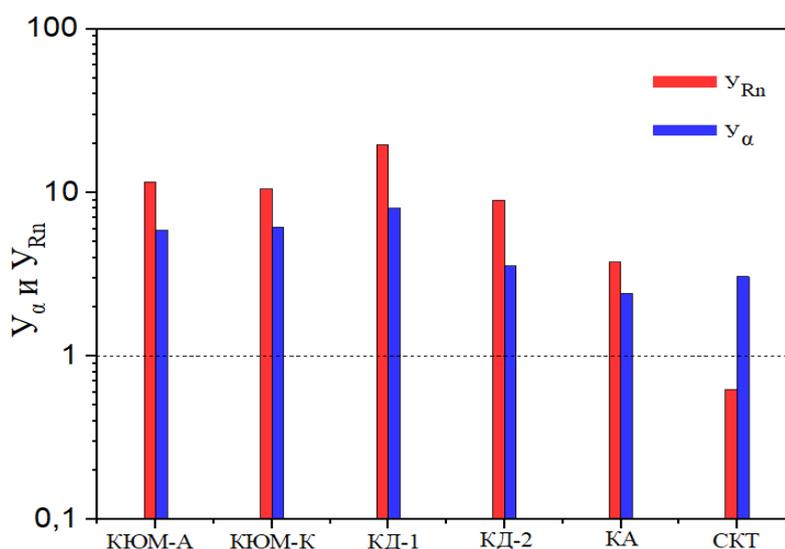


Рис. 4.4. Условный коэффициент накопления радионуклидов в исследуемых пробах для α -излучающих радионуклидов

Как видно на рис. 4.4, условный коэффициент накопления радионуклидов всегда больше единицы для α -излучающих радионуклидов и в 2.4 ÷ 7.9 раза больше в костях, чем в почве, где они находятся. Аналогичная картина наблюдается в эксхалации радона, где значение условного коэффициента накопления в 3.6 ÷ 22.4 раза больше в древних костях, чем в почве. Условный коэффициент накопления радионуклидов в стандартной кости составил 3.06 и 0.77 для α -излучателей и эксхалации радона,

соответственно. Из этого следует, что в обычных стандартных костях α -активность больше, чем эманация радона в почвах, где они находятся.

§ 4.3. Методика определения удельной активности ^{226}Ra в волосах человека

Методика относится к области радиационного контроля объектов окружающей среды и предназначена для определения удельной активности ^{226}Ra в волосах. Волосы человека являются индикатором окружающей среды для оценки воздействия эффективной дозовой нагрузки тяжелого радиотоксичного металла ^{226}Ra на организм человека [29].

Как известно, один грамм ^{226}Ra в течение одной секунды испускает $3.7 \cdot 10^{10}$ альфа-частиц или 1 Кюри = $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк [11]. После альфа излучения от металлического ^{226}Ra образуется дочерний радиоактивный инертный газ ^{222}Rn с $T_{1/2}=3.82$ дн и $E_{\alpha}=5.284$ (94%).

Методика основана на измерении объемной активности ^{222}Rn в волосах после достижения радиоактивного равновесия ^{226}Ra и ^{222}Rn .

§ 4.3.1. Измерение объемной активности радона в волосах

Определение удельной активности ^{226}Ra в волосах основано на экспозиции α -частиц дочернего ^{222}Rn из волос трековым детектором CR-39, находящимся в герметичной камере. Применение CR-39 детектора обеспечивает очень высокую чувствительность, и тем самым способствует определению очень низких содержаний ^{226}Ra в волосах. На рис. 4.5 приведен схематический вид экспозиционной камеры для измерения ОАР в волосах.

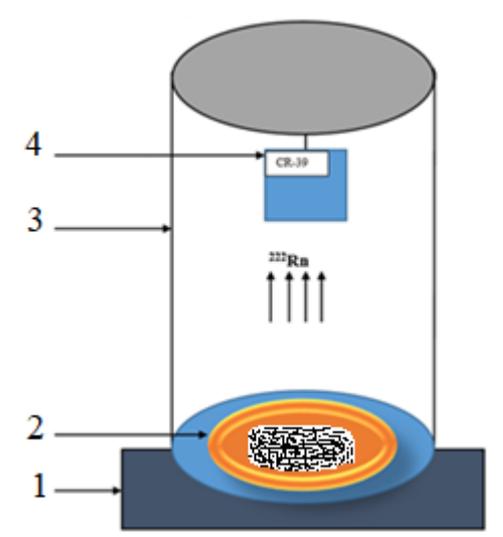


Рис. 4.5. Экспозиционная камера: 1 – подставка, 2- волосы на пластиковой чашке, 3- камера, 4- детектор CR-39

Камера состоит из прозрачной пластиковой цилиндрической камеры ($D = 9.0$ см, $h = 15$ см), в верхней части камеры устанавливается детектор CR-39. Исследуемые волосы ($m=1$ гр) помещаются на пластиковую чашку, наружный круг камеры плотно закрывают с помощью герметика для полной изоляции от влияния внешних факторов. Расстояние между образцом и CR-39 - детектором составляет 12 см для регистрации α -частиц только от ^{222}Rn и его дочерних продуктов распада. Преимуществом является то, что можно проводить измерения в нескольких десятках камерах, одновременно. Камеры находятся на экспозиции в течение 70 дней для набора альфа-частиц радона на CR-39, эманлируемых из волос.

