

Радиоактивные элементы
в окружающей среде
и проблемы радиэкологии

Radioactive elements
in environment and problems
of radioecology

Ministry of Education and Science of Russian Federation
Tomsk Politecnic University

L.P. Rihvanov

**RADIOACTIVE ELEMENTS
IN ENVIRONMENT AND PROBLEMS
OF RADIOECOLOGY**

TEXT BOOK

Scientific & Technical Translations



Tomsk 2009

Министерство образования и науки Российской Федерации
Томский политехнический университет

Л.П. Рихванов

**РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
И ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭКОЛОГИИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Scientific & Technical Translations



Томск 2009

Рихванов Л.П. **Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозкологии:** учебное пособие. – Томск: STT, 2009. – 430 с.
ISBN 5-93629-342-4

Учебное пособие написано заведующим кафедрой геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета на основании многолетнего опыта научных исследований в области геохимии радиоактивных элементов и проведения учебных занятий по курсам "Геохимия и типы месторождений редких и радиоактивных элементов", "Радиоактивные элементы в окружающей среде. Радиозкология", по программам магистерской подготовки 130100.27 "Геология, поиски и разведка руд редких и радиоактивных элементов" и специальности 020804 "Геоэкология".

Рассматриваются общие вопросы, связанные с историей изучения радиоактивности и радиоактивных элементов, методами и единицами их измерения.

Обсуждаются проблемы распространения природных и техногенных радионуклидов в различных природных средах, в том числе радона и "горячих частиц" – основных факторов внутреннего облучения организма человека.

Пособие знакомит с основными проблемами оценки воздействия ионизирующего излучения на биоту и человека, оценкой риска и нормированием радиационного фактора.

Показаны основные радиозкологические проблемы, возникающие при освоении месторождений радиоактивного сырья, и принципы организации радиационного мониторинга.

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов и магистров, специализирующихся в области геоэкологии, радиозкологии и освоения месторождений радиоактивного сырья.

Рекомендовано УМО российских вузов по образованию в области прикладной геологии в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по естественно-научным специальностям.

УДК 550.42:546.7+621.039

Рецензенты:

В.А. Парначев – д. геол.-минерал. наук, профессор, г. Томск;

И.В. Гончаров – д. геол.-минерал. наук, профессор, г. Томск.

Оглавление

Введение	7
ГЛАВА 1. История открытия и изучения радиоактивности	11
ГЛАВА 2. Радиоактивность и единицы ее измерения	26
2.1. Общие понятия о радиоактивности	26
2.2. Общие понятия о единицах измерения радиоактивности	32
ГЛАВА 3. Краткий обзор методов и средств измерения радиоактивности, оценки дозовых нагрузок	39
3.1. Методы и средства регистрации радиоактивного излучения	39
3.2. Методы оценки дозовых нагрузок	41
ГЛАВА 4. Радиоактивные вещества в окружающей среде	60
4.1. Естественные радиоактивные элементы	60
4.2. Искусственные радиоактивные элементы	84
4.3. "Горячие частицы"	151
ГЛАВА 5. Радон как радиационный фактор окружающей среды	162
5.1. Общие сведения о радоне и продуктах его распада	162
5.2. Основные источники радона	163
5.3. Радон и продукты его распада как радиационно опасный фактор	178
ГЛАВА 6. Основные дозообразующие техногенные радионуклиды	184

6.1. Тритий (^3H)	184
6.2. Углерод-14 (^{14}C)	189
6.3. Криптон-85 (^{85}Kr)	192
6.4. Йод-131 и йод-129 (^{131}I , ^{129}I)	193
6.5. Стронций-90 (^{90}Sr)	197
6.6. Цезий-137 (^{137}Cs)	198
6.7. Плутоний	198
6.7.1. Общие сведения	198
6.7.2. Основные источники поступления	203
6.7.3. Оценка глобального и регионального уровней накопления плутония	221
6.7.4. Биологическая опасность и уровни накопления Pu в биологических материалах	226
ГЛАВА 7. Проблема радиоактивных отходов	233
ГЛАВА 8. Воздействие радиоактивного излучения на биоту и человека	269
ГЛАВА 9. Радиозокологические проблемы при добыче и переработке минерально-сырьевых ресурсов	318
ГЛАВА 10. Организация и методы контроля за радиационной обстановкой	368
10.1. Общие положения по организации и проведению контроля	368
10.2. Контроль за глобальным и региональным загрязнением объектов природной среды радиоактивными веществами	370
10.3. Контроль за радиационной обстановкой на территориях, прилегающих к объектам ядерного технологического цикла (ЯТЦ)	373
10.4. Организация контроля за радиационной безопасностью строительных материалов и жилых помещений	379
10.5. Организация и методы контроля за радоном	381
10.6. Научно-методическое обеспечение контроля за радиационной обстановкой	382
Заключение	389
Терминологический словарь	391
Тестовые вопросы к курсу	401
Литература	407

ВВЕДЕНИЕ

Говоря о проблемах радиоэкологии, мы прежде всего имеем в виду последние 60 лет существования человеческого общества, когда масштабы распространения радиоактивных элементов существенно увеличились, особенно за счет деятельности человека. Появились новые элементы, ранее неизвестные или встречающиеся в столь ничтожно малых количествах, что они не обнаруживались имевшимися аналитическими методами. Их наличие в природе в значительных количествах, включение техногенных радионуклидов в биосферный кругооборот поставили человечество перед необходимостью объективно оценить не только природу радиационной опасности, но и ее масштабы.

На сегодняшний день нет достаточного количества данных для того, чтобы оправдать предположение о безопасности радиоактивного излучения, связанного как с испытанием ядерного оружия, так и с деятельностью предприятий ЯТЦ (ядерно-технологического центра), особенно в аварийных ситуациях.

Всем нам хорошо известно, что радиоактивное излучение является не единственной опасностью, которой подвергается человечество, но, как и всякий другой вид опасности, оно требует тщательного изучения и самого открытого обсуждения.

К сожалению, серьезным препятствием объективного беспристрастного анализа радиоэкологических проблем является то обстоятельство, что нам неизвестны еще все результаты исследований по изучению последствий испытания ядерного оружия и деятельности предприятий ЯТЦ.

Правительства России и, насколько можно судить по публикациям, США и других ядерных стран стремятся держать эти данные в секрете и выдавать то или иное рафинированное их количество под действием определенных обстоятельств, прежде всего – активного общественного воздействия.

Об этом достаточно красноречиво свидетельствуют материалы исследований последствий аварии на Чернобыльской АЭС 26.04.1986 г. "Жестокой игрой в прятки" называет такую политику доктор биологических наук, профессор, академик

НАН Украины, член Национальной комиссии по радиационной защите населения Украины Д.М. Гродзинский (Яблоков А.В. и др. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы, 2007).

Радиационную опасность следует оценивать наряду с определенными выгодами, являющимися результатом практического использования открытия радиоактивности и радиоактивных элементов.

Судьба подобных открытий, способ их практического использования прежде всего зависят от того, какие ценности и какой путь развития выбирает человечество. В явлении радиоактивности, как писал великий естествоиспытатель XX века В.И. Вернадский, "открылись источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники, какие рисовались человеческому воображению". Это заявление справедливо и по прошествии ста лет со дня открытия явления. Но энергия атомного ядра, таящая в себе огромные возможности, была использована не только как сила созидания, но и как сила разрушительная. И опять же тысячекратно прав гуманист и философ В.И. Вернадский, что "человечество с надеждой и опасением всматривается в нового союзника и защитника". Эти слова были сказаны задолго до открытия реакции деления.

Открытие радиоактивности и радиоактивных элементов привело к коренным изменениям в понимании целого комплекса научных и прикладных вопросов.

Решение проблем, связанных с радиоактивностью и радиоактивными элементами, принципиально изменило и изменяет методологию научного мышления, способствовало переходу на новый уровень развития фундаментального и прикладного знания в геологии, химии, биологии, экологии, технологии, медицинской диагностике, материаловедении и т.д. Все они выходят за рамки отдельных дисциплин, национальных, региональных и корпоративных интересов, требуя комплексного подхода, объединения усилий представителей различных групп научно-технических сообществ.

Интенсивное изучение радиоактивности привело к открытию деления ядра, развитию ядерной энергетики, производству и использованию изотопов. Огромные возможности, которые дают человечеству технологии использования энергии ядра, требуют специальных научных знаний и большой моральной ответственности, подготовки соответствующих кадров и разъяснительной работы с населением.

Современный ядерно-энергетический комплекс представляет собой сложную природно-техническую систему, в которой реализуются следующие основные этапы его функционирования:

- поиск, разведка и добыча урановых руд;
- переработка урановых руд с получением закиси-оксида урана (U_3O_8 , "желтый кек");
- перевод U_3O_8 в форму гексафторида урана (UF_6);
- разделение изотопов урана;
- получение топливных таблеток и ТВЭЛов для ядерного реактора с высоким содержанием изотопа ^{235}U ;

- облучение ТВЭЛов в ядерных реакторах с наработкой Pu;
- химико-металлургическая переработка облученного топлива с последующим извлечением Pu, Am и других делящихся элементов.

На всех этапах функционирования ЯТК образуются отходы и выбросы различных соединений в окружающую природную среду. Это приводит к загрязнению среды обитания человека и негативному влиянию на человека и биоту.

Проблеме радиоактивности и распространения радиоактивных элементов в окружающей человека природной среде и оценкам риска, связанного с данным фактором, посвящено огромное количество работ.

Прежде всего следует отметить фундаментальное обобщение американских коллег "Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources", которое издается с завидным постоянством (в 1997 г. вышло четвертое издание). Каждое его издание существенно пополняется новой информацией.

Огромный массив данных по этой проблеме публикуется в научных изданиях, например, в журнале "Environmental Radioactivity", а также в материалах конференций.

За последние 10 лет по данной проблеме вышло более десятка учебных пособий, которые отражают те или иные аспекты этой чрезвычайно сложной проблемы.

Для студентов естественно-научного профиля, изучающих науки о Земле, на мой взгляд, наиболее приемлемы следующие учебные пособия:

1. Беляев А.М., Иванюкович Г.А., Куриленко В.В., Хайкович И.М. Радиозэкология. – СПб., 2003.
2. Игнатов П.А., Верчеба А.А. Общая радиозэкология. – Дубна, 2005.
3. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. – М.: Бином, 2006.

Они могут быть рекомендованы как основные при изучении геоэкологами и геологами учебных курсов, связанных с изучением радиоактивности и радиоактивных элементов.

Большую помощь для изучающих учебные курсы по данной проблеме могут оказать следующие методические руководства:

1. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды / Под ред. И.А. Соболева, Е.И. Беляева. – М.: Медицина, 2002.
2. Учебно-методическое руководство по радиозэкологии и обращению с радиоактивными отходами для условий Казахстана. – Алма-Ата, 2002.
3. Россман Г.И., Быховский Л.З. Самсонов Б.Г. Хранение и захоронение радиоактивных отходов. – М.: ВИМС, 2004.

В основу данного учебного пособия положены материалы лекций и первой части книги автора "Общие и региональные проблемы радиозэкологии", вышедшей в 1997 г. в издательстве Томского политехнического университета. Вся имеющаяся обширная информация была адаптирована для обеспечения учебного курса "Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозэко-

гии", читаемого автором в Томском политехническом университете с 1995 г. для студентов специальности 020804 "Геоэкология". На основе этих лекций были изданы два электронных учебника (2000 и 2005 гг.).

По сравнению с этими материалами учебное пособие включает в себя новые разделы, такие как "Радиоэкологические проблемы при добыче и переработке минерально-сырьевых ресурсов" (гл. 9), в главе 8 сделаны существенные добавления по полученным за последние 10 лет результатам исследований, в том числе включены материалы рекомендаций Европейского комитета по радиационному риску (Брюссель, 2003; Москва, 2004, русскоязычный перевод) и др. Значительные изменения внесены в главы 4, 5 и др.

В главе 6 появился новый раздел, посвященный плутонию – одному из самых опасных радиоэкологических факторов.

Список литературы дополнен публикациями по данной теме, появившимися на свет за последние десять лет.

Учебное пособие отражает личный взгляд автора на данную проблему и не представляет собой компиляцию литературных данных, чьих-то взглядов и суждений. В учебное пособие включено много данных, полученных как самим автором, так и его коллегами по кафедре геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета – профессорами С.И. Арбузовым, Е.Г. Язиковым, кандидатами наук А.В. Волостновым, Н.В. Барановской, Т.А. Архангельской, А.Ю. Шатиловым, А.В. Тороповым, В.В. Ершовым, А.В. Липихиной и многими другими.

В оформлении учебного пособия вложили свой вклад И.Н. Найбауэр, В.Н. Нефедова, В.В. Жуков.

Поиск литературы по данной проблеме помогали вести сотрудники библиографического отдела научно-технической библиотеки Томского политехнического университета (зав. отделом Н.И. Кубракова).

Всем, кто помогал и содействовал в подготовке учебного пособия, автор выражает глубокую признательность.

Учебное пособие подготовлено при финансовой поддержке Фонда содействия науки, выделившего грант по программе "Физик-ядерщик" 2007. Издание осуществлено за счет финансовой поддержки выпускников кафедры и, прежде всего, В.К. Кондрина.

Глава 1

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ИЗУЧЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ

В 1886 г. французский исследователь Анри Беккерель, изучая явление люминесценции под воздействием солнечного света, обнаружил засвечивание фоточувствительного материала веществом, в состав которого входили соли урана.

Счастливая случайность: небесное светило было в момент проведения эксперимента закрыто тучами, и, естественно, наблюдательный ученый заподозрил что-то неладное. Последовал ряд повторных экспериментов, которые подтвердили, что засвечивание фотопластинок происходит во всех случаях, когда используются соли урана, и это засвечивание происходит даже через светонепроницаемую бумагу.

24 февраля 1896 г. А. Беккерель на заседании Парижской академии наук сделал сообщение "Об излучениях, производимых фосфоресценцией".

2 марта 1896 г. он сделал сообщение "О невидимой радиации, производимой фосфоресцирующими телами". При этом отмечалось, что излучение очень сходно по своему действию с излучением, образующимся в результате торможения электронов в мишени (рентгеновское излучение), изученным Ленардом и Рентгеном.

1 марта 1897 г. А. Беккерель выступил с докладом "Исследование урановых лучей", в котором отметил их способность разряжать в воздухе наэлектризованные тела, независимо от их потенциала и знака заряда.

А. Беккерель отмечал, что излучение радиоактивных веществ производит различные химические действия: оно влияет на вещества, применяемые в фотографии, окрашивает стекло в фиолетовый или коричневый цвета, а щелочные соли – в желтый, фиолетовый, голубой или зеленый цвета. Под его воздействием парафин, целлулоид, бумага желтеют, белый фосфор превращается в красный. В воздухе близ активных тел образуется озон. Не только газы, но и жидкие диэлектрики (нефть, жидкий воздух) и твердые изоляторы (парафин) ионизируются при прохождении излучения и сохраняют свои проводящие свойства несколько мгновений после прекращения действия излучения.

Он пишет, что наблюдались также различные физиологические действия лучей:

"...они вызывают фосфоресценцию различных сред глаза; при приближении активного вещества к виску получается ощущение света. Они действуют на эпидерму и глубоко поражают кожу подобно X-лучам. Действие вначале не вызывает никакого ощущения, и последствие его развивается лишь через несколько недель: образуются более или менее глубокие раны, которые требуют для заживления иногда нескольких месяцев, оставляя шрамы. В настоящее время делаются попытки использовать это действие при лечении волчанки и рака."

Из речи при вручении Нобелевской премии, 1903 г.

Это явление позднее Марией Кюри было названо радиоактивностью. Определения, данные ею, сформулированы следующим образом:

"Радиоактивными элементами называют особые химические элементы, характеризующиеся самопроизвольным атомным испусканием так называемых альфа-, бета- и гамма-лучей, т.е. положительных корпускулярных лучей, отрицательных корпускулярных лучей (движущиеся электроны) и электромагнитного излучения. Это лучеиспускание связано с атомными превращениями <...> Вещества, испускающие лучи Беккереля, назвали радиоактивными, а новое свойство вещества, обнаруженное по этому лучеиспусканию, радиоактивностью. Элементы, обладающие этим свойством, называются радиоэлементами".

М. Кюри "Радиоактивность"

С этого времени началось использование уникального свойства некоторых химических элементов в жизни человека – радиоактивности. Дальнейшее изучение этого явления шло стремительными темпами, особенно в этом преуспели Пьер и Мария Кюри – люди высокого научного подвига, о которых лучше всего написано их дочерью Евой Кюри в книге "Мария Кюри", опубликованной на русском языке в 1959 г. В 1898 г. они показали, что излучение солей урана прямо пропорционально количеству содержащегося в них урана, т.е. что радиоактивность – свойство атома урана.

В том же году (18 июля) они выделили из урановой руды химическое вещество, обладающее еще большей радиоактивностью. Этот элемент был назван ими полонием (древнее название Польши), а 25 декабря они открыли еще более радиоактивное вещество – радий (от греческого слова "лучистый").

Тогда же Г. Шмидт в Германии доказал, что радиоактивностью обладает торий и его соединения, а Ю. Эльстер и Г. Гейтель – что радиоактивность урана и тория не изменяется при разных температурах и давлениях, тем самым подтверждая, что это внутреннее свойство самих химических элементов не связано с воздействием извне (например, с поглощением каких-либо особых лучей).

В январе 1899 г. Э. Резерфорд опубликовал статью по изучению радиоактивности, где показал, что данное излучение не поляризуется и не преломляется.

Ученый обнаружил неоднородность излучения урана; легко поглощаемую часть излучения он назвал альфа-лучами, менее поглощаемую – бета-лучами.

В это же время Кюри во Франции подчеркнул материальный характер излучения и сделал вывод, что радиоактивность может оказаться свойством, присущим лишь тяжелым элементам.

Вскоре Пьер и Мария Кюри обнаружили химические воздействия соли радия: *"обыкновенное стекло, в котором она хранилась, темнело и покрывалось сетью мелких трещин"*. Отсюда ученые сделали вывод о том, что излучение радия *"представляет собой непрерывное выделение энергии"*.

Обилием различного рода исследований и открытий в области нового явления отмечены все последующие годы. Укажем лишь наиболее значительные из них.

