

**Федеральное агентство по образованию
ГОУ Уральский государственный университет им. А.М. Горького
Химический факультет**

Конспект лекций по курсу
«Радиационные методы контроля объектов окружающей среды»
для студентов дневной формы обучения по направлению:
«Химия » 020100 (бакалавриат и магистратура).
Специальность «Химия» 020101. Специализации:
«Аналитическая химия», «Химия твердого тела»,
«Химия окружающей среды, химическая экспертиза
и экологическая безопасность»

Составитель:
доктор химических наук, профессор
В.М. Жуковский

Екатеринбург 2008

ОТ АВТОРА

Открытие явления радиоактивности в корне изменило научную картину Мира и дало человечеству в руки ранее неведомые и негаданные источники энергии. Применение радиации в энергетике, технике, медицине, сельском хозяйстве и научных исследованиях стало неотъемлемой частью нашей современной жизни. Через 30-40 лет вообще невозможно представить благополучное существование человеческого сообщества в отсутствии атомной энергетики.

Во все времена живые организмы, в том числе и человек, не подозревая об этом, подвергались действию разнообразных естественных источников излучения, находящихся в воздухе, воде, пище, почве, а также космического излучения.

Первоначальная ориентировка на использование атомной энергии в военных целях, бомбардировки японских городов, многочисленные ядерные испытания и аварии на АЭС сформировали в массовом сознании крайне негативное отношение как к «военному», так и к «мирному» атому. В большинстве суждений отсутствует сколько-нибудь разумный научный анализ.

Автор пытается донести в научной, но достаточно доступной, а отчасти – даже в научно-популярной форме объективные сведения о радиоактивности и радиационной безопасности. Прежде всего, представленный курс лекций адресован студентам университета, обучающимся по направлению «Химия» 020100 (бакалавриат и магистратура). Однако он может быть весьма полезным для студентов других факультетов их старших коллег (журналистов, чиновников и избранников народа всех уровней – людей, обязанных владеть информацией, давать ей объективную интерпретацию и принимать адекватные решения!).

Знание – лучшее средство от страха и подозрений. Радиации не следует бояться, но с ней следует обращаться осторожно и компетентно. Развитие любых отраслей техники было и будет сопряжено с рисками негативных последствий. Риски нужно понять, оценить и довести до приемлемого обществом уровня. Только это делает возможным создание новых экологически приемлемых технологий.

Автор

ЛЕКЦИЯ 1. Социальные последствия открытия явления радиоактивности

*Мир движется, совершенствуется;
задача человека участвовать в этом движении
и подчиняться и содействовать ему.*

Л. Толстой

*Нельзя допустить, чтобы люди направляли на
свое собственное уничтожение те силы природы,
которые они сумели открыть и покорить.*

Ф. Жолио-Кюри

Становление и развитие человеческой цивилизации осуществлялось через овладение новыми знаниями, умениями и через инновации в области технологии. Каждая технологическая революция существенно расширяла человеческие возможности, реформировала структуру обществ, в деятельности которых находили применение порожденные наукой и техникой инновации, коренным образом изменяла образ мышления человека, социоэкономическую и экологическую ситуацию в обществе.

Открытие в последние годы XIX века явления радиоактивности привело к революции в физике, обеспечило переворот в научном мировоззрении, раздвинуло горизонты негаданных возможностей. Человечество получило принципиально новый мощный источник энергии. Мысли и судьбы людей, живших в XX и живущих веке XXI, в значительной мере формировались под влиянием этого открытия. Несомненно, оно будет оказывать глубокое влияние и на следующие поколения.

Прежде всего, это грандиозный *рывок в области фундаментальных наук*: углубленное понимание строения материи, проникновение в микромир, создание квантовой механики и теории относительности, понимание единства всего материального мира во Вселенной, единства фундаментальных взаимодействий, объединяющих микро- и мега мир, живое и косное вещество.

Не менее значимы *прикладные, технические аспекты*. К сожалению, обнаружив, что радиоактивные элементы ^{235}U и ^{239}Pu могут быть мощными малоразмерными источниками энергии, человечество, прежде всего, подумало о бомбе и немедленно свою задумку реализовало. Затем были созданы реакторы для атомных подводных лодок и лишь в последнюю очередь, появился т.н. мирный атом, когда начали строить и эксплуатировать АЭС, применять источники ионизирующих излучений для дефектоскопии и в медицинских целях.

Следует обратить внимание и на *негативные социальные аспекты*. В массовом сознании ядерная энергия после бомб Хиросимы и Нагасаки, Чернобыльской аварии, рудиментов «холодной войны» и волны терроризма воспринимается как некая жуткая «страшилка», которую необходимо полностью ликвидировать, забыть, а лучше – не следовало бы и вовсе открывать. Но остановить научно-технический прогресс нельзя. Всякая остановка (или даже замедление) способны привести к ослаблению творческого, интеллектуального потенциала общества и деградации человеческой цивилизации. Человеческий интеллект, получив в свое распоряжение результаты нового открытия, далеко не всегда и не сразу способен все оценить и предвидеть, отсюда и негативные последствия. Человечество многократно вело и ведет себя как малый ребенок, которому дарят новую игрушку – он ею размахивает, всем показывает, испытывает в разнообразных условиях, развинчивает и разбирает. Последствия таких действий далеко небезопасны – польза и негатив всегда шли рядом. Еще в незапамятные времена человек овладел огнем, что сыграло, несомненно, прогрессивную роль в его развитии. Он научился плавать через океан, летать в воздухе, ездить по железной дороге и в автомобиле, строить высотные

дома и многому-многому другому. Но вспомните, во что это обошлось человечеству, и какие «суммы» оно продолжает выплачивать по этим счетам!

Человек, среда его обитания и техносфера составляют единую неразрывную систему исключительной сложности, которая требует системного подхода. Два последних десятилетия прошли под осознанием недопустимости дальнейшего накопления и развития в XXI веке негативных последствий от динамично нарастающих катастрофических процессов в техногенной и природной сфере. На повестку дня встала острейшая необходимость выработки принципиально новой стратегии развития цивилизации, которая базируется на концепции «приемлемого риска». Риски негативного воздействия на человека исключительно многочисленны, разнообразны и, как правило, радиационные риски среди них отнюдь далеко не самые значимые.

Может, действительно, не следовало вообще открывать явления радиоактивности? Может, во всем виноваты ученые, открывшие радиоактивность и, связанные с этим явлением источники колоссальной внутриядерной энергии? Такое утверждение звучит, по крайней мере, наивно. Подобную претензию недоброжелатели американского образа жизни могли бы предъявить Х. Колумбу: «Зачем открывал Америку? Не открыл бы, и проблем бы не было!». С развитием наших знаний о предмете выяснилось, что независимо от открытия ученых, на Земле всегда существовал, существует, и будет существовать естественный радиационный фон (ЕРФ), от которого нельзя спрятаться. Все живое (в т.ч. человек) сформировались и эволюционируют в радиоактивном мире. А в момент возникновения первичных форм жизни (более 4 млрд. лет тому назад) природный фон был существенно выше существующего. Так что дело не в «открытии» или «закрытии». Дело в использовании: кто, где, когда, как и в каких целях?

Использование ядерной энергии и радиоактивности сводится к двум принципиальным возможностям: как средство ведения войны и в мирных целях. Прокомментируем эти возможности.

I. Если представить себе день, когда ведущие страны во всемирном конфликте пустят в ход баллистические ракеты, вооруженные ядерными и термоядерными зарядами, тогда, как мы знаем, земной цивилизации придет конец. В условиях глобальной термоядерной войны радиационные эффекты становятся в сущности вторичными, потому что они растворяются на фоне разрушительной силы взрыва и огня и последующего наступления «ядерной зимы»¹. Предотвращение такой ситуации лежит не в научно-технической сфере, а в сфере разума, человеческой этики и медицины психических расстройств.

II. Важнейшим источником энергии на Земле, источником самой жизни является Солнечная энергия. Именно она обеспечивает циркуляцию воздушных и океанических масс и формирует климат Земли. За счет процессов фотосинтеза атмосфера пополняется кислородом и освобождается от избытков углекислого газа. В результате фотосинтеза зеленая масса растений накапливает углеводы и другие органические вещества, являющиеся базовой пищей (источником энергии) для всего живого. Другими словами, именно Солнечная энергия обеспечивает круговороты вещества по геохимическому и биогеохимическому циклам. До недавнего времени все виды энергии, которые были доступны человеку, представляли собой трансформированную Солнечную энергию: прямой обогрев, энергия ветра, текущей воды, топлива, пищи, электричества полупроводниковых солнечных батарей. Энергия каменного угля, нефти, природного газа – это вся та же Солнечная энергия, запасенная прежними биосферами, интенсивно

¹ Н.Н. Моисеев, В.В. Александров, А.М. Тарко. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М., 1985.

В.П. Пархоменко, А.М. Тарко. Ядерная зима. Ж. Экология и жизнь, №4, 2000.

Э. Дж. Холл. Радиация и жизнь. М., «Медицина», 1989, 256 с.

расходуемая человечеством. Запасы этой энергии в масштабе времени существования человечества являются невосполнимыми, и мы успешно эти запасы проедаем.

Заметим, что все ускоряющееся «проедание» имеет историческую и «научную» основу, опирающуюся на мировоззрение основоположников классической политэкономии А. Смита и Д. Рикардо. В этом мировоззрении представление о бесконечности мира преломилось в постулат о неисчерпаемости природных ресурсов. Поэтому природные ресурсы были исключены из рассмотрения классической политэкономией как некая «бесплатная» мировая константа, экономически нейтральный фон хозяйственной деятельности. В частности, Д. Рикардо утверждал, что *«ничего не платится за включение природных агентов, поскольку они неисчерпаемы и доступны всем»*.

Сходные представления сохранились и в политэкономии К. Маркса. Вот некоторые из его формулировок: *«Силы природы не стоят ничего; они входят в процесс труда, не входя в процесс образования стоимости»*.² *«Производительно эксплуатируемый материал природы, не составляющий элемента стоимости капитала – земля, море, руды, леса и т.д. В процесс производства могут быть включены в качестве более или менее эффективно действующих агентов силы природы, которые капиталисту ничего не стоят»*.³

Не приходится удивляться, что в нашей стране с ее огромной, далеко не освоенной территорией и богатыми природными ресурсами в общественном сознании значительной части населения (включая политиков) продолжает доминировать порочная идея *«на наш век хватит»*.

Умное овладение человеком внутриядерной энергией «Мирного Атома» может коренным образом изменить ситуацию. Во-первых, человеческая цивилизация получает доступ к принципиально новому, практически неисчерпаемому на исторически обозримый период времени источнику энергии. Во-вторых, у человечества появляется отсрочка, реальный шанс изменить вектор своего развития – перейти из режима грабительского разрушения среды своего обитания, в режим *«Sustainable development»* – режим устойчивого развития, на необходимость чего неоднократно обращали внимание В.И. Вернадский⁴ и Н.Н. Моисеев⁵. Именно эта идея заложена в «Повестке на XXI век» ООН.

В.И. Вернадский
Н.Н. Моисеев



Непрерывное развитие творческого потенциала человечества и есть та обратная связь, которая делает человека → Человеком. Сложность и противоречивость – это черта, имманентно присущая научно-техническому и иному прогрессу на всех его этапах. Без него нет возможности решить материальные и социальные проблемы, но одновременно он вносит новые трудности и опасности, к которым приходится адаптироваться человеку: познавать их не только теоретически, но и минимизировать практически, понижая их вероятность. Ведь абсолютная безопасность не достижима не только практически, но и теоретически. Приведем по этому поводу высказывание Н.Н. Моисеева: *«Риск и опасности в развитии*



² К. Маркс, Ф. Энгельс. Соч. 2-е изд., т.47, с. 498

³ К. Маркс, Ф. Энгельс. Соч. 2-е изд., т.24, с. 399

⁴ В.И. Вернадский. Биосфера и ноосфера. М., 1989.

⁵ Н.Н. Моисеев. Судьба цивилизации. Путь Разума. М., 1998.

цивилизации были, есть и будут. И нам придется приучить себя к мысли о необходимости жить под этим бременем. Но это означает лишь одно: человечеству необходимо научиться предельно снижать этот риск и опасности».

«Нулевой» риск возможен лишь в системах, лишенных запасенной энергии, химически и биологически активных компонентов. Рост концентрации энергонасыщенных предприятий увеличивает вероятность аварий. Неудачное соседство предприятий увеличивает опасность и возможный ущерб (эффект «домино»).

Современное общество не способно удовлетворить свои материальные и духовные потребности (т.е. свою безопасность в социально-экономической области) без увеличения масштабов производства, сопровождающегося увеличением техногенного воздействия на биосферу. С другой стороны, оно вынуждено охранять биосферу (т.е. обеспечивать свою экологическую безопасность), поскольку от состояния последней зависят и эффективность производства, и комфортность условий жизни людей, их здоровье, да и сама возможность существования человека и жизни на Земле. Иными словами, развитие производства, направленное на повышение материального уровня жизни, одновременно ведет к появлению разнообразных видов техногенной опасности, как для здоровья человека, так и для состояния окружающей его среды. На устранение этих опасностей необходимо расходовать определенную долю материальных ресурсов общества, которые, независимо от того, велики они или малы – все равно **ограничены!**

В действительности затраты на создание систем технической безопасности промышленности составляют значительную долю материальных ресурсов общества и отвлекаются из социальной сферы. В этих условиях значение приобретает проблема оптимизации затрат, т.е. обеспечение максимально возможной социальной выгоды при приемлемом (минимальном) риске.

Какой уровень безопасности (риска) считать приемлемым, определяется технологическим, экономическим, социальным и культурным развитием общества, его историей, традициями и эмоционально-психологическим настроем. Не удивительно, что одни виды рисков являются настолько привычными и само собой разумеющимися, что на них до момента наступления аварии, несчастного случая или заболевания попросту не обращают внимания, хотя они весьма тяжелы. Сюда относятся дорожно-транспортные инциденты, неосторожное поведение на водоемах или обращение с огнем, курение, злоупотребление алкоголем и многое другое. Напротив, другая группа рисков, последствия которых значительно ниже и затрагивают ограниченные группы населения, вызывают у сообщества активное и эмоциональное неприятие⁶. В частности, в этот разряд попадают ядерные технологии и ядерная энергетика.

Если для страны главным риском оказывается риск внешнего вторжения, то основные средства вкладываются в обороноспособность. Что при этом происходит с социальной сферой, пояснений не требует. Наш народ об этом знает не понаслышке. Именно так мы победили в ВОВ, именно так был создан ракетно-ядерный щит страны в период холодной войны, именно поэтому нам не хватало средств не только на снижение рисков социально-экономических, но и рисков техногенных. Стоит ли удивляться, что в экстремальных условиях оборонные проблемы решались любой ценой, что приводило не

⁶ M. Granger Morgan. Risk Management should be about Efficiency and Equity. //FEATURE. 2000. V.34, Issue 1, pp. 32 A - 34 A.

И.И. Кузьмин. Безопасность и техногенный риск: системно-динамический подход. // ЖВХО им. Д.И. Менделеева, 1990, т. 35, №4, с. 415-420.

В.М. Жуковский Научно-технический прогресс и проблемы цивилизации (радиоактивность). Изв. Уральского гос. Ун-та «Проблемы образования, науки и культуры», Екатеринбург. Выпуск 12, №23, 2002, с. 22-32.

только к тяжелым условиям труда, но и к чрезвычайным рукотворным ситуациям, затрагивающим гражданское население. Именно так, в первые (1949–1951 гг.) функционирования ПО МАЯК были осуществлены сбросы высокорadioактивных отходов в реку Теча. Там же в 1957 г при разгерметизации емкости со средне активными растворами (тепловой взрыв) образовался пресловутый ВУРС – Восточно-Уральский радиоактивный след. Нештатные ситуации реализовывались при проведении ядерных испытаний, мирных подземных ядерных взрывов, запусках ракет и во множестве иных случаев, не обязательно напрямую связанных военной проблематикой.

Свой весомый вклад вносили энергетика, химическая промышленность, металлургия, добыча полезных ископаемых, все виды транспорта и многое другое. Огромный резонанс, как в нашей стране, так и во всем мире имела авария на ЧАЭС (1986).

Негативный фон всегда создавали и создают секретность, закрытость информации, которые плодят невероятные слухи и домыслы. Информация должна быть достоверной и компетентной. Но это предполагает наличие компетентности как у публичных политиков и представителей средств массовой информации, так и у широких кругов населения. Повседневное и неизбежное внедрение в нашу жизнь все новых результатов научно-технического прогресса требует повышения образованности, общей культуры и персональной ответственности каждого члена сообщества. В эпоху ядерной энергетики и электроники, не отрицая самых высоких требований к технике, все же высшая ответственность лежит на человеке. Его умение творчески мыслить, глубокие знания, его психологическая готовность к сложным ситуациям (или трагическая неготовность к ним) в критический момент оказываются решающими. Заметим, что значительное число техногенных аварий связано с ошибками персонала. Последствия этих ошибок, как показывает опыт ЧАЭС, оказываются тем тяжелее, чем более высокоэнергоемкие технические агрегаты и устройства. По мнению международной экспертизы *«...причиной аварии были совершенно невероятные как мы считаем, ошибки, допущенные операторами АЭС»*⁷. Наиболее тяжелые последствия для всего сообщества в целом несут ошибки, совершаемые в верхних структурах управления, особенно, если они замешаны на недостаточной компетентности и избыточных политических спекуляциях.

Открытость информации в системах МЧС и Минатома делает первые, но все еще робкие шаги. Однако еще 10 лет назад мы вряд ли могли почитать в официальных документах такие оценки: *«За 30 последних лет в нашей стране от аварий, катастроф и стихийных бедствий пострадало более 10 млн. человек, из них погибло более 600 тыс. человек. Суммарный экономический ущерб за этот период сопоставим со среднегодовым валовым внутренним продуктом (ВВП) России... Средний уровень индивидуального риска для населения России на два порядка превышает допустимый уровень, принятый в развитых странах мира. Однако условия для анализа и управления риском ЧС, перехода к нормированию допустимого риска и снижению на этой основе индивидуального риска в стране пока еще не созданы»*⁸.

Как ни парадоксальным это может показаться некоторым читателям, но именно в атомной отрасли проблемы оценки рисков проанализированы и осознаны наиболее глубоко.

Прежде всего, здесь принята т.н. «беспороговая» концепция – во внимание принимаются любые, самые малые дозы ионизирующих излучений, получаемые человеком в результате какой-либо деятельности. Такой консервативный подход (принцип – «Не навреди!») изначально предполагает, что оценки радиационного риска делаются с большим запасом прочности, тогда как в реальности риск будет намного меньше. Данные

⁷ Генеральный директор МАГАТЭ Х. Бликс. Беседа с корр. газеты «Правда» 14.04.87.

⁸ ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в РФ до 2005 года».

НКДАР – Научного комитета по действию атомной радиации при ООН, накопленные в результате 50 лет медицинских наблюдений за более чем 1 млн. человек во всем мире, не выявили вредного воздействия малых доз. Это и не удивительно, ибо любой человек постоянно подвержен действию внешнего облучения от естественного (природного) радиационного фона: космического излучения, излучения радионуклидов земной коры и внутреннего облучения природными радионуклидами (^{14}C , ^{40}K), вовлеченных в биохимические обменные процессы.

Между тем, нормирование рисков «более привычных» загрязнений воздуха, воды и почв техногенными химическими выбросами базируется на принципе ПДК – (предельно допустимых концентраций), который учитывает токсикологические и иные негативные воздействия. Причем нормируется около 2000 видов химических загрязнений! Казалось бы, это должно приводить к более низким значениям ПДК. Однако, по данным Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН⁹, химические риски с теоретически одинаковой вредностью (на уровне ПДК) для многих химических загрязнителей проявляют канцерогенные эффекты на 1 - 2 порядка выше и более, чем риски, связанные с хроническим облучением населения на уровне 1 мЗв, а в ряде случаев находятся на неприемлемом уровне. Множественность видов химических загрязнений усугубляет картину: контролировать необходимо все возможные выбросы, ибо все они создают потенциальные риски; одновременное присутствие нескольких загрязнений на уровне ниже ПДК, как минимум, создают аддитивный эффект, а в ряде случаев существенно усиливают негативное воздействие на живые организмы (явление синергизма). Следовательно, приходится учитывать всю совокупность из множества техногенных рисков, выделяя из них наиболее существенные.

Проблема объективной и сопоставленной оценки риска различных видов человеческой деятельности с использованием их в регулировании хозяйственной деятельности является проблемой государственной важности. Нравится нам или нет, но цели приходится ранжировать. Получить «все и сейчас» не удастся. Необходим глубокий систематический анализ. Просто разрозненных фактов для принятия решений недостаточно. Поэтому выбор приоритетных целей в поиске решений является отнюдь не тривиальной задачей. С течением времени, с учетом экономических возможностей и настроения общества они должны уточняться и изменяться. На ближайшие столетия атомной энергетике нет альтернативы¹⁰. И не следует прятать голову в песок. Пока только этот энергетический источник способен повернуть человечество в режим «*Sustainable development*», если для этого у человечества хватит Коллективного Разума и Коллективной Воли.

Использование радиации в промышленности и медицине со всей очевидностью приносит пользу обществу, но нельзя и отрицать, что искусственные источники излучения постоянно повышают природный радиационный фон. Поэтому человечество всегда стоит перед дилеммой выбора соотношения «польза – вред». В природе, несомненно, действует принцип, сформулированный Б. Коммонером¹¹: «*Ничто не дается даром. За все приходится платить*».

⁹ Л. Большов, Р. Арутюнян, И. Линге, О. Павловский. О роли радиационных факторов в экологических рисках для населения России, Ч.1 и Ч.2. Публикация от 15-10-2001 20:01 <http://daily.sec.ru/> Смотреть раздел: **Промышленная и экологическая безопасность**

¹⁰ Е.П. Велихов. Энергетика XXI в. и Россия // Энергия. Экономика. Техника. Экология. 1999. № 12. С. 2-9.
П.Н. Алексеев, А.Ю. Гагаринский, Н.Н. Пономарев-Степной, В.А. Сидоренко. Требования к атомным станциям XXI в. // Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 1. С. 3-14.

¹¹ Б. Коммонер. Замыкающийся круг. Природа, человек, технология. Л., Гидрометиздат, 1974, с.279.

Цивилизация в своем развитии постоянно вовлекает в сферу производства все новые достижения. Важно, чтобы человек умел отличать желательные достижения прогресса, от нежелательных, и умел последние элиминировать. Адаптация к новым реалиям должна осуществляться динамично, но без суеты: ответственно, компетентно, с принятием всех мер безопасности, в режиме открытости и полной информированности общества.

Для сведения читателя сообщаю, что наиболее полные сведения о воздействии ионизирующих излучений приведены в материалах Доклада Международного Научного Комитета по воздействию атомной радиации (НКДАР ООН) для Генеральной Ассамблеи ООН [Report of the United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly (2000)].¹²

¹² Report of the United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly (2000). Все материалы выставлены в ИНТЕРНЕТ.

Лекция 2. ОТКРЫТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ И РЕВОЛЮЦИЯ В ФИЗИКЕ

Содержание науки можно постигать и анализировать, не вдаваясь в рассмотрение индивидуального развития ее создателей. Но при таком односторонне-объективном изложении отдельные шаги иногда могут казаться случайными удачами. Понимание того, как стали возможными и даже необходимыми эти шаги, достигается лишь в том случае, если проследить за умственным развитием отдельных людей, содействовавших выявлению направления этих шагов.

А. Эйнштейн

Период с конца XIX и начала XX веков ознаменовался крупнейшими научными открытиями, которые получили название «революции в физике» и сыграли исключительную роль в дальнейшем развитии всей человеческой цивилизации.

Прежде всего, это открытие В.К. Рентгеном¹ в 1895 году таинственных невидимых Х-лучей, проникающих через разнообразные твердые вещества и



биологические ткани, вызывающих флюоресценцию стеклянных разрядных трубок и многих веществ (в то время предпочитали термин «фосфоресценция»). Оно вызвало колоссальный интерес у научной общественности и широких слоев населения. Во всех физических лабораториях мира выполнялись разнообразные эксперименты по поиску источников излучения невидимых Х-лучей (рис. 2.1).



Рис.2.1. Первый рентгеновский снимок

Вильгельм Конрад Рентген



В 1896 году французский ученый А. Беккерель² в поисках других источников излучения таинственных лучей систематически исследовал фосфоресценцию, унаследовав интерес к этому явлению от отца и деда, которые также были известными физиками.

Антуан Анри Беккерель

В его распоряжении оказался чистый образец двойной сернистой соли урана и калия, которым еще его отец пользовался при исследованиях флуоресценции под действием солнечного света.

¹ Вильгельм Конрад Рентген (1845-1923) немецкий физик, профессор Вюрцбургского университета, открыл Х- (рентгеновские) лучи 8 ноября 1895 года, сообщил об открытии научной общественности 22 декабря 1895 года. Первый Нобелевский лауреат по физике (1901).

² Антуан Анри Беккерель (1852-1908) французский физик, открывший естественную радиоактивность урана и его химических соединений в феврале-марте 1896 года. Нобелевская премия по физике (1903).

Пытаясь открыть какую-либо связь между рентгеновскими лучами и люминесценцией этой соли урана, Беккерель завернул фотографическую пластинку в черную бумагу, расположил над бумагой тонкий кристалл соли и затем поместил все это устройство на солнечный свет. После проявления фотографической пластинки оказалось, что она почернела, т.е. соль урана испускала излучение, которое могло проникать через бумагу. Эти лучи были способны проходить через тонкие слои алюминия и меди и после этого все еще вызывать почернение фотографической пластинки. Беккерель изначально считал, что соль урана испускает лучи в результате облучения светом. Высказанная гипотеза оказалась неверной. Однако, благодаря непредвиденному обстоятельству, он сделал открытие, которое сыграло революционную роль в науке.

Приведем отрывок из записок самого Беккереля за начало 1896 г: *«Некоторые из опытов были подготовлены в среду 26 февраля и в четверг 27 февраля, но так как в эти дни солнце светило не все время, а с промежутками, то я не стал проводить подготовленные эксперименты, и положил пластинки обратно в темный ящик..., оставив кристаллы урановой соли в том же положении. Так как в следующие дни солнце опять не показывалось, я проявил пластинки 1 марта, ожидая получить очень слабые изображения. В противоположность этому получились очень интенсивные силуэты... Гипотеза, которая приходит... на ум, заключается в предположении, что эти излучения [испускаемые урановой солью]... подобны невидимым лучам, испускаемым фосфоресцирующими [флуоресцирующими?] веществами, с той лишь разницей, что длительность этого излучения бесконечно больше длительности видимых излучений, испускаемых такими телами».* Таким образом, Беккерель показал, что урановая соль испускает излучение, даже не будучи подвергнута действию солнечного света. Обнаруженное излучение, подобно рентгеновским лучам, способно проходить сквозь вещества, непрозрачные для обычного света, засвечивать фотографическую пластинку, ионизировать воздух и не затухает неопределенно долгое время.

Так было открыто замечательное явление, которому Мария Кюри дала в 1898 г название *радиоактивности*.

Выяснив, что излучение урана подобно рентгеновским лучам способно проходить сквозь вещества, непрозрачные для обычного света и засвечивать фотографическую пластинку, Беккерель захотел проверить, способно ли это излучение, подобно рентгеновским лучам, ионизовать воздух.