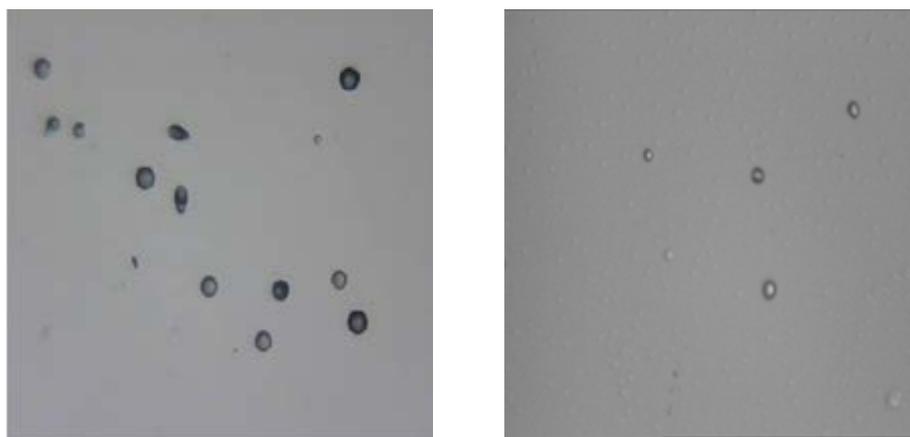
Исследуемые волосы (не крашенные [100]) были выборочно взяты с затылочной части головы мужчин младшего возраста (< 10 лет) и возрастной группы 40-70 лет, проживающих в городах Ташкент и Ангрэн.

Для каждого образца волос был составлен протокол. Их промыли в растворах шампуня и под струей водопроводной воды. После высыхания, образцы волос помещали в полиэтиленовые пакетики и хранили в лабораторных условиях в течение 30-40 дней для избавления от остаточной активности ^{222}Rn .

§ 4.3.2. Определение удельной активности ^{226}Ra в волосах

Для определения удельной активности ^{226}Ra в волосах сначала была измерена ОАР. Образцы волос массой 1 грамм помещали внутри камеры, согласно рис. 4.5. Регистрация α -частиц ^{222}Rn и его ДПР была проведена в 23 камерах одновременно. При этом в 21 (8 образцов по 2 или 3) камере содержались образцы волос, а в 2 камерах не было образцов, для учета вклада рабочего фона CR-39 детектора.

После экспозиции CR-39 детекторы были протравлены в растворе 6М NaOH при температуре 70 °С в течение шести часов. Подсчет числа α -треков на 1 см² площади детектора проводили через экран монитора, соединенного с оптическим микроскопом (см. Глава II. Рис. 2.3). На рис 4.6 приведены изображения α -треков CR-39 детектора для волос после экспозиции в 70 дней и рабочий фон.



Волосы

фон

Рис. 4.6. Фотоизображение α – треков из волос и рабочий фон на CR-39 детекторах

Значения объемной активности радона и удельной активности (УА) ^{226}Ra в волосах определяли по формулам (4.1) и (4.4) [95].

В таблице 4.4 приведены результаты удельной активности и концентрации ^{226}Ra в волосах детей (№1 и 2) и жителей старших возрастов (№3 -8) из Ташкента и Ангрена.

Таблица 4.4

Удельная активность и концентрация ^{226}Ra в волосах жителей Ташкента и Ангрена

№	Волосы	ρ , тр/см ² ·30 дн	A_{Rn} , мБк/м ³	C_{Ra} , мБк/г	m_{Ra} , 10 ⁻¹⁴ г/г
1	Жители Ташкента	6	331.5±94.5	0.12±0.03	0.32
2		13	667±141.7	0.24±0.05	0.64
3		20	993±283.53	0.36±0.1	0.97
4		39	1937±387.4	0.71±0.14	1.91
5		30	1500±300	0.55±0.11	1.48
6	Жители Ангрена	41	2036±407.2	0.75±0.15	2.02
7		71	3527±705.4	1.30±0.26	3.51
8		90	4471±894.2	1.65±0.33	4.45

Результаты показывают, что удельные активности ^{226}Ra в образцах волос жителей Ташкента составили для детей от 0.12 до 0.24 мБк/г и для взрослых от 0.36 до 0.71 мБк/г, соответственно. Эти значения для взрослых жителей Ангрена меняются от 0.75 до 1.65 мБк/г. Превышение удельной активности радия в 2-2.5 раза в волосах жителей Ангрена по сравнению с данными Ташкента, указывает на высокое содержание тяжелых радиоактивных элементов в этой местности. Для этого были проведены измерения ОАР и определены УА ^{226}Ra в почвах Ангрена и Ташкента по методу, описанному в § 4.2.

Здесь надо особо отметить, что при применении трекового детектора CR-39 достигается очень высокая чувствительность определения радия в волосах жителей Ташкента и Ангрена $(0.32\div 1.91)\cdot 10^{-14}$ г/г и $(2.02\div 4.45)\cdot 10^{-14}$ г/г, соответственно.