1901 г. А. Беккерель показал, что радиоактивность состоит из трех видов лучей, в том числе не отклоняемых в магнитном поле и сильно проникающих (гамма-лучей).

1902 г. М. Кюри определила атомный вес радия равным 225 и предложила поместить его в периодической системе в качестве высшего аналога щелочноземельных металлов.

1902 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди выдвинули теорию радиоактивного распада.

1903 г. П. Кюри и Ж. Данн определили период полураспада (4 дня) эманации радия – радона-222.

1904 г. Ряд ученых Англии и США пришли к выводу, что радий образуется в результате распада урана.

1907 г. Н. Кэмпбелл (Англия) доказал наличие естественной бета-активности у химического элемента калия.

1910 г. М. Кюри и А. Дебьерн впервые выделили чистый металлический радий.

1912 г. Э. Мейер (Германия) показал, что γ -лучи имеют ту же природу, что и рентгеновские, но являются более жесткими.

1913 г. Ф. Содди ввел понятие изотопов.

1914 г. Э. Резерфорд и Е. Андраде положили конец дискуссии о природе гамма-лучей, доказав их электромагнитную природу.

1921–1922 гг. Э. Резерфорд и Дж. Чэдвик исследуют искусственное расщепление легких элементов под действием альфа-частиц, открывая при этом протон. Они приходят к выводу, что расщеплению поддаются ядра всех легких элементов до калия (включительно) с нечетными порядковыми номерами.

1925 г. Л. Мейтнер (Германия) экспериментально доказала, что ядром, возникающим после альфа- или бета-превращения, испускается гамма-излучение.

1932 г. Дж. Чэдвик (Англия) доказал существование нейтрона.

Д.Д. Иваненко (СССР) и В. Гейзенберг (Германия) развили представления о протонно-нейтронной модели строения ядра.

1934 г. в Англии открыт сверхтяжелый изотоп – тритий.

В Италии Э. Ферми пришел к выводу, что при бомбардировке урана медленными нейтронами образуется трансурановый элемент с $Z = 93$ (нептуний-239).

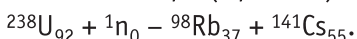
П. Сциллард (Англия) высказал идею о возможности осуществления цепной ядерной реакции.

1935 г. Г. Хевеши (Германия) показал, что из природных изотопов калия радиоактивным является ^{40}K .

1938 г. О. Ган и Ф. Штрассман (Германия) открыли процесс деления урана-235.

1939 г. Л. Мейтнер и О. Фриш (Швеция) дали теоретическое обоснование реакции деления ядра урана.

Ф. Жолио-Кюри (Франция) привел возможную схему деления урана:



Я. Френкель (СССР) и Н. Бор (США) независимо разработали теорию деления ядер.

А. Нир (ГИТА) обнаружил третий изотоп урана с массовым числом 234 и оценил природное соотношение изотопов урана:

– 99,28% – ^{238}U ;

– 0,71% – ^{235}U ;

– 0,006% – ^{234}U .

1940 г. К.А. Петржак и Г.И. Флеров (СССР) экспериментально обнаружили спонтанное деление урана с периодами полураспада:

^{238}U – $10^{16} \div 10^{17}$ лет;

^{235}U – $10^{14} \div 10^{15}$ лет;

^{234}U – $10^{12} \div 10^{13}$ лет.

Я.Б. Зельдович и Ю.Б. Харитон (СССР) изучили условия возникновения цепной реакции деления урана.

А. Нир (США) осуществил разделение изотопов урана-235 и 238.

1941 г. Дж. Кеннеди и др. (США) выделили ^{239}Pu как продукт распада ^{239}Np и доказали его деление под действием медленных нейтронов. Это открытие окажется чрезвычайно перспективным для использования этих элементов в качестве ядерного горючего.

В имеющихся обзорах по истории развития учения о радиоактивности (Gaspari, 1984; Зайцев, Фигуровская, 1961; Флеров, 1971; и др.), как правило, обсуждаются достижения ученых Европы и Европейской части России, тогда как имеющиеся в Томске архивные материалы позволяют утверждать (Рихванов, Лозовский и др., 1991; Хахалкин, 1991), что и в Азиатской части России, особенно в центре сосредоточения научной мысли – Томске, исследования этого явления проводились не менее активно, чем в столичных городах России.

Этому способствовало то, что первые сибирские вузы (Томский государственный университет с его медицинским факультетом и Томский технологический институт) укомплектовывались научными кадрами Московского и Санкт-Петербургского университетов, имеющих прочные связи с научными кругами Европы.

Так, один из ректоров ТГУ, профессор Н.А. Гезехус, был выходцем из Санкт-Петербургского технологического института и занимался изучением теплового действия лучей радия. Его работы по этому направлению обсуждались в научных

кругах уже в 1903 г., т.е. непосредственно в тот год, когда это явление было обнаружено.

Выпускниками европейских вузов России были и другие первые исследователи явления радиоактивности и радиоактивных элементов в Сибири (П.П. Орлов, В.С. Титов, Д.В. Алексеев, П.П. Пилипенко, П.П. Гудков, М.Н. Соболев, В.А. Обручев).

Хаос Гражданской войны разметал и уничтожил многие архивные материалы тех лет, а то, что осталось нетронутым, частично или полностью было изъято из открытого пользования и помещено в спецхранилища (материалы П.П. Орлова) либо уничтожено в годы репрессий.

Сегодня эти материалы собираются по крупицам из различных разрозненных, не систематизированных источников, средств массовой информации. На данный момент мы имеем далеко не полный перечень имен сибирских исследователей радиоактивности.

При описании этих исследований трудно сохранить строгую последовательность событий, также как трудно определить значимость тех или иных исследований. Все работы выполнены практически в одно десятилетие (1904–1914 гг.) и взаимораскрывают, дополняют друг друга.

Наиболее полно и обстоятельно в российской научной исторической литературе освещена роль профессора медицинского факультета Томского государственного университета **Петра Павловича Орлова**. Уже в 1904 г., прибыв в Томск, он начал подготовку к проведению исследований радиоактивности. В письме от 26 декабря 1904 г. академику В.И. Вернадскому он писал:

"Медиков интересует сейчас особенно радий. Хлопочу об отпуске денег на покупку его препаратов и кой-каких приборчиков... Надеемся с Пилипенко П.П. отыскать здесь урановые и ториевые минералы..."

В 1907 г. за счет личных средств он организует экспедиции в Енисейскую губернию (первая экспедиция Российской академии наук была организована только в 1908 г.). В работах принимали участие студенты томских вузов М.П. Орлов, Б.К. Шишкин. Были получены результаты по радиоактивности воздуха на руднике Юлия, минеральных вод озер Шира, Доможаково. П.П. Орлов отметил довольно высокую активность ключей и колодцев Томска, р. Томь в зимнее время и т.д.

В октябре-ноябре 1909 г. профессор П.П. Орлов выступал на заседаниях Общества испытателей и врачей при Томском государственном университете с докладом "Радиоактивные вещества и их нахождение в природе".

Он отметил находки радиоактивных минералов Алтая, доставленных П.П. Пилипенко (ученик В.И. Вернадского, который по его личной просьбе был в свое время принят В.А. Обручевым на работу младшим лаборантом кабинета минералогии ТТИ).

В 1912 г. П.П. Орлов по просьбе директора ТТИ Н.И. Карташова исследовал образец минерала, доставленного в ТТИ Восточно-Сибирским отделом Русского географического общества. Минерал оказался ортитом с весьма интересными свойствами, о которых было сообщено в материалах Географического общества в 1914 г.

В 1914 г. была показана высокая радиоактивность ключей по р. Ушайка (Заварзинские источники).

В 1915 г. работа профессора П.П. Орлова "К вопросу о нахождении радиоактивных веществ в шлаках золотоносных областей России" была опубликована в виде отдельного, шестого выпуска Трудов Радиевой экспедиции Императорской Академии наук. Данная работа представляет интерес своими практическими результатами и для исследователей радиоактивности Сибири сегодняшнего дня. У П.П. Орлова были тесные связи с ТТИ. В своем письме В.И. Вернадскому от 01.07.1913 г. он пишет:

"... пользуясь знакомствами в технологическом институте, стараюсь пропагандировать изучение радиоактивных веществ...".

В 1917–1926 гг. профессор П.П. Орлов вел курс лекций на физико-математическом факультете ТГУ "Радиоактивные элементы, их свойства и нахождение в природе".

Из анализа сохранившихся материалов видно, что при исследовании радиоактивности и радиоактивных веществ в Сибири у П.П. Орлова были весьма тесные контакты с профессорами Технологического института А.И. Ефимовым (зав. кафедрой физики), Д.А. Алексеевым (зав. кафедрой химии), геологами и горняками П.П. Гудковым, А.В. Лаврским, Б.Л. Степановым, Л.Л. Тове и др.

По-видимому, такой тесный контакт разнопрофильных специалистов, привлеченных П.П. Орловым, и позволил ему разработать фундаментальную научную программу по изучению радиоактивности и радиоактивных веществ в Сибири, которая, по оценке ряда специалистов, была наиболее интересной (Портнов, 1975).

В Технологическом институте это направление исследований наиболее ярко представлял **Вениамин Семенович Титов** (лаборант кафедры физики, ученик профессора П.Н. Лебедева, будущий профессор МГУ). К изучению радиоактивности вод Белокурихи (Алтай) В.С. Титов, по-видимому, приступил в 1905 г., т.к. в архивных документах есть его заявление от 25 мая 1905 г. с просьбой командировать на Алтай (цель командировки не указана), и уже в марте 1908 г. в прошении на имя директора института он пишет:

"Летом 1907 г. я имел случай провести, благодаря выписанным физической лабораторией вверенного Вам института приборам Эльстера и Гейттеля, наблюдения радиоактивности теплых минеральных источников деревни Белокуриха на Алтае. Эти наблюдения убедили меня в очень большой радиоактивности названных минеральных вод".

"... Кроме того, я убедился, – пишет В.С. Титов, – в чрезвычайно большой, превосходящей, по-видимому, радиоактивность газа Нарзана, радиоактивности газа, выделяющегося из Белокуринских источников".

На основании этой записи Совет Технологического института в 1908 г. командировал В.С. Титова и студента В.П. Маркова в экспедицию по детальному изучению радиоактивности вод и газовых терм деревни Белокуриха, выделив для этих

целей 300 рублей (для ориентировки – стоимость одной коровы тогда составляла 10 рублей, в современном денежном эквиваленте эта сумма составляет приблизительно 30 млн рублей).

В начале 1909 г. с материалами по радиоактивности вод Белокурихи на XII съезде естествоиспытателей и врачей (Дневник №9, 1909–1910 гг.) были озвучены специалисты России.

В 1913 г. в Томске по распоряжению директора Технологического института была издана книга В.С. Титова "Радиоактивная эманация в водах и газах термальной деревни Белокуриха на Алтае". Данная книга интересна специалистам и сейчас, т.к. позволяет наблюдать динамику изменения радиоактивности в водах и газах.

Позднее изучением радиоактивности этого источника занимались многие ученые Томска, в том числе Д.В. Кузнецов, обстоятельные анализы которого по этой проблеме были опубликованы в 1936 г. (Кузнецов, 1936). При этом обращалось внимание и на радиоэкологические аспекты радона. Так, профессор ТГУ В.П. Чехов опубликовал статью о влиянии лечебной воды курорта Белокурихи на развитие растений, отметив как стимулирующее, так и угнетающее воздействия (Чехов, 1936).

Историческим моментом в изучении явления радиоактивности и радиоактивных веществ в Сибири была встреча российских ученых с московским купцом П.П. Рябушинским. В личном архиве одного из основателей Томского политехнического университета, знаменитого ученого, писателя и путешественника, академика **Владимира Афанасьевича Обручева** хранятся интересные записки о его встрече с этим известным предпринимателем и спонсором науки. Встреча происходила у Рябушинского дома и носила неофициальный характер. Беседы велись за чаепитием.

Встреча происходила в четверг 14 ноября 1913 г. (1910 г.) на московской квартире Павла Павловича Рябушинского. На эту встречу были приглашены В.И. Вернадский, В.А. Обручев, В.Д. Соколов и другие известные ученые. Всего пришло 12 человек.

Рябушинский с интересом выслушал рассказы профессоров Вернадского, Шилова и других ученых о радиации, ее значении для науки и человека, о будущем, которое его ожидает. Он как коммерсант и деловой человек весьма заинтересовался этим делом и задавал много вопросов. Прощаясь, он сказал, что готов профинансировать поиски радия и радиоактивных элементов, но при соблюдении определенных условий теми, кто будет осуществлять эти поиски за счет его средств. Будучи деловым человеком, он уже тогда думал, какие практические выгоды можно извлечь из разработки комплекса вопросов, связанных с поисками, добычей радия и применением его на практике.

После встречи П.П. Рябушинского с учеными были приняты меры по ускорению поисков радиоактивных элементов в России. За счет промышленников было организовано две комплексных экспедиции: в Среднюю Азию (Фергану) и в Забайкалье.

Независимо от этих экспедиций поисками радия занялись и практические геологи, работавшие в Сибири. После встречи у купца П.П. Рябушинского в Москве

Владимир Афанасьевич Обручев предпринял шаги по организации поисков радия в Сибири. Он направил через профессора П.П. Гудкова, своего ученика, ставшего его преемником на кафедре в Томском технологическом институте, большую статью под названием "Ищите радий", которая вскоре была опубликована в томской газете "Сибирская жизнь". В этой статье Обручев популярно изложил представления о радии, какую службу он сослужит людям и призвал искать месторождения радия и радиоактивных элементов. Благодаря Гудкову эта статья незамедлительно была опубликована в газете.

Получив письмо своего наставника, Гудков собрал всех работавших под его началом геологов, а также студентов горного отделения, проходивших практику в Сибири, прочел им лекцию о радии и радиоактивных элементах и предложил попутно с выполнением основных работ по разведке месторождений руд заниматься еще и поисками радия. Однако результаты этих поисков были малоутешительны. Крупных месторождений тогда открыто не было.

Причиной было то, что никто практически ничего не знал о радиоактивности руд, не была разработана методика поисков этих руд.

О подробностях поисков радия сибиряками в те годы рассказывал бывший студент горного отделения Томского технологического института, впоследствии профессор, знаменитый сибирский геолог **Николай Николаевич Урванцев**.

Студент Урванцев под руководством профессора Гудкова работал в 1913–1917 гг. в Кузбассе на разведке месторождений железных руд. Для поиска радиоактивных руд приборов не существовало. Пользовались рекомендациями П.П. Гудкова. Небезынтересно, что ураноносность железных руд Кузнецкого Алатау была доказана только в пятидесятые годы (Кайкова и др.).

Снаряженная на деньги П.П. Рябушинского специальная экспедиция занималась поисками радиоактивных элементов в Забайкалье летом и осенью 1914 г. Возглавил Забайкальский отдел **Михаил Николаевич Соболев**, экономист по образованию. Будучи крупным ученым, он ряд лет проработал в Томском университете и Томском технологическом институте. Он был в большой дружбе с профессором В.А. Обручевым, исследователем Забайкалья и Монголии Г.Н. Потаниным и многими другими учеными, занимавшимися исследованиями Сибири. Профессор Соболев был опытным исследователем, хорошо знал местность, и, возможно, именно поэтому ему, не являющемуся специалистом в области геологии, и поручили возглавить Забайкальский отдел Московской экспедиции, как официально была названа тогда эта группа исследователей.

Профессор вынужден был заключить с П.П. Рябушинским договор. В соответствии с ним, он не имел права во время работы собирать лично для себя коллекции, делать описания месторождений, передавать кому бы то ни было любые сведения по работе экспедиции. Все, что касалось экспедиции и ее работы, являлось личной собственностью Рябушинского, и только он один мог распоряжаться всеми материалами работы.

В работе Забайкальской экспедиции приняли участие многие видные ученые в области петрографии, минералогии, геологии. В числе сотрудников экспедиции, по рекомендации В.А. Обручева, был студент горного отделения Томского

технологического института Николай Караханов. В конце 1914 г. М.Н. Соболев опубликовал краткое сообщение об итогах работы Забайкальской экспедиции. Ныне оно хранится в личном архиве А.А. Чернова в Институте геохимии им. Вернадского.

Небезынтересно отметить, что при проведении работ по изучению радиоактивных веществ в Забайкалье доктор И.А. Багашев (1910) отмечал высокую заболеваемость населения казачьих поселков, пользующихся в качестве источников питьевого водоснабжения водами из колодцев и ключей с высокой радиоактивностью (2,25÷10,22 ед. Махе).

Весьма интересной для населения Томской губернии была статья **Дмитрия Викторовича Алексеева** в газете "Сибирская жизнь" от 9 декабря 1905 г., в которой автор, сотрудник кафедры химии Технологического института, рассказывал о свойствах радия и о его возможном значении для человека.

Д.В. Алексеев опубликовал еще ряд статей по влиянию радиоактивности на живые организмы. По данным И.Т. Лозовского, он уже в 1904 г. занимался изучением радиоактивности и радиоактивных веществ. Из газетных сообщений известно о его публичной лекции в Томске (газета "Сибирская жизнь" 6 февраля 1904 г.).

К сожалению, его, а позднее и В.С. Титова, как неблагонадежных преподавателей, выслали из Томска, и далее вопросами радиоактивности они не занимались.

Первая мировая, затем Гражданская война, начавшиеся вскоре после того, как томские технологи приступили к поискам радиоактивных элементов, значительно осложнили работу в этом направлении. Многие геологи и студенты были призваны в армию. Затем в Сибири наступил хаос. Замерзли лаборатории. Исследования надолго были прерваны.

Сложной была судьба этих исследователей. Так, геолог П.П. Гудков, возглавивший по просьбе В.А. Обручева на недолгое время работы по поискам радия в Сибири, был вынужден в 1919 г. уехать из Томска во Владивосток, а два года спустя он уехал в США и там остался. В Америке он работал до самой кончины в 1955 г. Гудков был академиком, главным консультантом США и Мексики по нефти, членом многих научных обществ зарубежных стран, крупнейшим геологом мира, знаменитым американским ученым, но всегда оставался истинно русским человеком. Об этом весьма убедительно свидетельствуют его многочисленные письма из США, которые сохранились до наших дней.

Только неблагоприятные обстоятельства помешали томским политехникам в начале века успешно работать в области изучения радия и радиоактивных элементов.