Для этой цели он воспользовался электроскопом с золотыми лепестками, который в своей простейшей форме состоит из короткого вертикального металлического стержня с металлическим шариком или пластинкой на верхнем конце. К нижнему концу стержня прикреплены две маленькие прямоугольные золотые полоски, висящие вертикально. Стержень помещается в ящик из материала, не проводящего электрический ток. Ящик служит для защиты тонких золотых полосок от токов воздуха.

Если шарiku или пластинке сообщить электрический заряд, он перейдет через металл к золотым листкам. Так как последние несут теперь заряды одного и того же знака, они немедленно оттолкнутся друг от друга, образуя перевернутую букву V (рис.2.2).

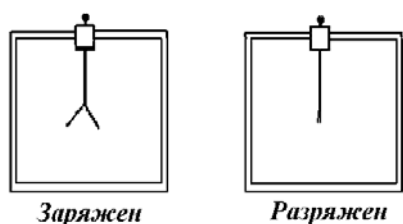


Рис.2.2. Электроскоп

Если воздух вокруг ионизован тем или иным способом, то он становится электрическим проводником, и благодаря этому с листков может происходить утечка заряда. Электроскоп разряжается, отталкивание прекращается, и листки возвращаются в свое

первоначальное вертикальное положение. Беккерель заметил, что урановая соль, поднесенная к заряженному электроскопу, заставляет последний разряжаться. Таким образом, лучи урана обладают свойством ионизовать вокруг себя воздух.

Вслед за открытием Беккереля вскоре последовала идентификация других радиоактивных элементов. Супруги Мария и Пьер Кюри в 1898 году установили, что природные минералы урана и тория вызывают существенно более сильную ионизацию воздуха, чем чистый уран и его синтетически полученные соли. Ими была высказана гипотеза, что минералы содержат другие радиоактивные элементы. Гипотеза нашла блестящее экспериментальное подтверждение.

Химически разделяя компоненты урановой руды (уранинит или смоляная обманка – $x\text{UO}_2 \cdot y\text{U}_3\text{O}_8$), они выделили два ранее неизвестных элемента, которые назвали: Po (полоний – от лат. Polonia – Польша) и Ra (радий – от лат. radius – луч)³. К 1902 году М. Кюри получила 0,1 г почти чистого хлорида радия, обладающего радиоактивностью, которая приблизительно в 3 млн. раз превышала радиоактивность урана. Распад радия сопровождается выделением тепловой энергии (≈ 550 Дж/г·час). В настоящее время известны радиоактивные изотопы практически всех элементов. Некоторые из них встречаются в природе. Другие – получаются при различных ядерных превращениях и процессах распада иных радиоактивных элементов.



Мария и Пьер Кюри в лаборатории

Отступление (Слово о радии): Радий как радиоактивный химический элемент, сыграл огромную роль в истории научного познания. Систематическое изучение и широкое использование радиоактивных свойств радия способствовало формированию и развитию фундаментальных представлений о внутреннем строении ядра атомов, пониманию сущности процессов ядерных превращений и выявлению областей возможных прикладных применений радиоактивных веществ в различных сферах человеческой деятельности. Тонкие химические методы (по существу методы препаративной химии), разработанные при выделении микро количеств радия

из значительных объемов руд сложного состава, легли в основу методов современной радиохимии и химической технологии радиоактивных веществ. Именно благодаря радия впервые было обнаружено мощное воздействие радиоактивных излучений на живые организмы, приводящее, в одних случаях, к серьезным лучевым поражениям, а в других – способствующее излечиванию некоторых тяжелых заболеваний. До конца 40-х гг. радий и некоторые его дочерние продукты оставались единственными препаратами, на базе которых изготавливались лабораторные источники ионизирующих излучений. С их помощью были сделаны открытия, сыгравшие определяющую роль в развитии ядерной физики.

³ Пьер Кюри (1859-1906) французский физик, Мария Склодовская-Кюри (1867-1934) физик и химик – по национальности полька, работала во Франции. Нобелевская премия по физике (1903). М. Кюри – дополнительно Нобелевская премия по химии (1911) за получение металлического Ra и изучение его свойств. Ей принадлежит открытие еще одного радиоактивного элемента – полония (Po).

Работами супругов Кюри, Эрнста Резерфорда⁴ и Поля Виллара (1899-1900) было показано, что испускаемое радиоактивными веществами излучение по своей природе неоднородно и подразделяется на три типа излучений, которые обозначили буквами греческого алфавита: α , β , γ .

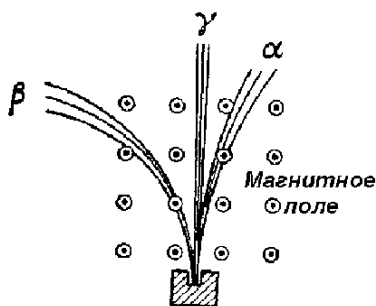


Рис.2.3. Схема распространения α -, β - и γ -излучений в магнитном поле.

Характеристика излучений выглядит следующим образом:

- α -излучение представляет собой поток положительно заряженных частиц, являющихся ядрами атома гелия (${}^4_2\text{He}^{2+}$);
- β -излучение является потоком отрицательно заряженных частиц e^- (электронов);
- γ -лучи – электромагнитное излучение, похожее на рентгеновское, но более жесткое (обладающее более высокой энергией).

Все три типа излучения могут действовать на фотографическую пластинку и оказывать ионизирующее воздействие на вещества. Эти воздействия неодинаковы: α -частицы имеют слабую проникающую способность, полностью поглощаясь несколькими листами бумаги, однако способны производить заметную ионизацию газов, через которые они проходят; β -частицы обладают гораздо большей проникающей способностью – чтобы поглотить их, требуется несколько миллиметров алюминия, но их ионизирующая способность значительно меньше; наконец, γ -излучение обладает очень высокой проникающей способностью, иногда их не удается полностью поглотить даже несколькими сантиметрами свинца, однако при прохождении через воздух они производят относительно меньшую ионизацию.

Большая часть естественных радиоактивных элементов испускает или α -частицы, или β -частицы. В некоторых случаях испускание этих частиц сопровождается испусканием γ -лучей. По существу природа излучения определенного типа (α -, β - или γ) одинакова, независимо от их происхождения. Однако специфические свойства излучений, например скорости частиц, их энергия, проникающая и ионизирующая способности и длины волн зависят от того, каким радиоактивным элементом они испускаются.

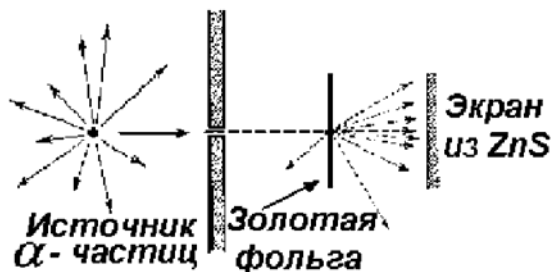
Наиболее значительный вклад в раскрытие сущности явления радиоактивности внесли работы Э. Резерфорда и многочисленных сотрудников его лаборатории. Именно благодаря их исследованиям была впервые раскрыта внутренняя структура атома и выявлена природа основных частиц, из которых построены ядра атомов.

Принципиально новая информация была получена при изучении рассеяния α -частиц на тонких фольгах различных материалов (рис.2.4.) Э. Резерфорд и его сотрудники Э. Марсден и Г. Гейгер бомбардировали тонкую золотую фольгу пучком положительно заряженных α -частиц, испускаемых радиоактивным полонием. Регистрация α -частиц проводилась с помощью флуоресцирующего экрана из сернистого цинка. Большинство

⁴ Эрнест Резерфорд (1871-1937) английский физик, один из создателей учения о радиоактивности. Открыл альфа- и бета-лучи и установил их природу. Создал (1903 г., совместно с Ф. Содди) теорию радиоактивности. Предложил (1911) планетарную модель атома. Осуществил (1919) первую искусственную ядерную реакцию. Предсказал (1921) существование нейтрона. Директор Кавендишской лаборатории (с 1919). Нобелевская премия (1908).

частиц (более 99%) проходили сквозь пластинку практически без отклонения, малая часть подвергалась действию отклоняющей силы на разные углы, а в редких случаях (1 частица из 100 тыс.) – даже поворачивали обратно (т.н. обратное рассеяние).

Рис.2.4. Схема опыта Резерфорда.



Существовавшая к началу XX в. модель атома Томсона предполагала равномерное распределение положительных зарядов в атоме и не могла объяснить таких отклонений. Для объяснения нужно было допустить, что положительные заряды сконцентрированы в очень малом объеме. Тогда α -частицы проходили бы через золотую пластинку без отклонений, кроме тех частиц, которые

оказались близки к такому сконцентрированному положительному заряду. Отклонение α -частиц могло происходить только в случае, если масса носителя заряда соизмерима с массой α -частиц. Масштаб отклонений показывал, что масса носителя заряда существенно больше массы α -частиц. Эффект обратного рассеяния α -частиц был обнаружен в 1909 г. Резерфорд постулирует, что положительный заряд сосредоточен в центре атома, в пределах очень малой области, которую он позднее (в 1912 г) назвал *ядром*. Но что собою представляло ядро, оставалось открытым.

Несколько ранее, при исследовании разрядных трубок с металлическим катодом в виде диска с отверстиями В. Гольдштейн (Германия, 1886 г) обнаружил светящиеся лучи, выходящие из отверстий в сторону, удаленную от анода (рис.2.5) и распространяющиеся прямолинейно.



Рис.2.5. Разрядная трубка

Первоначально эти лучи были названы канальными лучами, т.к. они проходили через отверстия или каналы в катоде. Собирая эти лучи с помощью цилиндра Фарадея, Ж. Перрен в 1895 г показал, что они связаны с

положительным зарядом. Последнее (1898 г) было подтверждено В. Вином, изучившим их отклонение в электрическом и магнитном полях. Чуть позже (1907 г) Дж. Дж. Томсон предложил более подходящее название – «положительные лучи», которое и стало общепринятым.

В результате многолетних исследований было установлено, что самой легкой из наблюдаемых положительных частиц (которую Э. Резерфорд в 1914 г называл «*так долго отыскиваемом положительном электроном*») имела массу, как атом водорода, а заряд равный по величине, но противоположный по знаку заряда электрона. Другими словами, в действительности это был однократно заряженный положительный ион водорода H^+ , примерно в 1836 раз более тяжелый по сравнению с массой электрона. Он был назван *протоном* (символ p) и является важной составной частью ядер всех других атомов.

Теорию радиоактивного распада и закон радиоактивных превращений разработали и сформулировали Эрнст Резерфорд и Фредерик Содди⁵. Ими показано, что как α -распад, так и β -распад сопровождаются превращением одних химических элементов в другие.

Другими словами, открытие радиоактивности привело к коренным изменениям в научном мировоззрении:

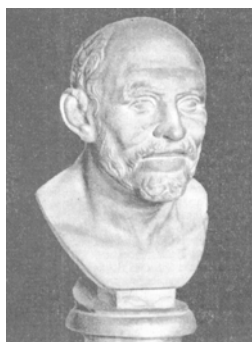
- Представление о неделимости атомов, существовавшее со времен греческого философа Демокрита (около 460-370 гг. до н. э.), оказалось неверным. Выяснилось, что атомы в действительности имеют сложное внутренне строение.

- Потерпело крушение и представление о неизменяемости химических элементов. Оказалось, что химические элементы могут превращаться один в другой или самопроизвольно, или под действием внешних физических факторов. Удалось даже осуществить синтез новых элементов, отсутствующих в природе.

- Выявлена генетическая связь между отдельными химическими элементами, которая объединила химическую материю Вселенной.

- Открыт принципиально новый источник атомной энергии, который нашел применение, как в военной, так и гражданской сферах.

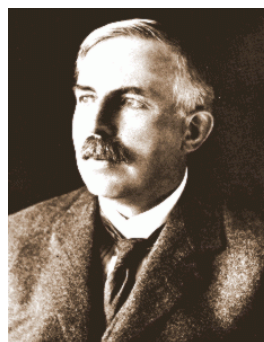
- Следствием установления внутренней структуры атома и природы элементарных частиц явилось создание принципиально новых теорий и математического аппарата (квантовая механика, теория относительности и др.), стало понятным единство и закономерности взаимопревращений вещественной и полевой форм материи (знаменитая формула Альберта Эйнштейна⁶ $E=mc^2$).



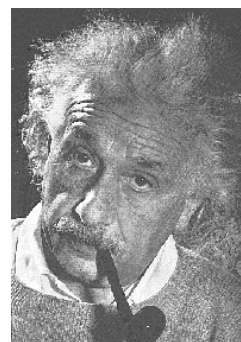
Демокрит.



Фредерик Содди.



Эрнст Резерфорд.



Альберт Эйнштейн.

Впечатляющим примером действия принципа единства Мира является общность взглядов на строение материи, используемых специалистами в области микромира ядерной физики, и химиками, работающими с макросистемами.

В 1869 г. Д.И. Менделеев построил систему элементов (тогда было известно всего 63 элемента!), расположив их в порядке возрастания атомной массы (обозначается символом A), и поместив друг под другом элементы с одинаковыми физическими и химическими

⁵ Фредерик Содди (1877-1956) английский физик и химик, совместно с Э. Резерфордом создал теорию радиоактивности, сформулировал правило смещения при α - и β - распадах. Нобелевская премия по химии (1921).

⁶ Альберт Эйнштейн (1879-1955) выдающийся физик-теоретик, один из создателей современной физики, создатель специальной и общей теории относительности, в корне изменившим представления о пространстве, времени и материи. Нобелевская премия (1921). Внес значительный вклад в различные отрасли науки. Член многих академий и научных обществ.

свойствами. Порядковый номер элемента в этой системе обозначается символом Z и называется «атомным номером».

Таблица Менделеева состояла из восьми столбцов и шести строк. Отметим несколько смещений в порядке атомных масс: аргон ($A=39,9$) имеет $Z=18$, в то время как калий ($A=39,1$) имеет $Z=19$. Кроме того, кое-где в последовательности элементов пришлось сделать пропуски для того, чтобы элементы с одинаковыми свойствами можно было поместить друг под другом. Эта система послужила основой Периодической таблицы элементов, которая с некоторыми уточнениями и дополнениями применяется и сегодня.



Д.И. Менделеев

Опыты Резерфорда показали, что атомный номер A значит гораздо больше, чем просто номер элемента в классификации элементов по порядку возрастания атомной массы. Действительно, проведя математический анализ траекторий α -частиц, отклоняющихся при прохождении через металлические пластинки, Резерфорд смог вычислить заряд ядра некоторых элементов. Он показал, что положительный заряд ядра, выраженный в элементарных зарядах, равен числу протонов атома и соответствует положению, которое элемент занимает в периодической системе. Например, элемент с порядковым номером $Z=23$ (это ванадий) имеет 23 протона в ядре. Столько же электронов размещается на электронных орбиталях, что делает атом в целом электронейтральным. Классификация, основанная на заряде ядра, снимает смещения, наблюдаемые при классификации по возрастанию атомной массы.

Не менее интересным является факт, что атомная масса (или массовое число) элемента может быть больше, чем это обеспечивает число протонов в ядре.

Следовательно, ядра элементов, стоящих за водородом, должны содержать нейтральные частицы, практически равные по массе атому водорода. Такие частицы были названы *нейтронами* (символ n). Экспериментально нейтрон был открыт в 1932 г Дж. Чадвиком при воздействии α -частиц на металлический бериллий.



Джеймс Чадвик

Ранее первое искусственное ядерное превращение атомов одних химических элементов в другие (трансмутация) в результате взаимодействий их ядер, было осуществлено (Резерфорд, 1919 г) при облучении азота α -частицами: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ({}^{18}_9\text{F}) \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$.

Здесь ${}^1_1\text{H} \equiv p$, а $({}^{18}_9\text{F})$ – промежуточное, нестабильное т.н. «компаунд-ядро». Краткая запись: ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$.

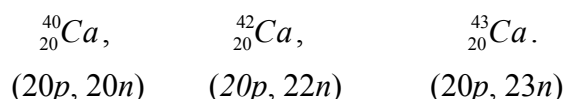
Реакция Чадвика: ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$ – долгое время служила лабораторным источником получения нейтронов.

В результате между атомной массой элемента A , числом протонов в ядре Z и числом нейтронов N реализуется простое, но важное соотношение $A = Z + N$, позволяющее составлять материальные балансы при радиоактивных распадах и любых ядерных превращениях.

Но каково научное прозрение Д.И. Менделеева! При неполноте и частичной ошибочности информации, ничего не зная об атомном ядре, протонах и нейтронах он

создал Периодический Закон, предсказал существование 12 неизвестных на тот момент элементов и описал их важнейшие свойства! Человеческий интеллект способен творить чудеса!

В современной записи символ некоторого элемента A_ZEl , выглядит следующим образом: пишется его символ, слева внизу – порядковый номер, а сверху – атомная масса. Например, символ кальция: ${}^{40}_{20}Ca$. Позднее выяснилось, что атомы одних и тех же элементов ($Z=const$) могут несколько отличаться по массам. Такие атомы были названы *изотопами*. Изотопы одного элемента характеризуются практически неразличимыми химическими свойствами и весьма близки по физическим свойствам, отличия вызваны малыми несовпадениями по массам. Пример изотопов:



К настоящему времени явление радиоактивности обнаружено более чем у 1000 изотопов различных элементов. При их распаде в дополнение к частицам, рассмотренным ранее, могут излучаться: протоны p – ядра водорода (1_1H)⁺; нейтроны n – нейтральные частицы с массой протона; позитроны e^+ – частицы, подобные электрону, но имеющие положительный заряд; некоторые другие частицы.

В итоге, Резерфорд предложил следующее строение атома: с одной стороны, ядро, состоящее из протонов и нейтронов, в котором сконцентрированы масса и положительные заряды; с другой стороны, электроны, вращающиеся в периферийной зоне, на значительном расстоянии от ядра. По Резерфорду, атом напоминает солнечную систему в миниатюре. (Заметим, что по современным представлениям, электроны не находятся на строго детерминированных орбитах, подобно планетам, а по вероятностным законам распределяются вокруг ядра по некоторым областям пространства, называемых орбиталями). Оценка размеров ядра атома дала следующий результат: его диаметр равен приблизительно 10^{-12} см, тогда как диаметр атомов порядка 10^{-8} см. Приведем более наглядный пример. Если представить, что атом увеличен до размера баскетбольного мяча (~ 30 см в диаметре), то ядро имело бы размер $\sim 0,003$ см. Таким образом, значительную часть объема атома как бы составляет «пустота». Фундаментальный опыт Резерфорда не только позволил обосновать модель атома, но и выявил исключительную роль «атомного номера» элементов.

Почему же одни ядра устойчивы, а другие – нет? Замечено, что ядра, содержащие 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82 протона или нейтрона и 126, 152 нейтрона, особенно стабильны. Предполагается, что эти «магические числа» тяжелых частиц ядра (нуклонов) соответствуют завершенным ядерным слоям и подслоям. «Магическими» ядра могут быть: по числу протонов; по числу нейтронов; как по числу протонов, так и по числу нейтронов («дважды магическими»). К дважды магическим относятся ядра гелия ${}^4_2He(2p, 2n)$, кислорода ${}^{16}_8O(8p, 8n)$, кремния ${}^{28}_{14}Si(14p, 14n)$, кальция ${}^{40}_{20}Ca(20p, 20n)$ и свинца ${}^{208}_{82}Pb(82p, 126n)$. Магическими (по числу протонов), являются никель ${}^{28}_{28}Ni$, олово ${}^{50}_{50}Sn$. По числу нейтронов, – стронций ${}^{88}_{38}Sr(38p, 50n)$, цирконий ${}^{90}_{40}Zr(40p, 50n)$, барий ${}^{138}_{56}Ba(56p, 82n)$, лантан ${}^{139}_{57}La(57p, 82n)$, церий ${}^{140}_{58}Ce(58p, 82n)$ и др. Элемент, с числом протонов в ядре равным одному из магических чисел, имеет больше изотопов, чем соседние с ним элементы (например, ${}^{50}_{50}Sn$ имеет 17 изотопов, а ${}^{82}_{82}Pb$ – 10). Ядра с числом нуклонов, стоящим непосредственно за магическим числом, особенно слабо связаны, т.е. склонны к радиоактивным распадам.

Явление повышенной устойчивости одних ядер и способность к радиоактивному распаду других было объяснено созданием оболочечной модели ядра (Мария Гепперт-Майер, 1948). Нуклоны (протоны и нейтроны) склонны формировать замкнутые оболочки (слои), соответствующие магическим числам. Поведение атомных ядер часто определяется избытком или недостатком нуклонов по сравнению с замкнутыми оболочками.

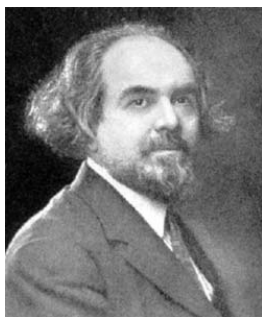
М. Гепперт-Майер



Вернемся на мгновение в начало XX века. Физики и химики Франции, Англии, Германии, США, России с увлечением получают все новые и новые экспериментальные данные о свойствах радиоэлементов, определяют скорость их распада, закономерности взаимопревращений и химического поведения, исследуют испускаемые радиоактивные излучения... А что же с осмыслением последствий этих открытий для человечества? Какое отражение они находят в умах передовых мыслителей и творческой интеллигенции, в том числе и в России? Во всех слоях российского общества – надежды на обновление жизни.

Культурным ренессансом после периода депрессии назвал это время русский мыслитель Николай Бердяев. *«Вместе с тем, – пишет он, – русскими душами овладели предчувствия катастроф... Поэты-символисты видели не только грядущие зори, но и что-то страшное, надвигающееся на Россию и мир...».*

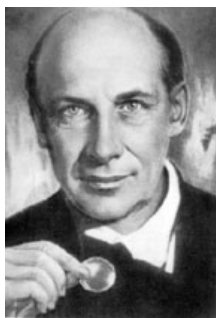
Н.А. Бердяев



И действительно, впереди была первая и вторая мировые войны, две революции, атомная бомба... (впервые в 1913 г этот термин использовал писатель-фантаст Герберт Уэллс). Предвидение атомной бомбы и связанные с ее применением огромные жертвы было высказано поэтом Андреем Белым (1921) в поэме «Первое свидание»:

*Мир рвался в опытах Кюри
Атомной лопнувшей бомбой
На электронные струи
Невоплощенной Гекатомбой*

Андрей Белый



С удовлетворением отметим, что в части всестороннего осмысления последствий фундаментальных открытий несомненные заслуги принадлежат выдающемуся российскому ученому В.И. Вернадскому⁷. Он поразительно быстро, сразу же за открытием явления радиоактивного распада атомного ядра, осознал все грандиозное значение этого шага в познании природы. Уже в 1910 г., выступая на собрании Российской академии наук, В.И. Вернадский говорил, что

⁷ Владимир Иванович Вернадский (1863-1945), академик (1912) основатель научных направлений по геохимии, биогеохимии, радиогеологии, профессор Московского и Санкт-Петербургского университетов, один из организаторов и председатель КЕПС (1915-1930). Первый президент АН Украины (1919). Организатор и директор Радиевого института (1922-1939), Биогеохимической лаборатории (с 1928) – ныне Институт ГЕОХИ РАН. Автор работ по философии естествознания, науковедению, создатель учения о биосфере и ее эволюции, о мощном воздействии человека на окружающую среду и превращении биосферы в ноосферу и др. работы.

обнаружение распада атомных ядер «...произвело огромный переворот в научном мировоззрении, вызвало создание новой науки, отличной от физики и химии, – учения о радиоактивности...».

Далеко не все его современники поняли, что «...самое понятие химического единства мира претерпевает глубочайшее изменение и расширение», что «... химические элементы оказались генетически связанными... частными случаями одного или нескольких радиоактивных процессов». Он первым увидел в радиоактивном распаде не только важнейший физический процесс, но и явление, охватывающее всю Вселенную, соединяющее и объединяющее ее части. Именно он одним из первых осознает последствия высвобождения внутриатомной энергии и, пожалуй, первым приходит к ошеломляющему выводу, которым делится с членами Академии наук: «...Теоретически мы сознаем неизбежность колоссального изменения условий человеческого существования, если только человек овладеет радиоактивными явлениями, хотя бы в той мере, в какой он овладел силой пара или электричества... Едва ли был в истории человечества момент, когда бы большие оправдывались затраты государственных средств в стадии предварительных исследований, чем в этой вновь открытой области науки. Ибо здесь характер открывающихся перед человечеством возможностей, в случае своего даже частичного осуществления, должен самым могущественным образом отразиться на общественной и государственной жизни».

«Благодаря открытию явлений радиоактивности мы узнали новый негаданный источник энергии... И в вопросе о радиии ни одно государство и общество не может относиться безразлично, как, каким путем, кем и когда будут использованы и изучены находящиеся в его владениях источники лучистой энергии. Ибо владение большими запасами радия даст владельцам его силу и власть, перед которыми может побледнеть то могущество, какое получают владельцы золота, земли и капитала... Теперь, когда человечество вступает в новый век лучистой – атомной – энергии, мы, а не другие должны знать, должны выяснить, что хранит в себе в этом отношении почва нашей родной страны».

Заметим, что далеко не все ученые ведущие ученые мира, изучающие явления радиоактивности, разделяли оптимизм В.И. Вернадского. В частности, в воспоминаниях об Э. Резерфорде английский ученый и литератор Ч. Сноу пишет, что в докладе на заседании Британской ассоциации (1933 г) Э. Резерфорд заявил: «Эти превращения атомов представляют исключительный интерес для ученых, но мы не сможем управлять атомной энергией в такой степени, чтобы это имело какую-нибудь коммерческую ценность, и я считаю, что вряд ли мы когда-нибудь будем способны сделать это. Об атомных превращениях наговорили множество всякой чепухи. Наш интерес к этой проблеме чисто научный». Увы, это был единственный ошибочный научный прогноз, сделанный Резерфордом всего за девять лет до того, как стал работать первый атомный реактор.

И еще о В.И. Вернадском. Уже в 1922 г он особо обратил внимание на ответственность ученых за последствия их открытий перед человечеством: «Мы подходим к великому перевороту в жизни человечества, с которым не могут сравняться все им раньше пережитые. Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться в ближайшие годы, может случиться через столетие. Но ясно, что это должно быть. Сумеет ли человек воспользоваться этой

силой, направить ее на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать ту силу, которую неизбежно должна дать ему наука? Ученые не должны закрывать глаза на возможные последствия их научной работы, научного прогресса. Они должны себя чувствовать ответственными за все последствия их открытий. Они должны связать свою работу с лучшей организацией всего человечества».

Эти мысли В.И. Вернадского перекликаются со словами, сказанными П. Кюри в его Нобелевской речи (Стокгольм, Королевская АН, 6 июня 1905): «...Можно себе представить и то, что в преступных руках радий способен быть очень опасным, и в связи с этим можно задать такой вопрос, является ли познание тайн природы выгодным для человечества, достаточно ли человечество созрело, чтобы извлекать из него только пользу, или же это познание для него вредно? В этом отношении очень характерен пример с открытиями Нобеля: мощные взрывчатые вещества дали возможность производить удивительные работы. Но они же оказываются страшным орудием разрушения в руках преступных властителей, которые вовлекают народы в войны. Я лично принадлежу к людям, мыслящим, как Нобель, а именно, что человечество извлечет из новых открытий больше блага, чем зла»⁸.