В таблице 4.5 приведены результаты удельной активности радия в почвах Ангрена и Ташкента.

Таблице 4.5

Удельная активность ^{226}Ra в почвах Ангрена и Ташкента

Почва	ρ , тр/см ² ·д	A_{Rn} , Бк/м ³	C_{Ra} , Бк/кг
Почва Ангрена	240	1405±327.8	134.2±25.0
Почва Ташкента	40	235.3±55.1	22.4±6.0

Как видно из табл. 4.2, удельная активность ^{226}Ra в почве Ангрена в 6 раз больше, чем в почве Ташкента, и составляет 134±24 и 22.4±6.0 Бк/кг, соответственно.

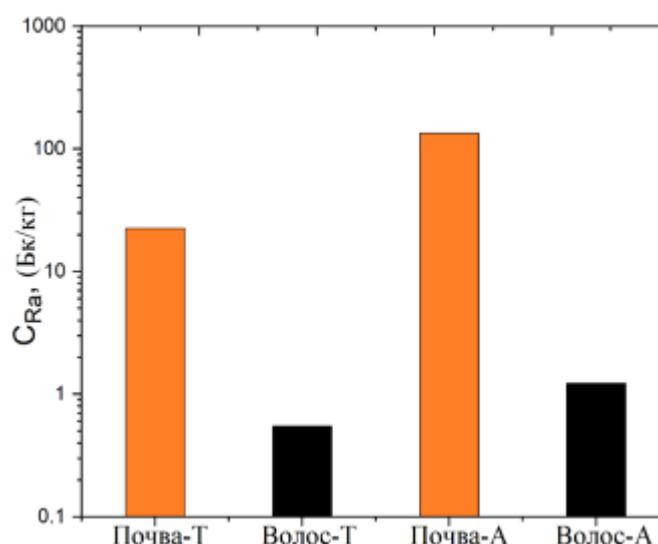


Рис. 4.7. Удельная активность Ra-226 в волосах жителей и почвах Ташкента и Ангрена

Из рис. 4.7 следует, что степень биологической аккумуляции ^{226}Ra в волосах людей связана с употреблением местной воды и продуктов питания, где основным источником поступления является местная почва. Следовательно, средние значения удельной активности радия в волосах населения Ангрена и Ташкента составили 1.23±0.2 и 0.54±0.12 мБк/г, соответственно. Превышение концентрации радия в волосах жителей Ангрена связано с геологическим расположением местности. Как показывает

сравнение УА ^{226}Ra в волосах человека $0.12 - 1.65$ мБк/г с другими данными $0.26 - 0.58$ мБк/г [29], сходимость результатов находится в пределах ошибок.

Что касается оседания тяжелых естественных радионуклидов в волосах из атмосферы, нам кажется, их количество незначительно.

Выводы по четвертой главе

В этой главе были описаны разработанные методики определения скорости эксхалации ^{222}Rn , удельной активности ^{226}Ra в костных находках и волосах человека и сделаны следующие выводы:

объемная активность и скорость эксхалации ^{222}Rn были определены: в доисторических и древних костях $812 \div 16180$ Бк/м³ и $0.69 \div 13.7$ Бк/(кг·ч), в почвах $185.6 \div 1398$ Бк/м³ и $0.16 \div 1.18$ Бк/(кг·ч) и в стандартной кости 182.4 Бк/м³ и 0.15 Бк/кг·ч, соответственно;

удельная активность ^{226}Ra была определена: в доисторических и древних костях $77.5 \div 1868$ Бк/кг, в стандартных костях $6.45 - 17.4$ Бк/кг, а в почвах $17.6 \div 134.2$ Бк/кг;

суммарная удельная α -активность естественных радионуклидов составила: в доисторических и древних костях $988 \div 10728$ Бк/кг, в стандартной кости 1104 Бк/кг, а в окружающих их почвах $360 \div 1828$ Бк/кг, соответственно.

удельные активности ^{226}Ra в волосах жителей Ангрена составили $0.75 \div 1.65$ мБк/г или $(2.02 \div 4.45) \cdot 10^{-14}$ г/г, в то же время в волосах жителей Ташкента составили $0.12 \div 0.71$ мБк/г или $(0.32 \div 1.91) \cdot 10^{-14}$ г/г.

превышение удельной активности ^{226}Ra в $2 \div 2.5$ раза в волосах жителей Ангрена указывает на высокое содержание тяжелых радиоактивных элементов в этой местности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии по техническим наукам (PhD) на тему: «Разработка методики определения ^{222}Rn и ^{226}Ra в костных останках и волосах людей трековым детектором CR-39», сформулированы основные результаты и следующие выводы:

1. Показано с использованием ИНАА, что почва является основным донором элемента урана в ткань скелета $1.5 \div 220$ мг/кг, при содержании ≤ 0.01 мг/кг в стандартной кости. При этом содержания ^{232}Th в костях динозавров, южных мамонтов, архантропа и стандартной кости различаются незначительно $0.58 \div 0.78$ мг/кг.

2. Разработана простая и легкодоступная регистрационная камера на CR-39 детекторах для определения удельной активности ^{226}Ra в доисторических и древних костях.