В этот период предвоенного и предреволюционного состояния научной ответственностью практически незамеченной осталась командировка В.И. Вернадского в 1914 г. в Томскую (командировочное удостоверение сохранилось) и Иркутскую губернии, а также поездка Марии Кюри-Склодовской в Красноярск.

Как отмечает А.А. Хахалкин (1991), В.И. Вернадский посетил Сибирь в июле 1914 г. Он работал в Забайкалье. В своих воспоминаниях он пишет:

"...Весь план работы мы выполнили, но признаю, было временами довольно трудно вести работу среди мобилизации и тревоги..."

Интерес к радиевым рудам в Сибири, по-видимому, был не случаен. А.А. Хахалкин (1991) высказывает мысль, что это связано с высокой ценой на радий в мире, а также с тем, что в 1913 г. правительства Австро-Венгрии и Германии (главные поставщики сырья для получения радия) наложили запрет на вывоз радиоактивных руд из своих стран, объявив их государственной собственностью.

Из сообщений печати было известно, что районы Сибири весьма интересны для выявления руд, содержащих радий.

Так, только в 1914 г. в журнале "Горные и золотопромышленные известия" было опубликовано свыше 30 материалов по данному вопросу (Хахалкин, 1991), в том числе следующие:

1. Борейша В.М. О необходимости широкого общественного почину в деле поисков и исследования радиоактивных руд России. – 1914. – С.135–144.
2. Радий в Сибири. – 1914. – №2. – С.36.
3. Урановая руда на Байкале. – 1914. – №12. – С.257.

В последней работе сообщалось "...о выезде экспедиции во главе с Кюри на Байкал для разведки урановых руд..." (цит. по А.А. Хахалкину, 1991).

Эта заметка была использована В.А. Обручевым при составлении книги "Библиография Бурят-Монголии, 1890–1936", на которую ссылаются советские историографы науки при обсуждении вопроса о практически не замеченном в научном мире факте пребывания дважды лауреата Нобелевской премии, выдающегося исследователя радиоактивности и радиоактивных элементов Марии Кюри в Сибири (Старосельская-Никитина, 1963).

О ее пребывании в Красноярске пишет в своих воспоминаниях в адрес ЦК КПСС в 1956 г. старый большевик, персональный пенсионер Иван Григорьевич Прохоров, фамилия которого упоминается в геологическом отчете В.П. Старкова за 1936 г. (указание на этот факт в отчете сделано д.г.-м.н. В.П. Ковалевым):

"...Прохоров И.Г. в 1914 г. доставил в Красноярск Склодовской-Кюри образцы пород высокой радиоактивности...".

Об этом же человеке пишет в 1940 г. в своей статье К.С. Филатов:

"...в 1914 г. норвежец, инженер Ганс, по указанию Прохорова И.Г. исследовал на радиоактивность пегматиты щелочных сиенитов г. Беси-Детловской...".

Кто же этот человек – И.Г. Прохоров (у А.А. Хахалкина ошибочно указан И.Г. Прокопьев)? Ивана Григорьевича Прохорова (1887–1963), крестьянина Казанско-Богородской деревни Кнышинской волости Минусинского уезда, можно назвать первым разведчиком и добытчиком урановых руд Сибири. В своих воспоминаниях он пишет:

"...мною с товарищами весной 1914 г. ввиду богатых наших находок <...> была организована первая в Сибири трудовая горнопоисковая артель...".

Действительно, устав такой артели был утвержден губернатором и опубликован, как тогда это было принято, в газете. Свои находки они сдавали в горнораз-

ведочную контору "Разведчик", специально организованную промышленниками и купцами для работы с местным населением (по-видимому, инженер Ганс, о котором пишет К.С. Филатов, был сотрудником этой конторы).

Вот как пишет крестьянин, председатель артели И.Г. Прохоров о своей встрече с Марией Кюри-Склодовской на Сибирской земле:

"В один из приездов в 1914 г. в Красноярск <...> я неожиданно познакомился с очень простой и, прямо можно сказать, душевно-внимательной к простым людям женщиной. Вокруг нее все в конторе "Разведчик" ходили на цыпочках. Мне сказали многозначительно и даже внушительно: Это – великая ученая. Ее знает весь мир, так как она открыла радий. Она посмотрит ваши образцы и даст им оценку. Выше этой оценки ничего уже не может быть!"

Забрав у меня камни, инженеры конторы "Разведчик" хотели меня удалить из зала, где у столика, заваленного образцами Минусинского уезда, сидела внимательно рассматривавшая и замерявшая их на своем электрокопипе Мария Кюри. Я был в таежной одежде, болотных сапогах, издававших резкий неприятный запах, и понимал, что, конечно, нарушаю обстановку торжественного приема такой действительно великой ученой.

Мария Кюри, хорошо понимавшая и говорившая по-русски, заметив, что меня выпроваживают из зала, очень благородно и в то же время очень настойчиво запротестовала, требуя, чтобы я обязательно остался в комнате и обязательно лично прослушал ее мнение об образцах, найденных нашей Казанско-Богородской артелью, а также и ее лекцию о ради и о будущем радиоактивных минералов. Эту лекцию, как я потом понял, она согласилась прочесть в узком кругу для инженеров, химиков и других лиц города Красноярска, приглашенных на эту лекцию конторой "Разведчик".

Минусинский уезд Енисейской губернии Мария Кюри, рассмотрев все образцы, собранные с территории этого уезда конторой "Разведчик", назвала в 1914 г. "мозгом высоко радиоактивных тел", скрывающимся под древним теменем Азии, как эту территорию Сибири до революции называли все геологи...

Далее Мария Кюри сказала, что этому горному району Сибири предстоит великое будущее в смысле добычи здесь со временем драгоценного радия и других, пока еще неизвестных человечеству радиоактивных элементов, ясно здесь улавливаемых по образцам, ею просмотренным. Было сказано Марией Кюри в лекции и то, что тяжелобольные люди и наука с этим районом <...> могут отныне связывать свои самые светлые надежды...

Восточную Сибирь в районе Кругобайкальской железной дороги и город Красноярск она посетила исключительно из-за большого научного интереса, который у нее вызвали образцы урановых минералов из этих районов, посылавшиеся ей в Париж, как соотечественнице, разными сибирскими краеведами и естествоиспытателями природы из местного учительства, из числа политических ссыльных студентов и просто крестьян.

Лично и я, как председатель Казанско-Богородской поисковой артели, прослушав лекцию Марии Кюри и получив от нее на память ее труды, напечатанные в то время и по-русски, а также ее парижский адрес для переписки и сердечное пожелание не бояться трудностей и овладевать наукой, которая должна принести счастье и долголетие человечеству, в знак великой благодарности отправил великой ученой в Париж тоже самые лучшие образцы, какие только находила наша артель в Саянских горах".

Будучи в германском плену в 1916 г., И.Г. Прохоров вел переписку с М. Кюри. О пребывании М. Кюри в Восточной Сибири имеется указание в работе Г.А. Нандельштедта (1961), лично знавшего эту великую женщину.

Эта чрезвычайно интересная и, казалось бы, всеми забытая история должна была стать предметом отдельных исследований. Они начались с разных отправных точек, которые сошлись в едином заключении.

Автор данной книги не мог не воспользоваться предоставленным ему случаем во время своей научной стажировки в университете Луи Пастера (Страсбург, Франция), с которым у Томского политехнического университета сложились хорошие деловые связи, чтобы познакомиться ближе с первоисточниками по данной проблеме.

В апреле 2001 г., во время поездки в Париж мне удалось посетить Институт и музей Марии и Пьера Кюри, а также отдел архивов Национальной библиотеки Франции, в котором хранятся все документы великих людей страны, в т.ч. Марии Кюри.

В результате знакомства с опубликованными источниками на основе личного дневника М. Кюри было установлено, что в 1914 г. она не посещала Россию. В официально опубликованном перечне корреспондентов, с которыми М. Кюри обменивалась письмами, отсутствуют какие-либо упоминания о И.Г. Прохорове и других лицах, которые упоминаются в его записках. То, что Мария Кюри не посещала Россию, утверждали и все сотрудники Музея. Они высказывали мысль, что это может быть одна из красивых легенд, которые о ней складывались в тот период. В качестве примера они приводили публикации о сплаве М. Кюри по реке Колорадо при посещении ею США, хотя такового и не было.

После всего этого мне не оставалось ничего другого, как предложить им сделать в Музее экспозицию под названием "Легенды и были о Марии Кюри", в которой я предложил использовать материалы о И.Г. Прохорове и его встрече с М. Кюри в Красноярске.

Меня не покидала мысль об источнике информации об этой экспедиции. По возвращении мною были подняты первоисточники о поездке М. Кюри в Россию, на которые была ссылка. В журнале "Горные и золотопромышленные известия" (1914 г., №12, с. 257) опубликована маленькая заметка следующего содержания:

"...и, как можно понять из этого, речь шла о поездке специалистов из Института М. и П. Кюри, а не о ее поездке, а все источники на нее были вторичными. Сейчас автор уточняет у французских коллег факт пребывания господина <...> и его коллег в России".

С другой стороны, личностью сибирского рудознатца И.Г. Прохорова заинтересовались специалисты-геологи (В.Т. Посохов), занявшиеся историей развития геологической службы России и, в связи с этим, расследованием большого политического судебного процесса, известного как "Дело о красноярских геологах". Собирая материалы для книги, которая должна появиться в ближайшее время, В.Т. Посохов приходит к выводу, что И.Г. Прохоров – это очень сложная и противоречивая фигура, которая использовалась бывшим корреспондентом газеты "Правда" А.Ф. Шестаковой для разыгрывания многоходовой политической игры, поставившей под уничтожение сибирскую, и не только, геологическую службу. Возможно, что для поднятия имиджа И.Г. Прохорова и были предложены легенды о его встрече с М. Кюри в 1914 и И.В. Сталиным в 1946 гг.

В этой истории есть еще некоторые неясные вопросы, но они, вероятно, скоро будут выяснены.

В 20-х гг. исследования по изучению радиоактивности в Сибири начинают возрождаться. К этому периоду относятся работы П.П. Орлова и М.П. Орловой по радиоактивности минеральных вод; Г.С. Лабазина, С.М. Курбатова, Ю.А. Билибина, изучавших отдельные месторождения или районы развития радиоактивности в некоторых геологических формациях. Естественно, что в большинстве случаев эти работы имеют описательный характер, но в некоторых из них уже проявляются черты, близкие к современным методам радиогеохимических исследований. Так, в работе Г.С. Лабазина (1925, 1930) приводятся микрорадиографии, характеризующие распределение радиоактивных веществ в породах ряда объектов, определяется природа радиоактивности изучаемых образований, величина торий-уранового отношения.

С середины 40-х гг. исследования радиоактивности приобрели закрытый характер в связи с использованием этого явления в военных целях.

Но это уже новый виток исторического развития, и он требует своего исследователя, а информация об этом интересном времени уже стала доступной (А.К. Круглов, В.М. Синеев и др.).

В 1947 г. в Новосибирске была организована специализированная Березовская экспедиция, вокруг которой сосредоточились все научно-исследовательские и поисковые работы, касающиеся радиоактивного сырья.

В 1954 г. в Томском политехническом институте Ф.Н. Шаховым и В.К. Черепниним организована кафедра руд редких и радиоактивных элементов для подготовки специалистов по поискам и изучению радиоактивных руд.

В 1960 г. в Институте геологии и геофизики СО АН СССР создана лаборатория геохимии редких и радиоактивных элементов, которую возглавил чл.-корр. АН СССР Ф.Н. Шахов.

В начале 70-х гг. сотрудниками ПГО "Березовгеология", совместно с учеными НИИ и вузов, составлены первые аэрогамма-спектрометрические карты Западной и Средней Сибири.

Радиологические исследования по определению абсолютных возрастов руд и пород имели большое значение в уточнении истории геологического развития Сибири, времени формирования многих рудных месторождений.

В 1967 г. в Томске запущен первый в Сибири и на Дальнем Востоке исследовательский атомный реактор, а с 1985 г. в ТПИ радиогеохимические исследования оформились в ядерно-геохимическую лабораторию.

В 1972 г. в Новосибирске проведено первое Всесоюзное радиогеохимическое совещание.

Материалы XXVII сессии Международного геологического конгресса (Москва, 1984) свидетельствуют о том, что сибирская радиогеохимическая школа в то время занимала передовые рубежи в мире.

В последнее время радиологические исследования находят все большее применение в изучении экологического состояния крупных промышленных центров. Они направлены на выявление радиоактивных загрязнений продуктов питания и окружающей среды как техногенными, так и природными радиоактивными веществами.

Таким образом, формируется новое направление в науке и народном хозяйстве – радиоэкология, ведущую роль в формировании которой играют учебные, научные и производственные организации Сибири: ТПУ, ГГП "Березовгеология", "Сосновгеология", ОИГИИМ СО РАН и др.

Так, ГГП "Березовгеология" в период с 1986 по 1995 гг. провела аэрогамма-спектрометрическую съемку и наземное радиационное обследование Средней Сибири, в т.ч. в Томске, Новосибирске, Омске, Красноярске и т.д.

Сотрудники ОИГГИМ СО РАН (В.М. Гавшин, Ф.В. Сухоруков и др.) активно включились в выполнение программы "Полигон", проведя исследования на территориях Алтайского края, Республики Алтай и др.

Томский политехнический университет провел комплексные эколого-геохимические исследования в Междуреченске, Рубцовске, Северске, Томске и Томской области, включая радиоэкологический мониторинг.

В Томске в 1991 г. было проведено III Всесоюзное радиогеохимическое совещание, на котором рассматривалось использование методов радиографии для решения вопросов радиоэкологии, материаловедения и т.д.

В 1996 г. Томский политехнический университет, Госкомэкологии Томской области, а также ряд других организаций, провели Международную конференцию "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека", посвященную столетию со дня открытия радиоактивности и столетию ТПУ.

В 2004 г. Томский политехнический университет провел II Международную конференцию "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека" с изданием ее материалов.

В завершение исторического обзора отметим, что современная общественная ситуация характеризуется весьма противоречивыми суждениями как о самом открытии явления радиоактивности, так и о практическом его применении, связанном с использованием ядерных технологий.

Как подчеркивает В.В. Чешев (1996), судьба подобных открытий, способ их практического использования зависят не только от ученых и конструкторов, но и от всей общественной атмосферы, от того, какие ценности и какой путь развития выбирает себе человечество.

Великий русский ученый В.И. Вернадский, посвятивший изучению этого явления значительную часть своей жизни, писал:

"...Это открытие произвело огромный переворот в научном мировоззрении, вызвало создание новой науки, отличной от физики и химии, – учения о радиоактивности, поставило перед жизнью и техникой практические задачи совершенно нового рода, открыло горизонты возможностей, совершенно неожиданных и, казалось, навсегда для человечества закрытых...

...А теперь перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, какие рисовались человеческому воображению...

...Как ни труден этот путь, нет никакого сомнения, что человечество пойдет по нему. Ибо с получением радия, источника лучистой энергии, связаны для него интересы огромного научного и практического значения <...> Работа эта уже началась и не может быть остановлена".

В.И. Вернадский, Избранные сочинения, 1954 г.

В.В. Чешев, оценивая философско-гносеологическое значение работ, проведенных в этой области, отмечает, что открытие и освоение явления радиоактивного распада принуждает человечество обратиться к самому себе и в новых условиях поставить традиционный вопрос о смысле человеческого существования и выборе своих ценностей.

Человечеству с этим открытием и его практическими приложениями предстоит войти в новую фазу истории, и конструктивное отношение к научному факту, столетие которого отмечено в 1996 г., должно заключаться в оценке его теоретико-познавательных и социальных последствий в прошлом и будущем (Чешев, 1996). Дать такую объективную оценку на данном временном срезе достаточно сложно.

Глава 2

РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЕДИНИЦЫ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1. Общие понятия о радиоактивности

Радиоактивность как физическое явление – это способность самопроизвольного превращения неустойчивого изотопа химического элемента в устойчивый (БСЭ, 1975, т. 21).

Такое превращение сопровождается испусканием элементарных частиц (альфа-, бета-) и излучения (гамма-кванты).

Существуют и другие формулировки термина **радиоактивность**:

- совокупность излучений, испускаемых каким-либо препаратом, содержащим радиоактивные изотопы;
- способность вещества давать излучение в виде α -, β -частиц, или γ -квантов.

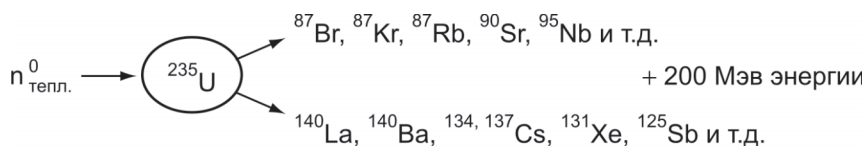
В природе установлено более 230 радиоактивных ядер естественного происхождения. Их количество дополняется техногенными (искусственными) радионуклидами практически всех элементов таблицы Д.И. Менделеева (рис. 2.1).

Все известные радиоактивные элементы следует разделить на две группы (табл. 2.1): *естественные* и *искусственные* (техногенные).

Среди естественных радиоактивных элементов выделяются долгоживущие (U, Th, ^{40}K , ^{87}Rb и др.), короткоживущие продукты распада долгоживущих изотопов (радий, радон и т.д.) и нуклиды, постоянно образующиеся в природной среде за счет ядерных реакций (C-14 , H-3 , Be-7 и др.).