⁸ В 1867 году шведский изобретатель Альфред Нобель получил патент на взрывчатое вещество, названное им динамитом. Высшие международные научные Нобелевские премии выплачиваются по завещанию А. Нобеля на деньги, полученные за этот патент.

Лекция 3. ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

«Мы живем в радиоактивном Мире ...» – этими словами автор начинает первую лекцию по радиоактивности.

Как следует из изложенного ранее, явление радиоактивности было, прежде всего, обнаружено для тяжелых природных элементов конца Периодической Системы. Определенные элементы с высоким атомным номером без каких-либо внешних воздействий спонтанно испускают невидимые лучи, которые, однако, можно обнаружить по ионизации воздуха, свечению некоторых веществ, выделению тепла, химическим превращениям, а также по другим вызываемым ими эффектам.

Нестабильность радиоактивных атомных ядер обусловлена их внутренним строением, и их распад происходит с определенной вероятностью, которая не зависит от времени и одинакова для всех частиц данного состояния. Поскольку распады атомов одного и того же нуклида равновероятны, а число таких атомов достаточно велико, то число атомов, распадающихся в единицу времени пропорционально числу N нераспавшихся атомов, имеющихся в наличии. Если за интервал времени dt распадается dN атомов, то статистически средняя скорость радиоактивного распада составляет:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (3.1)$$

где λ — постоянная распада, величина, не зависящая от времени. Из этого уравнения мы можем определить, сколько нераспавшихся атомов из общего количества N_0 радиоактивных атомов, существовавших в момент времени $t = 0$, останется к моменту t . Интегрируя после разделения переменных уравнение (3.1), получаем:

$$-\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t \lambda dt, \text{ т.е. } \ln \frac{N_0}{N} = \lambda t \quad (3.2)$$

$$\text{или } N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3.3)$$

где $e = 2,71828$ — основание натурального логарифма. Таким образом, число нераспавшихся радиоактивных атомов уменьшается со временем по экспоненциальному закону (рис.3.1).

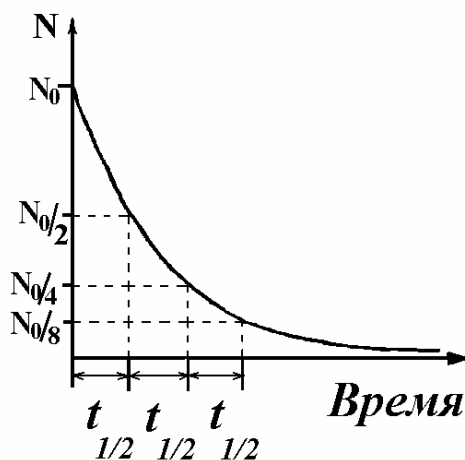


Рис.3.1. Изменение количества радиоактивного вещества в зависимости от времени

Величина, обратная постоянной распада, называется средним временем жизни радиоактивного элемента: $t_{cp} = 1/\lambda$. Она равна интервалу времени, в течение которого количество атомов радиоактивного элемента уменьшается до $1/e = 0,369$ от первоначальной величины.

Постоянная распада и соответственно среднее время жизни радиоактивного элемента зависит только от его порядкового номера и массового числа и не зависит от его количества, поэтому она является одной из характеристик данного

радиоактивного нуклида.

Вместо постоянной распада часто используется понятие периода полураспада $t_{1/2}$ – времени, в течение которого начальное количество нуклида уменьшается вдвое.

Чтобы установить связь между периодом полураспада $t_{1/2}$ и постоянной распада λ , следует в уравнении (3.2) заменить t на $t_{1/2}$, а N на $N_0/2$:

$$\begin{aligned} \ln 2 &= \lambda t_{1/2}; \\ t_{1/2} &= \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda \end{aligned} \quad (3.4)$$

Как видно из уравнения, период полураспада не зависит от начального количества радиоактивного вещества, он характеризует саму реакцию, т.е. сам радиоактивный нуклид. Значения периода полураспада разных радиоактивных веществ лежат в очень широких пределах: от 10^{10} лет и выше, до 10^{-11} с.

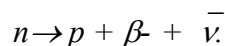
Вследствие вероятностного характера процесса радиоактивного распада вычисленная постоянная распада является статистически средней величиной, относительно которой возможны небольшие колебания, особенно для препаратов с очень малой активностью. Заметим, что продукты распада большинства естественных радиоактивных нуклидов также радиоактивны. Вследствие этого радиоактивные минералы и препараты содержат, как правило, не один, а много радиоактивных элементов или изотопов (например, в обычном препарате радия через какое-то время после его приготовления присутствует 11 видов радиоактивных атомов). Вследствие радиоактивности продуктов распада интенсивность излучения изменяется со временем более сложным образом, чем можно ожидать на основе соотношения (3.1).

В земных условиях можно встретить радиоактивный элемент только в трех случаях:

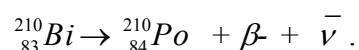
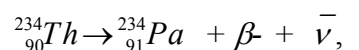
- он «пережил» 4,6 млрд. лет, которые существует планета Земля;
- его запасы постоянно пополняются за счет естественных процессов (ядерные реакции под действием высоко энергетических частиц космического излучения, цепочки распадов тяжелых природных радиоактивных элементов);
- он получен искусственно в результате человеческой деятельности.

Как же осуществляются основные типы радиоактивных превращений?

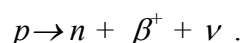
Наиболее часто происходит бета-распад ядер, т.е. ядро испускает электрон (β^- -частицу) за счет превращения одного нейтрона ядра в протон по схеме:



Часть энергии, выделяющейся при β^- распаде, уносит с собой антинейтрино $\bar{\nu}$ – частица, практически не обладающая массой покоя. Отношение массы нейтрино к массе электрона $= 1/2000$. Очевидно, при β^- распаде заряд ядра увеличивается на единицу: $Z \rightarrow Z+1$. Массовое число при этом не изменяется ($A = \text{const}$). Другими словами, образуется изотоп элемента с порядковым номером на единицу большим, чем исходного, но с той же атомной массой. Например:



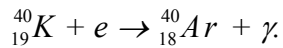
Для ядер с недостатком нейтронов (для самых легких изотопов легких элементов) характерен *позитронный распад*, т.е. распад с выделением позитрона e^+ (β^+ -частицы). β^+ -распад является следствием превращения:



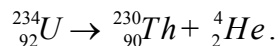
При этом $Z \rightarrow Z-1$, а $A = \text{const.}$

Пример β^+ -распада: ${}^{11}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{11}_{5}\text{B} + \beta^+ + \nu$.

К такому же изменению ядра, как и при β^+ -распаде, приводит *электронный захват* (электрон, находящийся на одном из ближайших к ядру подслоев, захватывается ядром): $p + e \rightarrow n$, например:



Наибольшие изменения исходного ядра наблюдаются в результате *альфа распада*. Выделенные ядром α -частицы (ядра гелия) приводят к образованию изотопа элемента с изменяющимся зарядом ядра $Z \rightarrow Z-2$. При этом массовое число $A \rightarrow A-4$. Альфа-распад наиболее характерен для тяжелых элементов, например:



Для тяжелых элементов наряду с естественной β - и α - радиоактивностью дополнительно возможно самопроизвольное (спонтанное) деление ядра на две части.

Впервые явление спонтанного деления ядер урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ было обнаружено аспирантами И.В. Курчатова – Г.Н. Флеровым и К.А. Петржаком (1940). Период полураспада спонтанного деления составляет $\approx 10^{16}$ лет.

Модель деления атомного ядра (т.н. «капельная модель») была предложена физиком-теоретиком Я.И. Френкелем. Ниже приведена схема последовательных этапов деления.



Аспиранты
Г.Н. Флеров и К.А. Петржак

Я.И. Френкель

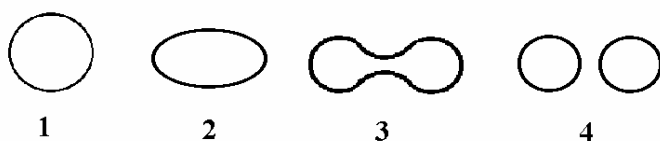


Рис.3.2 Капельная модель деления атомного ядра.

Рассмотренные виды радиоактивного превращения ядер всех видов часто сопровождаются γ -излучением, связанным с переходом вновь образующегося ядра из возбужденного в нормальное состояние.

Все элементы, находящиеся в периодической системе после *Bi* ($Z=83$), радиоактивны. Среди последних существуют только три ядра, продолжительность жизни которых достаточно велика, чтобы они могли сохраниться на Земле в течение прошедших 4,6 млрд. лет ее существования. Они являются родоначальниками цепочек последовательных радиоактивных превращений, образуя «семейства», в которые входят большинство встречающихся в природе радиоактивных элементов, но обладающих меньшей продолжительностью жизни. Цепочки распадов завершаются

образованием стабильных элементов – одного из стабильных изотопов свинца и гелия ${}^4_2\text{He}$. Такими родоначальниками являются:

${}^{232}_{90}\text{Th}$, $t_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ лет, конечный продукт ${}^{208}_{82}\text{Pb}$;

${}^{235}_{92}\text{U}$, $t_{1/2} = 7 \cdot 10^8$ лет, конечный продукт ${}^{207}_{82}\text{Pb}$;

${}^{238}_{92}\text{U}$, $t_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет, конечный продукт ${}^{206}_{82}\text{Pb}$.

Ниже приведены последовательности распадов в радиоактивных семействах тория ${}^{232}_{90}\text{Th}$, урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ и урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ (актиноурана).

После открытия радиоактивности все известные в природе элементы в разное время были подвергнуты исследованию с целью обнаружения естественной радиоактивности. В 1906 г Кэмпбелл и Вуд открыли слабую β -радиоактивность у калия и рубидия, и в последующие 25 лет это были единственные известные естественные радиоактивные элементы, не входящие в семейства урана, тория и актиния. В 1932 г. Хевеши и Пал обнаружили радиоактивность самария, а затем было открыто еще несколько естественных радиоактивных элементов. Известные в настоящее время естественные радиоактивные изотопы (не входящие в три радиоактивных семейства) и некоторые их свойства приведены в табл. 3.1.

Способность элементов к радиоактивным распадам широко используется на практике, в частности в геологии. Анализ руд и минералов на содержание урана-238 или тория-232 и соответствующих изотопов свинца позволяет с достаточной точностью решать проблемы *геохронологии*, т.е. определения возраста формирования геологических объектов. Возраст урановых руд можно определить по количественному соотношению $\text{U}:\text{He}$ – ураново-гелиевый метод или ${}^{238}\text{U} : {}^{206}\text{Pb}$ – ураново-свинцовый метод. Возраст ториевых руд определяют по соотношению в породе масс ${}^{232}\text{Th}$ и ${}^{208}\text{Pb}$ – ториево-свинцовый способ. На распаде нуклидов радиоактивного ${}^{40}\text{K}$, сопровождающемся возникновением 11% ${}^{40}\text{Ar}$, основан калиево-аргоновый метод. (Кроме аргона образуются еще и нуклиды ${}^{40}\text{Ca}$). Для измерения сравнительно коротких периодов пригоден углеродный метод, основанный на измерении количества радиоактивного нуклида ${}^{14}\text{C}$ в исторических объектах растительного или животного происхождения.

Радиоактивные нуклиды естественного и искусственного происхождения успешно применяются в качестве индикаторов при изучении механизмов физических, химических и биохимических процессов.

^{90}Th	$\text{Th}^{232}, \text{Th}$ (торий) $1,39 \times 10^{10}$ лет		$\text{Th}^{228}, \text{RdTh}$ (радиоторий) 1,90 лет		
^{89}Ac	α	$\text{Ac}^{228}, \text{MsTh}_2$ (мезоторий-2) 6,13 час	β	α	
^{88}Ra	$\text{Ra}^{228}, \text{MsTh}_1$ (мезоторий-1) 6,7 лет	β	$\text{Ra}^{224}, \text{ThX}$ (торий-X) 3,64 дня		
^{87}Fr			α		
^{86}Rn			$\text{Rn}^{220}, \text{Tn}$ (торон) 54,5 сек		
^{85}At			α		
^{84}Po			$\text{Po}^{216}, \text{ThA}$ (торий-A) 0,158 сек		$\text{Po}^{212}, \text{ThC}'$ (торий-C') $3,0 \times 10^{-7}$ сек
^{83}Bi			α (~100%)	$\text{Bi}^{212}, \text{ThC}$ (торий-C) 60,6 мин	β (66,3%) α
^{82}Pb			$\text{Pb}^{212}, \text{ThB}$ (торий-B) 10,6 час	β α (33,7%)	$\text{Pb}^{208}, \text{ThD}$ (стабильный изотоп свинца)
^{81}Tl				$\text{Tl}^{208}, \text{ThC}''$ (торий-C'') 3,1 мин	β

Семейство Th-232

^{92}U	$\text{U}^{238}, \text{U}_1$ (уран-I) $4,51 \times 10^9$ лет		$\text{U}^{234}, \text{U}_{II}$ (уран-II) $2,48 \times 10^5$ лет				
^{91}Pa	α β	$\text{Pa}^{234}, \text{UX}_2$ 1,18 мин β (99,85%) $\text{Pa}^{234}, \text{UZ}$ 6,7 час β	$\text{Th}^{230}, \text{Io}$ (ионий) $7,52 \times 10^4$ лет	α			
^{90}Th	$\text{Th}^{234}, \text{UX}_1$ (уран-X ₁) 24,1 дня						
^{89}Ac			α				
^{88}Ra			$\text{Ra}^{226}, \text{Ra}$ (радий) 1622 лет				
^{87}Fr			α				
^{86}Rn			$\text{Rn}^{222}, \text{Rn}$ (радон) 3,825 дня				
^{85}At			α	At^{218} 1,3 сек			
^{84}Po		$\text{Po}^{218}, \text{RaA}$ (радий-A) 3,05 мин	β (0,02%) α	$\text{Po}^{214}, \text{RaC'}$ (радий-C') $1,6 \times 10^{-4}$ сек		$\text{Po}^{210}, \text{RaF}$ (полоний) 138,4 дня	
^{83}Bi		α (99,98%)	$\text{Bi}^{214}, \text{RaC}$ (радий-C) 19,7 мин	β (99,96%) α	$\text{Bi}^{210}, \text{RaE}$ (радий-E) 5,01 дня	α	
^{82}Pb		$\text{Pb}^{214}, \text{RaB}$ (радий-B) 26,8 мин	β (0,04%) α	$\text{Pb}^{210}, \text{RaD}$ (радий-D) 22 года	β (5 $\times 10^{-5}\%$) α	$\text{Pb}^{206}, \text{RaG}$ (стабиль- ный изотоп свинца)	
^{81}Tl			$\text{Tl}^{210}, \text{RaG}$ (радий-G) 1,32 мин	β (1,8 $\times 10^{-5}\%$) α	$\text{Tl}^{206}, \text{RaE''}$ (радий-E'') 4,3 мин		
^{80}Hg				Hg^{206} 8,5 мин	β		

Семейство U-238

^{92}U	U^{235} , АсU (актиноуран) $7,13 \times 10^8$ лет				
^{91}Pa	α	Pa^{231} , Pa (протактиний) $3,48 \times 10^4$ лет			
^{90}Th	Th^{231} , УУ (уран-У) 25,6 час	β	α	Th^{227} , RdAc (радиоактивный) 18,17 дня	
^{89}Ac		Ac^{227} , Ac (актиний) 22,0 лет	β (98,8%)	α	
^{88}Ra		α (1,2%)	Ra^{223} , AcX (актиний-Х) 11,7 дня		
^{87}Fr		Fr^{223} , AcK (актиний-К) 22 мин	β	α	
^{86}Rn		α $4 \times 10^{-3}\%$	Rn^{219} , An (актинон) 3,92 сек		
^{85}At		At^{219} 0,9 мин	β (3%)	α	At^{215} 10^{-4} сек
^{84}Po		α (97%)	Po^{215} , AcA (актиний-А) $1,83 \times 10^{-3}$ сек	β ($5 \times 10^{-4}\%$)	α
^{83}Bi		Bi^{215} 8 мин	β	α (~100%)	Po^{211} , AcC' (актиний-С') 0,52 сек
^{82}Pb			Bi^{211} , AcC (актиний-С) 2,15 мин	β (0,32%)	α
^{81}Tl			Pb^{211} , AcB (актиний-В) 36,1 мин	β	α (99,68%)
				Pb^{207} , AcD (стабильный изотоп свинца)	
				Tl^{207} , AcC'' (актиний-С'') 4,79 мин	

Семейство U-235

Таблица 3.1. Известные естественные радиоактивные элементы
(не входящие в семейства урана, тория, актиния)

Радиоактивный элемент, изотоп	Тип распада	Период полу-распада, лет	Распространенность изотопа, %	Стабильный продукт распада
^{40}K	β , Э.З.	$1,27 \cdot 10^9$	0,012	^{40}Ca , ^{40}Ar
^{50}V	β , Э.З.	$6 \cdot 10^{15}$	0,24	^{50}Cr , ^{50}Ti
^{87}Rb	β	$5,7 \cdot 10^{10}$	27,8	^{87}Sr
^{115}In	β	$5 \cdot 10^{14}$	95,7	^{115}Sn
^{123}Te	Э.З.	$1,2 \cdot 10^{13}$	0,87	^{123}Sb
^{138}La	Э.З., β	$1,1 \cdot 10^{11}$	0,089	^{138}Ba , ^{138}Ce
^{142}Ce	α	$\approx 5 \cdot 10^{15}$	11,07	^{138}Ba
^{144}Nd	α	$2,4 \cdot 10^{15}$	23,85	^{140}Ce
^{147}Sm	α	$1,1 \cdot 10^{11}$	14,97	^{143}Nd
^{152}Gd	α	$1,1 \cdot 10^{14}$	0,20	^{148}Sm
^{176}Lu	β	$3 \cdot 10^{10}$	2,59	^{176}Hf
^{174}Hf	α	$2 \cdot 10^{15}$	0,18	^{170}Yb
^{87}Re	β	$6 \cdot 10^{10}$	62,9	^{187}Os
^{190}Pt	α	$7 \cdot 10^{11}$	0,013	^{186}Os

Следует обратить внимание на промежуточные продукты в цепях превращений. Они также являются радиоактивными. Например, в ряду распадов $^{238}_{92}\text{U}$ образуется элемент радий $^{226}_{88}\text{Ra}$, $t_{1/2} = 1622$ года. Будучи щелочноземельным элементом, т.е. химическим аналогом кальция, стронция и бария, радий способен в малых количествах легко попадать в состав разнообразных строительных материалов. Непосредственным продуктом распада радия является $^{222}_{86}\text{Rn}$, $t_{1/2} = 3,82$ дня. Радон – это инертный газ, не вступающий в химические взаимодействия, а потому обладающий большой подвижностью и способностью легко проникать через разнообразные материалы. Однако цепочка распадов радона в свою очередь приводит к образованию нескольких радиоактивных изотопов свинца, висмута и полония, которые формируют достаточно мощное α -, β - и γ -излучение, и, как следствие, способны в определенных условиях оказывать негативное воздействие на находящиеся в помещениях людях.

Лекция 4. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Обсуждая первые этапы открытия явления радиоактивности, мы уже отметили, что радиоактивные излучения засвечивают фотопластинки и ионизируют среду, через которую проходят.

Следует различать более общее понятие «радиация» и более конкретное понятие «ионизирующее излучение». Радиация будет ионизирующей в том случае, если она способна разрывать химические связи молекул, составляющие ткани живых организмов, и тем самым вызывать биологически важные изменения. Свет, радиоволны, так же как и радиационное тепло от Солнца, тоже представляют собой разновидность радиации. Однако они не вызывают повреждений путем ионизации, хотя, конечно, могут формировать биологические эффекты, если интенсивность их воздействия увеличить.

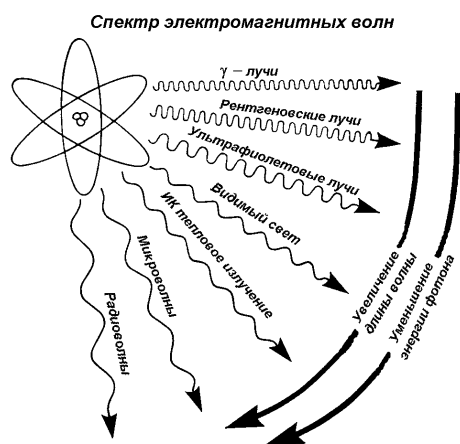


Рис.4.1. Типы электромагнитных излучений.

Природа ионизирующих излучений может быть различной. Прежде всего, это рентгеновские и γ -лучи. Они представляют собой энергию, передаваемую в виде волн, без какого-то бы ни было перемещения вещества, точно так, как свет и тепло от Солнца проходят сквозь безбрежный вакуум космоса, пока не достигнут Земли.

Рентгеновское излучение и γ -лучи по своей природе и свойствам мало отличаются друг от друга. Различие между ними состоит в величинах порций (квантов) энергии (γ -лучи обладают более

высокой энергией) и способах их образования.

На практике рентгеновские лучи чаще всего получают с помощью аппаратуры, ускоряющей электроны электрическим полем с последующим их торможением (например, рентгеновские трубки для аппаратов медицинской диагностики или аппаратуры рентгеноструктурного анализа). Естественным источником рентгеновского излучения является Солнце и другие космические объекты.

Источником γ -излучения является распад нестабильных, (радиоактивных), изотопов. Механизм взаимодействия γ -излучения с веществом зависит как от свойств среды, так и

от энергии излучения, т.е. длины волны и частоты колебаний. С увеличением энергии излучения и уменьшением длины волны меняется и механизм взаимодействия квантов с атомами и молекулами среды; γ -излучение обладает большой проникающей способностью, изменяющейся в широких пределах, напротив, ионизирующая способность γ -излучения значительно меньше, чем у α - и β -частиц.

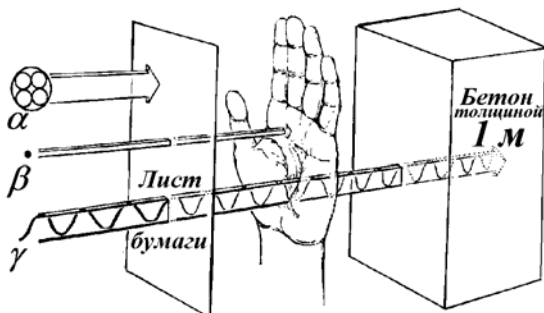


Рис.4.2. Поглощение различных типов излучений

Остальные типы ионизирующего излучения представлены быстро движущимися частицами вещества. Одни из них несут электрический заряд, другие – нет. Ионизирующие излучения, проходя через различные вещества, взаимодействуют с их

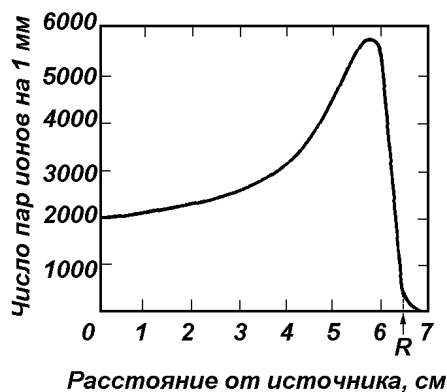
атомами и молекулами. Такое взаимодействие приводит к возбуждению атомов и вырыванию отдельных электронов из электронных оболочек нейтрального атома. В результате атом, лишенный одного или нескольких электронов, превращается в положительно заряженный ион – происходит первичная ионизация. Выбитые при первичном взаимодействии электроны, обладающие определенной энергией, сами взаимодействуют со встречными атомами и также создают новые ионы, – происходит т.н. вторичная ионизация. Электроны, потерявшие в результате многократных столкновений свою энергию, остаются свободными или присоединяются, «прилипают» (в газах) к какому-либо нейтральному атому и образуют при этом отрицательно заряженные ионы. Таким образом, энергия излучения при прохождении через вещество расходуется в основном на ионизацию среды. Число пар ионов, создаваемых ионизирующим излучением в веществе на единице пути пробега, называется *удельной ионизацией*, а средняя энергия, затрачиваемая ионизирующим излучением на образование одной пары ионов, – *средней работой ионизации*.

По мере продвижения заряженная частица теряет свою энергию, а на некотором расстоянии от начала пути скорость ее становится равной скорости теплового движения атомов и молекул среды. Расстояние, пройденное частицей от места образования до места потери ею избыточной энергии, называется *длиной пробега*.

Кратко остановимся на особенностях ионизирующего воздействия различных частиц.

α -Частицы – $({}^4_2\text{He})^{2+}$ – ядра атомов гелия, или, другими словами, атомы гелия, лишенные орбитальных электронов и состоящие из двух протонов и двух нейтронов, сцепленных вместе. Они имеют положительный заряд, относительно тяжелы и обладают большой ионизирующей и малой проникающей способностью. В настоящее время известно около 40 естественных и более 200 искусственных α -активных ядер. Альфа-распад характерен для тяжелых элементов (U, Th, Po, Pu и др.). При α -распаде «материнское» ядро с атомным номером Z и массовым числом A превращается в новое, «дочернее» ядро с атомным номером $Z-2$ и массовым числом $A-4$. В качестве примера α -распада можно привести распад плутония-239: ${}^{239}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{235}_{92}\text{U} + {}^4_2\text{He}$.

В начале пробега, когда α -частица обладает большей энергией (скоростью), удельная ионизация будет меньше, чем в конце пути (рис.6.3.). Частица, имеющая меньшую скорость, более эффективно взаимодействует с электронами оболочки атомов среды. Наибольшая удельная ионизация отмечается в последней трети длины пробега частицы. Пробег α -частиц радиоактивных элементов в воздухе не превышает 11 см, в более плотных средах он еще меньше. Так, в мягких тканях человека пробег α -частиц измеряется мкм. Проходя через слой вещества, α -частицы испытывают упругое рассеяние на электронах и ядрах атомов и неупругие столкновения с орбитальными электронами, последовательно теряя свою энергию. При неупругих столкновениях электрическое поле



α -частицы, взаимодействуя с внешними электронами атомов и молекул, ускоряет электроны, преодолевая их взаимодействие с ядрами атомов, что приводит, к процессам ионизации и возбуждения атомов и молекул, а иногда, и к диссоциации молекул.

Рис.6.3. Удельная ионизация, создаваемая α -частицами в воздухе с изменением расстояния от источника

Бета-излучение состоит из β -частиц (электронов e^- или позитронов e^+), которые испускаются при β -распаде радиоактивных изотопов. К β -распаду относится также электронный захват, т.е. захват атомным ядром одного из электронов с окружающих ядро электронных орбиталей. Массовое число ядра при β -распаде не изменяется.

При электронном β -распаде происходит превращение нейтрона в протон, заряд ядра и его порядковый номер увеличиваются на единицу. Электронный распад характерен для ядер с избыточным числом нейтронов. Примером электронного β -распада может служить распад стронция-90: ${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + e^-$.

При позитронном β -распаде происходит превращение протона в нейтрон, которое сопровождается образованием и выбросом из ядра позитрона. Заряд ядра и его порядковый номер уменьшаются на единицу. Позитронный β -распад наблюдается в случае неустойчивых ядер с избыточным числом протонов. Примером позитронного β -распада может служить распад радионуклида натрия по реакции ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + e^+$.

При электронном захвате один из протонов ядра превращается в нейтрон, в результате чего заряд уменьшается на единицу.