3. Обнаружено, что существует корреляция между возрастом и концентрацией ^{226}Ra в доисторических и древних костях.

4. Впервые разработана методика определения суммарной α -активности радиоизотопов в костных останках. Показано, что значения суммарной удельной α -активности радионуклидов в 10-12 раз больше, чем значения удельной активности ^{226}Ra в тех же образцах.

5. Разработана простая и высокочувствительная методика определения удельной активности ^{226}Ra в волосах людей на CR-39 детекторе до 0.12 мБк/г ($0.32 \cdot 10^{-14}$ г/г). Обнаружено, что удельная активность Ra в $2 \div 2.5$ раза больше в волосах жителей Ангрена, что указывает на высокое содержание тяжелых радиоактивных элементов в этой местности. Это доказывает, что концентрация радия в волосах является радиоиндикатором загрязнения окружающей среды. Получен патент на полезную модель.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я глубоко признателен А. Васидову за его научное руководство и ценные консультации, которые помогли мне в написании диссертации.

Также хотел бы выразить благодарность президенту АН РУз академику Б.С. Юлдашеву за его практическую поддержку в исследованиях в области радиогенного датирования возраста реликтов. Я также глубоко признателен директору Института ядерной физики И.И. Садыкову и его заместителю М. Ташметову за их постоянное внимание к моей работе.

Отдельно хочу выразить благодарность директору геологического музея Министерства Геологии Республики Узбекистан, уважаемому Ахмаджону-ака Ахмадшаеву за его поддержку и предоставление ценных доисторических костных артефактов, относящихся к различным периодам эволюции.

И, наконец, хочу выразить благодарность руководителю и всему коллективу лаборатории «Радиохимии» за их постоянную помощь и поддержку в завершении данной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор ядерных технологий - 2021. / Сборник МАГАТЭ. – Австрия, 2021. -С. 69.
2. Юлдашев Б.С., Салихбаев У.С., Досимбаев А.А., Байтелесов С.А., Рязанцев Е.П., Егоренков П.М. Эксплуатация ВВР-СМ с диоксидурановым топливом 36%-ного обогащения // Атомная энергия. – Москва, 2005. - Том. 99, №2. – С. 147 - 152.
3. Бакиев С.А., Рахманов Ж., Кульджанов Б.К., Осинская Н.С., Ташимова Ф., Хусанбаев У.Я., Ахмедов Я.А., Якубов О. Применение инструментального нейтронно-активационного анализа для исследования элементного состава плодоовощной продукции лекарственных растений //Узбекский физический журнал. Ташкент, 2010. – Том. 12, № 3. – С. 181 - 187.
4. Хатамов Ш. НАА биогеохимических объектов при поисках золоторудных месторождений и оценке биогеохимической ситуации в Среднеазиатском регионе // Дисс. док. тех.наук. - М.: ГЕОХИ РАН, 1991. - 420 с.
5. Acharya R.R., Reddy A.V., Pujari P.K. The 15th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis (MTAA-15) at BARC, Mumbai, India: Preface // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry -2020. -V. 325. – pp. 701 - 705 <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07314-2>
6. Протасова Н.А., Беляев А.Б. Химические элементы в жизни растений // Соросовский образовательный журнал. – Москва, 2001. – Том. 7. №3. – С. 25 - 32.
7. Mukhammedov S., Khaydarov A., Pardayev O. Quality control of baby food products on the base of results obtained using the instrumental neutron activation analysis technique // Uzbek Journal of Physics. – Tashkent, 2014. – Vol. 5, №6. – pp.312 - 316.

8. Зайцев Е.И., Резников Р.С., Сотсков Ю.П. Нейтронно-активационный анализ горных пород на редкие элементы // Москва, 1978. – 101 с.
9. Курбанов Б.И., Данилова Е.А., Осинская Н.С., Хусниддинова С.Х., Турдиев С.Ю., Хушвактов Н.Х., Фармонов Х.Ш. Нейтронно-активационный анализ в экологических исследованиях объектов окружающей среды // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2021. – Том 23, №4. – С. 57 - 64.
10. Данилова Е.А., Кист А.А., Осинская Н.С., Хусниддинова С.Х. Применение НАА для оценки элементного статуса организма человека // Медицинская физика. – Москва, 2008. – №3. – С. 73 - 77.
11. James T. Radiation monitoring notebook. – Los Alamos, 2000. - 150 p.
12. Kramer B., Shear M.J. Composition of bone // Journal of Biological Chemistry. – USA, 1928. -Vol. 79. – pp. 147-160.
13. Исламов У.И., Крахмаль К.А. Палеоэкология и следы древнейшего человека в Центральной Азии. – Ташкент: Фан, 1995. – 220 с.
14. Халмухамедова Р.А. Воложенинов Н.Н. и др. Палеографическое изучение Хайдарканской долины. К истокам истории древнекаменного века. – Ташкент: Фан, 1996. – С. 112 - 121.
15. Bowen H.J.M. Trace elements in biochemistry. – Academic Press: New York – London, 1966. – 241 p.
16. Антипина Е. Е. Костные остатки животных из поселения Горный // Российская археология. – Москва, 1999. – №1. – С. 103 - 116.
17. Worked bone research group of the international council of zooarchaeology. www.wbrg.net
18. Jenkins E. N., Sc. M., Smales A. A. Radioactivation analysis // Quarterly Reviews Chemical Society. – UK, 1956. – Vol.10. – pp. 83 <https://doi.org/10.1039/QR9561000083>
19. Bowen H.J.M., Gibbons. D. Radioactivation analysis // Clarendon Press. – Oxford, 1963. – 295 p.