Искусственные радиоактивные элементы могут быть подразделены на:

- осколочные (продукт деления ядер урана-235 под воздействием тепловых нейтронов по схеме):



		Группы элементов											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII				
Периоды	Ряды												
I	1	H 1,00797 Водород							H		3	He 4,0026 Гелий	
II	2	Li 6,94 Литий	Be 9,01218 Бериллий		B 10,81 Бор	C 12,011 Углерод	N 14,0067 Азот	O 15,999 Кислород	F 18,9984 Фтор		10	Ne 20,17 Неон	
III	3	Na 22,98977 Натрий	Mg 24,305 Магний	12,13	Al 26,98154 Алюминий	Si 28,0855 Кремний	P 30,97376 Фосфор	S 32,06 Сера	Cl 35,453 Хлор	18	Ar 39,948 Аргон		
IV	4	K 39,098 Калий	Ca 40,08 Кальций	20	Sc 44,9559 Скандий	Ti 47,88 Титан	V 50,9415 Ванадий	Cr 51,996 Хром	Mn 54,9380 Марганец	26	Co 58,9332 Кобальт	28	Ni 58,70 Никель
	5	Cu 63,54 Медь	Zn 65,38 Цинк	30	Ga 69,72 Галлий	Ge 72,63 Германий	As 74,9216 Мышьяк	Se 78,96 Селен	Br 79,904 Бром	36	Kr 83,804 Криптон		
V	6	Rb 85,467 Рубидий	Sr 87,62 Стронций	38	Y 88,9059 Иттрий	Zr 91,224 Цирконий	Nb 92,9064 Нобий	Mo 95,94 Молибден	Tc 98,9062 Технеций	44	Rh 102,9055 Родий	46	Pd 106,4 Палладий
	7	Ag 107,8682 Серебро	Cd 112,41 Кадмий	48	In 114,82 Индий	Sn 118,610 Олово	Sb 121,76 Сурьма	Te 127,6 Телур	I 126,9045 Йод	74	Os 192 Осций	76	Pt 195,08 Платина
VI	8	Cs 132,90547 Цезий	Ba 137,33 Барий	56	La* 138,905 Лантан	Hf 178,49 Гафний	Ta 180,947 Тантал	W 183,84 Вольфрам	Re 186,207 Рений	75	Ir 192,22 Иридий	77	Pt 195,08 Платина
	9	Au 196,96657 Золото	Hg 200,59 Ртуть	80	Tl 204,387 Таллий	Pb 207,2 Свинец	Bi 208,9804 Висмут	Po 209 Полоний	At 210 Астат	82	Po 209 Полоний	84	Rn 222,0176 Радон
VII	10	Fr 223,0197 Франций	Ra 226,0254 Радий	88	Ac** 227,028 Актиний	Rf 261 Резерфордий	Db 262 Дубний	Sg 263 Сибгорий	Bh 264 Боррий	106	Hs 265 Хасений	108	Mt 268 Мейтнерий
	11	Rf 261 Резерфордий	Db 262 Дубний	104	Lr 260 Лоренций	U 238,02891 Уран	Np 237,04817 Нептуний	Pu 244,06422 Плутоний	Am 243,06137 Америций	94	Cm 247,07030 Кюрий	96	Bk 247,07030 Берклий
	12	Cf 251,0825 Калифорний	Es 252,0833 Эйнштейний	98	Fm 253,0451 Фермиий	Md 258,10 Менделеевий	No 259,10 Нобелий	Lr 260,10 Лоренций	La** 138,905 Лантан	57	Ce 140,90765 Церий	58	Pr 140,90765 Прометий
	13	Sm 150,36 Самарий	Eu 151,964 Европий	62	Gd 157,25 Гадолиний	Tb 158,925 Тербий	Dy 162,50 Диспрозий	Ho 164,930 Гольмий	Er 167,26 Ербий	66	Tm 168,9342 Тулий	68	Yb 173,054 Иттербий
	14	Lu 174,967 Лютеций	Yb 173,054 Иттербий	70	Lu 174,967 Лютеций	Hf 178,49 Гафний	Ta 180,947 Тантал	W 183,84 Вольфрам	Re 186,207 Рений	75	Os 192 Осций	76	Pt 195,08 Платина
	15	Rh 102,9055 Родий	Pd 106,4 Палладий	46	Rh 102,9055 Родий	Pd 106,4 Палладий	Ag 107,8682 Серебро	Cd 112,41 Кадмий	In 114,82 Индий	49	Cd 112,41 Кадмий	48	In 114,82 Индий
	16	Cd 112,41 Кадмий	In 114,82 Индий	48	In 114,82 Индий	Sn 118,610 Олово	Sb 121,76 Сурьма	Te 127,6 Телур	I 126,9045 Йод	52	Sb 121,76 Сурьма	51	Sn 118,610 Олово
	17	Sn 118,610 Олово	Sb 121,76 Сурьма	51	Sn 118,610 Олово	Pb 207,2 Свинец	Bi 208,9804 Висмут	Po 209 Полоний	At 210 Астат	84	Po 209 Полоний	82	Po 209 Полоний
	18	Pb 207,2 Свинец	Bi 208,9804 Висмут	82	Po 209 Полоний	At 210 Астат	Rn 222,0176 Радон	Ac 227,028 Актиний	Th 232,0377 Торий	90	Pa 231,036 Протактиний	91	U 238,02891 Уран
	19	U 238,02891 Уран	Np 237,04817 Нептуний	92	Pu 244,06422 Плутоний	Am 243,06137 Америций	Cm 247,07030 Кюрий	Bk 247,07030 Берклий	Lr 260,10 Лоренций	57	Ce 140,90765 Церий	58	Pr 140,90765 Прометий
	20	Pr 140,90765 Прометий	Ce 140,90765 Церий	58	Pr 140,90765 Прометий	Ce 140,90765 Церий	La 138,905 Лантан	La 138,905 Лантан	La 138,905 Лантан	57	Ce 140,90765 Церий	58	Pr 140,90765 Прометий

Рис. 2.1. Таблица Д.И. Менделеева

Таблица 2.1. Классификация радиоактивных элементов

Естественные		Искусственные	
Долгоживущие актиниды и радиоактивные изотопы нерадиоактивных элементов	235, 238, 234U, 232Th, 40K, 87Rb, 152Sm, 187Re, 138La, 176Lu и др.	Осколочные элементы ядерного деления	134, 137Cs, 90Sr, 106Ru, 131I, 141Ce, 140La, 147Nd, 99Tc, 85Kr, 147Pm и др.
Короткоживущие и среднеживущие продукты распада актинидов	<i>ряд урана:</i> радон и т.д.; <i>ряд тория:</i> торон и т.д.; <i>ряд актиноурана:</i> актинон и т.д.	Продукты активации в нейтронных полях	54Fe, 60Co, 65Zn, 22Na, 32P и т.д.
Постоянно образующиеся в природе в результате ядерных реакций с протонами, нейтронами и другими частицами космического и земного происхождения	14N (n,p) → 14C (5,8 · 10 ³ лет); 6Li (n) → 3H (12,3 года); 2H (n,γ) → 3H; 2H (n,p) → 3H; 238U (n, γ) → β → 237Np → β → 239Pu (ничтожно малые количества); спонтанное деление 238U приводит к образованию 90Sr, 99Tc, 149Pm и т.д.	Элементы ядерных реакций присоединения	Нептуний (Np); Плутоний (Pu); Америций (Am); Кюрий (Cm); Берклий (Bk); Калифорний (Cf); ...; ...; ...; Менделевий (Md); ... и т.д.
		Элементы ядерных реакций с нейтронами при ядерных взрывах и управляемых ядерных реакциях	3H, 14C и др.

- радиоактивные элементы – продукты активации за счет взаимодействия нейтронов, гамма-квантов и т.д. с веществом (⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ⁵⁴Fe и т.д.);
- трансурановые радиоактивные элементы, образующиеся в результате поглощения нейтронов по схеме:

$$^{238}\text{U} + (n^0) \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow \beta \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow \beta \rightarrow ^{239}\text{Pu};$$

$$^{239}\text{Pu} + (\gamma, n) \rightarrow ^{240}\text{Pu} + (\gamma, n) \rightarrow ^{241}\text{Pu} \rightarrow \beta \rightarrow ^{241}\text{Am}.$$

Наиболее широко распространенными естественными радиоактивными эле-

ментами в природе являются уран, торий и калий. Так, нуклид ^{40}K обуславливает 40–45% существующей мощности экспозиционной дозы гамма-излучения в природе. На долю ^{232}Th и продуктов его распада приходится около 35%, а на уран и продукты его распада – 20–25%.

Все радиоактивные элементы распадаются по закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где N_0 – число радиоактивных атомов в начальный момент времени появления нуклида (t_0); e – основание натурального логарифма (2,718); λ – постоянная радиоактивного распада, характеризующая вероятность распада ядра атома какого-либо нуклида в единицу времени, она различна для разных радионуклидов; t – время, прошедшее от t_0 .

Постоянная радиоактивного распада определяет так называемый **период полураспада** ($T_{1/2}$) – промежуток времени, требующийся для уменьшения первоначального числа радиоактивных ядер в 2 раза:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda.$$

Период полураспада $T_{1/2}$ является одной из основных характеристик радиоактивного вещества и определяет степень его опасности для биосферы и человека.

Природные радиоактивные изотопы, не входящие в группу актинидов (Rb, Nd, Sm, Sn, In и др.), обладают периодом полураспада от $n \cdot 10^{21}$ (^{130}Te) до $n \cdot 10^9$ (^{40}K) лет. В природе они встречаются в ничтожно малых количествах, за исключением ^{40}K , доля которого в природной сумме изотопов составляет 0,0118% (Баранов и др., 1973).

Естественные радиоактивные элементы группы актинидов обладают периодом полураспада от $n \cdot 10^{10}$ (^{232}Th) до $n \cdot 10^8$ (^{235}U) лет.

Радиоактивный распад может представлять собой цепь последовательных радиоактивных превращений. Элементы, входящие в такую цепь, образуют радиоактивные семейства. Наиболее длинные и хорошо изученные цепочки распада характерны для урана и тория.

Известно три семейства (или ряда) распадов:

- ряд ^{238}U ;
- ряд ^{235}U (актиноурана);
- ряд ^{232}Th .

В каждом ряду образуются радионуклиды с разными периодами полураспада, в том числе короткоживущие (секунды, минуты, часы, дни), испускающие α -, β -частицы и гамма-кванты различных энергий. Конечные продукты в цепи распада представлены нерадиоактивным химическим элементом – свинцом разного изотопного состава (^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb). На долю этих радиогенных изотопов свинца приходится около 99% всего количества свинца в земной коре. Обобщенные схематические ряды распадов представлены на рисунке 2.2.

Следует отметить, что, если материнский изотоп образует радиоактивный ряд, то по истечении времени во всем ряду распада образуется радиоактивное равно-

^{238}U	99,27% от всего · урана планеты ↓ $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет	^{235}U	0,7024% от всего · урана планеты ↓ $T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^8$ лет	^{232}Th	100% всего · элемента планеты ↓ $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ лет
^{226}Ra	$T_{1/2} = 1622$ лет	^{223}Ra	$T_{1/2} = 1144$ дня	^{224}Ra	$T_{1/2} = 3,64$ дня
^{222}Rn	газ без цвета и · запаха ↓ $T_{1/2} = 4,82$ дня	^{213}Rn	газ (An) $T_{1/2} = 3,96$ сек	^{220}Rn	газ (Tn) $T_{1/2} = 54,5$ сек
^{210}Po	$T_{1/2} = 138,4$ сут.	^{211}Bi	$T_{1/2} = 2,15$ мин	^{212}Bi	$T_{1/2} = 60,6$ мин
^{206}Pb	нерадиоактивен	^{207}Pb	нерадиоактивен	^{208}Pb	нерадиоактивен

Основные альфа-излучатели в рядах:

^{238}U	^{235}U	^{232}Th
^{234}U	^{231}Pa	^{228}Th (Ra, Th)
^{230}Th	^{227}Th	^{224}Ra (ThX)
^{226}Ra	^{223}Ra	^{220}Rn (Tn)
^{222}Rn	^{215}Po	^{216}Po (ThA)
^{210}Po	^{211}Po	^{212}Bi (ThC)
	^{211}Bi	^{212}Po (ThC')

Основные бета-излучатели в рядах:

^{234}Th (UX ₁)	^{231}Th	^{228}Ra (MsThI)
^{234}Pa (UX ₂)	^{227}Ac	^{228}Ac (MsThII)
^{214}Pb (RaB)	^{211}Pb	^{212}Pb (ThB)
^{214}Bi (RaC)	^{207}Tl	^{212}Bi (ThC)
^{210}Bi (RaE)		^{208}Tl (ThC'')

Основные гамма-излучатели в рядах:

^{214}Pb (RaB)	^{228}Ac
^{214}Bi (RaC)	^{228}Th (RaTh)
^{226}Ra	^{212}Pb
	^{212}Bi
	^{208}Tl

Рис. 2.2. Упрощенная схема рядов распада некоторых естественных радионуклидов

весие, т.е. число распадающихся атомов каждого члена ряда, за исключением первого (материнского), равно числу вновь образующихся, откуда вытекает ряд равенств: $N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 = \dots = N_i\lambda_i = \dots$ для всех членов ряда распада.

Так, радиоактивное равновесие между ураном (U) и радием (Ra) может быть выражено формулой: $U = Ra \cdot 2,9 \cdot 10^6$ (Баранов и др., 1973).

Если это соотношение в силу каких-то природных процессов изменяется, то говорят о нарушении радиоактивного равновесия. Оно, например, может быть сдвинуто в сторону Ra или в сторону U. Соответственно, если измерять мощность экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения, за которое прежде всего отвечает

Ra, то в местах присутствия U гамма-активность будет низкой, а в местах присутствия радия – высокой. Знание этого обстоятельства особенно важно при определении U методом гамма-спектрометрии и при гамма-каротаже скважин.

В случае радиоактивного равновесия между U и Ra от 0,01% U формируется МЭД в 110 мкР/час.

Искусственные радионуклиды, как правило, имеют незначительные периоды полураспада – от долей секунды до десятков лет, реже (например T^{129}) – сотни и миллионы лет, и только элементы, образующиеся в результате ядерных реакций присоединения (нептуний, плутоний, америций), имеют периоды полураспада от нескольких минут до десятков тысяч лет (^{239}Pu – 24065 лет).

У искусственных (техногенных) радионуклидов существуют также радиоактивные цепочки (Гусев и др., 1988), которые заканчиваются нерадиоактивными элементами.

Радиоизотопы искусственных нуклидов обладают разными видами радиоактивности. Среди них могут преобладать гамма-излучатели (цезий-137, барий-137 и др.), бета-излучатели (стронций-90 и др.) и альфа-излучатели (плутоний-239 и др.).

Следует отметить, что в большинстве случаев, но не всегда, альфа- и бета-распад сопровождается испусканием гамма-квантов того или иного энергетического спектра. По этой причине контроль за радиационной обстановкой включает в себя в первую очередь измерение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, хотя этого недостаточно при контроле за альфа-излучающими нуклидами (Pu и др.).

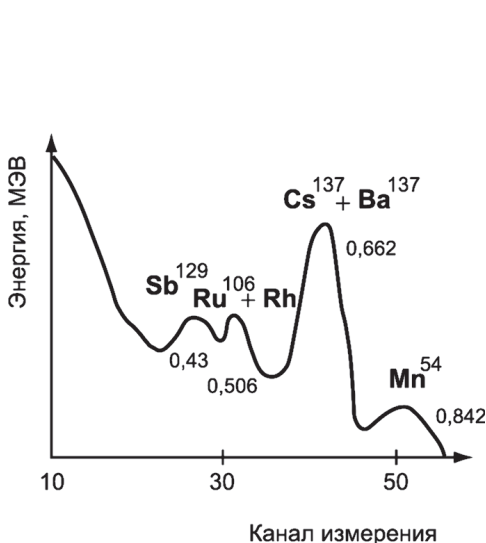


Рис. 2.3. Гамма-спектр излучения почв в районе ядерных испытаний

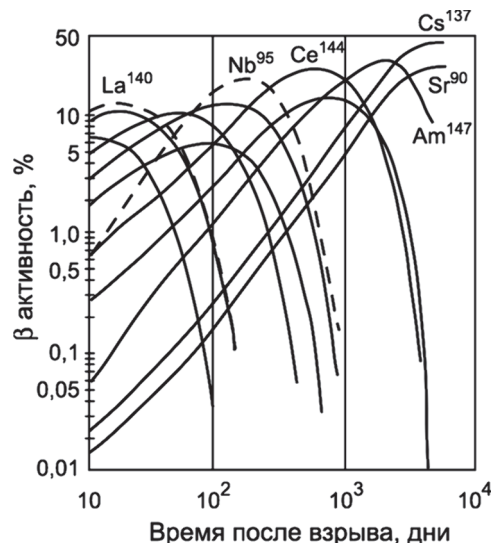


Рис. 2.4. Выход основных изотопов после взрыва мегатонных бомб

В процессе ядерного взрыва образуется значительное количество гамма-излучателей (рис. 2.3). Но их активность уже в первые минуты, часы и дни после взрыва существенно уменьшается (рис. 2.4).

2.2. Общие понятия о единицах измерения радиоактивности

Следует отметить, что существуют определенные объективные трудности в восприятии и понимании термина "единица радиоактивности". Это связано, во-первых, с тем, что имеются единицы измерения как самого явления, так и единицы измерения воздействия этого явления на вещество, и зачастую необходимо переходить от одних к другим; во-вторых, с наличием нескольких единиц с различными исторически сложившимися названиями, не связанных между собой кратными или дольными соотношениями.

Исторически первой общепринятой единицей радиоактивности была принята радиоактивность 1 г химически чистого радия, которая была названа в честь супругов М. и П. Кюри.

Радиоактивность 1 г Ra = 1 **Кюри** (Ки), англоязычное – Ci.

Позднее за единицу радиоактивности (активности) было принято количество радиоактивных превращений (распадов) за единицу времени.

Единица, характеризующая 1 распад радионуклида в 1 сек., была названа в честь французского физика А. Беккереля – **Беккерелем** (Бк), англоязычное – Bq.

Так как 1 г Ra давал $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в 1 сек., то между Ки и Бк установлено соотношение:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк, или } 1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки.}$$

Радиоактивность некоторых других элементов относительно радия будет следующей:

- 1 г ^{235}U = $2,1 \cdot 10^{-6}$ Ки;
- 1 г ^{137}Cs = 87 Ки;
- 1 г ^{131}I = $1,2 \cdot 10^5$ Ки;
- 1 г ^{232}Th = $1,1 \cdot 10^{-7}$ Ки;
- 1 г ^{239}Pu = $6,1 \cdot 10^{-2}$ Ки;
- 1 г ^{60}Co = $1,1 \cdot 10^{-3}$ Ки;
- 1 г ^{14}C = 4,6 Ки;
- 1 г ^{87}Rb = $8,5 \cdot 10^{-8}$ Ки;
- 1 г ^{90}Sr = 145 Ки;
- 1 г ^{40}K = $6,8 \cdot 10^{-6}$ Ки и т.п.