Бета частицы в воздухе на своем пути создают в несколько сотен раз меньше ионов, чем α -частицы, т.е. обладают меньшей ионизирующей способностью. Бета частицы, испускаемые атомными ядрами при радиоактивных превращениях, имеют различную энергию, поэтому и пробег их в веществе неодинаков. Ослабление потока β -частиц веществом происходит постепенно. Слой вещества, равный длине пробега β -частиц, имеющих максимальную энергию, полностью затормозит все β -частицы, испускаемые данными радионуклидами.

Бета частицы при взаимодействии с атомами среды отклоняются от своего первоначального направления. Поэтому путь, проходимый β -частицей в веществе, представляет собой не прямую линию, как у α -частиц, а ломаную. Взаимодействуя с веществом среды, β -частицы часто проходят вблизи атомных ядер. Под влиянием положительного заряда ядра отрицательно заряженная β -частица резко тормозится и теряет при этом часть своей энергии. Энергия, потерянная β -частицей при торможении, излучается в виде тормозного рентгеновского излучения. С увеличением энергии β -частиц и среднего атомного номера среды тормозное рентгеновское излучение возрастает. Наиболее высокоэнергетические β -частицы могут пройти слой алюминия до 5 мм. Ионизирующая способность их меньше, чем у α -частицы.

Протоны (p) – положительно заряженные частицы (по величине заряд протона равен заряду электрона, но имеет противоположный знак). Они присутствуют в ядрах всех атомов. Порядковый номер элемента Z в Периодической таблице Менделеева совпадает с числом протонов в атомном ядре. Масса протона приблизительно равна массе нейтрона и почти в 2000 раз больше массы электрона. Протоны обычно не испускаются радиоактивными изотопами, известными на Земле, однако они найдены в изобилии в открытом космосе, что может представлять опасность для космонавтов, могут быть получены на ускорителях заряженных частиц. Их ионизирующее воздействие на вещества подобно воздействию α -частиц, но при меньшей массе и меньшем заряде, протоны обладают большей длиной пробега и меньшей ионизирующей способностью, чем α -частицы.

Тяжелые ионы – ядра любых атомов, лишенных орбитальных электронов и движущихся с высокой скоростью. В космосе присутствуют ионы почти всех известных элементов, и это создает одну из трудностей обеспечения безопасности космических полетов. По существу невозможно сконструировать космический корабль, полностью защищающий экипаж от всевозможных тяжелых ионов, несущихся с большой скоростью и обладающих огромной энергией. В земных условиях разогнанные до высоких энергий ионы ${}^{40}\text{Ar}$, ${}^{50}\text{Ti}$, ${}^{54}\text{Cr}$, ${}^{55}\text{Mn}$, ${}^{58}\text{Fe}$, направленные на мишени из Pb и Bi, позволяют

осуществить ядерные реакции синтеза трансурановых элементов. Например, по реакции $^{204}_{82}\text{Pb} + ^{40}_{18}\text{Ar} \rightarrow ^{242}_{100}\text{Fm} + 2n$ был осуществлен синтез фермия.

Нейтроны (n) – единственные незаряженные частицы, образующиеся при радиоактивных преобразованиях элементов, являются важной разновидностью ионизирующего излучения, потому что они, как правило, связаны с процессами, происходящими в атомных бомбах, ядерных реакторах. Их можно получить и на мощных ускорителях частиц. Нейтроны, как и протоны, являются частицами, из которых построены ядра атомов. Массы нейтрона и протона практически равны. Однако, в отличие от протона, нейтроны не обладают электрическим зарядом. Не имея электрического заряда, нейтрон не взаимодействует с электрическим полем заряженных частиц и ядер атомов. Поэтому он может пройти значительное расстояние во всяком веществе, включая и живые ткани, до столкновения с ядром. При прохождении пучка нейтронов через вещество могут проявиться различные виды взаимодействий: упругое (n, n') и неупругое (n, n', γ) рассеяние, радиационный захват с испусканием фотона (n, γ), радиационный захват с испусканием заряженных частиц (n, α), (n, p), (n, d) и деление тяжелых ядер (n, f). Вероятности этих процессов (или сечения захвата нейтронов ядрами, которые измеряются в барнах (б), где $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$) сложным образом зависят от энергии нейтронов и значительно различаются для разных элементов. Результатом всех рассмотренных взаимодействий является появление вторичных заряженных частиц или квантов (фотонов) гамма излучения, способных оказывать сильное ионизирующее воздействие на вещество. Виды таких частиц обозначены в круглых скобках. Для случая упругого взаимодействия, подобного соударению бильярдных шаров, такими заряженными частицами являются ядра атомов поглощающего вещества, “выбитые” из собственных электронных оболочек (т.н. ядра отдачи).

Принято следующее разбиение нейтронов по энергиям:

1. Медленные, $E < 1 \text{ кэВ}$. В эту группу входят тепловые ($5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ} < E < 0,5 \text{ эВ}$) и надтепловые ($0,5 \text{ эВ} < E < 1 \text{ кэВ}$) нейтроны.
2. Промежуточные ($1 \text{ кэВ} < E < 0,2 \text{ МэВ}$).
3. Быстрые ($0,2 \text{ МэВ} < E < 20 \text{ МэВ}$).
4. Сверхбыстрые ($E \geq 20 \text{ МэВ}$).

При выборе защиты от нейтронного излучения следует помнить, что защита от этого вида излучения основывается на поглощении тепловых и холодных нейтронов, а быстрые нейтроны должны сначала замедлиться. Нейтроны с энергией более 0,5 МэВ рассеиваются на ядрах поглощающей среды, испытывая неупругие столкновения. При этом ядра среды находятся в возбужденном состоянии и испускают фотоны; кроме того, под действием нейтронного излучения многие материалы активизируются. В этой связи защитные свойства материалов от нейтронного излучения определяются их замедляющей и поглощающей способностью, степенью их активизации и захватным γ -излучением.

Быстрые нейтроны наиболее эффективно замедляются веществами с малым атомным номером. К таким материалам относятся водородсодержащие вещества: парафин, вода, бетон, пластмассы и др. Для эффективного поглощения тепловых нейтронов используются материалы, обладающие большим сечением захвата (материалы с бором и кадмием: борная сталь, борный графит, сплавы бора с алюминием, кадмия со свинцом и др.).

Гамма-излучение наиболее эффективно ослабляется материалами с высокой плотностью. Проникающая способность потока нейтронов сравнима с таковой для γ -излучения.

Специфические особенности воздействия ионизирующего излучения на живые организмы обсуждаются в лекции 10.

Лекция 5. ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

Как показано в лекции 4, самопроизвольный распад радиоактивных ядер сопровождается ионизирующим излучением. Количество или содержание радиоактивного материала характеризуют термином «активность».

Активностью (A) называется мера количества радиоактивного вещества, выражаемая числом радиоактивных превращений в единицу времени, т.е. она характеризуется через скорость распада. Каждый радионуклид (радиоизотоп) распадается со своей скоростью A , которая пропорциональна числу ядер радионуклида:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \text{ Здесь } N - \text{число ядер радионуклида, а } \lambda - \text{постоянная распада,}$$

характеризующая вероятность распада за единицу времени (доля общего числа атомов изотопа, распадающихся каждую секунду). Очевидно, чем больше λ , тем быстрее происходит распад. Постоянная распада λ связана с периодом полураспада соотношением $t_{1/2} = 0,693/\lambda$. Каждому радиоизотопу присущи свои значения λ и $t_{1/2}$.

В течение многих лет для характеристики активности использовали единицу активности – кюри (Ки), названную так в честь Пьера и Мари Кюри – ученых, первыми выделившими чистый радий. Исторически сложилось так, что указанная единица была введена применительно к радию, один грамм которого и обладал активностью 1 Ки. Когда начали использовать эту единицу по отношению ко всем остальным радиоактивным элементам, 1 Ки стал выражать количество вещества, в котором за 1 с распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ атомов. Поскольку кюри относительно крупная единица радиоактивности, на практике чаще применяли дольные единицы: милликюри (1 мКи = 10^{-3} Ки), микрокюри (1 мкКи = 10^{-6} Ки) и пикокюри (1 пКи = 10^{-9} Ки).

В современной Международной системе единиц СИ за единицу активности принято одно ядерное превращение в секунду (расп./с). Эта единица в честь первооткрывателя явления радиоактивности А.А. Беккереля получила название «беккерель» – (Бк или Bq). Заметим, что введение новой единицы активности вызвало определенное негодование среди ученых – представительниц прекрасного пола, сторонниц движения за равноправие женщин. В самом деле, из широкого употребления выведена единственная в мире единица измерения, названная в честь женщины!

Один беккерель по отношению к одному кюри – единица малая: $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ или $1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$.

Испускаемые радиоактивным источником частицы образуют поток, измеряемый числом частиц в 1 с. Число частиц, приходящихся на единицу поверхности (квадратный метр или квадратный сантиметр), представляет собой плотность потока частиц, например, [част./с·см²] и т.п.]. В науке и технике применяются удельная A_m (Бк/кг), объемная A_V (Бк/м³), молярная $A_{\text{мол}}$ (Бк/мол) и поверхностная A_S (Бк/м²) активности источников.

Между активностью A (Бк) и массой радиоактивных веществ m (г) существует определенная связь. Общее число радиоактивных атомов в образце $N = A/\lambda = A \cdot t_{1/2}/0,693$. Число радиоактивных атомов, обеспечивающих активность в 1 Бк равно N/A . Чтобы перейти к массе радионуклида m (г), необходимо помножить величину N/A на массу одного радиоактивного атома M/L_0 , где M – относительная атомная масса нуклида, а L_0 – число Авогадро, равное $6,023 \cdot 10^{23}$.

$$\text{Тогда, } m = \frac{N}{A} \frac{M}{L_0} = \frac{t_{1/2}}{0,693} \frac{M}{6,023 \cdot 10^{23}} = 0,24 \cdot 10^{-23} M t_{1/2} \text{ г/Бк.}$$

Обратная величина характеризует активность одного грамма радионуклида:

$$A = 4,17 \cdot 10^{23} / M t_{1/2} \text{ (число распадов в секунду/г).}$$

В отличие от проблем оценки безопасных уровней и предотвращения негативных воздействий на человека разнообразных техногенных факторов (химических загрязнений, электромагнитных полей, шумовых воздействий, вибраций и др.), радиационные воздействия на человека хорошо изучены и опираются на обширный эпидемиологический базис:

- углубленное обследование лиц, подвергшихся атомным бомбардировкам в Хиросиме и Нагасаки;
- профессиональные работники атомной промышленности;
- шахтеры урановых рудников;
- пациенты, получившие радиационное облучение в терапевтических целях;
- жители территорий, подвергшиеся загрязнению радионуклидами;
- жители территорий, многие поколения которых проживают в локальных регионах с существенно повышенным природным радиационным фоном.

Накапливающиеся материалы многочисленных и разносторонних научных исследований изучаются и обобщаются компетентными Международными и Национальными организациями, прежде всего такими как:

- Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (**НКДАР ООН**). Заметим, что это единственный научный комитет при ООН;
- Международная Комиссия по Радиационной защите (**МКРЗ**) (**ICRP**);
- Комитет по изучению биологических эффектов ионизирующей радиации при Национальной Академии наук США (**Комитет BEIR**).

Эти организации делают наиболее взвешенную оценку радиационных воздействий и рисков и дают наиболее надежные рекомендации по проблемам обеспечения радиологической защиты. На основании этих данных и согласованно установленного уровня приемлемого риска (10^{-3} год⁻¹ для персонала и $5 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ для населения) и определяются допустимые уровни радиационного воздействия на человека. Все публикации данных организаций носят только *информационный, научный и рекомендательный!* характер.

Правила безопасного проведения и организации работ, на международном уровне, разрабатываются подразделениями Международного агентства по атомной энергии (**МАГАТЭ**). Эти международные правила уже являются обязательными для выполнения государствами-членами МАГАТЭ, в особенности, в вопросах, относящихся к проблемам трансграничного обеспечения радиационной безопасности. На основании норм и правил МАГАТЭ с учетом рекомендаций МКРЗ разрабатываются национальные документы, гарантирующие обеспечение радиационной безопасности.

Согласно МКРЗ систематизация облучения населения и персонала при проведении работ с ионизирующим излучением может быть разделено на две категории:

1. Нормальное (или рутинное) облучение. Его возникновение можно разумно ожидать. Оно включает в себя облучение от проводимых операций, как запланированных, так и незапланированных, но с незначительными последствиями от мелких неполадок.

2. Потенциальное облучение – непреднамеренное облучение, для которого имеется вероятность, но нет уверенности в его возникновении. Оно может быть предусмотрено заранее, и вероятность его возникновения рассчитана, однако оно не может быть предсказано в деталях.

Такая дисциплина, как «*радиологическая защита*» (radiological protection) в основном имеет дело с ограничением доз облучения при нормальном, ожидаемом облучении от источников облучения, в то время как «*радиационная безопасность*» (radiation safety) в основном имеет дело с уменьшением потенциального облучения при авариях.

Степень, глубина и форма лучевых поражений, развивающихся среди биологических объектов при воздействии на них ионизирующего излучения, в первую очередь зависят от

величины поглощенной энергии излучения. Для характеристики этого показателя используется понятие *поглощенной дозы* (D), т.е. энергии, поглощенной единицей массы облучаемого вещества.

Поглощенная доза D определяется соотношением $D = \bar{de}/dm$, где \bar{de} – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу в элементе объема; dm – масса вещества в этом элементе объема. За единицу поглощенной дозы любого ионизирующего излучения в системе СИ принимается грей³ (Гр или Gy) – джоуль на килограмм (Дж/кг). Данная физическая единица названа в честь английского физика и радиобиолога Л. Грея.



Л. Грей (1905-1965)

Производная поглощенной дозы \dot{D} , т.е. $\dot{D} = dD/dt$, где dD – приращение поглощенной дозы за интервал времени dt .

Для целей радиационной безопасности полезно определять среднюю поглощенную дозу в ткани или конкретном органе D_T , т.е. $D_T = e_T/m_T$, где e_T – полная энергия, переданная ткани или органу; m_T – масса этой ткани или органа. Например, m_T может изменяться в диапазоне от менее 10 г для яичников, до более чем 70 кг для всего тела. Учитывается и неограниченная линейная передача энергии в конкретной среде при движении носителя энергии: $L_{\infty} = dE/dL$, где E – энергия,

потерянная заряженной частицей при прохождении расстояния dL .

Следует учитывать, что исторически в радиобиологии и радиационной гигиене широко использовалась внесистемная единица поглощенной дозы – рад. Рад – это такая поглощенная доза, при которой количество поглощенной энергии в 1 г любого вещества составляет 100 эрг независимо от вида и энергии излучения. Следовательно, 1 грей=100 рад. В некоторых случаях доза радиации может быть намного меньше 1 грея, и даже 1 рад. Тогда ее выражают в миллигреях или миллирадах: 1 грей=1000 миллигрэй (мГр) или 1000000 микрогрей (мкГр), а 1 рад=1000 миллирад (мрад) или 1000000 микрорад (мкрад).

Чтобы оценить данные единицы измерения, заметим, что общая поглощенная телом человека доза излучения 5 Гр (500 рад) по оценкам медиков является полулетальной. Для сравнения – средний естественный по Миру радиационный фон, действию которого мы все подвергаемся, приблизительно составляет 1,0 мГр (100 мрад) в год.

Однако, равные дозы различных видов излучения не обязательно вызывают одинаковые биологические эффекты. Например, поглощенная доза нейтронного излучения 0,5 Гр будет приводить к более тяжелым последствиям, чем такая же доза рентгеновского излучения. Обычно при одинаковой величине поглощенной дозы рентгеновские лучи, γ - и электронное излучение вызывают меньшие повреждения по сравнению с излучением тяжелых ионов. Нейтронное излучение занимает промежуточное положение.

Для сопоставления радиационных эффектов от разных источников используют понятие *эквивалентной дозы* (H). Единицами измерения эквивалентной дозы в системе СИ являются зиверт (Зв или Sv)². В ряде случаев продолжают использовать внесистемную единицу бэр (биологический эквивалент рада). Эквивалентная доза представляет собой величину поглощенной дозы (в греях или радах), умноженную на переводной коэффициент W_R , – радиационный весовой коэффициент, известный в нашей литературе

³ Грей – единица облучения, названная в честь известного английского физика и радиобиолога Л. Грея.

² Зиверт – единица, названная в честь известного шведского физика Sievert'a, внесшего видный вклад в методологию количественного измерения радиации.

как «коэффициент качества», отражающий эффективность воздействия конкретного вида радиации: $H = W_R D_R$ (нижний индекс R характеризует тип радиации).

Таблица 5.1. Радиационный весовой коэффициент для различных видов излучения.

Вид излучения R	γ	β	p	$n(\text{медл.})$	$n(\text{быстр.})$	a
W_R	1	1	10	5	10	20



Р. Зиверт (1896-1966)

В поле воздействия нескольких видов излучений эквивалентная доза

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R}, \quad (5.1)$$

где $D_{T,R}$ – поглощенная доза тканью или органом T излучения типа R .

Чувствительность различных органов и тканей к действию различных видов излучений индивидуальна и оценивается весовым коэффициентом W_T . С учетом этого обстоятельства эффективная доза E есть сумма взвешенных эквивалентных доз во всех тканях и от всех видов воздействующих излучений:

$$E = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{T,R} \quad (5.2)$$

Таблица 5.2. Радиационный весовой коэффициент для различных тканей (*)

Ткани или органы	Весовой коэффициент W_T	
	1977 г	1990 г
Гонады	0,25	0,20
Грудь	0,15	0,05
Толстый кишечник		0,12
Красный костный мозг	0,12	0,12
Легкие	0,12	0,12
Желудок		0,12
Мочевой пузырь		0,05
Печень		0,05
Пищевод		0,05
Щитовидная железа	0,03	0,05
Поверхность костей	0,03	0,01
Кожа		0,01
Прочее	0,30	0,05

(*) Численные значения коэффициентов усреднены для больших групп населения широкого возрастного состава для мужчин и женщин³.

Если поглощенная доза измерена в радах, эквивалентная доза должна быть в бэрах (биологических эквивалентах рада). Если поглощенная доза измерена в греях, эквивалентная доза соответственно будет выражена в зивертах (Зв). В тех случаях, когда

³ Report of the United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly (2000). ANNEX A. Dose assessment methodologies.

эквивалентная доза намного меньше 1 Зв или 1 бэра, ее измеряют в более мелких кратных единицах. Так, 1 зиверт соответствует 1000 миллизивертам (мЗв) или 1000000 микрозивертам (мкЗв). Соответственно 1 бэр равен 1000 миллибэрам (мбэр) или 1000000 микробэрам (мкбэр).

Следует дать пояснение по еще одной используемой характеристике величины эквивалентной дозы, пришедшей к нам из прошлых лет, когда главным источником ионизирующего излучения были рентгеновские установки – это рентген P .

Электромагнитное (фотонное) излучение, проходя через вещество, выбивает из его атомов свободные электроны и создает в веществе положительно и отрицательно заряженные ионы. Для оценки воздействия фотонного излучения на вещество используется т.н. *экспозиционная доза* X . В качестве такого вещества, прежде всего, рассматривали сухой воздух, т.к. большинство приборов радиационного контроля измеряют ионизирующие действия излучения в воздухе. Экспозиционная доза – это отношение суммарного заряда Q всех ионов одного знака в воздухе при полном торможении электронов, которые были образованы фотонами в элементарном объеме воздуха с массой m , к массе воздуха в указанном объеме: $X = Q/m$. Единицей экспозиционной дозы в системе СИ является кулон на 1 кг воздуха (Кл/кг). Внесистемной единицей экспозиционной дозы является рентген P , который сохранен для использования в армии и публичных дозиметрах на улицах городов.

Рентген – это экспозиционная доза фотонного излучения (рентгеновского или гамма), при прохождении которого через 0,001293 г воздуха (масса сухого воздуха в 1 см³ при 0 °С и давлении 760 мм рт. ст.) в результате завершения всех ионизационных процессов создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Это соответствует образованию $2,083 \cdot 10^9$ пар однозарядных ионов, а при пересчете на 1 г воздуха – $1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов. Элементарный заряд составляет $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Тогда, $1 P = 1,61 \cdot 10^{12} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1000 = 2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.

Среднее значение энергии, затрачиваемой на образование одной пары ионов в 1 г воздуха, составляет 33,5 эВ, а на образование $1,61 \cdot 10^{12}$ пар – $5,40 \cdot 10^{13}$ эВ, что соответствует ≈ 86 эрг (1 эВ эквивалентен $1,60 \cdot 10^{-12}$ эрг), или $86 \cdot 10^{-7}$ Дж. Это энергетический эквивалент рентгена для воздуха.

Так как эффективный заряд ядер атомов воды и биологической ткани $Z_{эф}$ не точно равен эффективному заряду ядер атомов воздуха $Z_{возд}$, то энергетический эквивалент рентгена для воды и биологической ткани другой – 93 эрг/г, т.е. всего на 7% меньше от единицы рад или **1 P = 0,93 бэр**. Последнее соотношение позволяет оценить величину поглощенной дозы по измеренной экспозиционной.

Использование единицы экспозиционной дозы в системе СИ неудобно. Еще более неудобным и затрудненным был бы процесс перестройки шкал приборов радиационного контроля, которые в настоящее время отградуированы в большинстве случаев в рентгенах. В частности, все параметры загрязнений окружающей среды и биологических воздействий на человека в результате аварии на ЧАЭС изначально были измерены в рентгенах. Поэтому до сих пор значения экспозиционной дозы рекомендовано использовать во внесистемных единицах, т.е. рентгенах или в соответствующих дольных и кратных единицах.

Эквивалентная доза является индивидуальным критерием опасности, обусловленным ионизирующим излучением. Но при широком использовании атомной энергии воздействию ионизирующих излучений могут подвергнуться значительные контингенты людей. Это, прежде всего люди, профессионально работающие в атомной промышленности, люди, подвергающиеся облучению в результате аварий на ядерных установках или проживающие длительное время на территориях с повышенным радиационным фоном техногенного или природного происхождения. Для оценки риска

при облучении большого контингента людей даже и небольшими дозами полезной величиной является *коллективная эквивалентная доза* H_S .

Коллективная эквивалентная доза – сумма индивидуальных эквивалентных доз H_i у данного контингента людей за данный промежуток времени:

$$H_S = \sum_{i=1}^n H_i N_i, \quad (5.3)$$

где N_i – число лиц, получивших эквивалентную дозу H_i . Единицей измерения коллективной дозы в СИ является чел·Зв.

Очевидно, что само по себе значение коллективной дозы не является показателем уровня обеспечения радиационной безопасности. Например, рост коллективной дозы для всего персонала АЭС в какой-либо стране мог бы свидетельствовать лишь о развитии ядерной энергетики и увеличении числа людей, привлекаемых в эту отрасль. Судить о тенденции изменения уровня безопасности можно лишь на основе средней индивидуальной дозы в данной отрасли («средняя температура по больнице»).

Например, во время «инцидента», произошедшего на атомной электростанции «Three Miles Island» (США, 28.03.1979), коллективная эквивалентная доза, полученная 2 млн. человек, проживавшими в пределах 80-километровой зоны, составила 32 чел·Зв или 3200 чел·бэр. Некоторые индивидуумы получили при этом до 1 мЗв (100 мбэр), другие – менее 0,01 мЗв (1 мбэр).

И, наконец, еще одна величина – передаваемая эквивалентная доза. Она представляет собой расчетную дозу, которую получит в будущем популяция людей в результате выброса в окружающую среду определенного количества радиоактивности. При расчете данной дозы следует принять во внимание процесс физического распада радиоактивных веществ, число людей, которые могут подвергнуться радиации в будущем, а также скорость проникновения радиоактивных веществ в организм человека и скорость их выведения из организма. Единицы измерения будут такими же, как и для коллективной эквивалентной дозы, т.е. чел·Зв (чел·бэр).

Важное замечание. Расчет коллективной дозы требует уже не только введения коэффициента качества, но и принятия допущения в том, что биологический эффект находится в линейной зависимости от дозы излучения. Иными словами, эффект радиации, приходящийся на одну единицу дозы, не зависит от величины самой дозы. Например, один миллион людей, получивших эквивалентную дозу 1 мкЗв, и одна тысяча людей, получивших эквивалентную дозу 1 мЗв, будут представлять в обоих случаях одну и ту же коллективную дозу, равную 1 чел·Зв. Это не говорит ни за, ни против того, что в данных не связанных между собой популяциях людей могут произойти одинаковые биологические последствия.

Понятия «коллективная доза» и «передаваемая коллективная доза» пригодны для оценки воздействия радиации, особенно с учетом специфики происшествия, но к ним надо относиться критически. Величину коллективной дозы очень «любят» использовать чиновники и представители «зеленых» движений, поскольку она как бы дает простую и однозначную оценку воздействия радиации на население, даже если такая оценка бессмысленна. Коллективная доза совсем теряет смысл без введения понятия о «ничтожной» («de minimus») дозе. Другими словами, необходимо определить некоторую очень низкую дозу радиации, за пределами которой нарушений в организме, как полагают, не произойдет.

Если же понятие о «ничтожной» дозе не принимать в расчет, концепция о коллективной дозе становится неприемлемой. Например, допустим, где-то произошел локальный выброс радиоактивных веществ, приведший к кратковременному воздействию на несколько человек. Затем ветер разносит радиоактивность по всему миру, и она, непрерывно теряя свою концентрацию, достигает, скажем, России, Китая, Индии или США. Любой встретившийся на ее пути индивидуум получит незначительную дозу, соответствующую всего лишь нескольким миллионным или миллиардным долям бэра, т.е.

она незначима по сравнению с дозой, получаемой от природного фона. Однако умножение данной дозы на огромное число людей этих стран «компрометирует» подобную оценку, делая ее бессмысленной. Сказанное справедливо и в отношении других потенциально опасных загрязнителей окружающей среды, например, химических.

И еще одно замечание. При оценке индивидуальных и коллективных эффективных доз следует учитывать возрастной состав групп людей, подвергшихся облучению, ибо воздействие нуклидов в разные периоды развития организма существенно различается. Наиболее справедливо это для экстремально большого воздействия на детские организмы, выброшенного из аварийного реактора на ЧАЭС радионуклида ^{131}I .

Проходя сквозь живые организмы, ионизирующее излучение передает свою энергию тканям и клеткам, из которых построены все биологические материи. При этом следует принимать во внимание, что поглощенная энергия распределяется не равномерно, а отдельными разрозненными порциями или «пачками». В результате громадное количество энергии излучения передается в определенные участки конкретных клеток и совсем небольшое (если таковое вообще имеется) в другие.

Подобный неравномерный характер поглощения энергии обуславливает особенности последствий воздействия радиации на организм. Общее количество поглощенной тканями энергии может быть небольшим, но некоторые клетки живой материи из-за такой неравномерности распределения энергии излучения будут значительно повреждены, что приведет к значительным нарушениям жизненных функций организма в целом. Ничтожность поглощенного количества энергии, вызывающего тяжкие последствия, можно продемонстрировать несколькими способами, заимствованными из книги Э. Дж. Холла⁴.