20. Zaichick S, Zaichick V. NAA of Ca, Cl, Mg, Mn, Na and P content in human bone affected by osteogenic sarcoma // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2012. – Vol. 293, №1. – pp. 241 - 246.

21. Zaichick S, Zaichick V. Human bone as a biological material for environmental monitoring // Int. J. Environment and Health. – 2010. –Vol. 4, № 3. – pp. 278 – 292.

22. Saiki M., Takata M. K., Kramarski S., Borelli A. INAA of rib bone samples and of bone reference materials // Biological trace element research. – 1999. –Vol. 1, №71. – pp. 41 – 46. <https://doi.org/10.1007/BF02784189>

23. Kadhim Y.A., Kadhim N.F., Ibrahim N.K. Determination of alpha rates emitted from animal bones using CN–85 nuclear track detector // American Journal of Quantum Chemistry and Molecular Spectroscopy. –2019. – Vol. 3, № 1. – pp. 7 – 11.

24. Vasidov A., Osinskaya N.S., Khatamov Sh., Akhmadshaev A. INAA of prehistoric and ancient bone remains // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2008. – Vol. 278, №2. – pp. 287 – 291.

25. Holm E., Gwynn J., Zaborska A., Gäfvert T., Roos P., Henricsson F. Hair and feathers as indicators of internal contamination of ^{210}Po and ^{210}Pb // Denmark, 2010. – 27 p.

26. Tridico S.R., Houck M.M., Kirkbride K.P., Smith M.E., Yates B.C. Morphological identification of animals hairs // Forensic Science International. – 2014. – Vol.238. – pp. 101 – 107

27. Abojassim A.A., Najam L.A., Naji D., Hussain T.A. The effective Ra content and Rn exhalation rate in hair dyes samples // International Journal of Radiation Research. – 2017. – Vol. 15, №2. – pp. 207 – 211.

28. Mikulewicz M., Katarzyna Ch., Thomas G., Henryk G. Reference values of elements in human hair. // Environmental toxicology and pharmacology. – 2013. –Vol. 36, №3. – pp. 1077 – 1086. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2013.09.012>

29. Muikku M., Li W. Natural radionuclides in human hair // Human health handbooks. – 2012. – №1. – pp. 316-330. <https://www.julkari.fi/handle>

30. Спектральный анализ волос на микроэлементы // <https://www.besthairspb.ru/content/spektralnyy-analiz-volos-na-mikroelementy/>

31. Patent No.: US 6,847,033 B2. Method and device for quickly and continually detecting changes in the concentration of radon gas that is dissolved in water / Klaus Freyer, 17.10.2002.

32. Патент RU 2396576: Способ определения удельной активности радия-226 в почве / Прокофьев О.Н. – 10.08.2010.

33. Васидов А., Сайдуллаев Б.Ж. Био намуналарда ^{222}Rn радиоактивлигини ва эксхалация тезлигини аниқлаш методикасини яратиш // «Ядерная физика и ядерные технологии»: Сборник материалов V Республиканской конференции молодых физиков Узбекистана, 4-5 декабря 2018. – Ташкент, 2018. –С. 159 – 161.

34. Frederic G., Frederic P. Radon emanation from human hair // Science of Total Environment. – 2019. – Vol. 660. – pp. 421 – 428.

35. Mukhammedov S., Danilova E. A., Osinskaya N. S., Khushvaktov Zh., Akramov F., Suleimanova D. N., and Kuliev O. Neutron activation analysis of anemic children's hair. // Atomnaya energiya. – Москва, 2012. –Vol. 111. №3. – pp. 225 - 229.

36. Малова И.Ю., Рубайлов Ю.В. Волосы: анатомия, физиология, патофизиология. – Майкоп, 2015. – 29 с.

37. Morton, J., Vikki, A.C. and Gardiner, P.H.E. Removal of exogenously bound elements from human hair by various washing procedures and determination by inductively coupled mass spectrometry // Analytica Chimica Acta. – 2002. – Vol. 455. – pp. 23 – 34.

38. Sky-Peck, H.H. Distribution of trace elements in human hair // Clin Physiol Biochem. – 1990. – Vol. 8. – pp 70 – 80.

39. Chatt A., Sajjad M., DeSilva K.N. and Secord C.A. Human scalp hair as an epidemiologic monitor of environmental exposure to elemental pollutants // Atomic Energy. – Vienna (Austria), 1985. – pp. 33- 49.