Таким образом, радиоактивность 1 г, например, кобальта-60 в 1000 раз выше, чем радиоактивность 1 г радия-226, а плутония – в 100 раз меньше.

Активность радионуклида прямо пропорциональна его количеству, поэтому количество радиоактивного вещества можно измерить, определив его активность в Бк/кг, Ки/л и т.д.

Единицы активности 1 Бк и 1 Ки имеют кратные и дольные значения (см. десятичные приставки), например:

- 1 мКи = 10^{-6} Ки;
- 1 КБк = 10^3 Бк;
- 1 МКи = 10^6 Ки;
- 1 пКи = 10^{-12} Ки и т.д.

Существуют также понятия удельной активности, площадной активности и объемной концентрации.

Удельная активность – это активность единицы массы вещества, т.е. Ки/г; Бк/кг; пКи/г и т.д.

Площадная активность – это радиоактивность вещества, приходящаяся на 1 ед. площади, то есть Ки/м²; Ки/км²; Бк/м² и т.д.

Характеризуя радиоактивность какого-либо материала, необходимо конкретно указывать, о каком радионуклиде идет речь. Так, если мы говорим, что удельная активность почвы по цезию-137 равна 100 Бк/кг, то это значит, что речь идет только об этом изотопе, другие (уран, торий, калий и т.д.), присутствующие в почве, не учитываются.

Оценивая общую радиоактивность почв от естественных радионуклидов в единицах СИ, мы должны указать, например, радиоактивность по урану – 238 Бк/кг, по торию – 35 Бк/кг, по калию – 296 Бк/кг, тогда как общая суммарная радиоактивность данной почвы от естественных радиоэлементов будет не просто суммой активностей, равной 369 Бк/кг, а несколько больше, так как она рассчитывается по формуле с учетом коэффициентов.

При этом не учитывается присутствие дочерних радионуклидов этих элементов (радий, полоний, и т.д.).

При оценке соответствия строительных и некоторых других материалов радиационно-гигиеническим нормативам (см. гл. 9) введено понятие **суммарная эффективная удельная активность радионуклида** (A_c).

$$A_c = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_k$$

где A_{Ra} , A_{Th} , A_k – удельные активности соответствующих радионуклидов.

Если в материале определялась концентрация урана, а не радия, то вместо A_{Ra} подставляется содержание равновесного урана, тогда расчетная формула будет иметь вид:

$$A_c = A_u \cdot 3,4 \cdot 10^{-7} + 1,31A_{Th} + 0,085A_k$$

Если почва была загрязнена техногенными радиоизотопами, например, цезием, стронцием и кобальтом, то указывается их радиоактивность, допустим:

- по цезию-137 – 100 Бк/кг;
- по стронцию-90 – 20 Бк/кг;
- по кобальту-60 – 80 Бк/кг.

Общая радиоактивность почв составит ($A_c + 100 + 20 + 80$) Бк/кг.

Для перехода от удельной активности в Бк/кг, Бк/г и т.д. к площадной в Бк/м², в Ки/км² и т.д. необходимо знать плотность вещества.

Расчет может вестись по разным формулам. Так, В.М. Гавшин и др. (1994) предлагают следующий вариант:

$$P = A \cdot d \cdot h \cdot 10^7,$$

где P – площадной запас радионуклидов в Бк/км²; A – активность почвы, Бк/кг; d – объемный вес пробы, г/см³; h – глубина ячейки параллелепипеда отбираемой пробы, см; или по формуле $P = 0,27 \cdot A \cdot d \cdot h$ мКи/км².

Так, 34 Бк/кг активности почвы по цезию-137 будет соответствовать площадной активности 0,1 Ки/км² при плотности почвы 1100 кг/м³ и глубине отбора 0,1 м.

Часто для ориентировочной оценки необходимо знать переход от мощности экспозиционной дозы гамма-излучения в мкР/ч к площадной загрязненности почв (Ки/км²). Эта ориентировочная оценка должна учитывать весь энергетический спектр радионуклидов.

Так, М. Эйзенбад (1967) указывает, что продуктам деления, средняя энергия гамма-квантов которых равна 0,7 МэВ (цезий-137 + барий-137 м), площадной

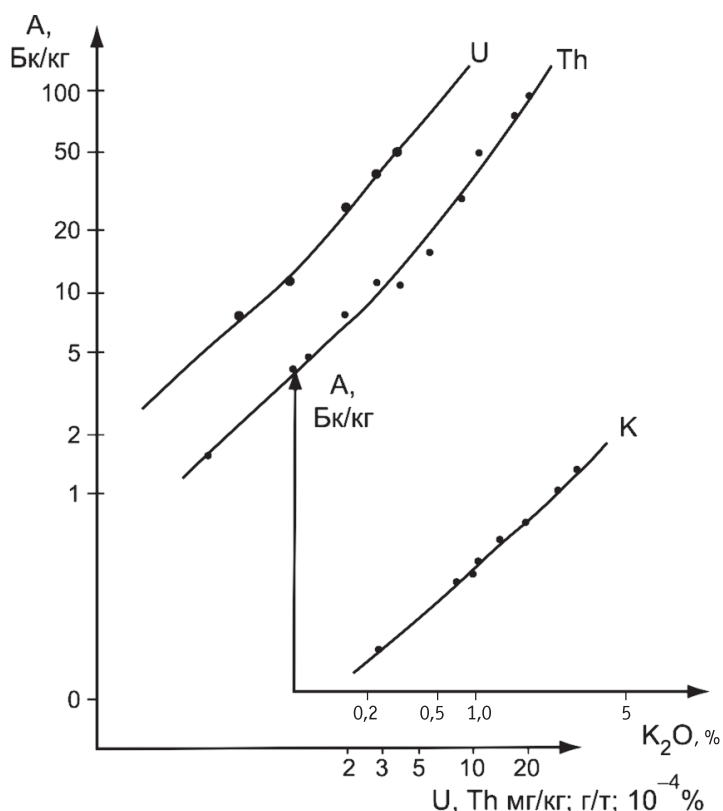


Рис. 2.5. Соотношение между весовыми содержаниями естественных радионуклидов и их удельной активностью

активности 1 Ки/км² на высоте 0,9 м будет соответствовать мощность экспозиционной дозы 10 мкР/ч.

Соотношение между весовыми содержаниями естественных радионуклидов, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия, и удельной активностью приведено на рисунке 2.5.

Ориентировочно, при условии радиоактивного равновесия, можно считать, что:

1 мг/кг U = 12,6 Бк/кг;

1 мг/кг Th = 4,07 Бк/кг;

1% K = 313 Бк/кг ⁴⁰K.

Объемная концентрация радиоактивности – количество распадов в единицу времени, отнесенное к объему вещества, т.е. Ки/л, Ки/м³, Бк/л, Бк/м³ и т.п.

Первоначально объемная концентрация радона измерялась в эманах и единицах махе:

– 1 **эман** = 10⁻¹⁰ Ки/л = 220 расп/мин · л = 3,7 Бк/л;

– 1 **махе** = 3,64 эман = 3,64 · 10⁻¹⁰ Ки/л = 780 расп/мин · л = 13 Бк/л.

В процессе распада радиоактивных ядер образуются потоки γ -квантов, α - и β -частиц, способных ионизировать вещественную среду (воздух, воду, биологические клетки и др.) и сообщать веществу дополнительную энергию.

Количество поглощенной энергии и образовавшихся пар ионов являются определенным интегрированным показателем величины радиоактивности вещества и измеряются различными физическими методами (по ионизации воздуха, например).

Так, например, если при воздействии γ -квантов (фотонное излучение) в см³ воздуха при нормальных условиях (н.у.) происходит ионизация воздуха с образованием 2,08 · 10⁹ пар ионов, что соответствует электрическому заряду в 1 Кулон (1 К), то говорят, что **экспозиционная доза** γ -излучения соответствует 1 **Рентгену** (1 Р). Отсюда появился широко распространенный термин – **ионизирующее излучение**.

Экспозиционная доза, отнесенная ко времени, получила название мощности экспозиционной дозы (X) и измеряется в системе СИ в амперах на кг (а/кг), а во внесистемных единицах в Р/с, Р/ч и т.п. Существуют и кратные им единицы (мР, мкР, мР/ч, мкР/ч и т.д.).

Переход от единиц активности вещества, выраженного, например, в мКи, к мощности экспозиционной дозы γ -излучения данного радионуклида в Р/ч осуществляется при помощи **гамма-постоянных** (справочная величина), характерных для каждого радиоиотопа. Гамма-постоянная любого радионуклида равна мощности экспозиционной дозы гамма-излучения нуклида в рентгенах за час, которая создается точечным изотропным гамма-источником активностью 1 мКи на расстоянии 1 см. Единица измерения гамма-постоянной Р · см²/ч · мКи.

Так, например, от источника Ra-226 активностью 1 мКи на расстоянии 1 см создается мощность экспозиционной дозы γ -излучения в 9,36 Р/ч (Справочник по дозиметрии, 1974). От аналогичного источника цезия-137 – 3,1 Р/ч, лантана-140 – 11,14 Р/ч и т.д.

Кроме экспозиционной дозы, характеризующей степень ионизации воздуха, существует и другое понятие – **поглощенная доза (D)** – это энергия излучения, поглощенная единицей массы вещества. В СИ она измеряется единицей **Грей (Гр)**:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг.}$$

Ранее для ее оценки пользовались единицей **Рад**:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

Поглощенная доза, отнесенная ко времени поглощения, носит название мощности поглощенной дозы и измеряется в Гр/ч, Гр/с, мГр/ч, рад/с, рад/год и т.д.

Следует отметить, что 1 Р экспозиционной дозы (по всему спектру γ -излучения до энергии 3 МэВ) соответствует поглощенной дозе в биологической ткани в 0,93 рад, т.е. 1 Р около 0,93 рад или $1 \text{ Р} \approx 0,0093 \text{ Гр}$, тогда как в воздухе $1 \text{ Р} \approx 0,88 \text{ рад}$.

Биологический эффект воздействия ионизирующего излучения зависит от вида излучения, энергии частиц и гамма-квантов. Так, альфа-частица с энергией 4 МэВ проходит 31 мкм биологической ткани, а с энергией 10 МэВ – 130 мкм.

Излучения, испускаемые радионуклидами, различаются по эффективности и по способности повреждать биологические системы. Существует понятие **относительная биологическая эффективность (ОБЭ)** излучения. ОБЭ того или иного вида излучения выражается по отношению к дозе условно принятого стандартного типа излучения.

Главный фактор, влияющий на ОБЭ, – распределение ионизации и возбуждений по следу (треку) движения заряженной частицы.

Для интегрированной характеристики процессов ионизации и возбуждения введен термин **линейная потеря энергии (ЛПЭ)**. ЛПЭ выражается в среднем количестве переданной частицей энергии, измеренной в единицах кэВ на микрометр пробега в веществе (кэВ/мкм).

Частицы с высокой ЛПЭ являются более повреждающими на единицу дозы (Гр), чем излучение с низкой ЛПЭ.

Для учета степени воздействия радиоактивного излучения на биологические ткани существует понятие **коэффициента качества (КК)** излучения или **фактор качества (ФК)** излучения.

КК (ФК) находится в прямой зависимости от ЛПЭ излучения (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Линейная потеря энергии и коэффициент качества некоторых видов излучения

Вид излучения	ЛПЭ в воде, кэВ/мкм	КК (ФК)
Рентгеновское и гамма-излучение	$\leq 3,5$	1
То же самое	7	2
Протоны и нейтроны с энергией 0,1–10 МэВ	53	10
Альфа-частицы с энергией меньше 10 МэВ, тяжелые ядра отдачи	≥ 175	20

Если ККИ γ -излучения принять за 1, то для β -излучения он будет составлять 10, для α -излучения с энергией < 10 МэВ – 20, для тепловых нейтронов – 3.

Поглощенная доза излучения (D), рассчитанная с учетом КК, получила название **эквивалентная доза (H)**:

$$H = D \cdot КК.$$

Так, ранее широко распространенный термин **биологический эквивалент рентгена (бэр)** является показателем того, что при дозе 1 бэр данного вида излучения возникает такой же биологический эффект, как и при поглощенной дозе в 1 рад образцового излучения. Для приближенных расчетов можно считать, что для γ -излучения 1 бэр \sim 1 рад \sim 0,93 Р.

В настоящее время рекомендуется в качестве единицы измерения эквивалентной дозы использовать единицу **Зиверт (Зв)**.

$$1 \text{ Зв} = 0,01 \text{ бэр}.$$

Соответственно, мощность эквивалентной дозы будет измеряться в Зв/ч, мкЗв/ч и т.д.

Соотношение между применяемой единицей мощности дозы γ -излучения в мкР/ч и мкЗв/ч таково:

$$1 \text{ мкР/ч} = 0,01 \text{ мкЗв/ч} \text{ или } 100 \text{ мкР/ч} = 1 \text{ мкЗв/ч} \text{ для излучения с КК} = 1.$$

Мощность поглощенной дозы 1 Гр/ч соответствует мощности эквивалентной дозы 1 Зв/ч при КК = 1 (гамма- или рентгеновское излучение), но 1 Гр/ч от альфа-излучения будет соответствовать 20 Зв/ч от гамма-излучения.

Связь понятий поля, дозы, радиобиологического эффекта и единиц их измерения может быть представлена в виде схемы (рис. 2.6).

	Источник	Поле	Облучение	
			Неживых объектов	Живых организмов
Величина	Активность (С)	Экспозиционная доза (х)	Поглощенная доза (D)	Эквивалентная доза (H)
Единица измерения в системе СИ (вне-системная)	Беккерель (Кюри)	Кулон / килограмм (рентген)	Грей (рад)	Зиверт (бэр)

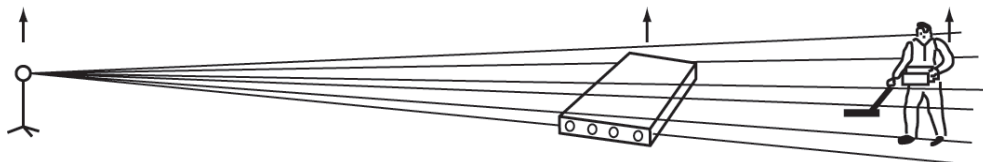


Рис. 2.6. Связь понятий поля, дозы, биологического эффекта и единиц их измерений (по Ю.В. Сивенцову, 1992, с дополнениями)

Таблица 2.3. Доза облучения человека в зависимости от времени пребывания в гамма-поле с определенной мощностью дозы (по Ю.В. Сивенцову, 1993)

Мощность дозы, мбэр/ч (мкР/ч)	Доза, мбэр (мЗв), время пребывания в поле			
	1 час	1 сутки	1 месяц	1 год
0,02 (20)	0,02 (0,0002)	0,48 (0,0048)	14,4 (0,144)	175 (1,75)
0,06 (60)	0,06 (0,0006)	1,44 (0,0144)	43,2 (0,432)	526 (5,26)
0,1 (100)	0,1 (0,001)	2,4 (0,024)	72 (0,72)	876 (8,76)
0,4 (400)	0,4 (0,004)	9,6 (0,096)	288 (2,88)	3500 (35)
1,0 (1000)	1,0 (0,01)	34 (0,34)	720 (7,2)	8760 (87,6)

Примечание: выделена мощность дозы, выше которой весь организм человека получит дозы выше предусмотренных МКРЗ для населения (5 мЗв/год) и для профессионалов (50 мЗв/год). Новые нормативы МКРЗ предлагают установить предельную дозу облучения на уровне 1 мЗв/год, которая будет превышена уже при МЭД = 20 мкв/ч.

В таблице 2.3 показана доза облучения человека в зависимости от времени пребывания в поле гамма-излучения.

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ, ОЦЕНКИ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК

3.1. Методы и средства регистрации радиоактивного излучения

Регистрация радиоактивного излучения производится по эффектам его воздействия на вещество.

Основными методами регистрации являются:

1. **Фотографический метод** – самый первый метод, который позволил А. Беккерелю открыть явление радиоактивности. Основан на воздействии радиоактивного излучения на фоточувствительные материалы (по принципу воздействия световых квантов на фотопластину).
2. **Ионизационный метод**, основанный на измерении степени ионизации газов, либо по образованию электронно-дырочных пар в твердых телах. Для измерения используются электроскопы, ионизационные камеры (камера Вильсона и др.), газоразрядные счетчики (счетчики Гейгера–Мюллера и т.д.), полупроводниковые счетчики на основе кремния, германия и т.д. Это один из самых широко распространенных методов измерения радиоактивного излучения. С его использованием создано большое количество разных типов аппаратуры.
3. **Люминесцентный метод** обусловлен возникновением свечения под влиянием какого-либо воздействия (фотолюминесценция, радиолюминесценция, хемилюминесценция, триболюминесценция, термолюминесценция и т.д.). Возникновение и интенсивность свечения обусловлены накоплением энергии при взаимодействии излучения с веществом. Для регистрации радиоактивного излучения используются сцинтилляционные детекторы различных типов, в которых в результате попадания альфа-, бета-частиц и гамма-квантов возникают световые вспышки разной интенсивности, продолжительности и т.д., которые регистрируются фотодетектором (фотодиод, фотоумножитель и т.д.). Существуют твердотельные (ZnS, активированный Ag; NaI, активированный Tl и

т.д.), жидкостные, газовые (ксенон и др.) детекторы. Это также один из самых широко применяемых методов регистрации радиоактивного излучения.

4. **Оптический метод** реализуется на эффекте изменения оптических свойств материалов под воздействием радиоактивного излучения. Для этих целей используются различные типы стекол (фосфатные, борные, активированные Ag либо Bi и т.д.), полимерные материалы (цветной целлофан, ацетилцеллюлоза и т.д.). Этот метод послужил основой для создания аппаратуры, измеряющей радиационные поля высокой интенсивности. Интенсивность почернения прямо пропорциональна дозе радиоактивного излучения. На этом принципе работают многие типы индивидуальных дозиметров. Метод широко используется в лабораторных исследованиях радиоактивных веществ для их обнаружения и пространственной локализации (различные виды макро- и микрорадиографии).
5. **Калориметрический метод** измерения радиоактивности основан на измерении тепла, выделяемого при радиоактивном распаде или при взаимодействии излучения с веществом. Метод применяется сравнительно редко, но на его основе созданы приборы для градуировки дозиметров, измерения мощных потоков гамма- и нейтронного излучения в реакторной дозиметрии, где они имеют преимущество по сравнению с ионизационным и другими методами, так как не зависят от энергетических характеристик излучения.
6. **Химические методы** основаны на изменении химического состава жидкостей или газов при взаимодействии с радиоактивным излучением. Типичными примерами такой реакции является радиолит воды с образованием H^+ и OH^- или разложение закиси азота (N_2O) с образованием N_2 , O_2 и NO_2 . На этом принципе созданы жидкостные (ферросульфатные и др.) и газовые химические дозиметры для измерения мощных потоков γ -квантов.