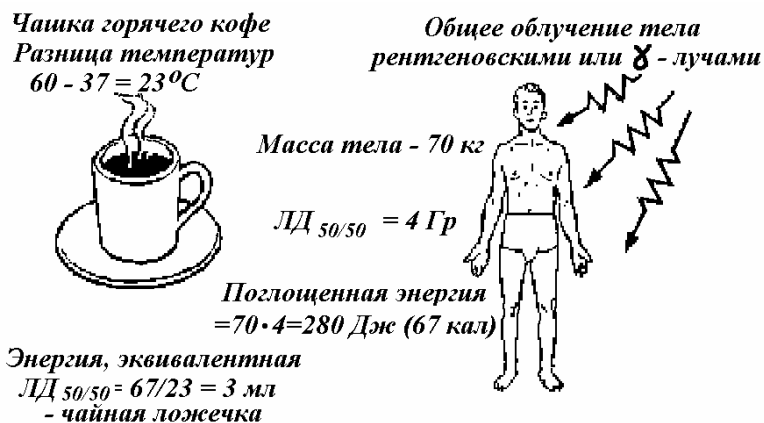


Рис.5.1. Сравнение тепловой энергии и энергии ионизирующих излучений.

Например (рис.5.1.), дозу рентгеновского излучения, опасную (полудетальную) для человека при общем облучении, сравним с тепловой энергией. При этом смертельная энергия рентгеновского излучения будет меньше тепловой энергии,

поглощенной организмом после выпитой маленькой чашечки горячего кофе или после нескольких минут принятия солнечных ванн в теплый день.

Энергию смертельной дозы поглощенного рентгеновского излучения Э. Дж. Холл сопоставляет и с механической энергией по подъему груза. Пусть тот же человек, что на рис. 5.1, поднимается по лестнице. Энергия (работа A), затрачиваемая на подъем, может быть вычислена по формуле: $A = mgh$. Здесь m - масса человека, g - ускорение силы

тяжести, равное $9,81 \text{ м/с}^2$, а h - высота подъема в м. Отсюда $h = \frac{A}{mg} = \frac{280}{70 \cdot 9,81} = 0,41 \text{ м}$. Т.е.

смертельная доза рентгеновского излучения эквивалентна энергии, затрачиваемой человеком при подъеме на две ступеньки.

Тепловая или механическая энергия поглощается и распределяется в тканях одинаково и равномерно. Поэтому, чтобы вызвать повреждения в живом организме,

⁴ Э. Дж. Холл. Радиация и жизнь. М: «Медицина», 1989, с. 256.

энергии подобного типа потребуется намного больше, чем энергии радиоактивного излучения. Сущность различия между ионизирующей и неионизирующей радиацией можно пояснить рис.5.2. Рассмотрим последствия падение груза массой 1 кг на бегущего кролика. Груз можно выбрать в двух формах:

- песок, в котором миллионы разрозненных частиц вещества составляют массу 1 кг;
- камень массой 1 кг.

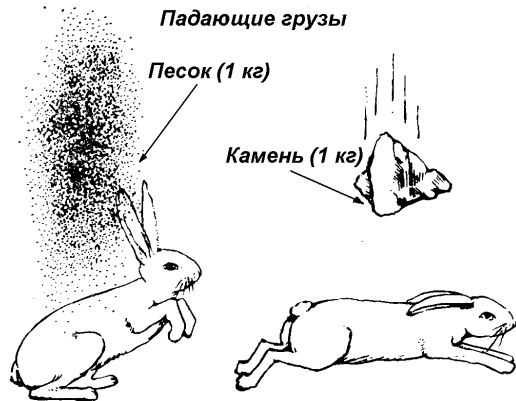


Рис.5.2. Иллюстрация различий между ионизирующей и неионизирующей радиацией.

Общее количество энергии при падении обоих грузов с заданного расстояния будет одинаковым. В случае падения песка общая энергия будет дробиться на столь небольшие отдельные порции, что при столкновении любой из частиц песка с кроликом повреждений организма не произойдет. Если выбрать вместо песка камень, шансов на столкновение его с кроликом станет меньше, зато в случае

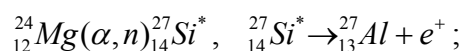
попадания камня в мишень биологические повреждения, безусловно, будут значительными. Ионизирующее излучение представляет собой отдельные крупные «пакеты» или «пачки» энергии, которые достаточно сильны, чтобы разорвать жизненно важные для организма связи в химических молекулах и вызвать, подобно упавшему камню, серьезное биологическое повреждение.

Лекция 6. ОТКРЫТИЕ ИСКУССТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ. ЯДЕРНАЯ ПРОГРАММА США

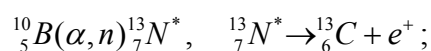
Явление искусственной радиоактивности открыли французские ученые супруги Ирен и Фредерик Жолио-Кюри¹ (1934), бомбардируя некоторые элементы α -частицами. В результате были получены искусственные радионуклиды фосфора, кремния и азота, претерпевающие позитронный (β^+) распад:



$t_{1/2} = 3,25$ минуты ;



$t_{1/2} = 2,5$ минуты ;



$t_{1/2} = 14$ минут.

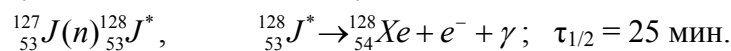
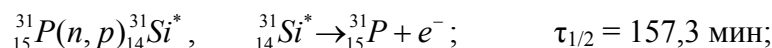
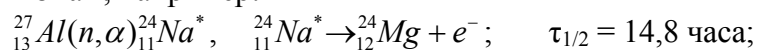


Ирен Жолио-Кюри



Фредерик Жолио-Кюри

В том же году итальянец Энрико Ферми² (1934) установил, что искусственные радионуклиды могут быть получены при облучении ряда элементов нейтронами. При этом ядерные реакции могут осуществляться по разным механизмам, например:



Энрико Ферми

Наконец, немецкие исследователи Отто Ган³ и Фриц Штрассман (1938) обнаружили деление ядер урана-235 при бомбардировке их нейтронами. Интерпретация этого явления была весьма запутанной. Сущность процесса была понята, ранее работавшей в лаборатории О. Гана, но вынужденной бежать в Швецию, Лизой Мейтнер⁴. В январе 1939 г она, вместе с физиком Отто Фришем, дала правильную трактовку механизма деления.

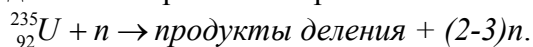
¹ Ирен (1897-1956) и Фредерик (1900-1958) Жолио-Кюри – французские физики и химики, работали в области радиохимии, ядерной физики и ядерной техники. Открыли (1934) явление искусственной радиоактивности, вызванной быстрыми α -частицами – Нобелевская премия по химии (1935). Члены многих академий, известные общественные деятели.

² Энрико Ферми, (1901-1954) – итальянский физик, работал в области атомной и ядерной физики, статистической и квантовой механики. Открыл искусственную радиоактивность, вызванную нейтронами, обнаружил и создал теорию замедления нейтронов – Нобелевская премия по химии (1938). Построил первый ядерный реактор (1942, Чикаго). Член многих академий и научных обществ.

³ Отто Ган (1879-1968) – немецкий радиохимик и физик. Открыл ряд радиоактивных элементов, совместно с Ф. Штрассманом – деление ядер урана нейтронами – Нобелевская премия по химии (1944). Профессор многих университетов и член ряда академий.

⁴ Лиза Мейтнер (1878-1968) – австрийский физик, профессор. Открыла протактиний и ряд других радиоактивных изотопов. Предсказала цепную ядерную реакцию деления.

Оказалось, что ядро уран-235 под действием медленных (т.н. «тепловых нейтронов») претерпевает деление на два близких по размерам неустойчивых (т.е. радиоактивных) осколка по цепному механизму: на каждый поглощенный нейтрон образуются 2-3 нейтрона, способных развивать процесс далее. При этом в каждом элементарном акте деления выделяется огромная энергия ≈ 200 МэВ:



Отто Ган



Л. Мейтнер и О. Ган в лаборатории



Лиза Мейтнер

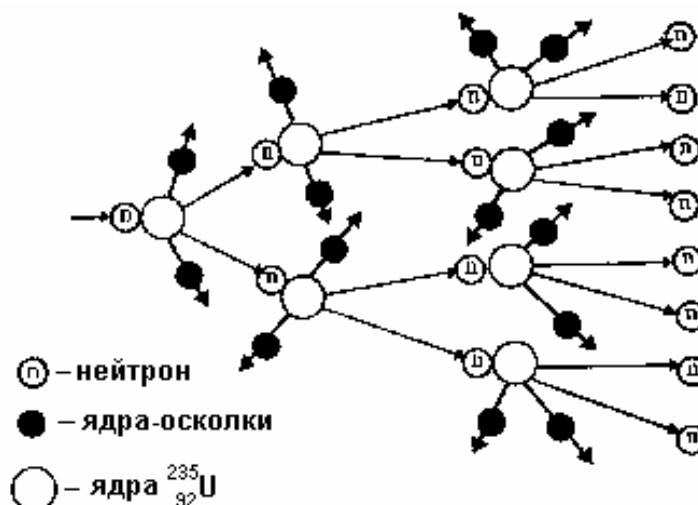


Рис.6.1. Цепная реакция на ядрах урана-235

Ядерные реакции принципиально отличны от химических реакций. Химические изменения происходят главным образом вследствие прямого взаимодействия (соударений) атомов и молекул и сопровождается изменением энергии на 0,1 - 10 эВ ($\sim 10^4 - 10^6$ Дж/моль). Поскольку энергия теплового движения молекул при 100 – 1000°C составляет в среднем 0,03 – 0,1 эВ, в лабораторных и производственных условиях можно легко осуществлять реакции, протекающие за счет тепловой энергии и управляемые путем регулирования температуры.

Для превращения атомных ядер необходима энергия порядка МэВ, т.е. приблизительно в миллион раз превосходящая химическую энергию. Это соответствует тепловой энергии вещества при температуре порядка многих миллионов градусов. Поэтому обычные температурные изменения и химические реакции не оказывают и не

могут оказать воздействия на атомные ядра. Во всех химических реакциях атомы ведут себя как не изменяющиеся частицы (закон неизменяемости химических элементов в классической химии).

Последнее объясняет все неудачи средневековых алхимиков, пытавшихся с помощью простейших химических операций превратить одни элементы в другие (чаще всего – свинец или ртуть – в золото).



Рис. 6.2. Алхимическая лаборатория

Превращения элементов – это ядерные процессы, и для их реализации необходимы несопоставимо большие энергозатраты, что обеспечивается в ядерных реакторах и сверхмощных ускорителях элементарных частиц. Колоссальные энергетические эффекты сопровождают как процессы деления тяжелых элементов, так и процессы синтеза из наиболее легких элементов последующих элементов таблицы Менделеева. Так,

деление 1 кг $^{235}_{92}\text{U}$ эквивалентно сжиганию примерно 3300 т угля.

Открытие процесса цепного деления $^{235}_{92}\text{U}$ под действием медленных (тепловых) нейтронов коренным изменило ситуацию. Исследование проблем радиоактивности перестало быть областью интересов узкого круга «избранных». Возникли предпосылки для создания нового сверхмощного атомного оружия и полноценной атомной энергетики. Из чисто научной проблемы, проблема радиоактивности переросла в «букет» проблем: технических, экономических, военных, политических и социальных.

Вспомним, что открытие цепного деления произошло в Германии, где у власти находились фашисты, и пришлось на начало 2-й Мировой войны. Это имело ряд последствий:

- воюющие страны проявили исключительный интерес к возможности создания принципиально нового «сверхоружия»;
- передовые ученые Германии, Италии и оккупированных стран Европы (А. Эйнштейн, Э. Ферми, Б. Понтекорво, Л. Сциллард и многие другие) бежали в США и создали там мощное научное сообщество, в том числе и физиков-ядерщиков;
- опасение, что Германия решит эту задачу быстрее других (там оказались большие запасы урана и оставались такие крупные специалисты, как В. Гейзенберг, В. Боте, К. Вейцзеккер) заставило их инициировать деятельность правительства США в этом направлении.

Решительные шаги были предприняты Лео Сциллардом, исследователем цепных ядерных реакций, который составил проект письма президенту США Ф.Д. Рузвельту. В письме обращалось внимание на необходимость развертывания мощной ядерной программы, чтобы опередить немцев и не оказаться перед фактом беззащитности от военных действий со стороны фашистской Германии. В конечном итоге это письмо было отправлено 2-го августа 1939 г за подписью А. Эйнштейна (см. ниже). Годы спустя, когда были сброшены атомные бомбы на Хиросиму и Нагасаки, Эйнштейн взял всю ответственность за содержания письма на себя, но подчеркнул, что это – «главная ошибка моей жизни».

Письмо А. Эйнштейна президенту США Ф.Т. Рузвельту:

*Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island*

August 2nd 1939

*F.D. Roosevelt
President of the United States
White House
Washington, D.C.*

Sir:

Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable – though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia. while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of the situation you may think it desirable to have more permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government

action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with y private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,



(Albert Einstein)

Результатом письма было создание полномасштабной американской ядерной программы, которая известна под кодовым названием «Манхэттенский проект». В рамках программы 02.12.1942 г Э. Ферми осуществил в Чикаго запуск первого в мире ядерного реактора, где роль замедлителя нейтронов выполнял графит (до тех пор физики считали, что роль замедлителя может выполнять только тяжелая вода D_2O).

Заметим, что реакция Гана и Штрассмана может быть реализована только на изотопе урана-235, тогда как его содержание в природном уране составляет всего лишь около 0,7% ат.; почти все остальное содержание приходится на уран-238. Химические методы разделения изотопов из-за их полной химической идентичности неприемлемы. Поэтому разделение изотопов базируется только на различиях их молекулярных масс M и представляет собой трудоемкую многоступенчатую и энергоемкую процедуру. Первым промышленным производством США, обеспечившим массовое разделение изотопов, был завод в Ок-Ридже (штат Теннесси). Начало строительства – лето 1943 г, выход на проектируемую мощность – начало 1945 г. Для разделения был использован метод газовой диффузии газообразного соединения UF_6 через тонко пористые перегородки. Теоретический коэффициент обогащения изотопом

уран-235 $f = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{352}{349}} = 1,0043$. Практический – всего 1,0014. Поэтому в

промышленных условиях необходимо использовать каскады, включающие тысячи повторяющихся операций. В последствии газодиффузионные заводы для обогащения урана-235 были построены США в Падука (штат Кентукки) и в Портсмуте (штат Огайо).

В том же Ок-Ридже был построен и 04.11.1943 г вошел в строй первый полупромышленный ядерный реактор, предназначенный для наработки первых порций еще одного нового, отсутствующего в природе элемента: плутония-239. Данный элемент способен, подобно урану-235, участвовать в цепной реакции деления под действием медленных нейтронов. Обнаружен в 1939 г Мак-Милланом, а его свойства описаны в марте 1941 г Кеннеди, Сиборгом, Сегре и Уолом.

Принципиальная схема получения плутония-239 в ядерном реакторе действием быстрых нейтронов на уран-238 выглядит следующим образом:

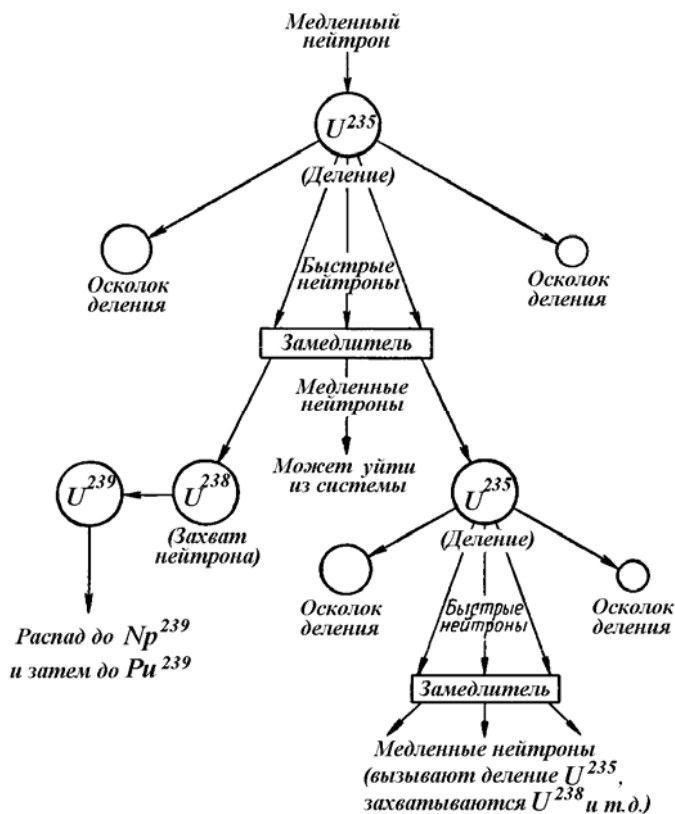
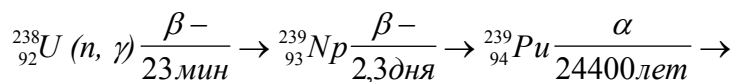
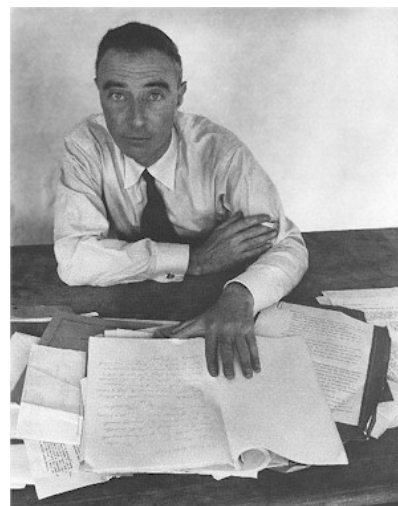
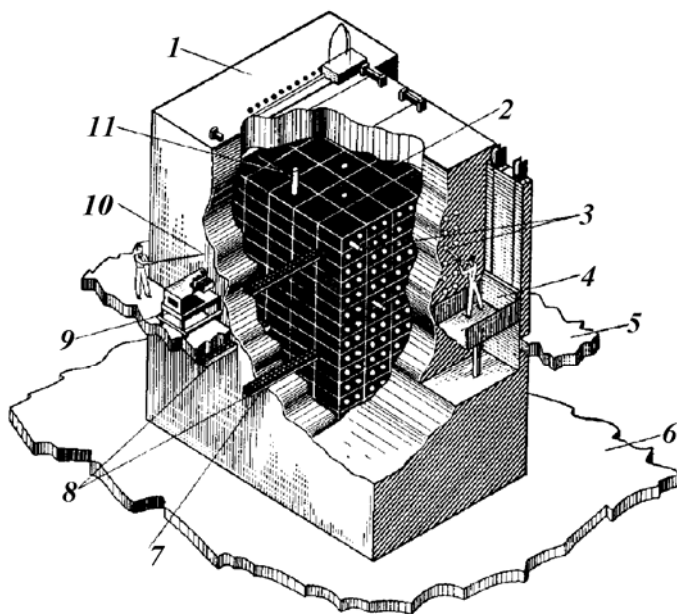


Рис.6.3.Схема деления U^{235} и захвата нейтронов U^{238} в ядерном реакторе

Ниже изображена схема устройства Ок-Риджского реактора с графитовым замедлителем.



Р. Оппенгеймер



1- бетонная защита; 2- графитовый замедлитель; 3- алюминиевые трубки, содержащие уран; 4- подъемник; 5- второй этаж; 6- первый этаж; 7- отверстие для алюминиевых трубок; 8- длинные графитовые держатели; 9- защитный слой свинца; 10- удаление алюминиевых трубок, содержащих радиоактивные изотопы; 11- регулирующие стержни из бористой стали.

Выделение плутония из смеси с другими элементами осуществляют химическими методами, что принципиально легче. Трудность заключается в высокой радиационной активности этих смесей, что требует дистанционного управления операциями разделения. Первая партия облученных блоков поступила на разделительную установку 20.12.1943 г, а к концу февраля 1944 г плутоний стал производиться в количестве нескольких граммов в месяц.

Промышленные реакторы США были построены в Хенфорде (штат Вашингтон) на берегу многоводной реки Колумбии – удобном источнике воды для охлаждения. Первый реактор начал работать в сентябре 1944 г. Второй и третий реакторы – в конце 1944 и начале 1945 гг. Позднее в Хенфорде было построено еще несколько реакторов. Там же были построены мощные заводы по выделению плутония. В конечном итоге это позволило США в сжатые сроки изготовить и испытать первую атомную бомбу.⁵



Рис.6.4. Первое испытание атомной бомбы (16.07.1945, Аламагордо, штат Нью-Мексико, США)

В отличие от ядерных реакторов любого типа, где ядерные реакции осуществляются в контролируемом режиме, атомные бомбы – устройства, где осуществляются неуправляемые реакции с максимально высокой скоростью, т.е. по взрывному механизму. Чтобы осуществить такой процесс, необходимо обеспечить три условия:

- во-первых, необходимо иметь достаточно большое количество чистого делящегося материала (урана-235 или плутония-239), чтобы размеры системы были больше критических – только в этом случае будет поддерживаться ядерная цепная реакция;

- во-вторых, деления ядер урана или плутония должно происходить в основном за счет быстрых нейтронов – в этом случае процесс будет идти чрезвычайно быстро. В устройстве должен отсутствовать не только специальный замедлитель, но и любые материалы, способные замедлять нейтроны;

- в-третьих, из-за присутствия в атмосфере блуждающих нейтронов количество компактного делящегося материала в бомбе должно быть меньше критического. Чтобы бомба взорвалась, необходимо практически мгновенно перевести систему из подкритического в надкритическое состояние.

Для осуществления такого перехода (осуществления ядерного взрыва) существуют два метода:

- выстрел одного куска расщепляющегося материала в другой, для их соединения, с помощью т.н. «орудийного ствола»;

- всестороннее сжатие куска материала сферической формы подкритических размеров, что переводит его в надкритическое состояние за счет мгновенного увеличения плотности и уменьшения поверхности. В таком состоянии материал эффективнее поглощает нейтроны и меньше их теряет через поверхность. Сжатие происходит под действием

⁵ См. Американский документальный фильм об испытании первой атомной бомбы, бомбардировках Хиросимы и Нагасаки, создании и испытании водородных бомб. Trinity and Beyond – the Atomic Bomb Movie.

направленной внутрь ударной волны, образованной взрывом химической взрывчатки, размещенной по внешней сфере.

Ниже изображены схемы ядерных устройств.

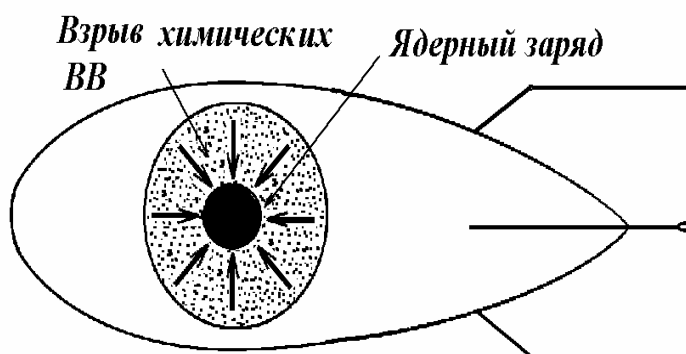
I.



Рис.6.5. Атомная бомба «Малыш», сброшенная на Хиросиму (06.08.1945). Заряд – около 2 кг урана-235, мощность взрыва – $15 \text{ кт} \pm 20\%$ (в пересчете на самую распространенную взрывчатку периода второй мировой войны – тринитротолуол, или тол). Ее Внешний вид:



II. Рис.6.6. Схема атомной бомбы «Толстяк», сброшенной на Нагасаки (09.08.1945). Заряд – плутоний-239. Мощность взрыва – $22 \pm 2 \text{ кт}$.



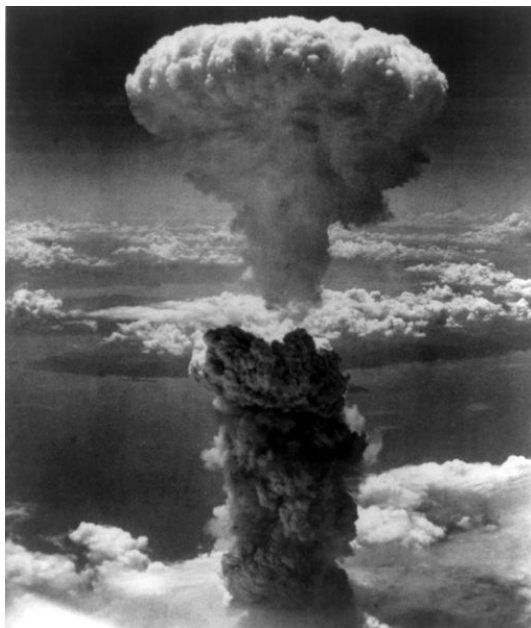
Внешний вид «Толстяка» и его конструкция были воспроизведены при создании первой атомной бомбы в СССР.



Рис.6.7. Хиросима. Слева – «ядерный дом» или «Мадонна Хиросимы» – уцелевшее при бомбардировке здание тюрьмы. Справа – поле после разрушения и пожара легких домиков.
Ниже - Колокол Мира.

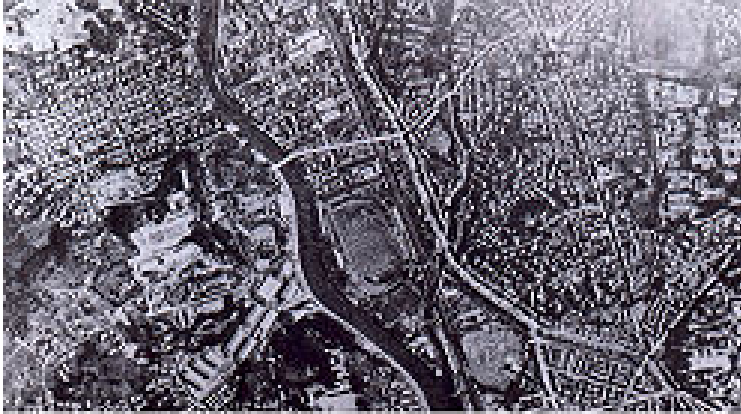
Взрывы бомб вызвали огромные жертвы среди гражданского населения⁶. Численность населения Хиросимы в момент бомбардировки – около 400 тыс. человек. Погибло от взрыва около 140 тыс. человек, раненых насчитывалось 160 тысяч. Потом число жертв постоянно увеличивалось за счет умерших от радиационного поражения. В огне вспыхнувших пожаров сгорели 75 тысяч домов.

Рис.6.8. Нагасаки. Взрыв бомбы. Пейзаж разрушений. Карта города до и после бомбардировки.



⁶ <http://www.minatom.ru/News/Main/view?id=21149&idChannel=614>. Варварской атомной бомбардировке Хиросимы и Нагасаки - 60 лет

При бомбардировке Нагасаки были разрушены крупные промышленные предприятия, и погибло около 75 тыс. человек. Применение ядерного оружия не вызывалось военной необходимостью. Правящие круги США преследовали политические цели – продемонстрировать свою силу для устрашения свободлюбивых народов и запугать СССР.



Сразу после окончания войны города стали отстраивать заново. В 1946 году, через год после взрыва, население Хиросимы составляло 188 тыс. человек, в 1950 году – 285 тыс., в 1955 году – 357 тыс. Сейчас численность населения Хиросимы превышает 1 млн. человек.



Действующая конституция Японии декларирует принцип трех запретов, касающихся ядерного оружия: *«Не производить, не иметь, не использовать»*.