40. Vaupotic J. Indoor and outdoor radon measurements, Slovenian experience // NATO Radon seminar. Stefan Institute, Ljubljana, February 2007. – Ljubljana (Slovenia), 2007. – pp. 12- 23.
41. Fleischer R.L. Radon: Overview of Properties, Origin, and Transport. Radon Measurements by Etched Track Detectors // Polytechnic Institute, Troy, New York, USA, 1997. – pp. 3 – 20.
42. Tanner A.B. Radon migration in the ground // A review. In the natural radiation environment. – Chicago, 1964. – pp. 161– 190.
43. Nazaroff W.W., Nero A.V. Radon and its decay products in indoor air // J. Wiley.Int. Sci. Publ. – New York, 1988. – 518 p.
44. Otton J.K. Geology and radon. – U.S. Government Printing Office Superintendent of Documents, Mail Stop SSOP, Washington, 1992. – 30 p.
45. Fleischer R.L. Isotopic disequilibrium of uranium: Alpha–recoil damage and preferential solution effects // Science. –1980. –Vol. 207. – pp. 979- 981. <https://doi.org/10.1126/science.207.4434.979>
46. Fleischer R.L. Alpha–recoil damage and solution effects in minerals: Isotopic disequilibrium and radon release // Geo–Cosmochim. Acta. –1982. –Vol. 46. – pp. 2191- 2201.
47. Ek J., Ek B., Radium and uranium concentrations in two eskers with enhanced radon emission // NRE IV, Environment International. – 1995. [doi:10.1016/S0160-4120\(96\)00151-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00151-1)
48. Hildingson O. Radon emitted from gravel and aggregate; Testing method and consistencies for indoor environment // Swedish National Testing Institute, Report. –1983. – pp. 1 - 45.
49. Старосельская–Никитина О.А. История радиоактивности и возникновения ядерной физики. – Москва, 1963. – 429 с.
50. Погодин С.А., Либман Э.П. Как добыли советский радий. – Москва, 1977. –250 с.
51. Jonsson G., Albarracin D.A., Bacmeister G.U. et al. Comparison of radon measurements done by solid–state nuclear track detectors and electronic

devices in the frame of an EU–radon project // Radiation Measurements. – 1997. – Vol. 28, №6. – pp. 651 - 656.

52. Yafasov A.Ya. Report on mission to firms Genitron Instruments GmbH and Positron Technology GmbH, Frankfurt–on–main, Germany // Technology Center in Ukraine. – 1999. – pp. 1- 37.

53. Яковлева В.С. Методы определения объемной активности изотопов радона и продуктов распада в воздухе. – Томск, 2010. –119 с.

54. Sohrabi M. Radon levels in nature and in dwellings: Remedial actions. In: Radon measurements by etched track detectors // Editor: S Durrani and R. Ilic. Word Scientific. –1997. – pp. 225 - 242.

55. Hadler J.C.N. et.al. Performance of the alpha–spektrometer CR–39, versus etching time and its possible application in radon, toron discrimination // In 16th Inter. Conference on Nuclear Tracks in solids. – Beijing, 1992 – pp. 347.

56. Николаев В.А. Твердотельные трековые детекторы в радиометрии, изотопном анализе и радиографии // Радиохимия. – 2012. – Том. 54, №1. – С. 7–20.

57. Васидов А. Методы измерения объемной активности и скорости эксхалляции радона. – LAPLAMBERTAсP: Saarbrucken (Deutschland), 2013. – 216 с.

58. Durrani S.A., Ilic R. Radon measurements by etched track detectors. – Singapore, 1997. – 387 p.

59. Almayahi B.A., Tajuddin A.A., Jaafar M.S. Measurements of natural radionuclides in human teeth and animal bones as markers of radiation exposure from soil in the northern Malaysian Peninsula // Radiation Physics and Chemistry – 2014. – Vol. 97. – pp. 56–67

60. Яковлева В.С. Методы определения объемной активности изотопов радона и продуктов распада в воздухе. Учебное пособие. – Томск, 2010. – 119с.

61. Сайдуллаев Б.Дж., Васидов А., Усманов Т.М. Измерение α –активности естественных радионуклидов в древних костных останках //

«Ядерная физика и ядерные технологии»: Сборник материалов VI Республиканской конференции молодых физиков Узбекистана, 1-2 декабря 2020. – Ташкент: Институт ядерной физики АН РУз, 2020. – С. 203–212.

62. Bhagwat A.M. Solid state nuclear track detection theory any applications // Indian Society for Radiation Physics Kalpakkam Chapter. –1993. – 34 p.

63. Ali A.R., Nadhim K.I., Auras M.O., Nada F.K. Measurement the natural radioactivity of Chicken meat samples from Karbala governorate // World Scientific News. – 2019. – Vol. 117. – pp. 196-203.

64. Hussain H.A. Alpha Particles Registration Characteristics in a CN–85 Plastic Track Detector // Isotopenpraxis Isotopes in Environmental and Health Studies. – 1989. – Vol. 25, №6. – pp. 243-245.

65. Барановская Н.В., Игнатова Т.Н., Рихванов Л.П. Уран и торий в органах и тканях человека // Вестник Томского Государственного университета. – 2010. – № 399. – С. 182–188.

66. Василенко О.Н. Радиационная экология. – М.: Медицина, 2004. – 216 с.

67. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных. – М.: Высшая школа, 2004. – 549 с.

68. George A. Welford, Ruth Baird. Uranium levels in human diet and biological materials // Health Phys. –1967. – Vol. 13. – pp. 1321-1324.