Количественные и качественные характеристики радиоактивного излучения, основанные на тех или иных методах регистрации, измеряются радиометрами, дозиметрами, спектрометрами и спектрометрическими комплексами.

Радиометр – прибор для измерения числа актов радиоактивного распада за единицу времени (активности). Определяет плотность потока ионизирующих излучений и т.д. При измерении мощности экспозиционной дозы фотонного излучения функции радиометра и дозиметра совпадают.

Дозиметр – устройство для измерения доз радиоактивного излучения или величин, связанных с дозами (мощность экспозиционной дозы, поглощенной дозы и др.). Может служить для измерения доз одного (гамма-дозиметр, нейтронный дозиметр и т.д.) либо смешанного излучения (гамма-бета дозиметр и т.д.).

Спектрометр – устройство, которое позволяет измерять распределение радиоактивного излучения по энергии (гамма-альфа-спектрометры и т.д.), массе и заряду (масс-спектрометры и т.д.).

Гамма-спектрометр, например, позволяет выявить в смеси гамма-излучающих радионуклидов присутствие конкретных радиоизотопов по характерной энергии. Так, торий определяется по энергии гамма-квантов дочернего изотопа Pb^{208} с энергией 2,62 МэВ, калий-40 – 1,46 МэВ, а цезий-137 – по энергии 0,662 МэВ и т.д.

Уран измеряется по RaC – по энергии 1,76 МэВ.

Существует большое количество типов и моделей радиометрического, дозиметрического и спектрометрического оборудования.

Данная аппаратура может быть переносной (габариты и масса позволяют носить ее одному человеку), передвижной (автомобильные, вертолетные и спутниковые варианты), стационарной.

Она может быть подразделена и по функциональному назначению: измерение радиоактивности газов и аэрозолей; измерение радиоактивности жидких и сыпучих материалов; измерение радиоактивного загрязнения поверхностей; индивидуальные средства измерения, постоянно носимые человеком.

Приборы могут иметь одно- и многофункциональное назначение.

Некоторые типы аппаратуры, которая используется для контроля за радиационной обстановкой, приведены в таблице 3.1.

Советскими учеными из вузов и НИИ Москвы, Харькова и Луганска (главный конструктор проекта И.А. Михнев) был разработан и создан мобильный комплекс "Аметист", представляющий собой систему гамма-видения на основе телескопа с кодированной апертурой, позволяющий наблюдать многоэлементное гамма-поле, совмещенное с телевизионным изображением (рис. 3.1).

Этот комплекс, расположенный на автомобиле "Урал" и прицепе типа "КамАЗ", позволяет осуществлять контроль за перемещением ядерных материалов, за загрязнением окружающей среды. Автор изучал данный комплекс в действии в Гомеле в 1991 г.



Рис. 3.1. Комплекс "Аметист"

3.2. Методы оценки дозовых нагрузок

Внешние дозовые нагрузки на человека, в том числе на его отдельные органы и ткани, определяются методами прямого измерения радиоактивного излучения индивидуальными дозиметрами различных типов.

Дозиметры могут быть размещены на тех или иных участках тела, а затем эти показания могут быть экстраполированы на другие его участки с учетом геометрии измерения и поправочных коэффициентов, которые получают с учетом моделей-фантомов (модель-фантом – это стандартная модель человека, изготовленная из пластических материалов, которые соответствуют биологической плотности той или иной ткани).

Таблица 3.1. Некоторые типы аппаратуры для контроля за радиационной обстановкой

Тип	Назначение	Диапазон измерений	Фиксируемая энергия излучения, МэВ
РГБ-02 переносной	Измерение концентрации β -активных газов в воздухе	по ^3H – 10^2 – 10^8 Бк/л; по ^{85}Kr – 10^2 – 10^8 Бк/л; по ^{14}C – 10 – 10^7 Бк/л	
РБ-4 переносной	Обнаружение и измерение концентрации долгоживущих α - и β -активных аэрозолей и β -активных газов	$\alpha > 3,7$ МэВ – 10^{-3} – 10^3 Бк/л; β -активные – 10^{-2} – 10^4 Бк/л	
РГА-01 переносной	Измерение мгновенной концентрации радиоактивности иона	10^{-1} – 10^6 Бк/м ³	
РЗА-01 "Омега"	Измерение мгновенной концентрации радиоактивности иона	2 – $10\,000$ Бк/м ³	
РГБ-06 стационарный	Непрерывный контроль содержания β -радиоактивных газов	по ^3H – 10 – 10^7 Бк/л; по ^{85}Kr – 1 – 10^{11} Бк/л	
РГБ4-1eM стационарный	Экспресс-измерение активности жидких проб по β -излучению	$2,9$ – $1,9 \cdot 10^7$ Бк/л	0,1–3,5
РУБ-01П стационарный	Экспресс-измерение активности жидких проб по β -излучению, α -излучению ^{239}Pu	2 – $2,5 \cdot 10^6$ Бк/л; $0,6$ – $1,85 \cdot 10^3$ Бк/л	0,1–3,5; 5,15
ДРГЗ-01 переносной	Измерение МЭД рентгеновского и гамма-излучений	0–100 мкР/с	0,15–1,25
ДРГ-05 переносной	Измерение МЭД и экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений, качественное определение β -излучения	1 – 10^4 мР; $0,1$ – 10^4 мкР/с	0,04–10; 0,2–3
ДГБ-04А	Измерение МЭД	0,1–99,99 мкЗв/ч	0,05–3,0

Продолжение таблицы 3.1

СРП-68-01 переносной	Измерение МЭД γ -излучения, поисковый геолого-разведочный прибор с высокой чувствительностью и непрерывным режимом измерения	1–3 000 мкР/ч	0,015–3, 0
МКС-01Р переносной	Универсальный радиометр-дозиметр для измерения МЭД, γ -излучения, α - и β -излучений, нейтронов	10^{-2} – 10^5 мкЗв; 1– 10^4 мкЗв/ч; 10 – 10^5 мин $^{-1}$ см 2	0,04–10 по γ ; $^{239}\text{Р}$ по α ; 0,3–3 по β
РУП-1 переносной	Универсальный радиометр-дозиметр для измерения МЭД, потока α - и β -излучений, нейтронов	0,2–10 000 мкР/с; 0,5–20 000 см $^{-2}$ мин $^{-1}$; 10–50 000 см $^{-2}$ мин $^{-1}$	0,2–1,25 по γ ; > 2 по α ; > 0,07 по β
РКП-305 "Карат" переносной	Радиометр-концентрометр для измерения содержания U (по Ra), Th, K в природных средах	от 1 по 100 г/т по U, Th; от 0,1 по 10% по K	
РСП-101 "Поиск-Припять" переносной	Радиометр-спектрометр для измерения МЭД, снятия качественного энергетического спектра гамма-излучения потока, β -измерение излучения	0–1 000 мкР/ч; 10–10 000 см $^{-2}$ мин $^{-1}$	0,3–3,5
КИД-2	Индивидуальный дозиметр рентгеновского и γ -излучения с ионизационной камерой	0,005–1 Р	0,02–2
Alpha Guard RQ 2000	Многопараметрический радон-монитор профессиональной фирмы "Позитрон"	2 – $2 \cdot 10^6$ Бк/м 3	
ДКС-04	Индивидуальный фотографический дозиметр рентгеновского и γ -излучения с газоразрядным счетчиком	0,001–1 Р	0,05–3
ИФКУ	Индивидуальный дозиметр для измерения γ - и β -излучений, тепловых нейтронов фоточувствительной пленкой	0,5–20 мЗв	0,1–3 по γ ; > 0,3 по β
ИКС-А	Индивидуальный термолюминесцентный дозиметр для регистрации γ - и β -излучений	0,5– 10^3 Р; 1– $2 \cdot 10^3$ Р	0,1–3 по γ ; 0,2–3,5 по β

Окончание таблицы 3.1

ТЛД-К на основе SiO ₇	Индивидуальный термолю- минесцентный дозиметр для определения МЭД	$2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^5$ сГр	
РКСБ-104	Бытовой дозиметрический прибор для измерения МЭД, плотности потока β -излучения с поверхности, предельной активности Cs ¹³⁷	0,1–99,99 мкЗв/ч; 6–6 000 см ⁻² мин ⁻¹ ; $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^6$ Бк/кг	0,06–1,25 по γ ; 0,5–3 по β
РСК-203 "Припять"	Бытовой радиометр для измерения β - и γ -излучений		
АНРИ-01 "Сосна"	Бытовой дозиметр- радиометр		
РРА-01П "Альфара"	Портативный радиометр ра- дона для измерения его объем- ной активности в воздухе	20–20 000 Бк/м ³	

Примечание: более подробный перечень с указанием метрологических параметров существующей и предлагаемой новой аппаратуры можно взять в научно-информационном журнале по радиационной экологии «АНРИ» (Москва, Информцентр НПП «Доза»).

Таблица 3.2. Результаты индивидуального дозиметрического контроля населения в зоне аварии 06.04.1993 г. на Сибирском химическом комбинате

№ п/п	№ дозиметра	Доза, мЗв	Житель села
1	10301	0,17	Б... Г.Ю.
2	10304	0,20	К... Ю.В.
3	10305	0,18	Н... Р.
6	10308	0,14	С... А.Н.
14	10317	0,42	И... Н.К.
21	10325	0,24	К... А.В.
34	10340	0,30	П... В.Г.
37	10343	0,29	С... Ю.Г.
41	10347	0,11	Г... С.Н.
46	10362	0,14	Х... И.А.
	Среднее по 46 дозиметрам	0,15 мЗв за 48 суток	

Примечание: измерения выполнены индивидуальными дозиметрами типа ДТГ-4 с использованием прибора типа «Алпог», аттестованным в НПО «ВНИМ им. Д.И. Менделеева». Свидетельство №35/91 от 15.01.92 г.

В качестве примера индивидуальной дозиметрии можно рассмотреть данные по дозовой нагрузке на жителей с. Георгиевка Томской области, определенной в период с 19 мая по 5 июля 1993 г. по истечению 42 дней после аварии 06.04.1993 г. на СХК (табл. 3.2).

Определение доз внутреннего облучения биологических объектов, например человека, проводится, как правило, расчетным путем. Для этого используются стандартные физиологические параметры среднестатистического человека, характеризующие те или иные обменные процессы. Так, например, МКРЗ (Международная комиссия по радиационной защите) рекомендует использовать при таких расчетах следующие величины (Моисеев, Иванов, 1974):

- средний вес человека – 70 кг;
- в т.ч. мышцы – 30 кг;
- кости – 10 кг;
- кровь – 5,4 кг;
- кожа и подкожная ткань – 6,1 кг;
- жировая ткань – 10 кг;
- жизненная емкость легких у мужчин – 3–4 л;
- объем воздуха, вдыхаемого за 8 рабочих часов, – 10^7 мл;
- полная поверхность органов дыхания – 70 м^2 ;
- полное содержание воды в организме – 43 кг.

При этом учитываются размер дыхательной системы, особенности распределения мелких частиц в органах дыхания, воздушный баланс, средняя скорость дыхания, время задержки воздуха, воды и пищи в тех или иных органах человека; содержание воды в различных органах и тканях, водный баланс, химический состав мышц, костей, эффективный атомный номер сложных веществ (костная ткань, мышцы и т.д.) и ряд других параметров (Моисеев, Иванов, 1974; Гусев, Беляев, 1991; и др.).

Определяются главные критические органы, накапливающие те или иные радионуклиды, коэффициенты их накопления в тех или иных органах.

Так, например, считается, что критическими органами для ^{90}Sr являются кости, легкие и все тело, тогда как для $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$ – все тело, мышечная ткань, легкие, селезенка, кости, почки, желудочно-кишечный тракт, а для ^{131}I – прежде всего щитовидная железа.

Согласно исследованиям В.Ф. Журавлева (1990), все радионуклиды по особенностям своего распределения в организме человека делятся на группы:

- остеотропные (^{35}P , ^{90}Sr , ^{226}Ra , U, Pu и др.);
- тканевые ретикулоэндотелиальные (^{140}La , ^{144}Ce , Th, ^{239}Pu , нитраты и др.);
- избирательно накапливающиеся (йод в щитовидной железе, ^{59}Fe в эритроцитах и т.д.);
- равномерно распределяющиеся (^3H , ^{40}K , ^{14}C , ^{137}Cs и т.д.).

Доза внутреннего радиоактивного облучения как всего организма, так и его отдельных органов и тканей зависит и от физико-химических характеристик ин-

корпорированных радионуклидов, которые определяют их всасываемость, распределение и выведение из организма.

Обращается особое внимание на то, что продукты ядерного деления распределяются в органах и тканях человека крайне неравномерно. При этом различие в дозовых нагрузках на разных участках может достигать нескольких порядков (Василенко И.Я., Василенко О.И., 2004, 2006; и др.). Все эти характеристики подробно освещены в научной справочной литературе (Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: справочник, Л.: Химия, 1990; и др.).

Геохимические особенности радионуклидов определяют и особенности их поступления в организм человека по различным путям миграции (рис. 3.2), обуславливая его внутреннее облучение (табл. 3.3).

Таблица 3.3. Классификация радионуклидов, наиболее представительных в выбросах предприятий ядерного топливного цикла, по путям их миграции и степени равновесности в окружающей среде (по И.Е. Артемовой и др., 1990)

Критерий	Радионуклиды
<i>Основной путь</i> поступления радионуклидов в пищевые цепи человека – непосредственное загрязнение начальных звеньев цепи (растения) радиоактивными выпадениями. Характерен для короткоживущих и биологически подвижных нуклидов, равновесие содержания которых в атмосфере и начальных звеньях пищевой цепи устанавливается в течение одного вегетационного периода	^{24}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{43}Ca , ^{31}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{88}Rb , ^{89}Sr , ^{90}Y , ^{91}Y , ^{95}Zr , $^{95\text{m}}\text{Nb}$, ^{95}Nb , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{106}Ru , $^{103\text{m}}\text{Rh}$, $^{106\text{m}}\text{Rh}$, $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{125}Sb , $^{125\text{m}}\text{Te}$, $^{127\text{m}}\text{Te}$, ^{127}Te , $^{129\text{m}}\text{Te}$, ^{129}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{147}Pm , ^{154}Eu , ^{210}Bi , ^{234}Th , ^{234}Pa
<i>Комбинированный путь</i> (воздушный, почвенный) поступление радионуклидов в пищевые цепи с существенным вкладом усвоения нуклидов корневой системой растений из почвы. Характерен для долгоживущих радионуклидов, равновесное содержание которых в атмосфере и начальных звеньях пищевой цепи в течение одного вегетационного периода не достигается. Наблюдается постоянное увеличение кумулятивного запаса радионуклида в почве в течение десятилетий	^{90}Sr , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{230}Th , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , $\text{U}_{\text{ост}}$, ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm
Пути в составе биогеохимического круговорота водорода и углерода в биосфере. Характерен только для ^3H и ^{14}C с равновесным содержанием в атмосфере, пищевых цепях и организме человека. Равновесие может быть достигнуто в течение одного-двух вегетационных периодов	^3H и ^{14}C

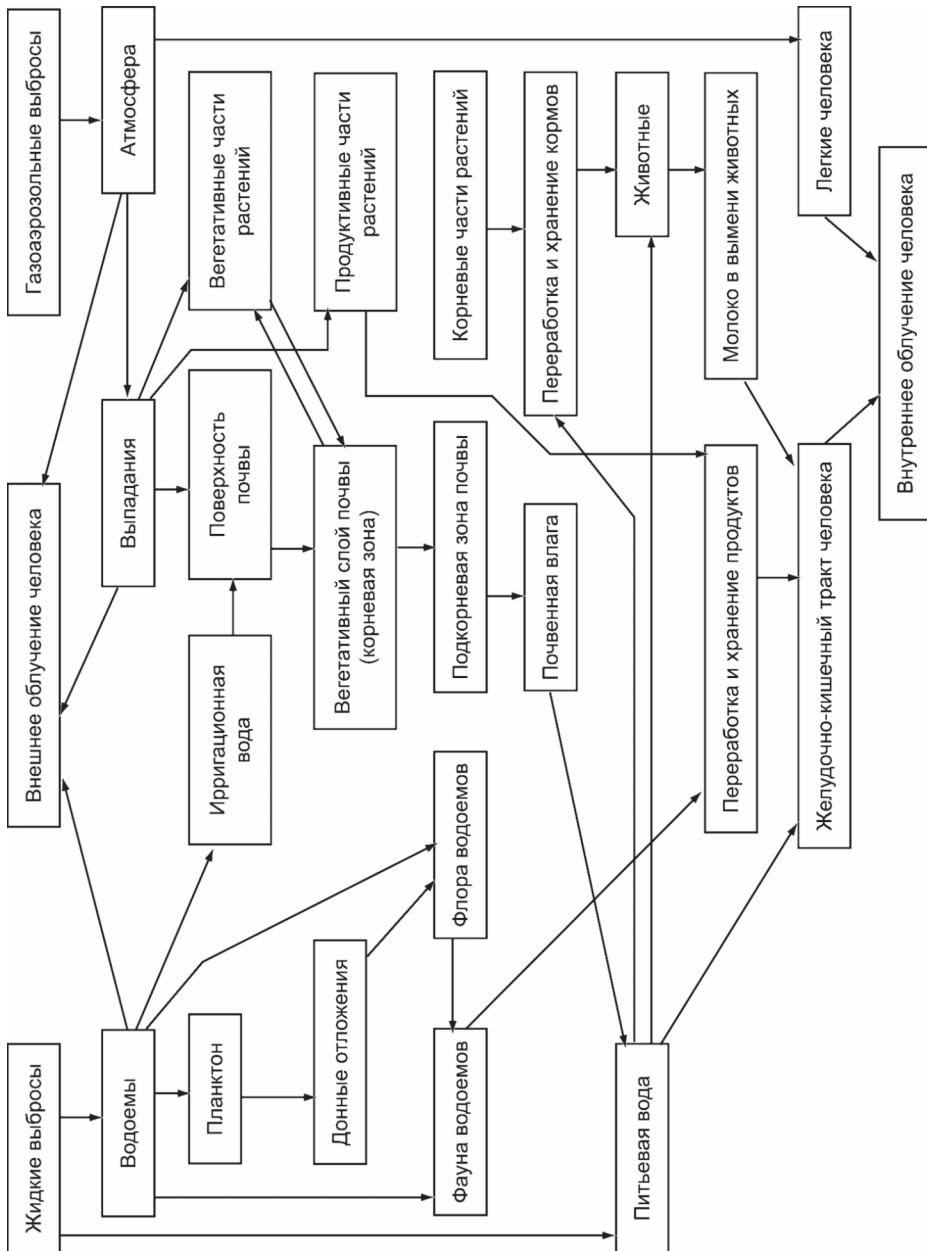


Рис. 3.2. Схема миграции радионуклидов во внешней среде (по Н.Г. Гусеву и др., 1991)

Определение дозовых нагрузок на человека ведется по одной из выбранных моделей пути облучения человека. Существует сравнительно большой набор моделей, учитывающих механизм поступления радионуклидов и множество других факторов. Имеются специальные рекомендации Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) по методам построения и использованию моделей радиационного воздействия на человека и их роли в оценке доз облучения (МКРЗ, 1980; МКРЗ, 1987 и др.). Весьма обстоятельно этот вопрос рассмотрен в справочнике по радиоактивным выбросам в биосферу (Гусев, Беляев, 1991) и работах В.Ф. Журавлева (1982, 1990), Ю.А. Москалева (1989) и др.