Лекция 7. СТАНОВЛЕНИЕ АТОМНОЙ ПРОГРАММЫ СССР

Официальная информация о первом испытании американцами атомной бомбы была сообщена И.В. Сталину на Потсдамской конференции президентом Г. Трумэном через неделю после первых атомных испытаний в Аламогордо. Непроницаемое лицо Сталина ничего не сказало Трумэну – он так и не понял, знают ли русские что-нибудь об атомном оружии? Русские знали, и знали достаточно много¹.

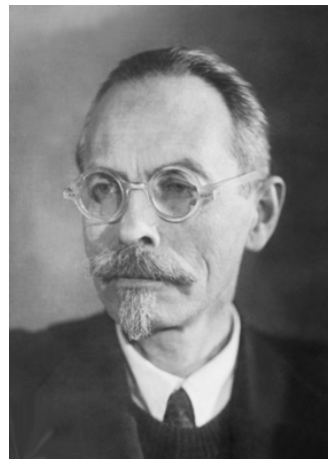
Принципиальная возможность практического использования ядерной энергии была осознана и начала рассматриваться советскими учеными сразу же после эпохальных открытий в области ядерной физики 1938-1939 годов.

В 1939 г вопрос о возможности осуществления ядерной цепной реакции обсуждался в СССР на IV Всесоюзном совещании по атомному ядру (ноябрь 1939 г, Харьков). И.М. Франк на основании расчетов Жолио, Перрена и др. исследователей отметил, что *«такая реакция возможна, и, следовательно, мы стоим на грани практического использования внутриатомной энергии»*.

В июне 1940 г. В.И. Вернадский и В.Г. Хлопин писали:

«Открытие в 1939 году явления деления ядра атома урана под действием нейтронов, сопровождающегося выделением огромных количеств энергии, и особенно тот факт, что процесс этот порождает возникновение новых нейтронов в количестве, превосходящем то, которое необходимо для того, чтобы его вызвать, впервые вплотную поставили вопрос о возможности использования внутриатомной энергии для нужд человечества».

В.Г. Хлопин



В проекте письма заместителю председателя СНК СССР Н.А. Булганину (12.07.1940) В.И. Вернадский, А.Е. Ферсман и В.Г. Хлопин отмечали, что *«на пути технического использования внутриатомной энергии стоит еще ряд очень больших трудностей, и потребуются проведение большой научно-исследовательской работы, однако, как нам кажется, трудности эти не носят принципиального характера. Нетрудно видеть, что если вопрос о техническом использовании внутриатомной энергии будет решен в положительном смысле, то это должно в корне изменить всю прикладную энергетику. Важность этого вопроса вполне сознается за границей, и по поступающим оттуда сведениям в Соединенных Штатах Америки и Германии лихорадочно ведутся работы, стремящиеся разрешить этот вопрос, и на эти работы ассигнуются большие средства... Мы полагаем, что уже сейчас назрело время, чтобы правительство, учитывая важность решения вопроса о техническом использовании внутриатомной энергии, приняло ряд мер, которые обеспечили бы Советскому Союзу возможность не отстать в разрешении этого вопроса от зарубежных стран»*.

Мнение ученых было поддержано Президиумом АН СССР и доведено в сентябре 1940 г до сведения аппарата ЦК ВКП(б), а в начале 1941 г с предложением о необходимости организации работ по использованию атомной энергии в военных целях к Народному комиссару обороны СССР С.К. Тимошенко. Однако специальных правительственных решений по проблеме использования атомной энергии путем осуществления ядерной цепной реакции в 1940-1941 гг. в СССР не было принято. Работы в этом направлении

¹ Г.А. Гончаров, Л.Д. Рябев. О создании первой отечественной атомной бомбы.//Успехи физических наук, 2001, т.171, №1, с. 79-104.

координировались решениями Президиума АН СССР и созданной (30.07.1940) при нем Комиссии по проблеме урана (председатель – В.Г. Хлопин).

Заслуживает внимания сделанное еще в 1940 г высказывание члена Урановой комиссии А.Ф. Иоффе о наилучшей, по его мнению, кандидатуре для руководства проблемой урана.



Отвечая на запрос секретаря Президиума АН СССР П.А. Светлова о состоянии проблемы использования внутриатомной энергии, А.Ф. Иоффе 24.08.1940 отметил, что *«возможность технического использования энергии урана нельзя считать исключенной при настоящем состоянии наших знаний»* и что *«основными специалистами являются: И.В. Курчатов (ЛФТИ) и его сотрудники Флеров и Петржак; а также Зельдович и Харитон (ЛИХФ)... Общее руководство всей проблемой в целом следовало бы поручить И.В. Курчатову как лучшему знатоку вопроса, показавшему на строительстве циклотрона выдающиеся организационные способности»*.

А.Ф. Иоффе

Я.Б. Зельдович и Ю.Б. Харитон в статье за 1940 г. *«Кинетика цепного распада урана»* описали условия, необходимые для осуществления ядерного взрыва: *«Взрывное использование цепного распада требует специальных приспособлений для весьма быстрого и глубокого перехода в сверхкритическую область и уменьшения естественной терморегулировки»*. Они высказали предположение о том, что в результате применения тех или иных мер может оказаться возможным *«создание условий цепного распада урана посредством разветвляющихся цепей, при котором сколь угодно слабое облучение нейтронами приведет к мощному развитию цепной реакции и макроскопическим эффектам»*. Там же они оценили скорость экспоненциального роста концентрации нейтронов в системе при большой надкритичности (*увеличение в e раз за время 10^{-7} с*). Они отметили и связанные с этим, по их мнению, трудности: *«При столь бурном развитии цепного распада мы не вправе более отвлекаться от рассмотрения создания самих сверхкритических условий, при которых цепной распад только и возможен. Время проведения процессов, осуществляющих переход критических условий, например время сближения двух урановых масс, каждая из которых в отдельности находится в докритической в отношении цепного распада области, вряд ли удастся сделать хотя бы сравнимым со временем разгона реакции»*, и то обстоятельство, что: *«кинетика развития цепного развала является решающей для суждения о тех или иных путях практического, энергетического или взрывного использования распада урана»*.

Нападение 22 июня 1941 г. фашистской Германии на Советский Союз прервало проводившиеся в СССР ядерные исследования, в том числе исследования возможности осуществления цепной реакции деления, в то время как в Великобритании и США работы по этой проблеме энергично продолжались.

Однако руководство СССР понимало важность продолжения научных исследований, отвечавших интересам обороны страны, и скорейшего внедрения их результатов. В связи с военным положением вся полнота власти на период войны перешла (30.07.1941) чрезвычайному партийно-государственному органу – Государственному комитету обороны (ГКО). Уже через неделю (06.08.1941) ГКО принял постановление № 34сс о назначении председателя Комитета по делам высшей школы при СНК СССР С.В. Кафтanova уполномоченным ГКО по вопросам координации и усиления научной работы в области химии для нужд обороны. На него была возложена обязанность подготовки и

внесения на утверждение ГКО предложений о внедрении в производство и на вооружение новых научных и технических достижений и изобретений в области взрывчатых веществ, других химических средств обороны и средств химической защиты. При уполномоченном ГКО С.В. Кафтанове был организован научно-технический совет из крупнейших ученых и специалистов, в состав которого вошли, в частности, академики А.Н. Бах, Н.Д. Зелинский, П.Л. Капица, С.С. Наметкин, А.П. Фрумкин. В задачи совета входило выдвижение и организация разработки новых тем, имеющих актуальное значение в деле обороны страны. Вскоре при С.В. Кафтанове была организована и физическая комиссия, которую возглавил П.Л. Капица.

(Отметьте признание авторитета высшей школы со стороны высшего руководства страны, в критические моменты ее истории!).

П.Л. Капица



Весной 1942 г., основываясь на агентурной информации, Л.П. Берия впервые сообщил Сталину о развернувшихся на Западе работах по созданию атомной бомбы.

За несколько месяцев до этого, с конца 1941 г 28-летний курсант Военно-воздушной академии, уже тогда известный физик и будущий академик Г.Н. Флеров, обратился с письмами сначала к И.В. Курчатову, а затем к уполномоченному Государственным Комитетом Обороны (ГКО) по науке С.В. Кафтанову, убеждая их в необходимости развернуть в стране работы по делению урана. Более того, уже находясь в армии, он в апреле 1942 г пишет непосредственно И.В. Сталину (и это письмо попало к С.В. Кафтанову). Примечательно, с какой страстью Флеров отстаивал свою позицию: *«Во всех иностранных журналах полное отсутствие каких-либо работ по этому вопросу. Это молчание не есть результат отсутствия работы... Словом, наложена печать молчания, и это-то является наилучшим показателем того, какая кипучая работа идет сейчас за границей... Нам всем необходимо продолжить работу над ураном».*



В письме Сталину Флеров подчеркивал: *«Единственное, что делает урановые проекты фантастическими – это слишком большая перспективность в случае удачного решения задачи... В военной технике произойдет самая настоящая революция... Если в отдельных областях ядерной физики нам удалось подняться до уровня иностранных ученых и кое-где даже их опередить, то сейчас мы совершаем большую ошибку, добровольно сдавая завоеванные позиции».*

Г.Н. Флеров

Письма Г.Н. Флерова сыграли свою роль. Как и информация, почерпнутая из записной книжки убитого партизанами немецкого офицера. В ней были обнаружены схемы ядерных превращений урана и записи, наводившие на мысль о работах в Германии по созданию сверхоружия. В результате весной 1942 г за подписью С.В. Кафтанова и академика А.Ф. Иоффе в ГКО страны было направлено предложение о необходимости создания научного центра по проблеме ядерного оружия.

Много лет спустя Кафтанов вспоминал: *«Докладывая вопрос на ГКО, я отстаивал наше предложение. Я говорил: конечно, риск есть. Мы рискуем десятком или даже сотней миллионов рублей... Если мы не пойдем на этот риск, мы рискуем гораздо большим: мы можем оказаться безоружными перед лицом врага, овладевшего атомным*

оружием. Сталин походил, походил и сказал: «Надо делать». Флеров оказался инициатором принятого теперь решения»².

В течение 1942 г советская разведка получила очень большое число документов по урановой проблеме³. Из Англии наиболее ценные сведения поступали от Клауса Фукса, физика-атомщика, уехавшего в 1933 г из Германии, и от Джона Кэрнкросса, секретаря одного из министров Военного кабинета лорда Хэнки. Из США в это же время стала поступать информация от Бруно Понтекорво, эмигранта из Италии, близкого сотрудника знаменитого Энрико Ферми, строившего в 1942 г первый в мире урановый реактор. Кэрнкросс, Фукс и Понтекорво были коммунистами по политическим убеждениям, и передача сведений по атомной бомбе в СССР осуществлялась ими добровольно, по их собственной инициативе. Агентурная связь обеспечивала лишь отправку материалов, а не их генерацию. Информация приходила в форме обстоятельных научных отчетов, сложных математических расчетов и копий исследований, которые распространялись как своеобразные «закрытые публикации» среди активных участников «уранового проекта» в США и Англии. Каждый новый технологический процесс или техническое решение обеспечивались патентами, и копии связанной с этим документации также поступали в СССР. Понимать все эти материалы могли лишь ученые, знающие высшую математику и теоретическую физику. Некоторые отчеты могли быть понятны лишь специалистами-химиками. Все они лежали непрочитанные специалистами в сейфах НКВД больше года.

Решение ГКО о программе работ по созданию атомной бомбы было подписано Сталиным 11.02.1943. Общее руководство проблемой было возложено на заместителя председателя ГКО В.М. Молотова⁴. Ему же предстояло дать рекомендации о выборе научного руководителя. Молотов так вспоминает о своем решении: *«У нас по этой теме работы велись с 1943 года, мне было поручено за них отвечать, найти такого человека, который бы мог осуществить создание атомной бомбы. Чекисты дали мне список надежных физиков, на которых можно было положиться, и я выбирал. Вызвал Капицу к себе, академика. Он сказал, что мы к этому не готовы, и атомная бомба - оружие не этой войны, дело будущего. Спрашивали Иоффе – он тоже как-то неясно к этому отнесся. Короче, был у меня самый молодой и никому еще не известный Курчатов, ему не давали ходу. Я его вызвал, поговорили, он произвел на меня хорошее впечатление. Но он сказал, что у него еще много неясностей. Тогда я решил ему дать материалы нашей разведки – разведчики сделали очень важное дело. Курчатов несколько дней сидел в Кремле, у меня, над этими материалами»*.

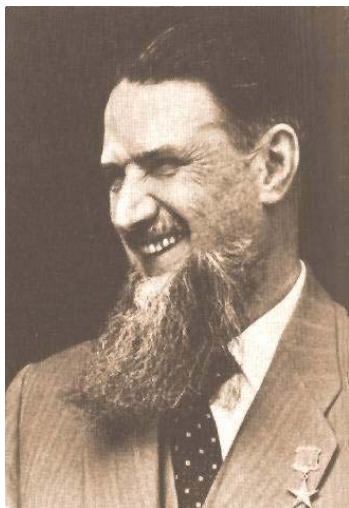
Экспертное заключение Курчатова по документам разведки, которые он читал в Кремле в кабинете Молотова, датировано 07.03.1943. Это был подробный анализ. Курчатов начал с заявления о том, что полученные разведкой материалы *«имеют громадное, неоценимое значение для нашего государства и науки»*. В заключение он написал, что *«... вся совокупность сведений материала указывает на техническую возможность решения всей проблемы урана в значительно более короткий срок, чем это думают наши ученые, не знакомые с ходом работ по этой проблеме за границей»*.

Решение ГКО СССР о назначении И. В. Курчатова на вновь созданный пост научного руководителя работ по использованию атомной энергии в СССР подписано Сталиным 10.03.1943. ГКО и Сталин наделили Курчатова чрезвычайными полномочиями по мобилизации необходимых для решения проблемы человеческих и материальных ресурсов. В течение всего марта 1943 г Курчатов изучал в НКВД многочисленные документы разведки. Документы, полученные из США, содержали колоссальный объем информации. Курчатову нужно было дать заключение на 237

² Ж.А. Медведев. Сталин и атомная бомба.// Вестник РАН, том 72, №1, с. 57-66 (2002)

³ У истоков советского атомного проекта: Роль разведки, 1941-1946 гг. //Вопросы истории естествознания и техники. № 3, с. 107-108 (1992).

⁴ М.Г. Первухин. Как была решена атомная проблема в нашей стране.//Новая и новейшая история, №5, 2001.



научных работ, связанных в основном с конструкцией уран-графитового котла (реактора) и возможности использования не только урана, но и плутония для получения атомной бомбы. На этот раз Курчатов не просто давал экспертный анализ, но уже как утвержденный руководитель проблемы составлял подробный список тех сведений, *«которые было бы желательно получить из-за границы»*, и просил в связи с этим *«... дать указания Разведывательным Органам»*.

И.В. Курчатов

Решением Академии наук СССР 12.04.1943 Курчатов был назначен директором вновь созданного секретного научного института атомной энергии, которому для конспирации было дано условное название Лаборатория №2. Документы, с которыми ознакомился Курчатов в Кремле и в НКВД, содержали много неожиданного для советской атомной физики. Новостью была возможность постройки уранового реактора с графитом в качестве замедлителя нейтронов. До этого физики считали, что реактор может работать лишь в том случае, если замедлителем нейтронов будет «тяжелая» вода D_2O . Немецкие физики также пытались в 1942 г. построить реактор с тяжелой водой, и дефицит тяжелой воды был тормозом в их работе. Новостью для Курчатова было открытие в США плутония (в своих первых заметках Курчатов называл его *«неземным элементом»*) и перспективность использования нового элемента для создания атомной бомбы. Критическая масса у плутония была значительно ниже, чем у урана-235. Плутониевая бомба могла иметь большую мощность взрыва при меньшем весе. Очень важными были и исследования в США и Англии о разделении природного урана на изотопы 235 и 238 газовой диффузией.

Спектр проблем, требующих решения, их сложность, многогранность и трудоемкость были столь велики, что один Курчатов не был в состоянии давать по ним экспертную оценку и осуществлять руководство по их реализации. Ему удалось преодолеть сопротивление НКВД, и постепенно к секретным документам были допущены ведущие ученые, возглавившие разные отделы в Лаборатории № 2: А.Ф. Иоффе, А.И. Алиханов и И.К. Кикоин. В последующем к этой группе «надежных» физиков были подключены Л.А. Арцимович, Ю.Б. Харитон и К.И. Щелкин. Каждый из них возглавил самостоятельную научно-техническую проблему:

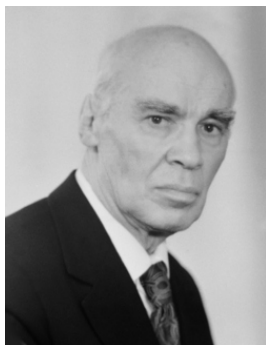
И.В. Курчатов – создание уран-графитового реактора и выделение плутония;

А.И. Алиханов – постройка реактора на тяжелой воде;

И.К. Кикоин – практическая разработка разделения изотопов урана газодиффузией;

Л.А. Арцимович – разделение изотопов под действием магнитных полей;

Ю.Б. Харитон и К.И. Щелкин – разработка конструкции урановой и плутониевой бомб.



Слева направо:

А.И. Алиханов,
И.К. Кикоин,
Л.А. Арцимович



Ю.Б. Харитон,



К.И. Щелкин

Хотя разведка продолжала снабжать физиков большим объемом информации, показывающим приближение США к обладанию реальной атомной бомбой, прогресс в этом направлении в СССР был скромным. Причина была простой – в стране не было урана. Для самого маленького уранового реактора нужны были десятки тонн чистого урана, а в распоряжении Лаборатории № 2 имелись лишь несколько килограммов этого металла. Урановая руда нигде на территории СССР не добывалась. Геологическая разведка урана уже активно разворачивалась, но на быстрые решения трудно было рассчитывать.

Значительные запасы урана имелись в Германии. Их добывали в Болгарии, Чехословакии и в Восточной Германии. Наиболее богатые руды Бельгийского Конго были вывезены в Германию из Бельгии после оккупации последней.

Нами болгарские рудники были взяты под контроль в начале 1945 г, почти сразу после освобождения Болгарии. Но болгарская урановая руда была бедной, и обогатительных комбинатов здесь не было. Урановые рудники в западной части Чехословакии и в Саксонии были разрушены американской авиацией до прихода сюда советской армии. После высадки союзных войск в Европе, в США была создана группа «спецназа» Alsos Team, в задачу которой входил захват на территории Германии любого оборудования, связанного с урановым проектом, а также немецких запасов урана и тяжелой воды. Эта же группа осуществляла аресты и депортацию в Англию ученых-атомщиков. В первые месяцы 1945 г в Германии были разобраны и отправлены в Англию два немецких экспериментальных урановых реактора на тяжелой воде, которые не были еще закончены. Один из этих реакторов находился возле Лейпцига в будущей советской зоне оккупации.



С опозданием в середине мая 1945 г, уже после капитуляции Германии, в Берлин прибыла наша собственная «трофейная» урановая команда. Она состояла из ученых-атомщиков, знающих немецкий язык, и сопровождения из офицеров НКВД. Руководство группой осуществлял замнаркома НКВД А.П. Завенягин, в последствии первый заместитель начальника ПГУ.

А.П. Завенягин

В состав группы входили физики Г.Н. Флеров, А.К. Кикоин, Ю.Б. Харитон, Л.А. Арцимович и др. Все они были в форме полковников советской армии.

Наличие в составе группы крупных ученых позволило привлечь к работе ряд ведущих немецких специалистов. Так, проф. Николаус Риль, главный немецкий эксперт по производству чистого металлического урана, был в это время в Берлине и добровольно согласился помогать своим советским коллегам. (Риль родился в 1901 г в Санкт-Петербурге, жил в России до 1919 г и свободно владел русским языком). Он показал главный завод Германии по производству чистого урана для реакторов, который размещался в Ораниенбурге (город к северу от Берлина). Оказалось, что завод был полностью разрушен американскими бомбежками за несколько дней до окончания войны, вне всякой связи с военными действиями. Поврежденные остатки заводского оборудования, тем ни менее, демонтировались и отправлялись в СССР.

А.К. Кикоину и Ю.Б. Харитону в другом городке удалось найти склад уранового сырья. Там оказалось почти 100 т оксида урана. Еще 12 т урана были найдены в другом месте. Вслед за ураном в Москву были отправлены и Н. Риль с семьей, и несколько инженеров немецкого уранового завода, которые поехали добровольно. В июле немецкая команда Рили начала переоборудование завода «Электросталь» в Ногинске Московской обл. в урановый завод. В конце 1945 г здесь уже началась переработка оксида урана в чистый металлический уран. Первые партии литого металлического урана стали поступать в курчатовскую лабораторию в январе 1946 г, и шли на сборку уран-графитового экспериментального реактора.

Завод «Электросталь» превратился в один из первых «островов» атомного Гулага. В НКВД он стал известен под кодом «Строительство 713». Число заключенных в этом лагере росло пропорционально росту производства урана. К 1950 г, когда производство чистого урана достигло 1 т в день, количество заключенных, обслуживавших завод, достигло 10 тыс. человек.

Отдельно от Н. Рили команда Завенягина заключила контракты в Восточной Германии еще с двумя группами немецких ученых. Одну из них возглавил Нобелевский лауреат (1925) физик Густав Герц, другую – Манфред фон Арденне. В состав этих групп входили известные и малоизвестные физики и химики. Главной задачей для каждой из групп были испытания разных методов разделения изотопов урана-235 и -238. Для них были созданы институты на берегу Черного моря возле Сухуми (местечко Агудзера). Несколько позднее на Урале на озере Сунгуль был создан еще один секретный объект для радиохимических и радиобиологических исследований, где также работала группа немцев. Научное руководство осуществлял здесь выдающийся радиобиолог Н.В. Тимофеев-Ресовский, арестованный в Берлине 13 сентября 1945 г и привезенный в Москву вместе с рядом своих немецких коллег по Институту генетики и биофизики в Берлин-Бухе, директором которого он был. Его приговорили к 10 годам заключения в ИТЛ, но в 1947 г сочли целесообразным использовать по специальности. Всего в СССР с 1945 по 1955 гг. в урановом проекте работали почти 300 немецких ученых и инженеров.

Академик Ю.Б. Харитон, участник находки трофейного немецкого урана, впоследствии вспоминал: *«Как-то, я помню, мы ехали куда-то на объект с Игорем Васильевичем Курчатовым, и он сказал, что эти 100 тонн помогли примерно на год сократить срок запуска первого промышленного реактора».*

Атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки открыли путь к практическому применению атомных бомб и в других регионах. Вынужденное сотрудничество США и СССР в период войны с Германией перешло в жесткое противостояние и конфронтацию. По сообщениям от К. Фукса и Б. Понтекорво, производство урана-235 и плутония в США позволяло изготавливать до восьми атомных бомб в месяц. В этих новых условиях атомный проект стал для Сталина абсолютным приоритетом.



К. Фукс

Б. Понтекорво



Постановление ГКО № 9887 от 20 августа 1945 г определило новую структуру управления атомным проектом. Для общего руководства всеми работами по использованию внутриатомной энергии ГКО создал «Специальный Комитет» с чрезвычайными полномочиями. Это был директивный орган, своего рода «атомное политбюро». Берия был назначен председателем. Членами комитета, список которого Сталин продиктовал сам, стали Маленков, Вознесенский, Ванников, Завенягин, Курчатов, Капица, Махнеев и Первухин. Спецкомитет должен был обеспечить *«широкое развертывание геологических разведок и создание сырьевой базы СССР по добыче урана... использование урановых месторождений за пределами СССР... организацию урановой промышленности... а также строительство атомно-энергетических установок и производство атомной бомбы»*.

Для непосредственной реализации этих задач при Спецкомитете создавался исполнительный орган – Первое Главное Управление при СНК СССР (ПГУ). Начальником ПГУ был назначен нарком боеприпасов Б.Л. Ванников. В распоряжение ПГУ передавались многочисленные научные, конструкторские, проектные, строительные и промышленные предприятия и учреждения из других ведомств. Курчатовский центр также был передан из Академии наук в ПГУ. Научно-технический отдел разведки был передан под контроль Спецкомитета. ПГУ превратился в огромный секретный супернаркомат.



Б.Л. Ванников

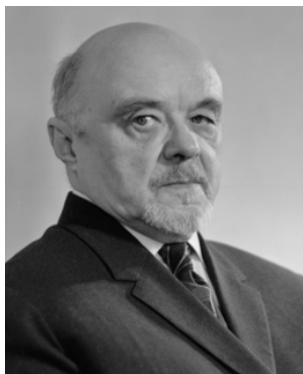
Самой большой и мощной строительной системой, которая была передана ПГУ из НКВД, было Главное управление лагерей промышленного строительства НКВД (ГУЛПС). Этот промышленный ГУЛАГ состоял к концу 1945 г из 13 лагерей, в которых находились 103 тыс. заключенных. Одновременно с этим в ПГУ было передано также и Главное управление лагерей горно-металлургических предприятий НКВД (ГУЛГМП), объединившееся с ГУЛПС. В лагерях ГУЛГМП находилось в начале 1946 г 190 тыс. заключенных, треть которых относилась к так называемому «спецконтингенту» (бывшие военнопленные, репатрианты и другие, попавшие в ГУЛАГ без суда). Объединенная система лагерей, известная в последующем как Главпромстрой, приказом по НКВД № 00932 была объявлена *«специальной организацией для строительства предприятий и учреждений Первого Главного Управления»*. По кодовой классификации приказов в НКВД, два нуля перед цифровым номером приказа означали, что он издан по директиве или резолюции лично Сталина.

В американском атомном проекте участвовало около 125 тыс. человек. В советском проекте, к концу 1945 г, было втрое больше. Но уже в 1950 г число людей, вовлеченных в систему ПГУ, превысило 700 тыс. Больше половины из них составляли заключенные, треть – военно-строительные части МВД. Только около 10% приходилось на «вольнонаемных», свобода передвижения которых была, однако, сильно ограничена.

Директива Сталина обязывала ПГУ обеспечить создание атомных бомб – урановой и плутониевой – в 1948 г.

От К. Фукса, и независимо от Б. Понтекорво, в 1945 г были получены подробные описания и чертежи плутониевой бомбы того типа, которая была взорвана над Нагасаки. В это время в СССР производство плутония еще не начиналось. Небольшой экспериментальный реактор начали строить в Лаборатории № 2. Для этой цели использовали трофейный уран. Большой промышленный реактор требовал не менее 150 т урана. В конце 1945 г. возобновили работу урановые рудники в Чехословакии и в Восточной Германии. Для эксплуатации немецких рудников в Саксонии было создано советское акционерное общество «Висмут». К работе на этих рудниках привлекли немцев, интернированных на Балканах, и немецких военнопленных.

В 1946 г были найдены месторождения урана в различных районах СССР: на Колыме, в Читинской области, в Средней Азии, в Казахстане, на Украине и на Северном Кавказе возле Пятигорска. Разработка месторождений урана, особенно в отдаленных местах, является очень трудной задачей. Первые партии отечественного урана стали поступать лишь в 1947 г из построенного в рекордно быстрые сроки Ленинадского горно-химического комбината в Таджикской ССР. В системе атомного Гулага этот комбинат был известен лишь как «Строительство 665». Места разработки урана были засекречены до 1990 г. Даже рабочие на рудниках не знали про уран. Официально они добывали «спецруд», а вместо слова «уран» в документах того времени писалось «свинец».



Первый промышленный реактор и радиохимический завод начали строить на Урале, в середине 1946 г возле города Кыштым (первое название «База №10», ныне – «ПО Маяк»). Инженерный проект реактора составлялся под руководством академика Н.А. Доллежаля.