69. Hoffman J. U in human thyreoid gland and dog testicule and pancreas // Naturwissenschaften. – 1942. – Vol. 30. – pp. 279 - 280.

70. Sievert R.M., Hultgvist B. Some Swedish investigations of the radioactivity of the humman body // Brit.J.Radiol. – 1957. – suppl., №7. – pp. 1-12.

71. Бойко В.И., Силаева М.Е. Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов. – Томск: МНТЦ, 2011. – 355 с.

72. Durrani S.A., Bull R.K. Solid state nuclear track detection, principles, methods and applications // Oxford; New York: Pergamon Press, 1987. – 304 p.

73. Hafez A.F. and Kahlil G.I. Track-hole formation of alpha particle and recoil nuclei in an LR-115 nuclear track detector exposed to neutrons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. –1994. – pp. 107-112.

74. Kadhim Y.A., Kadhim N.F., Najam L.A. Determination of Track Density of Animal Bones using CN-85 Detector // American Journal of Quantum Chemistry and Molecular Spectroscopy. – 2019. –Vol.3, №1. – pp. 138-145.

75. Бахур А.Е. и др. Полный радионуклидный анализ на низкофоновом альфа-бета-радиометре УМФ-2000 // АНРИ. –Москва, 2006. №2. – С. 36 – 42.

76. Маренный А.М. Диэлектрические трековые детекторы в радиационно-физическом и радиобиологическом эксперименте. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 180 с.

77. Vasidov A., Akhmadshaev A., Osinskaya N.O., Saydullayev B.J. Neutron activation and track analysis of the newly found bones of the southern mammoths and dinosaurs // J. Radioanal. Nucl. Chem. – Springer, 2016. – pp. 953 - 958. doi: <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4969-0>

78. Васидов А., Ахмадшаев А., Осинская Н.О., Сайдуллаев Б. Ж. Инструментальный нейтронно-активационный анализ древних костей, найденных на территории Узбекистана // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2017. –Том19, №2. – С. 114 - 119.

79. Васидов А., Сайдуллаев Б.Дж., Усманов Т.М. Измерение суммарной альфа-активности естественных радионуклидов в древних костных останках // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2022. – Том.24, №1. – С. 76 - 79.

80. Vasidov A., Saidullaev B.J., Usmanov T.M. α -Activity Measurement for Native Radionuclides in Ancient Bone Remains // Atomic Energy. – Москва, 2022. –Vol. 131. №5. – pp. 279 - 283 doi: <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00879-z>

81. Saydullaev B.J., Vasidov A., Usmanov T.M. Measuring the alpha activity of natural radionuclides in ancient bone remains // “Modern Problems of

Nuclear Energetics and Nuclear Technologies”: Book of Abstracts of International Conference, November 23-25, 2021. - Tashkent: Institute of Nuclear Physics, 2021. – pp. 199.

82. Васидов А., Сайдуллаев Б.Дж. Разработка методики измерения радона–222 из волос для определения удельной активности радия–226 в волосах с помощью трекового детектора CR–39 // Сб. материалов Международной научно–практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – залог прогресса и процветания», посвященной 5-летию основания Навоийского отделения Академии наук Республики Узбекистан. – Навои, 2022. – С.67 – 70.

83. Шутов В.Н., Стамат И.П., Швыдко Н.С. и др. Методика выполнения измерений суммарной удельной альфа–излучающих радионуклидов. – ФГУП «ВНИИМ им. Д. Менделеева», 2007. – 42 с.

84. Vaipotic J., Hunyadi I., Baradacs E. Thorough investigation of radon in a school with elevated levels // Radiat Measurements. – 2001. – Vol. 34. – pp. 477-482.

85. Tommasino L. Track registration: Etching and counting methods for nuclear tracks // Radon measurements by etched track detectors. Applications in radiation protection, earth science and the environment. Eds S.A. Durrani and R. Ilic. – Singapore, 1997. – pp. 129 – 141.

86. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Сер.5. География. – М. МГУ, 2015. – №2 – С. 7 - 17.

87. Vasidov A., Saydullaev B.J. The measurements of ^{222}Rn and ^{226}Ra activities in human hairs by using CR–39 track detectors // IV International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” September 26-30, 2022. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2022. – pp.192.

88. Susan S.A., Raed A., et. Al. Bone char as a green sorbent for removing health-threatening fluoride from drinking water/ Envir. Inter. 2019, 127, 704–719

89. Хатамов Ш., Юлдашев Б.С., Исламов У., Осинская Н.С., Рахманова Т.П., Васидов А. Определение калия и аргона в костных останках архантропа методом активационного анализа // *Узбекский физический журнал*. – Ташкент, 2005. – Том 7, №3. – С. 222 – 227.

90. Сайдуллаев Б.Ж., Васидов А. Қадимий ва стандарт суяк қолдиқларидаги радон эксхалация тезлгини аниқлаш // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари»: VII Республика илмий – назарий анжуман материаллари, 19-20 май. – Термиз, 2017. – Б. 207-209.