Упрощенная модель путей облучения человека, например ^3H или ^{14}C , показана на рисунке 3.3.

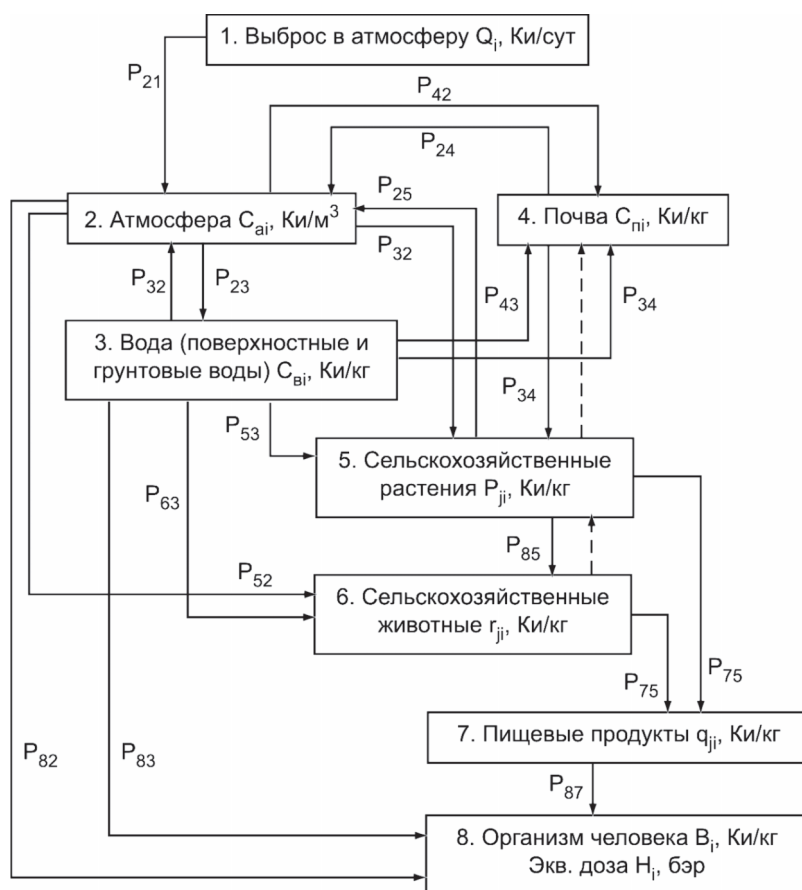


Рис. 3.3. Упрощенная модель путей облучения человека при достижении равновесия содержания ^3H (или ^{14}C) в атмосфере, объектах окружающей среды и тканей человека в результате поступления нуклидов через органы пищеварения (по И.Е. Артемовой и др., 1980)

Радиоактивные дозообразующие вещества могут поступать в организм через органы дыхания, пищеварительный тракт, кожу, открытые раны, ожоги и т.д. (рис. 3.4).

Особенности распределения аэрозольных частиц, в том числе радиоактивных, в дыхательном тракте показаны на рисунке 3.5, а особенности переноса радионуклидов из дыхательного тракта в другие органы показаны на рисунке 3.6.

Следует отметить, что во многих моделях расчета дозовых нагрузок учитывается характер поступления радионуклидов и радиационного воздействия (острый разовый, аварийный; пролонгированный, хронический).

Таким образом, расчет дозовой нагрузки на человека зависит как от информации, полученной при непосредственных дозиметрических измерениях, так и от

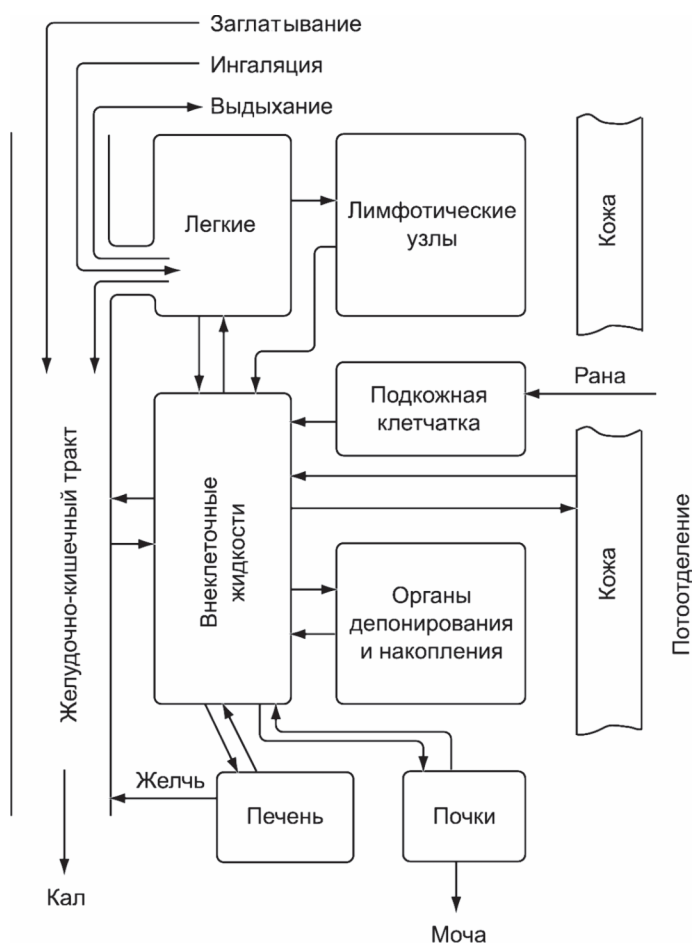


Рис. 3.4. Основные пути обмена радионуклидов в организме (по В.Ф. Журавлеву, 1990)

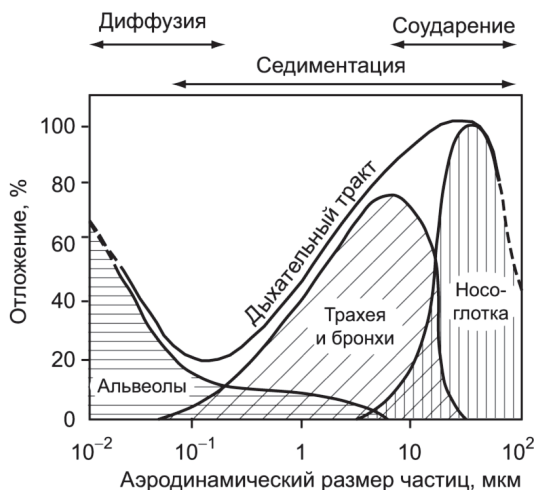


Рис. 3.5. Схема отложения частиц в дыхательном тракте (по Р. Альберту, 1971)

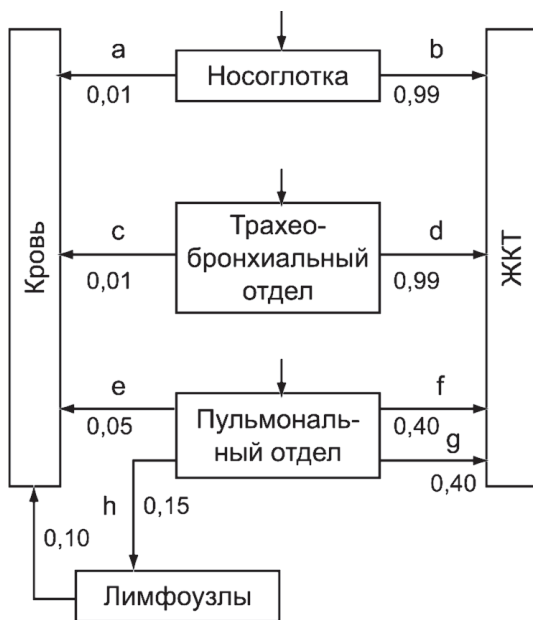


Рис. 3.6. Дыхательный тракт, носоглотка, трахеобронхиальный и пульмональный отдел легких: а, б, с, д, е, ф, г, и — доли переноса активности из легких в кровь, ЖКТ и лимфатические узлы (по В.Ф. Журавлеву, 1990)

измерений концентрации радионуклидов в воздухе, воде, продуктах питания с последующим перерасчетом их распределения по пищевым цепям и организму.

В настоящее время развиваются методы прямого определения радионуклидов, инкорпорированных в организм. Они осуществляются путем отбора биологической ткани (соскобы и т.д.) либо методом высокочувствительной гамма-спектрометрии. Для этих целей сконструированы специальные подземные камеры низкого фона (Канифер), как это сделано в ОИГМ СО РАН (Бобров и др., 1975), и счетчики излучения человека (СИЧ).

На этих установках возможно определение γ -излучающих радионуклидов как во всем теле человека, так и в отдельных его участках (щитовидная железа, желудок и т.д.), что достигается путем перемещения детектора радиоактивного излучения по телу человека. В ряде случаев может фиксироваться и жесткое бета-излучение.

Так, устройство СИЧ-01Л может измерять ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn в легких человека, а СИЧ-2 — любой набор радионуклидов в любом органе (Каталог приборов, оборудования, услуг, М.: Экспертцентр, 1994), хотя есть большое сомнение в возможности измерения им, как указано в проспекте, α -радионуклидов, β -излучающих в мягкой области спектра радионуклидов.

По мнению Ф.А. Тихомирова (1972), при определении дозовых

нагрузок в биологических системах, в силу различных объективных обстоятельств, не всегда возможно получить необходимую дозиметрическую информацию.

Это может быть обусловлено рядом причин:

- 1) неравномерность распределения источников радионуклидов, чаще всего имеющих "пятнистый" характер распределения;
- 2) одновременное сочетанное воздействие внутренних и внешних природных и техногенных факторов радиационного характера;
- 3) сложный энергетический спектр излучающих радионуклидов с разными показателями ЛПЭ.

А если к этому добавить еще и факторы субъективного характера по принципу "этого не может быть, потому что этого не может быть никогда", то возникает проблема объективного определения полученных дозовых нагрузок на человека и биоту.

Наиболее ярким примером субъективного подхода к определению дозовых нагрузок служат материалы по аварии на Чернобыльской АЭС, когда дозовая нагрузка была строго регламентирована, и она не должна была превышать 25 бэр. При этом речь шла прежде всего о радиационном факторе, обусловленном наличием гамма-излучающих компонентов, без учета "горячих частиц", α -нуклидов и т.д. Именно тогда впервые профессором А.И. Воробьевым был поднят вопрос об уточнении доз, полученных методами физического измерения, другими методами, в частности с помощью методов биологической дозиметрии (хромосомный анализ), которая, по его данным, была на порядок (!) точнее физической (Протокол №12 заседания Правительственной комиссии по оказанию медицинской помощи пострадавшим в результате радиационной аварии от 12.05.86 г. // Вестник Чернобыля, сент. 1991 г.).

Методы биодозиметрии позволяют определять интегрированную эффективную эквивалентную дозу облучения за все время проживания человека как от внешних, так и от внутренних факторов радиационного воздействия.

Совещательная группа МАГАТЭ по биологической дозиметрии (Ленинград, 16–20 ноября 1987 г.) отмечает, что существует значительная группа биологических индикаторов радиационного воздействия (табл. 3.4).

Кроме того, в литературе описаны и другие биологические методы определения радиационной нагрузки.

Так, известен метод биологической дозиметрии по **хромосомным абберациям** в культуре лимфоцитов человека. Методические рекомендации по использованию этого метода утверждены Минздравом СССР в 1979 г. Метод используется в различных странах, в том числе в Японии (J. Hayata, 1996). Он имеет определенные ограничения.

С помощью линейно-квадратичной модели зависимости цитогенетического эффекта от дозы получены калибровочные кривые, рекомендуемые для проведения биологической дозиметрии (рис. 3.7). Полученные калибровочные кривые позволяют оценивать дозы радиации с приемлемой точностью (15–30%).

Широко используется метод **микроядерного теста** для индикации пострада-

Таблица 3.4. Некоторые предлагаемые методы биодозиметрии

№ п/п	Система индикатора	Диапазон дозы, Гр	Период времени после облучения для использования теста
1	Субпопуляции лимфоцитов (лимфоциты крови и костного мозга)	1–10	до недель после облучения
2	Образование после стимулирования (лимфоциты и лимфатическая ткань)	1–6	до недель после облучения
3	Стимулирование лимфоцитов (лимфоциты и лимфоткани)	1–6	до недель после облучения
4	Смешанная лимфоцитная культура (Т-лимфоциты)	1–6	до недель после облучения
5	Абсолютное число клеток в периферической крови (полиморфно-нуклеидные клетки, лимфоциты, тромбоциты, ретикулоциты)	1	до месяцев после облучения
6	Состав и цитология костного мозга (гемопозитические стволовые клетки и клетки предшественники)	1	до месяцев после облучения
7	Система гемопозитических стволовых клеток	0,8–1,6	часы, дни
8	Нуклеиновая кислота в лейкоцитах (кровь)	0,5–4	30 дней
9	Тимидин (кровь)	0,005–1,0	6 ч
10	Таурин (моча)	1–8	72 ч
11	Амилаза (кровь)	2–20	24 ч
12	Свободные аминокислоты (кровь)	2–8	30 дней
13	Разрыв тяжей ДНК (кровь)	0,2–5	48 ч
14	Чрезмерно извитая структура ДНК (кровь)	2–8	48 ч

ционных эффектов у человека. Методические рекомендации по его использованию утверждены Минздравом СССР в 1991 г.

Этот метод быстрее и проще по сравнению с предыдущим, хотя по своей чувствительности он уступает методу хромосомных aberrаций. Связь между дозой облучения и количеством микроядер в лимфоцитах периферической крови прямая и определяется при анализе микроядер в одноядерных клетках.

В литературе обсуждаются также методы биодозиметрии на основе гликофоринового теста и *hprt*-мутаций. Но использование этих довольно сложных в техническом исполнении методов имеет ряд ограничений.

Так, по данным А.В. Севанькова и др. (1994), гликофориновый тест применим только для людей, имеющих MN группы крови, он не специфичен для радиационного воздействия и, вероятно, дает оценку доз с большой неопределенностью.

Для реализации метода *hprt*-мутаций пока нет достаточных лабораторно-клинических исследований.

Для оценки дозовых нагрузок методами биодозиметрии на сегодняшний день широко используются два метода: метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и метод флуоресцентной гибридизации *in situ* (FISH-метод) с хромосом-специфичными ДНК-зондами.

В мировой литературе имеется большое количество публикаций по вопросам методики использования данных методов и полученных с их помощью результатов (Б.И. Гусев и др. по зоне влияния от взрывов на СИП и др.).

Для ретроспективного восстановления дозовых нагрузок на человека большой практический интерес представляет метод **электронного парамагнитного резонанса** (ЭПР) по эмали зубов, который является одной из немногих ГОСТированных методик.

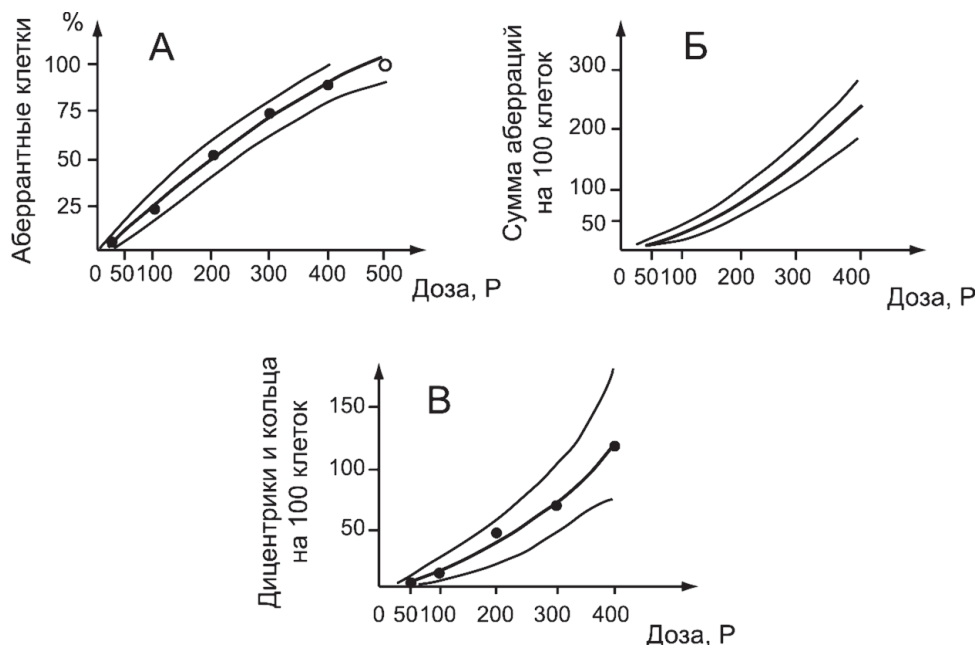


Рис. 3.7. Калибровочные кривые для оценки дозы по проценту аберрантных клеток (А), общему числу аберраций хромосом (Б) и сумме дицентриков и колец (В). Тонкие линии означают доверительный интервал 95% (Методические рекомендации..., 1979)

Метод ЭПР основан на изменении количества электронно-дырочных центров, образующихся в структуре минералов в результате радиационного воздействия.