Н.А. Доллежал

Закладкой урана в реактор руководил лично Курчатов. Строительством всего центра руководил начальник ПГУ Б.Л. Ванников. Объем строительства был очень велик, и здесь работали более 30 тыс. заключенных нескольких лагерей и три полка военно-строительных частей МВД.

В 1947 г. было развернуто строительство еще трех атомградов: два в Свердловской области, Свердловск-44 (И.К. Кикоин) и Свердловск-45 (Л.А. Арцимович), для промышленного разделения изотопов урана и один в Горьковской области, Арзамас-16 (Ю.Б. Харитон и К.И. Щелкин), предназначенный для изготовления плутониевых и урановых бомб. Строительные работы шли быстрыми темпами, дефицита рабочей силы не было. Но урана не хватало. Правительственные сроки для изготовления первых атомных бомб были пропущены.

Первый промышленный реактор был запущен Курчатовым в середине 1948 г. В него загрузили весь накопленный в СССР уран! В течение 1948 г Курчатов, Ванников и Завенягин постоянно находились на «Базе №10». Несколько раз приезжал сюда и Берия. В декабре 1948 г реактор был остановлен на перезагрузку урановых блоков и текущий ремонт. Практически немедленно радиохимический завод начинал выделение плутония из облученных урановых блоков, не дожидаясь полного распада короткоживущих продуктов деления урана.

Все это приводило к переоблучению как реакторщиков, так и радиохимиков. Радиоактивные отходы плутониевого производства сливали в то время в речку Теча, протекавшую через промышленную зону. Теча была загрязнена на десятки километров вниз по течению за пределами «объекта», что было причиной радиационных заболеваний разной тяжести среди местного населения.

Десять килограммов плутония – количество, заложенное в американскую бомбу, – были накоплены в СССР в июне 1949 г. По расчетам физиков, можно было бы провести взрыв и с меньшим весом столь дорогого металла. Но приказ «сверху» требовал делать точную копию. Экспериментировать никто не рисковал.

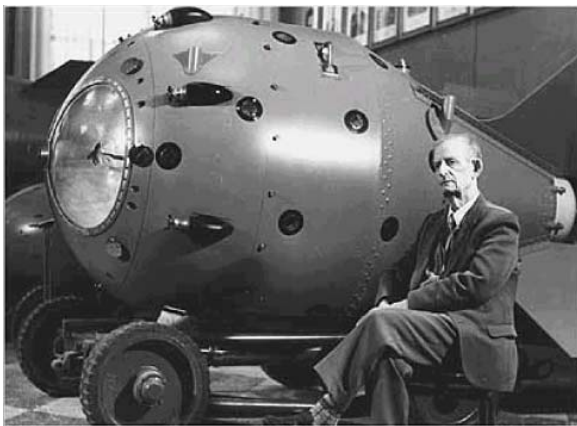


Рис.7.1. Ю.Б. Харитон с макетом бомбы РДС-1

Первая советская атомная бомба РДС-1 была успешно испытана на Семипалатинском полигоне 29 августа 1949 г. Аббревиатура РДС – для секретности расшифровывалась как «Реактивный двигатель специальный». Сами разработчики расшифровывали ее как «Россия делает сама». Из фотографии видно, что бомба как две капли воды похожа на «Толстяка» Нагасаки.



Момент взрыва и воздействие его на все сооружения, технику, животных был заснят на киноплёнку, которая была показана И.В. Сталину и другим членам Политбюро ЦК. Все здания и сооружения в радиусе 3-5 километров от места взрыва были разрушены, военная техника искалечена. Животные получили сильные ожоги. Взрывной волной повреждены стекла во всех зданиях на расстоянии 10-15 километров от взрыва. Гул от взрыва и свет видели и слышали жители населенных пунктов за 80-100 километров от места взрыва.

Рис.5.2. Первое испытание атомной бомбы в СССР

Секретным, никогда не публиковавшимся Указом Верховного Совета СССР, большая группа участников создания атомной бомбы была удостоена правительственных наград. Высшую награду – звание Героя Социалистического Труда и медаль «Золотая Звезда» – получили ученые: Курчатов, Флеров, Харитон, Щелкин, Доллежал и Риль; начальник ПГУ Ванников; от МВД – заместитель министра Завенягин, начальник Главпромстроя А.Н. Комаровский и его заместитель П.К. Георгиевский, начальник «Строительства 859» (реактор) М.М. Царевский и его заместители В.А. Сапрыкин и С.П. Александров; в группу МВД вошли два начальника горнорудных уранодобывающих комбинатов, Б.Н. Чирков (немецкий «Висмут») и М.М. Мальцев (Ленинабадский комбинат в Таджикистане). Их награждали за «вклад в создание атомной бомбы». Глава Спецкомитета Л. Берия, получил орден Ленина.

Глава 8. ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН

Развитие жизни на Земле всегда происходило в присутствии радиационного фона окружающей среды. Радиоактивное излучение – это не нечто новое, сотворенное разумом человека, а вечно существующее явление. Все живые существа, населяющие нашу планету, в том числе и человек, развиваются в условиях постоянного воздействия различных источников ионизирующих излучений. Таким образом, естественный радиационный фон (ЕРФ) есть неотъемлемый фактор окружающей среды.

Есть основания полагать, что в отсутствие ЕРФ по-другому протекали бы физико-химические процессы в живом организме, да и эволюционное развитие могло пойти по другому пути. Роль ЕРФ в жизни организмов, населяющих землю, еще до конца не выяснена. Но поскольку эволюционное развитие шло по восходящей линии, в условиях ЕРФ обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности растений, животных и человека. Более того, существует гипотеза, выдвинутая и поддерживаемая вполне авторитетными учеными, что превращение примитивных гоминид в *homo sapiens* произошло в рифтовой долине Восточной Африки как раз под действием радиации.

Отступление. Интерес к высказанной гипотезе был подогрев открытием в Африке природных ядерных реакторов, которые работали около 2 млрд. лет назад. Пока науке известны 17 древних реакторов, расположенных в Габоне – одной из стран экваториальной Африки. Все реакторы были обнаружены в районе урановых месторождений Окло и Бангомбе, которые находятся на юго-востоке Габона. Девять из семнадцати реакторов найдены в полностью выработанных урановых залежах. Древние реакторы были обнаружены в 1972 г.

Французский исследователь Бузиг (H. Bouzigue), работавший на одном из заводов по производству ядерного топлива, обратил внимание на необычное соотношение изотопов урана в некоторых образцах руд. Стандартное содержание ^{235}U в природном уране составляет 0,7202%. Определение давало заниженную величину – 0,7171%.

Фундаментальные исследования, выполненные Комиссариатом по Атомной Энергии Франции, подтвердили результаты Бузига. Более того, в нескольких локальных залежаниях урановых руд относительное содержание ^{235}U , способного к делению тепловыми нейтронами, составляло всего 0,44%. Этот факт вызывал большие недоумения. Ответ был найден, когда в таких залежаниях были обнаружены нуклиды, являющиеся продуктами ядерного деления. Другими словами, мы имеем дело с природными ядерными реакторами¹.

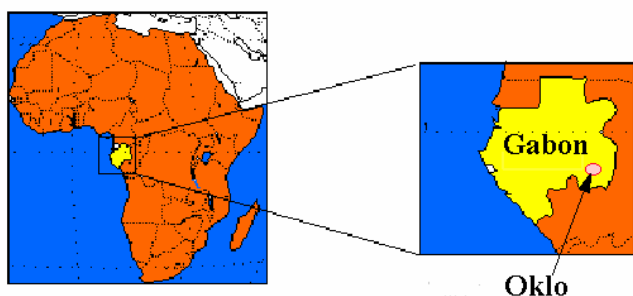


Рис.8.1. Дислокация провинции Окло в Габоне

Чтобы реакция ядерного деления в природной смеси изотопов приобрела цепной характер, необходимо совпадение довольно

экзотических условий:

- урановые руды должны быть богатыми (осадочные руды провинции Окло содержат до 70% масс. UO_2);
- породы должны быть древнее 1 млрд. 800 млн. лет, когда отношение изотопов $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ в рудах было еще достаточно высоким. Исходя из периодов полураспада

¹ Nature. 22 May 1997. V.387. N6631. P.337.

Ю.А. Шуколюков. Аномальный ксенон Земли. Соросовский образовательный журнал №9, 1997, с.63-70.

изотопов ^{235}U и ^{238}U , можно подсчитать, что в момент формирования нашей планеты относительное содержание ^{235}U составляло $\approx 17\%$, а к моменту начала работы реакторов $\approx 3\%$ (примерно такое содержание поддерживается в современных легководных реакторах);

- рудный конгломерат должен быть разбавлен легкими элементами, служащими замедлителями нейтронов деления (водой, углеродом);
- содержание поглощающих нейтроны элементов (бора, кадмия, ванадия) должно быть небольшим;
- вместилищем отложений урана должен быть высокостабильный бассейн, защищенный от влияния возможных геологических событий. Насколько известно, нигде более на Земле подобные условия в совокупности не встречаются. Ниже показан один из каньонов, прорезающих территорию. В пещерах и трещинах формировались богатые руды и другие условия, необходимые для возникновения самопроизвольной реакции деления.

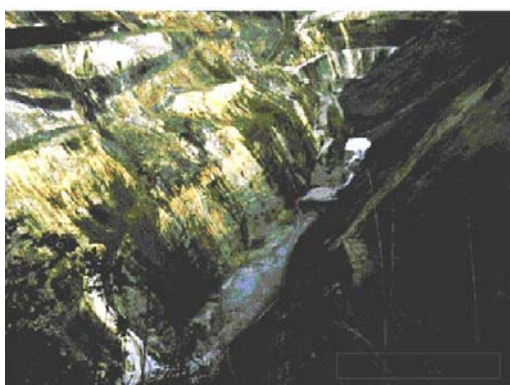


Рис.8.2. Каньон



Рис.8.3. Внутри природного ядерного реактора №15.



Рис.8.4. Этапы формирования природного реактора в Окло

Время работы габонских реакторов составило примерно 1 млн. лет. В настоящее время возникновение таких реакторов невозможно, поскольку из-за спонтанного распада урана-235 его концентрация в природе невелика.

Для получения сравнительных оценок ущерба от всех видов радиационного воздействия на человека необходимо иметь количественную информацию об уровнях фоновой облучения населения. Ионизирующее излучение не является каким-либо принципиально новым фактором воздействия на человека, в отличие от многих химических веществ, синтезированным человеком и ранее не существовавшим в природе (т.н. ксенобиотиков).

Отличительной особенностью излучения источников ЕРФ² является его воздействие на всё население земного шара, а также относительно постоянный уровень воздействия. К естественным источникам ионизирующего излучения относятся: космическое излучение и естественные радиоактивные вещества, распределённые на поверхности и в недрах земли, в атмосфере, воде, растениях и организме всех живых существ, населяющих нашу планету.

Космическое излучение. Различают первичное и вторичное космическое излучение. Первичное излучение представляет собой поток частиц высоких энергий, попадающих в земную атмосферу из межзвездного пространства. Оно состоит в основном из протонов (~90%) и α -частиц (10%). Очень небольшую долю составляют нейтроны, фотоны, электроны и ядра легких элементов. Малое количество нейтронов в первичном космическом излучении объясняется их малым временем жизни ($t_{1/2} = 10,4$ мин.) – они распадаются на протон и электрон и не успевают дойти до земной атмосферы, хотя и образуются при ядерных и термоядерных процессах, протекающих на звездах (длительность прохождения излучения из Галактики $\sim 10^6$ – 10^7 лет). Электроны и фотоны поглощаются космической пылью. Энергия галактического космического излучения очень велика – 10^{12} – 10^{14} МэВ (на самых современных ускорителях – фазотронах – можно достичь энергии частиц не более 10^5 МэВ). Энергия частиц, возникающих при солнечных вспышках, всего 1–40 МэВ. Поэтому солнечное космическое излучение не приводит к значительному увеличению дозы на поверхности земли.

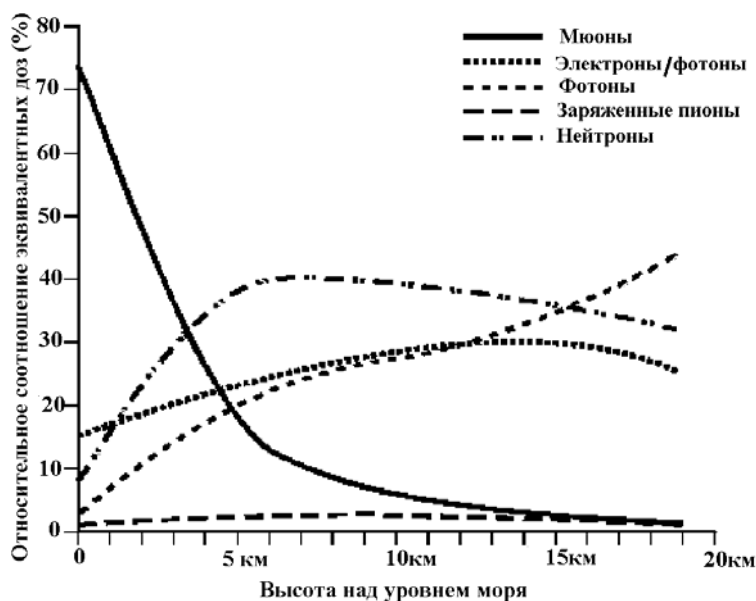


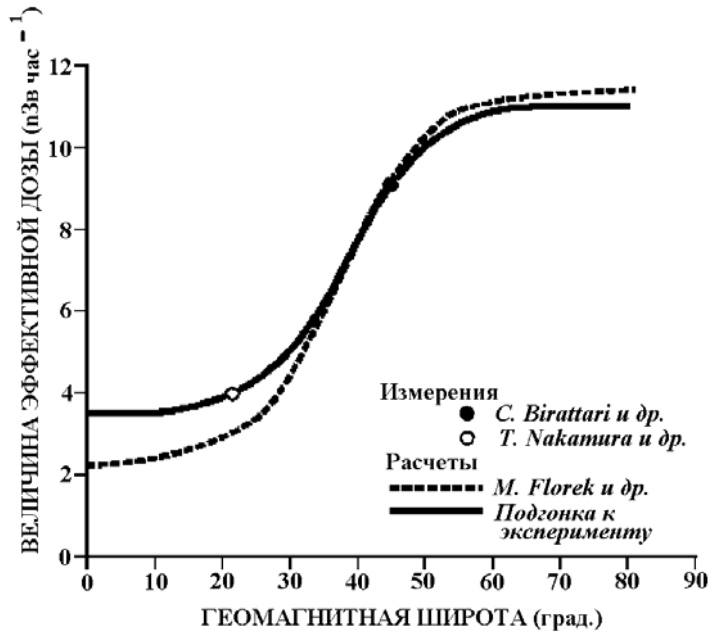
Рис.8.5. Относительный вклад эквивалентной дозы компонентами космического излучения на разных высотах над уровнем моря

Вторичное космическое излучение имеет сложный состав и включает протоны, нейтроны, электроны, фотоны и более тяжелые частицы. Оно образуется в результате взаимодействия частиц

первичного космического излучения с ядрами нуклидов, входящих в состав воздуха. При этом образуется ряд т.н. космогенных радионуклидов, из которых наиболее известны тритий ^3H , бериллий ^7Be , углерод ^{14}C и натрий ^{22}Na . У поверхности земли вторичное космическое излучение состоит в основном из фотонов, электронов и позитронов с энергией до 100 МэВ и μ^\pm -мезонов (мюонов ≈ 600 МэВ). Нейтральная компонента излучения образуется в результате расщепления ядер при взаимодействиях первичного излучения с элементами атмосферы. Энергия нейтронов составляет 10–15 МэВ. Максимальная интенсивность вторичного космического излучения имеет место на высоте 25 км. С уменьшением высоты интенсивность падает, достигая минимума на уровне моря. На высоте 45 км и выше преобладает первичное космическое излучение.

² Report of the United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) to the General Assembly (2000). Annex B. Exposures from natural radiation Sources.

Рис.8.6. Широтные вариации эффективной дозы от космических нейтронов на уровне моря



Из рис. 8.6. видно, что интенсивность космического излучения неодинакова по поверхности Земли — она больше у полюсов и в высоких широтах и минимальна на экваторе, что связано с особенностями строения магнитосферы Земли.

Имеются и вариации интенсивности излучения во времени, совпадающие с 11-летним циклом активности Солнца. Периодические колебания солнечной активности вызывают соответствующие колебания в интенсивности т.н. «солнечного ветра» — потока высоко ионизированной плазмы и связанного с ним магнитного поля.

В моменты высокой солнечной активности интенсивность магнитного поля оказывается наивысшей, что обеспечивает дополнительную защиту от космической радиации, т.е. в максимумах солнечной активности магнитное поле снижает интенсивность галактической радиации, достигающей поверхности Земли. Наблюдается и зависимость мощности космического излучения от высоты над уровнем моря: на больших высотах атмосфера разрежена и слабее поглощает космическое излучение.

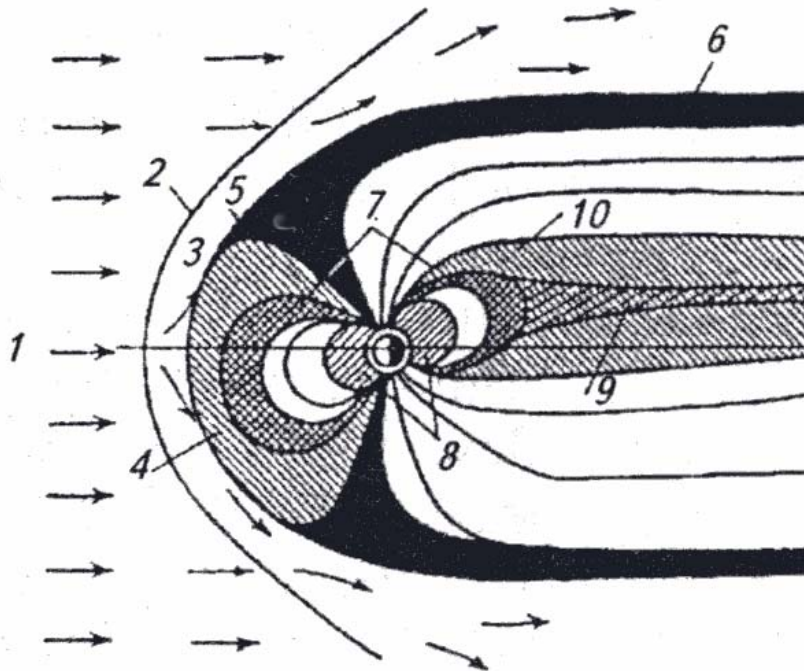
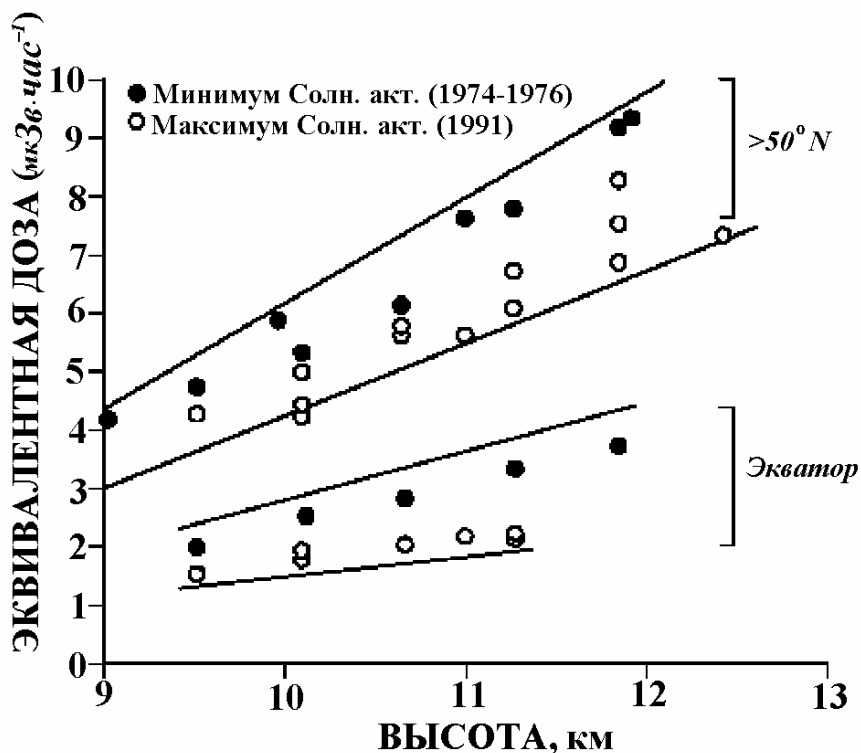


Рис. 8.7. Магнитосфера Земли (меридиональное сечение): маленький черно-белый шарик в центре — сама Земля; 1— солнечный ветер; 2— ударный фронт; 3— магнитная полость; 4 — магнитопауза; 5— верхняя граница полярной магнитосферной щели; 6— плазменная мантия; 7— внешний радиационный пояс; 8— внутренний радиационный пояс, или плазмосфера; 9—нейтральный слой; 10— плазменный слой.

Рис.8.8. Эквивалентные дозы от космического излучения при полетах на самолетах.



На основании обобщения многочисленных экспериментальных данных Научный комитет ООН по действию атомной радиации (UNSCEAR или НКДАР) рекомендует принимать среднее значение суммарной эквивалентной дозы космического излучения на уровне моря в год равным 0,38 мЗв. На высоте 4-5 км для средних широт она достигает значения 5 мЗв в год. Летая на самолетах (высота 9-12 км) человек получает эквивалентную дозу 5-8 мкЗв в час. Трансатлантический перелет Европа – Сев. Америка соответствует дозе 35-50 мкЗв.

Годовая эффективная доза от действия космогенных радионуклидов оценивается следующим образом: ^3H – 0,01 мкЗв, ^7Be – 0,03 мкЗв, ^{14}C – 12 мкЗв, ^{22}Na – 0,15 мкЗв.

Естественные радионуклиды (ЕРН) широко распространены во всех средах (воздухе, воде и земной коре). Они формируют дозу в результате как внешнего, так и внутреннего облучения. ЕРН можно разделить на две группы:

- *Космогенные.* О них говорилось выше. Они у поверхности земли не вносят существенного вклада в дозу внешнего излучения.

- Присутствующие в различных объектах внешней среды с момента образования Земли и их дочерние продукты распада. Основной вклад во внешнее излучение вносят ^{40}K , имеющийся везде, где есть стабильный калий, и радионуклиды семейств ^{238}U и ^{232}Th . Все они формируют дозы от γ -излучения как на открытой местности, так и внутри помещения. Величина дозы внутри помещений может быть несколько выше (рис.8.9.), если имеется повышенное содержание этих радионуклидов в строительных материалах.

Средняя годовая эффективная доза для индивидуума составляет 0,48 мЗв (разброс, в зависимости от состава почв от 0,3 до 0,6 мЗв). В различных горных породах содержание радионуклидов колеблется в широком диапазоне, что естественно сказывается на создаваемом ими уровне излучения в той или иной местности. Поглощенная доза γ -

излучения в воздухе на открытой местности варьируется от 0,1 до 0,75 мГр в год. В среднем 35% дозы обусловлено γ -излучением ^{40}K , 25% и 40% – γ -излучающими продуктами распада ^{238}U и ^{232}Th соответственно. В силу ослабления γ -излучения в почве, вся формируемая доза в воздухе над поверхностью земли обусловлена радионуклидами, содержащимися в верхнем 30-ти - сантиметровом слое почвы.

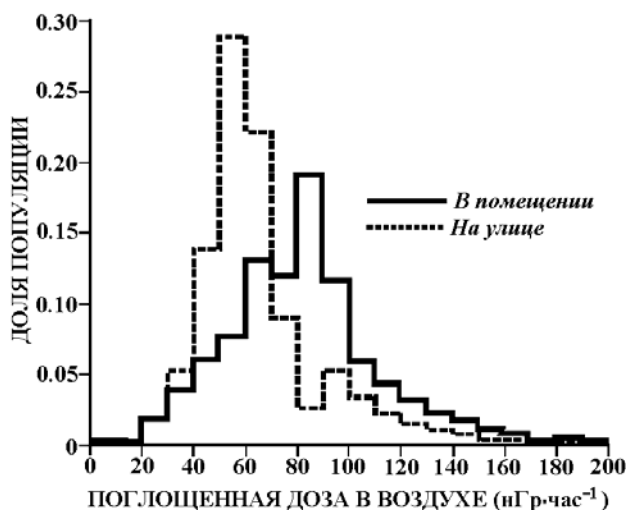


Рис.8.9. Сопоставление поглощенных доз в помещениях и на открытой местности на примере 9-ти Европейских стран.

Однако на планете существуют регионы с более высоким уровнем естественного радиационного фона, который обусловлен присутствием в почве, питьевой воде и строительных материалах радиоактивных веществ, весьма превышающих их норму. Интерес к состоянию здоровья проживающих там людей огромен, поскольку их предки проживали там

же на протяжении многих поколений, подвергаясь действию необычно высоких уровней излучения.

Назовем несколько таких регионов:

1. Бразилия, Гуарапари (73 тыс. жителей), монацитовые пески, экспозиционная доза в воздухе на улицах города ≈ 17 мкР/час, а на побережье в максимуме до 9000 мкР/час!
2. Китай, Куанг-Донг (80 тыс. жителей), монацит, в среднем 37 мкР/час.
3. Индия, Керала и Мадрас (100 тыс. жителей), монацитовые пески, полоса побережья протяженностью 200 км и шириной 0,5 км, дозовый интервал 20-400 мкР/час, среднее значение – 180 мкР/час.
4. Иран, Рамзар и Махаллат (2 тыс. жителей), весенние паводковые воды, в максимуме от 400 до 1700 мкР/час.
5. Остров Ниуэ в Тихом океане (4,5 тыс. жителей), вулканические породы, в максимуме зафиксировано до 111 мкР/час.
6. Италия, провинции Лацио и Кампанья (10 млн. 700 тыс. жителей), вулканические породы, в среднем 18-20 мкР/час.
7. Франция, Центральный и Юго-Западный регионы (7 млн. жителей). В Центральном – граниты, базальты, песчаники. В максимуме – до 40 мкР/час. На Юго-Западе – урансодержащие минералы. В максимуме – до 1000 мкР/час.

Заметим, что тщательные исследования людей, проживающих в регионах с повышенным радиационным фоном, на сегодняшний день *не выявили у них дополнительных биологических нарушений!* Если бы избыточное излучение наносило вред здоровью, проявляясь в генетических нарушениях или повышении риска развития рака, то этот эффект должен быть зафиксирован.

Помимо внешнего облучения, естественные радионуклиды поступают через органы дыхания и пищеварения внутрь организма и обуславливают внутреннее облучение человека. Основным естественным источником внутреннего облучения является ^{40}K . Содержание его в пищевых продуктах колеблется от 20 до 200 Бк/кг. Концентрация калия в теле человека ~ 2 г на кг массы тела. Средняя удельная активность ^{40}K в теле человека составляет 60 Бк/кг (суммарная активность в расчете на “среднего” человека массой 70 кг

– 4200 Бк). Различные органы получают несколько различающиеся дозы, а эффективная эквивалентная годовая доза на все тело принимается равной 0,17 мЗв. Наиболее высокие содержания ^{40}K в почве зафиксированы некоторых регионах Китая, Казахстана, Ю. Кореи, Германии, Люксембурга, Швейцарии, Португалии, Испании и др. стран. Локальные повышения концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{226}Ra в Китае, Казахстане, Индии, Швейцарии, Португалии, Испании и др. странах.