91. Perrier F., Girault F., Bouquerel H. Effective radium-226 concentration in rocks, soils, plants and bones // London, SpecPub. 2018. –Vol. 451. – pp. 113-129. <https://doi.org/10.1144/SP451.8>

92. Тойчиев Х.А., Абдуназаров У.К. Открытие захоронения южного мамонта на территории Узбекистана // Основные проблемы магматической геологии западного Тянь-Шаня // Материалы II Республиканской конференции Ташкент, 2013. – С. 45-48.

93. Протасова Н.А., Беляев А.Б. Химические элементы в жизни растений // Соросовский образовательный журнал –2001. –Том.7, № 3. – С. 25.

94. Vasidov A., Akhmadshaev A., Osinskaya N.S., Saidullaev B.J. Neutron activation and track analysis of the newly found bone relicts // 14th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis – Delft, Niderland, 2015. – pp. 132.

95. Васидов А. Разработка методик для активационного и трекового анализа конструкционных и биоэкологических материалов: Дис. ... док.тех.наук. – Ташкент: ИЯФ АН РУз, 2021. – 197 с.

96. Васидов А, Сайдуллаев Б.Дж, Усманов Т.М. Измерение суммарной альфа-активности естественных радионуклидов в древних костных останках // *Узбекский физический журнал*. – Ташкент, 2022. – Том. 24, №1. – С. 76 – 79. doi: <https://doi.org/10.52304/v24i1.306>

97. Vasidov A., Kist A. A. Measurements of ERR from soil samples of the Tashkent area by CR-39 // Book of abstracts of the Fifth Eurasian Conference on Nuclear Science and its Application, 14-17 October, 2008. – Ankara (Turkey), 2008. – p. 219.

98. Васидов А., Салихбаев У.С., Кист А.А., Радюк Р.И. Измерение объемной активности радона в зонах урановых отвалов // Атомная энергия. – Москва, 2010. –Том 109, №5. – С. 272 – 274.

99. Протасова Н.А., Беляев А.Б. Химические элементы в жизни растений // Соросовский образовательный журнал. – Москва, 2001. – Том. 7, №3. – С. 25 -32.

100. Abojassim A.A., Najam L.A., Naji D., Hussain T.A. The effective Ra content and Rn exhalation rate in hair dyes samples // Inter J Radiation Research. – 2017. –Vol.15, №2. – pp. 207- 211.

101. Васидов А., Сайдуллаев Б.Ж. Тарихий ва қалимги суяк топилмаларида радон-222 радиоактивлигини ва эксхалация тезлигини аниқлаш // Ёш олимлар ахборотномаси. – Тошкент, 2019. – №1(3). – Б. 45- 46.

102. Сайдуллаев Б.Дж., Васидов А. Определение скорости эксхалации радона из костных останков // Радиационно – гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 191-194.

103. Васидов А., Сайдуллаев Б.Дж., Усманов Т.М. Измерение α -активности естественных радионуклидов в древних костных останках // Атомная энергия. – Москва, 2021. – Том131, №.5. – С. 275-279.

104. Patent RUz № FAP01941. CR-39 iz detektori yordamida sochdagi radiy-226 solishtirma aktivligini aniqlash usuli / Vasidov A., Saydullayev B. J. // Расмий Ахборотнома. - 2022. – №5. – Б.139

105. Vasidov A., Akhmadshaev A., Saydullayev B. J. Activation and track analysis of the bone remains found in the territory Uzbekistan // The 7th Eurasian

conference Nuclear science and it's application, 21-24 October: Book of abstracts.
– Baku (Azerbaijan), 2014. – pp. 370 – 371.

106. Васидов А., Ахмадшаев А., Сайдуллаев Б.Дж.. Определение эксхалации радона из доисторических и древних костных образцов // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Республиканская конференция, посвященная 100–летию академика С.А. Азимова. – Ташкент, 2014. – С. 34 – 35.

107. Васидов А., Ахмадшаев А., Сайдуллаев Б.Ж.. Янги топилган тарихий ва қадимий суякларнинг инструментал нейтрон активацион таҳлили // «Физика фанининг ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни»: Республика илмий – амалий конференция. – Тошкент, 2015. – Б. 153 – 159.

108. Васидов А., Сайдуллаев Б.Ж.. Жанубий фил суяк қолдиқларидаги радон эксхалация тезлигини аниқлаш // «Физика фанининг ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни»: Республика илмий – амалий конференция мақолалари тўплами. – Тошкент, 2015. – Б. 111-114.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

АА – активационный анализ

НАА – нейтронно–активационный анализ

ИНАА – инструментальный НАА

ЯФМА – ядерно–физические методы анализа

ИЯР – исследовательский ядерный реактор

АЭС – атомная электростанция

РН – радионуклид

РЗЭ – редкоземельные элементы

КБП – коэффициент биологического поглощения

ДПР – дочерние продукты распада

ЯТТД – ядерные твердотельные трековые детекторы

ЭРОА – эквивалентная равновесная объемная активность

ОАР – объемная активность радона

СЭР – скорость эксхалации радона

ПДК – предельно допустимая концентрация

КК – калибровочный коэффициент

ВОЗ – всемирная организация здравоохранения

МКРЗ – международный комитет по радиационной защите

СЦЯ – сцинтилляционная ячейка

ППНВ – почвенные поры, насыщенные водой