Количество термически устойчивых радиационных электронно-дырочных центров зависит напрямую от величины дозы радиационного воздействия.

Дозиметрические характеристики минералов определяются их структурой и элементами-примесями. Наиболее известным минералом-дозиметром является кварц. Потенциальными дозиметрами могут быть апатит, циркон, полевой шпат, гипс, кальцит, флюорит и др.

Метод ЭПР давно использовался при поисках месторождений радиоактивных руд для определения возраста минералов при известных концентрациях радиоактивных элементов и т.д.

Палеодозиметрические исследования по E_1 -центру в кварце в геологических целях проводились по методическому указанию, утвержденному НСОММН Мин-Гео СССР.

Известны работы японских специалистов по исследованию материалов, содержащих кварц (кирпич и т.д.), для восстановления палеодоз в Хиросиме и Нагасаки (д-р Мариама, 1990 и др.). Проводились также исследования с использованием ЭПР-спектроскопии для оценки палеодоз по фарфоровым и стеклянным изоляторам.

Метод ЭПР-спектроскопии эмали зубов основан на изучении радиационно-индуцированных парамагнитных центров, фиксирующихся в эмали зубов (фосфатное вещество по составу и структуре соответствующее апатиту). Количество этих центров в данном веществе, также как и в кварце, прямо пропорционально поглощенной дозе.

Для унификации результатов, получаемых этим методом, и придания им официального статуса при принятии решений, в 1994–1995 гг. Л.Н. Смиранным и др. (1996) из Центра радиационной безопасности космических объектов был разработан ГОСТ Р 22.3.04-96 "Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Контроль населения дозиметрический. Метод определения поглощенных доз внешнего гамма-излучения по спектрам ЭПР". В работе над ГОСТом, наряду с головной организацией (НИИЦ РБ КО) приняли участие еще пять организаций (ИБФ, МРНЦ, ВНИИФТРИ, ВИМС, ТОО "Тринон"). Официальные отзывы и предложения поступили более чем от 20 организаций Академии наук: Академии медицинских наук, Высшей школы, Минздравмедпрома РФ, МЧС, Госсанэпиднадзора, Госатомнадзора и ряда других организаций. Окончательная редакция проекта ГОСТа была рассмотрена и одобрена Российской научной комиссией по радиационной защите (ноябрь 1995 г.) и специализированной рабочей группой Технического комитета по стандартизации "Гражданская оборона, предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций". Одновременно был разработан рабочий эталон поглощенной дозы в облученной зубной эмали РЭ ПД 03Э (ТУ-4381-001-08627448-95). На сегодняшний день данный ГОСТ утвержден и принят к исполнению.

По мнению специалистов (Смиранный и др., 1996), важнейшим вопросом ЭПР-дозиметрии является вопрос, связанный с определением достоверности и точности получаемых результатов.

Наиболее серьезным гарантом при этом является проведение калибровочных дооблучений на аттестованных гамма-установках в условиях, позволяющих с достаточной точностью и достоверностью моделировать условия реального облучения и определять коэффициент радиационной чувствительности исследуемого зуба. При проведении такого рода калибровок предусматривается обязательное экранирование проб зубной эмали в процессе дооблучения тканезквивалентным покрытием толщиной 1 г/см^2 , учитывая тем самым влияние биоткани лица при облучении зубов человека в реальных условиях и, в частности, обеспечивая соответствующие условия формирования равновесия вторичных электронов. В этом случае наряду с приближением условий облучения к реальным уменьшается энергетическая зависимость чувствительности зубной эмали к гамма-излучению ("ход с жесткостью"), которая должна учитываться лишь при малых энергиях – менее $0,15 \text{ МэВ}$.

Другим способом определения достоверности результатов, получаемых с помощью ЭПР-дозиметрии, является проведение сравнительных "слепых" измерений доз в различных лабораториях. Для этих целей было выполнено несколько подобного рода сличений. Так, в 1993 г. сравнительные измерения в диапазонах доз $0,1\text{--}0,5 \text{ Гр}$ проводились лабораториями ИБМ МЗМП, ИХФ РАН и ИФМ УрАН. Полученные результаты показали, что метод ЭПР-дозиметрии позволяет определять дозы в указанном диапазоне с погрешностью $\sim 10\%$.

В 1994–1995 гг. была проведена I Международная интеркалибровка. Она проводилась в рамках проекта ЕСР-10 Комиссии Европейского Сообщества. В интеркалибровке приняли участие 9 лабораторий из 6 стран (Беларусь, Германия, Россия, США, Украина и Эстония).

Образцы зубной эмали были приготовлены в одной из лабораторий по заданию МАГАТЭ и облучены, величина дозы участникам не объявлялась. Измерения проводились по методикам, аналогичным представленным в ГОСТ Р22, как с дооблучением, так и ускоренным методом. Итогом явилось то, что, независимо от применяемых ЭПР-методик, в разных лабораториях различие полученных оценок доз оказалось в пределах $\pm 25\%$.

С целью установления сходимости результатов измерений, выполненных с использованием различных методических подходов и спектрометров, А.Н. Смирным и др. (1996) были проведены сравнительные измерения с использованием двух методов:

- экспресс-метода с использованием усредненного коэффициента чувствительности и фоновой кривой, полученной по молочным зубам;
- метода последовательных дооблучений исследуемого образца.

Экспресс-измерения проводились с использованием спектрометра ECS-106 BRUKER, ФРГ. Исследования по методу дооблучений были выполнены на спектрометре BRUKER-ER-420.

Дооблучения проводились на установке с радиоактивным изотопом ^{137}Cs , аттестованной ВНИИФТРИ Госстандарта.

Для сличения были использованы два зуба одного и того же человека, подвергнутого аварийному облучению. Из представленных зубов были изготовлены

Таблица 3.5. Результаты сравнительных измерений, выполненных двумя методами на разных спектрометрах для зубов одного человека

№ зуба	№ препарата	Результаты измерений экспресс-методом, Гр	Метод аддитивного облучения, Гр
1	1	0,134±0,04	
	2		0,100±0,01
2	3	0,123±0,035	
	4		0,95±0,01

четыре препарата зубной эмали, по два препарата из каждого зуба. Результаты измерений доз по ЭПР-спектрам этих зубов представлены в таблице 3.5.

Как видно из таблицы, результаты, полученные независимо двумя методами на двух различных спектрометрах, совпадают в пределах точности измерений.

Представляется интересным сравнение индивидуальных доз, восстановленных с помощью ЭПР-дозиметрии и измеренных штатными дозиметрами для одних и тех же лиц.

Такие сравнения были проведены для рабочих Южноуральского предприятия "Маяк" группой ученых ФРГ, Екатеринбурга и Озерска.

В результате сопоставления получено хорошее согласие в области высоких доз (0,5–3,5 Гр), удовлетворительное в области средних доз (0,1–0,5 Гр) и плохое в области сравнительно малых доз. При этом более высокие значения доз, полученные с помощью ЭПР-метрии, свидетельствуют о вкладе в дозу неконтролируемых производственной физической дозиметрией источников излучений. Это подтверждается наличием значительных доз у населения г. Озерск, где проживают и обследуемые рабочие.

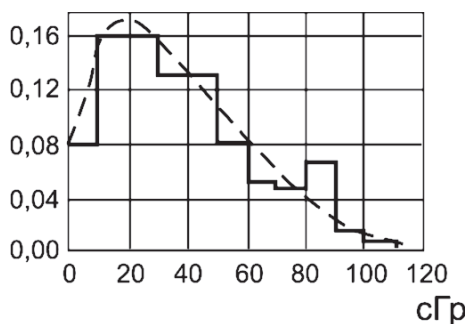


Рис. 3.8. Частотная гистограмма распределения доз у жителей Алтайского края

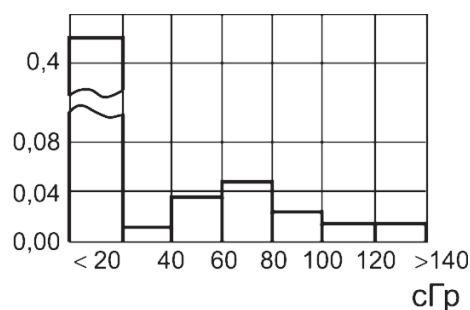


Рис. 3.9. Частотная гистограмма распределения доз у жителей поселка Самусь

Таким образом, сопоставления и проверки метода ЭПР-дозиметрии свидетельствуют о его надежности и возможности использования при расследовании неконтролируемых случаев облучения населения.

Японскими учеными (N. Nakamura et al, 1996), как и в исследованиях группы Н.Н. Ильинских, продемонстрирована хорошая корреляция интенсивности ЭПР-сигнала и частоты хромосомных аббераций в лимфоцитах крови доноров. Эф-

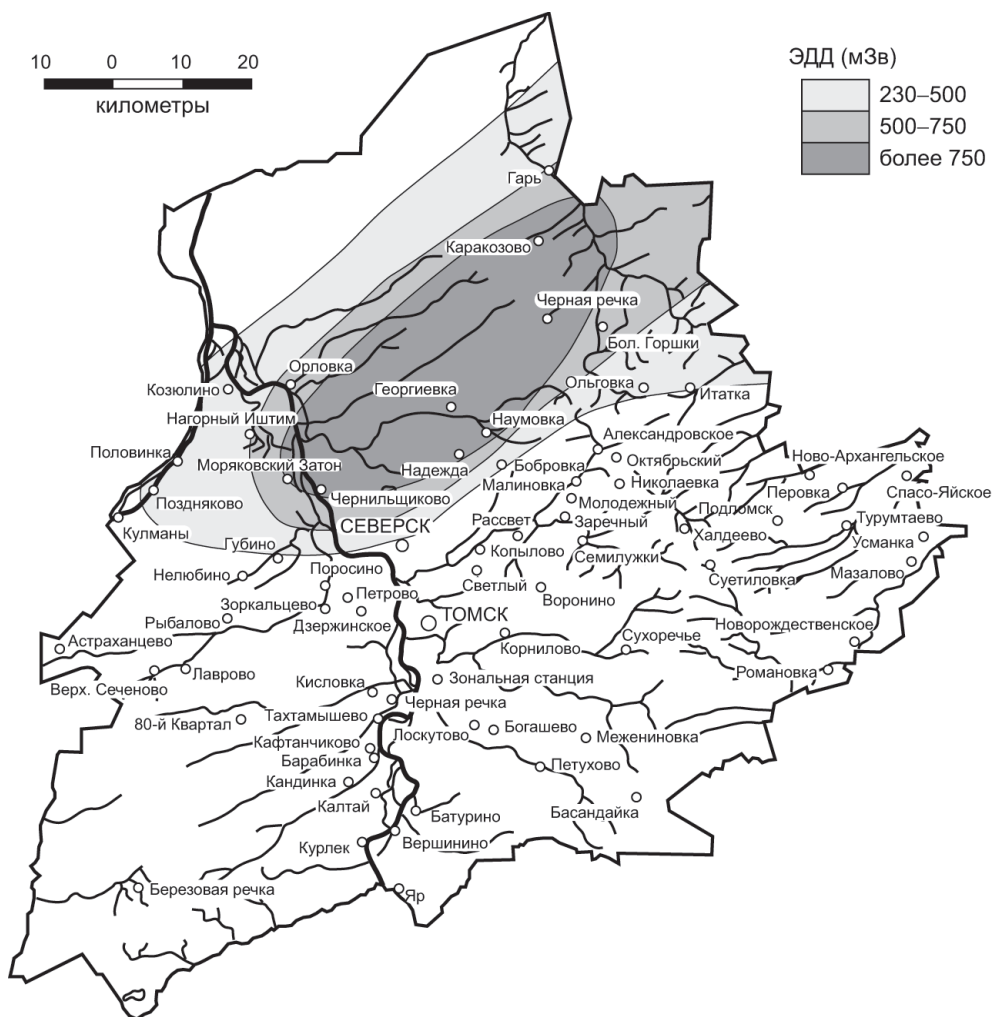


Рис. 3.10. Схема зонирования территории юга Томской области по эффективной эквивалентной дозе (ЭЭД), определенной методами биодозиметрии (по данным Н.Н. Ильинских и др., 1994, 1995)

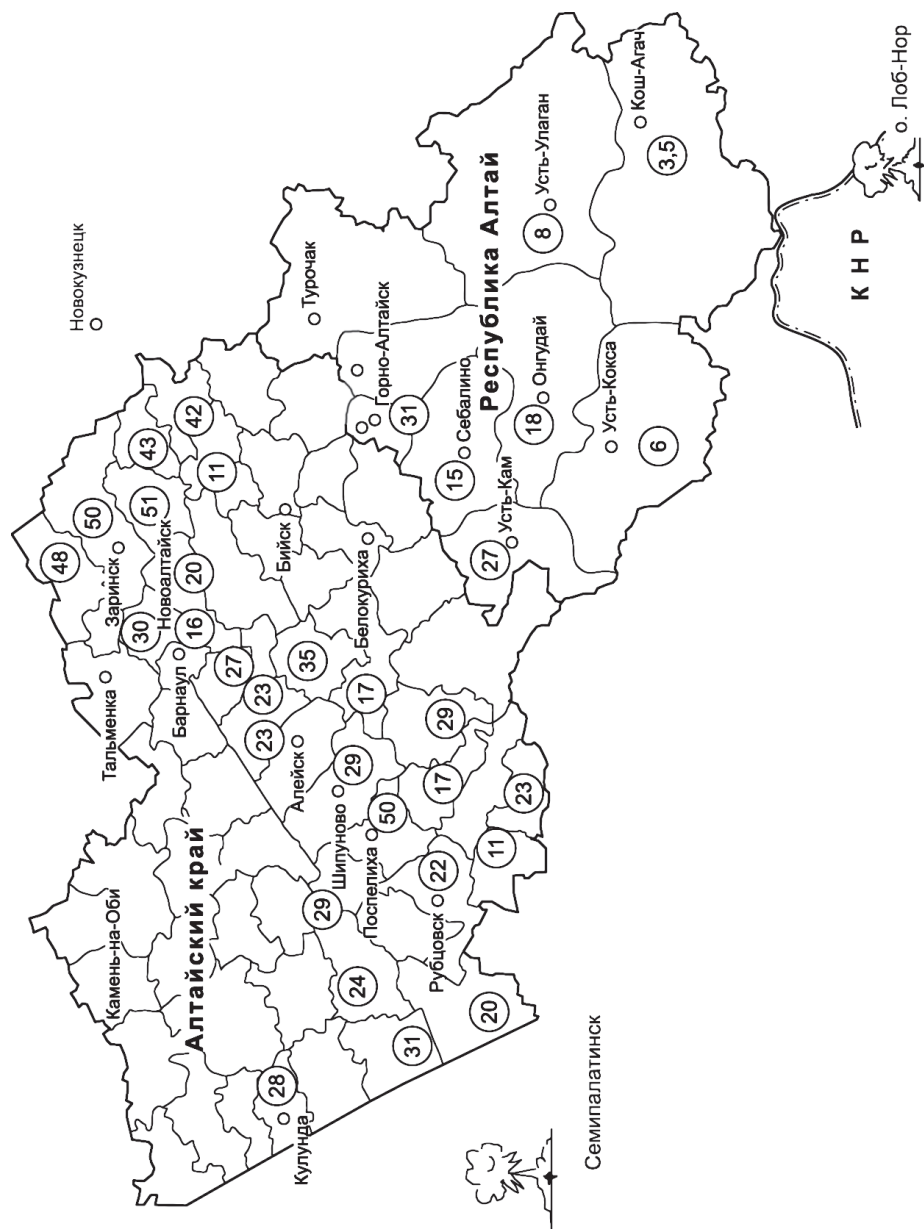


Рис. 3.11. Дозовая нагрузка (сЗв) у населения Алтайского региона по данным ЭПР-спектрометрии эмали зубов (по Г.А. Федосееву, 2004)

эффективность использования метода ЭПР-спектроскопии для ретроспективной оценки индивидуальных накопленных доз у населения Брянской области достоверно убедительно показана группой исследователей Медицинского радиологического научного центра (Скворцов и др., 1996). Ими установлена корреляция измеренных методом ЭПР-спектрометрии усредненных значений индивидуальных накопленных доз с уровнем радиоактивного загрязнения территорий.

Отработка метода определения поглощенных доз внешнего гамма-излучения по спектрам ЭПР эмали зубов осуществлялась при выполнении программы радиационного мониторинга на территории Томской области, прилегающей к СХК.

Для проведения ЭПР-метрических измерений были приготовлены 78 препаратов эмали зубов, полученных из поселка Самусь. ЭПР-спектры измерялись для 58 препаратов. В 31 случае показания ЭПР-метрии не превышали фоновых значений. В 14 случаях показания были недостаточно достоверны в связи с малым количеством эмали, при этом в 4 случаях наблюдался заметный сигнал, связанный с парамагнитными центрами радиационного происхождения. У 12 доноров (то есть в 21% случаев) были зафиксированы дозы, существенно превышавшие фоновые значения. Из них в двух случаях дозы достигали 118 и 188 сГр (Смиренный и др., 1996).

Сравнительные гистограммы распределения палеодоз, измеренных у жителей пос. Самусь Томской области и у жителей Алтайского края (Смиренный и др., 1996), показаны на рисунках 3.8, 3.9.

На сегодняшний день с применением биодозиметрии, прежде всего с использованием эмали зубов, возможно выполнение районирования территории в зоне влияния СХК (рис. 3.10), Алтайского края (рис. 3.11), Уральского региона и района Тоцкого ядерного взрыва (Иванов Д.В., 2005).

Таким образом, сегодня можно говорить о том, что появляются методы объективного определения дозовых нагрузок на человека, что позволит довольно оперативно получить ретроспективную оценку эффективных эквивалентных доз облучения человека, обусловленных различными радиационными факторами.