Радионуклиды семейств ^{238}U и ^{232}Th : ^{226}Ra и его дочерние продукты распада ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{210}Bi поступает в организм человека с пищей, водой и в виде аэрозолей. Радий-226 и свинец-210 концентрируется в костной ткани. Полоний-210 – α -излучающий нуклид – накапливается в мягких тканях. В природных условиях он концентрируется в табаке и мхах-лишайниках. Поэтому у курящих людей концентрация ^{210}Po в легких в 2,5 раза выше, чем некурящих. Жители северных районов, употребляющие в пищу мясо северных оленей, имеют уровень облучения полонием-210 в десять раз выше среднего. Всего же долгоживущие радионуклиды семейств тория и урана формируют среднюю эффективную эквивалентную годовую дозу на все тело 0,14 мЗв.

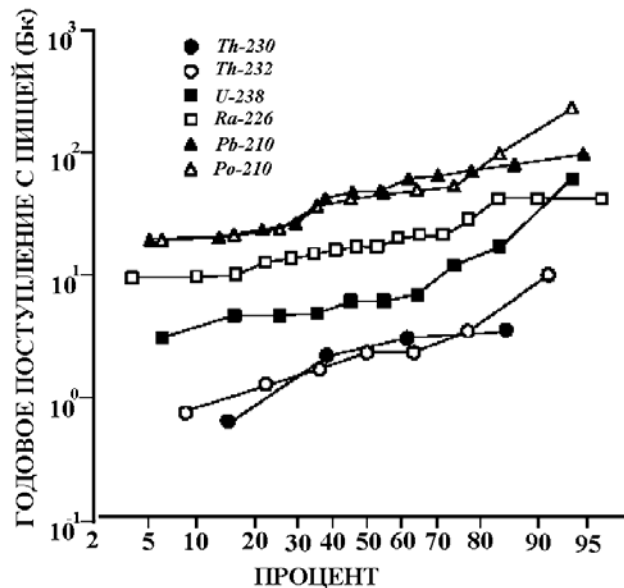


Рис.8.10. Ежегодное поступление радионуклидов урана и тория с пищей и водой

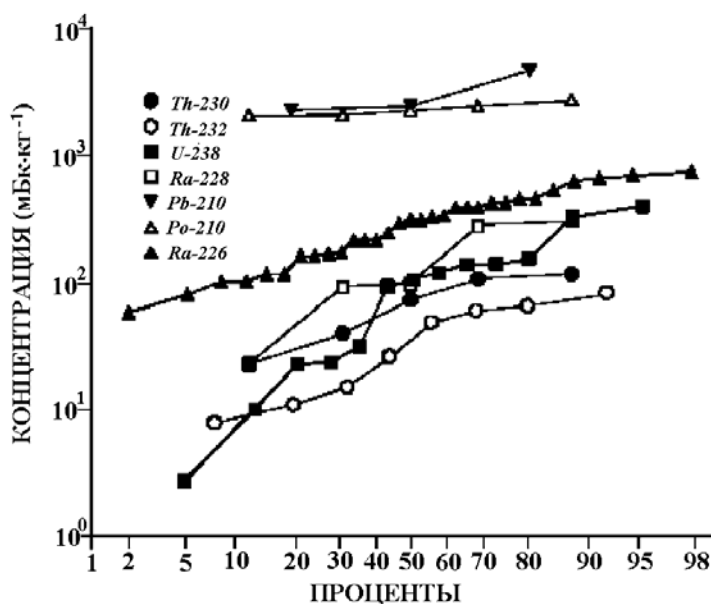


Рис.8.11. Концентрация радионуклидов семейств урана и тория в костных тканях человека

Заметим, что каждая точка на приведенных выше графиках представляет средний результат по отдельной Европейской стране.

Проблема радона. Наибольший вклад во внутреннее облучение вносят короткоживущие продукты распада ^{226}Ra (член семейства ^{238}U) и ^{222}Rn (член семейства ^{232}Th), являющиеся инертными газами: радон ^{222}Rn $t_{1/2} = 3,854$ сут. и торон ^{220}Rn $t_{1/2} = 54,5$ секунд, а также и их короткоживущие продукты распада: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl , способные существовать в виде аэрозолей. Они накапливаются в горных породах, почвах, природных водах, строительных материалах и легко переходят в атмосферу. Радон и торон накапливаются в воздухе шахт, рудников, подвальных и жилых помещений. Поступление в организм ингаляционное. Будучи α -излучателями, они наносят существенные повреждения непосредственно легочной ткани.

То, что большие дозы от ионизирующего излучения могут повреждать ткани организма человека, стало понятно уже через шесть месяцев после открытия рентгеновских лучей в 1896 году. Некоторое время рабочие, изготавливающие рентгеновские трубки, проверяли их мощность, облучая себя и измеряя время, которое требовалось для воспаления кожи! Впоследствии более 300 из них умерли от заболеваний, причина возникновения которых объяснялась воздействием излучения, около 250 из них – от рака кожи и более 50 человек – от нарушения состава крови (анемия или лейкемия). Первым ожог кожи от облучения радием получили сначала А. Беккерель (случайно), а вслед за ним П. Кюри (намеренно, в целях проверки). Однако практика, которая в настоящее время признана опасной, продолжалась и далее. Начиная с 1915 года, например, сотни девушек работали в кампании "Radium Luminous Materials" в Нью-Джерси (США), осуществляя операцию нанесения на циферблаты часов, стрелки и шкалы приборов люминофоры постоянного действия – смеси солей радия и сульфида цинка. Девушки смачивали кончики кисточек во рту: местные зубные врачи вскоре зарегистрировали заболевание, которое они называли «радиевой челюстью», и к концу 1926 года четыре девушки умерли от рака кости и анемии.

Однако осознание факта, что высокие дозы облучения даже от некоторых природных источников излучения могут также оказывать разрушительное воздействие, медленно приходило к людям.

В конце XV века в районе городка Шнееберга в Саксонии (Германия), на северном склоне горы Эрцгеберг (Рудная гора) была развернута интенсивная добыча серебра. Серебро также добывали в районе городка Иохимсталь (ныне Яхимов) на южной (Богемской) стороне Рудной горы.

Способы добычи, применяемые в этих районах в начале XVI века, описаны и проиллюстрированы Агриколой (1494-1555, при рождении – Георг Бауэр), которого считают отцом минералогии. С 1527 по 1533 год он работал врачом в Иохимстале. Его наиболее известная книга «De Re Metallica» была переведена с латыни на английский язык американским горным инженером Гербертом Гувером (впоследствии президентом США) и его женой Лу.

Агрикола описывает, что в Яхимове серебряная руда добывалась поверхностным способом, в то время как в Шнееберге – с больших глубин. Некоторые шахты достигали глубины 400 м.

Георгиус Агрикола



Ниже приведены изображенные в книге Агриколы шахтные устройства.



Рис. 8.12. Поверхностные шахтные сооружения. В левой части виден подъемный ворот. Справа сзади – вентиляционный короб.



Рис. 8.13. Устройство шахтных стволов и горизонтальных штреков.

В начале XVI века среди шахтеров в районе Шнееберга была замечена необычно высокая смертность от легочных заболеваний, особенно у молодых рабочих. Первое упоминание об этом было сделано знаменитым врачом Парацельсом (1493- 1541).



Парацельс
(Филипп Ауреол Теофраст
Бомбаст фон Гогенгейм).

По мере выработки запасов серебра в шахтах добывали полиметаллические руды, содержащие медь, кобальт, ванадий и уран. Урановые соединения в течение сотен лет использовались для нанесения приятных цветных рисунков на изделия из керамики и стекла (знаменитое Богемское стекло).

Частота описанного Парацельсом легочного заболевания, которое позже назвали (Шнеебергская легочная болезнь), увеличилась в XVII и XVIII веках, когда выросла добыча руд. В 1879 заболевание идентифицировали как рак легких. От рака легких в районе Шнееберга умирало около 75% шахтеров. Было предположено, что рак легких вызывался вдыханием рудной пыли, содержащей различные металлы. В качестве дополнительных канцерогенных факторов предполагались заболевания туберкулезом и наличие в пыли мышьяка.

В 1898 г Мария и Пьер Кюри выделили из Яхимовских руд радий (^{226}Ra) и полоний (^{210}Po). Так называемая эманация радия, позже названная радоном (^{222}Rn), была открыта Э. Дорном (1900 г) и идентифицирована как радиоактивный, благородный газ, образующийся при распаде радия. Впоследствии, начиная с первых измерений радона выполненных Я. Эльстером и Х. Гейтелем (1901 г), были обнаружены высокие концентрации радона в воздухе шахт Шнееберга и Яхимова. Первые случаи рака, в особенности рака кожи, вызванного «рентгеновским излучением радия», были описаны в начале XX века.

На основании этих исследований была предположена связь между раком легких и высокой концентрацией радона в этих шахтах. Первым, кто указал на эту причинную связь, был директор шахты в Цвикау (Саксония) Х.Е. Мюллер. Он пришел к выводу, что Шнеебергская легочная болезнь является специфическим профессиональным заболеванием, вызванным содержанием в руде радия и высокой концентрацией радона в воздухе этих шахт, приводящего к канцерогенным процессам в дыхательных путях. Позднее ведущий британский радиобиолог Э. Почин, на базе изучения записей в церковных книгах, описал «биологический дозиметр» XVI века для оценки воздействия этого облучения: *«Некоторые жены шахтеров, как известно, имели по семи мужей подряд»*.

Между тем канцерогенная роль радона в Шнееберге все еще не была общепризнанна. И только исследовательская программа Института Биофизики Кайзера Вильгельма (позже Институт Макса Планка) во Франкфурте-на-Майне в период 1936-1945 гг. обосновала связь между концентрацией радона и раком легких. Программа включала измерения радона в шахтах Шнееберга, α -активности образцов тканей и гистопатологические исследования образцов легочной ткани шахтеров, умерших от рака легких. В это время концентрация радона в большинстве шахт Шнееберга была в пределах 70-120 кБк/м³, а в одной из шахт средняя концентрация составляла около 500 кБк/м³. Было известно, что

большинство шахтеров этой шахты умерло от рака легких, ее называли «шахтой смерти». Однако данные по Шнеебергу и Яхимову не позволили сделать каких-либо количественных оценок связи между облучением радоном и раком легких, а роль вдыхаемых, короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) радона в тот момент не была осознана.

В 1940-х годах в связи с развертыванием ядерных программ во всем мире началась интенсивная добыча и переработка урана для военных целей. Основными источниками в это время были урановые залежи в Бельгийском Конго (ныне Заир), Канаде и в Колорадо (США). Активный поиск урановых руд и их добыча проводились по всей территории СССР, но основная добыча с 1946 г развернулась в историческом горнорудном районе Ауэ, Шнееберг (ГДР) и с 1948 г в Яхимове (Чехословакия).

На начальной стадии радиологической защите рабочих уделялось мало внимания. Предполагалось, что уровни радона в этих новых шахтах значительно ниже, чем в старых шахтах Рудных гор. В этот период имеются сведения только об отдельных измерениях радона. В шахтах Колорадо содержание радона до 1950 г не контролировалось. Сведения о содержании радона в воздухе для шахт ГДР стали доступны только для периода после 1955 г. Количественные анализы когортных исследований среди шахтеров урановых шахт США и Чехословакии в период 1950–1970 гг. показали, что риск возникновения рака легких монотонно возрастает с кумулятивной экспозицией ДПР радона. Заметим, что эпидемиологические когортные исследования охватывают только малую долю всех шахтеров урановых шахт. В урановых шахтах ГДР в период с 1946–1955 гг. на подземных работах было занято около 250000 человек. По оценкам экспертов, с 1945 по 1990 гг. в урановых шахтах в мире работало около 500000 человек. Высокие концентрации радона также наблюдались и в неурановых рудниках.

В 1956 г появилась первая публикация об измерениях радона в воздухе 225 домов в Швеции. Это исследование, проведенное по инициативе радиолога Рольфа Зиверта, показало достаточно высокие уровни радона в некоторых домах, построенных из алюмосланцевого бетона с высоким содержанием радия. Вначале полагали, что это локальная шведская проблема. Однако, когда 20 лет спустя, были обобщены результаты аналогичных измерений в различных странах, выявился огромный диапазон обнаруженных концентраций радона в домах: от нескольких Бк/м³ до 100000 Бк/м³. Это означает, что для некоторых индивидуумов уровни радона в зданиях сопоставимы с уровнями для шахтеров первых урановых рудников.

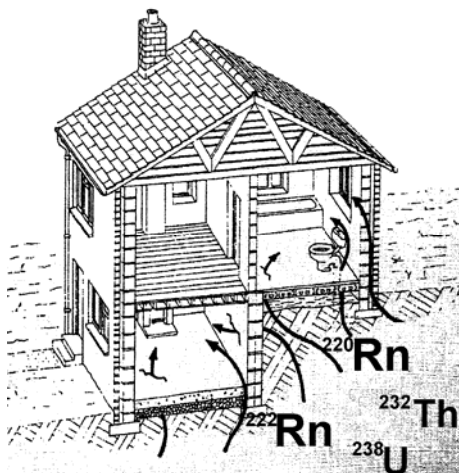
Было установлено, что в большинстве зданий с высоким уровнем радона основным источником являлся не материал здания, а конвективный поток радона из почвы. Радон и торон могут поступать в здание с водопроводной водой и природным газом.

Эти результаты имеют большое значение при планировании эффективных методик вмешательства с целью уменьшения концентраций радона. Особую роль играет выявление радоноопасных геологических зон, характеризующихся повышенным содержанием урана, тория и радия и зон разломов земной коры. Такие зоны выявлены во многих регионах мира:

- прежде всего, в Скандинавских странах (Швеции, Норвегии и Финляндии);
- в странах Центральной и Западной Европы (Франции, Англии, Германии, Швейцарии, Бельгии, Испании, Чехии);
- в Канаде, Казахстане и др. регионах планеты;
- локальные зоны повышенного выделения радона из почвы выявлены на Урале³.

³ М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко. Радон: измерение, дозы, оценки риска. Екатеринбург, УрО РАН, 1997, с.232.

Рис.8.14. Схема поступления в помещение радона и торона из грунта, строительных материалов и конструкций.



Основные мероприятия, направленные на уменьшения опасного воздействия радона и торона на жителей домов: при строительстве – осознанный выбор места строительства, незагрязненность радионуклидами строительных материалов и конструкций, конструктивные особенности фундаментов и подвальных помещений, предотвращающие поступление радона в жилые помещения, оптимальный уровень вентилирования помещений⁴.

Мероприятия по защите от радона в жилых зданиях содержатся в рекомендациях МКРЗ – Международной Комиссии по Радиационной защите⁵. Согласно Нормам радиационной безопасности НРБ-99 среднегодовое значение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов радона и торона не должно превышать в эксплуатируемых зданиях 200 Бк/м³. Превышение этой величины предполагает вмешательство со стороны контролирующих органов для принятия необходимых мер. Ряд стран определил для себя как предельные более низкие уровни активности.

Таблица 8.1. Нормативы содержания радона в воздухе жилых зданий, Бк/м³.

Страна	Существующие здания	Проектируемые здания
Швеция	400	70
Финляндия	400	100
США	200	-
Канада	400	-
Германия	200	-
Великобритания	200	50
Россия	200	100
МКРЗ	200	100

Согласно UNSCEAR (2000), радон формирует среднюю эффективную по миру эквивалентную годовую дозу на все тело 1,15 мЗв, торон – 0,10 мЗв, а в сумме – 1,25 мЗв. Заметим, при среднегодовой величине ЭРОА 200 Бк/м³ доза составила бы 3 мЗв, а при 600 Бк/м³ – 10 мЗв.

Хозяйственная деятельность и облучение от ЕРН.

Природные радионуклиды могут вовлекаться в сферу жизни человека в результате деятельности промышленности, напрямую не связанной с ядерным циклом и атомной энергетикой. К таким производствам относятся:

⁴ М.В. Жуковский, А.В. Кружалов, В.Б. Гурвич, И.В. Ярмошенко. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург, УрО РАН, 2000, с.180.

⁵ Публикация 65 МКРЗ. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. М., 1995, Энергоатомиздат, с.28.

- Получение и использование фосфатных минеральных удобрений;
- Обогащение и переработка руд и концентратов в металлургической промышленности, особенно полиметаллических и редких металлов;
- Сжигание всех видов природного топлива – угля, нефти, газа и торфа;
- Добыча нефти и природного газа;
- Производство строительных материалов;
- Переработка металлолома, куда неконтролируемо могут попадать на переплавку загрязненные радионуклидами аппаратура и конструкционные материалы.

Дело в том, что радионуклиды в невысоких концентрациях содержатся в рудах для металлургической промышленности, для производства фосфатных удобрений, в твердом, жидком и газообразном топливе, строительных материалах. Они могут поступать не только в готовую продукцию, промышленных отвалах, но и концентрироваться в отвалах, шлаках, сбросных водах или переходить в атмосферу в газообразной или аэрозольной формах. Другими словами, имеет место техногенное загрязнение окружающей среды природными радионуклидами. На усредненного жителя Земли вклад этой группы загрязнений в эквивалентную годовую дозу мал – 1-10 мкЗв. Однако возможны локальные повышения концентрации радионуклидов и, особенно, на рабочих местах (табл. 8.2).

Несколько примеров:

1. В музее Брюсселя, где хранятся образцы урановых минералов из Катанги, в момент временной остановки вентилятора концентрация радона в воздухе составляла 10 – 15 кБк/м³. В помещениях зафиксирован и повышенный фон гамма излучения ≈ 5-6 мкЗв/час.
2. В Голландии работают два завода по производству фосфорной кислоты, которые ответственны за 90% всех сбросов в воду ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po. Через эти заводы проходит 0,6-0,8 ТБк ²²⁶Ra в год, что сопоставимо с загрязнением радиом Северного моря за счет сбросных вод всей прибрежной нефтедобывающей промышленности Англии, Норвегии, Голландии и Дании.
3. Из опыта нашей страны. Современная тепловая электростанция (ТЭС), работающая на каменном угле, потребляет 3 млн. т угля на производство 1 ГВт электроэнергии в год и выбрасывает 0,1 млн. т золы в воздух (таб.8.2.).

Таблица 8.2. Среднее содержание радионуклидов в летучей фракции золы.

Радионуклид	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po
Концентрация, Бк/кг	265	226	930	1700

Допустим, что выбрасываемая зола равномерно оседает вокруг ТЭС на территории радиусом 15-20 км. Тогда годовая индивидуальная эквивалентная доза облучения различных органов людей, проживающих в этом районе, для современной станции мощностью 1 ГВт (эл.) составит 0,014 мЗв для красного костного мозга, 0,42 мЗв на легкие и 0,005 мЗв на все тело. Усредненная доза на все тела всего населения – 0,9 мкЗв. Примерно в 5 раз более высокая средневзвешенная по земному шару годовая эффективная доза сформируется в настоящее время от сжигания угля для обогрева помещений.

4. Интенсификация сельского хозяйства за счет концентрированного использования фосфоритных минеральных удобрений заметно увеличила естественный радиационный фон, прежде всего на полях хлопчатника в республиках Средней Азии. Для населения Узбекистана средневзвешенная индивидуальная доза облучения всего тела от этого источника составляет примерно 7,5 мкЗв в год.

Ниже приведены в обобщенном виде последние данные UNSCEAR (НКДАР) по средним годовым эффективным дозам, полученными работающими на производстве, от природных источников.

Таблица 8.3. Повышенная радиационная опасность на рабочих местах от природных источников (2000 г).

Природные источники, место работы	Число обследованных работников, тыс.	Средняя годовая эффективная доза, мЗв
Воздушные полеты	250	3,0
Горная добыча (кроме угля)	760	2,7
Добыча угля	3910	0,7
Переработка минерального сырья	300	1,0
Рабочие места выше уровня земли (Rn)	1250	4,8
В целом от природных источников на рабочих местах	6500	1,8

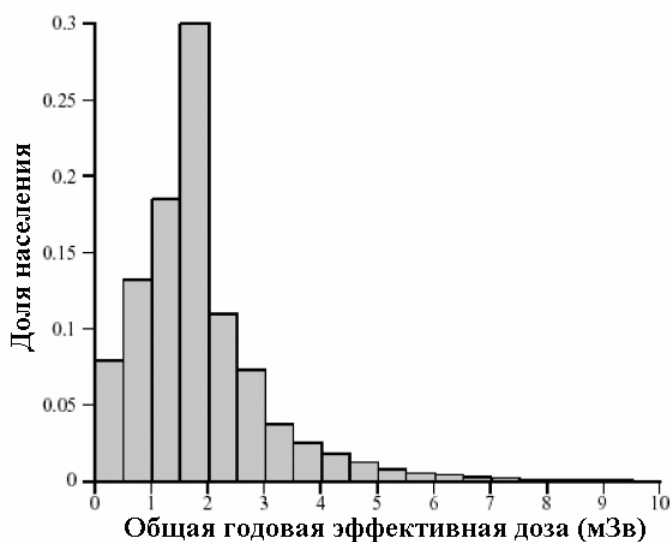


Рис.8.15. Распределение жителей Земли по полученным дозовым нагрузкам (все природные источники).

В целом усредненная индивидуальная годовая эффективная доза от всех природных источников приведена в табл. 8.4, а распределение жителей Земли по полученным дозовым нагрузкам – на рис.8.15.

Таблица 8.4. Средняя эффективная доза от всех природных источников.

Источник	Средняя по Земному шару годовая индивидуальная эффективная доза (мЗв)	Типичная область варьирования (мЗв)
Внешнее облучение		
Космические лучи	0,4	0,3-1,0
Гамма фон среды	0,5	0,3-0,6
Внутреннее облучение		
Ингаляция (радон)	1,2	0,2-10
Радионуклиды, попавшие в организм	0,3	0,2-0,8
Общее	2,4	1-10

Глава 9. ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Главные источники искусственных ионизирующих излучений (ИИИИ), повышающие естественный радиационный фон:

- испытание или применение ядерного оружия;
- деятельность предприятий ядерного оборонного и топливного циклов;
- источники для технической дефектоскопии, научных исследований, медицинской диагностики и терапии.

Ядерное оружие. В военных целях оно было применено лишь дважды при бомбардировке в 1945 г Японских городов Хиросима и Нагасаки. Все остальные ядерные взрывы были произведены в целях испытания ядерного оружия.

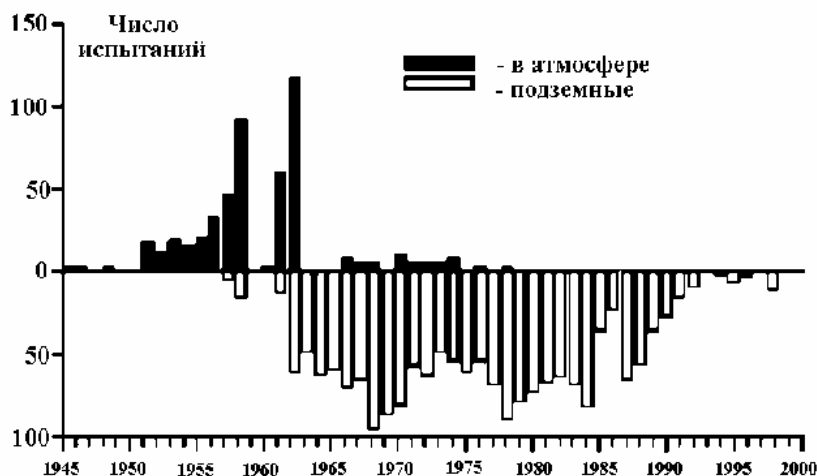
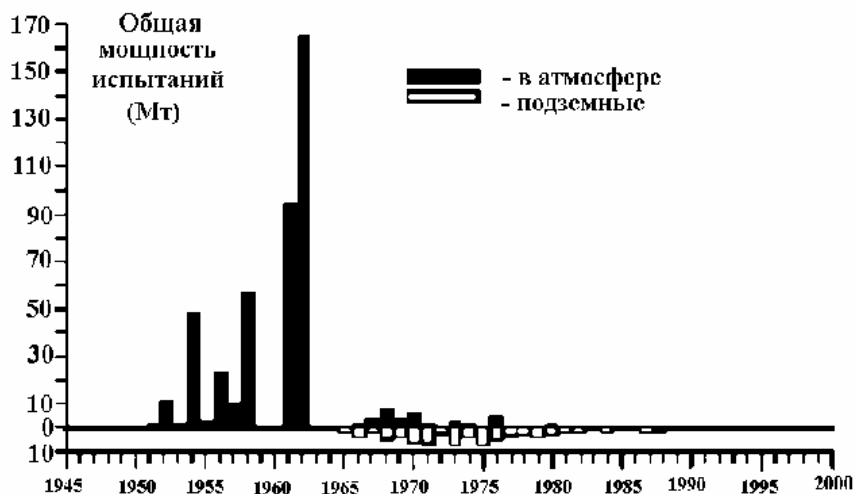


Рис.9.1. Характеристика испытаний ядерного оружия в мире (1945-2000 гг.)¹

Первая часть рис. 9.1. а – число испытаний по годам и средам.

Вторая часть рис 9.1. б – мощность испытания по годам и средам.



¹ UNSCEAR Report (2000), Annex C.

Наибольшие загрязнения окружающей среды произошли в период 1945-1980 гг., когда ядерные заряды взрывали в атмосфере. При этом в атмосферу попадало значительное количество радиоактивных веществ, находящихся в тонкодисперсном аэрозольном состоянии. Аэрозоли разносились ветрами по всему земному шару и, выпадая с осадками, в разных долях загрязняли практически все территории. Главными источниками загрязнений были радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs . Всего в атмосфере было произведено 543 взрыва.

С конца 50-х гг. начались испытания под землей. Наибольшее число испытаний приходится на начало 60-х гг. С 1980 г. испытания в атмосфере прекращены. Под землей проведено 1826 взрывов. Суммарное число испытаний – 2419.

Если в первые годы развития ядерных программ оружейные заряды основывались на процессах деления ^{235}U или ^{239}Pu на медленных нейтронах, то уже в начале 50х гг. получило развитие идея создания сверхмощного оружия, работавшего на принципе ядерного синтеза легких элементов (гелия) из еще более легких (изотопов водорода). В результате была создана *водородная* или *термоядерная бомба*. Термоядерные реакции способны протекать лишь при очень высоких температурах (порядка 10^7 К). Высокая энергия может быть сообщена сталкивающимся частицам в результате сильного разогрева в недрах звезд или при атомном взрыве. К сожалению, пока на практике осуществлены лишь неуправляемые термоядерные реакции взрывного типа, т.е. бомба.

Термоядерный век начинает отсчет 01.11.1952, когда США взорвали первую водородную бомбу на атолле Эвениток в Тихом океане. Бомба имела кодовое название «Майк» и обладала мощностью 10,4 Мт. (По существу это была не бомба, а громоздкое взрывное устройство размером с двухэтажный дом и массой более 65 т.) Чаще всего в термоядерной (водородной) бомбе, «взрывчатый» веществом является дейтерид лития (LiD , где $\text{D} = {}^2_1\text{H}$) или тритий ($\text{T} = {}^3_1\text{H}$):

Схемы превращений складываются в цепочки ядерно-нейтронных и ядерных реакций:

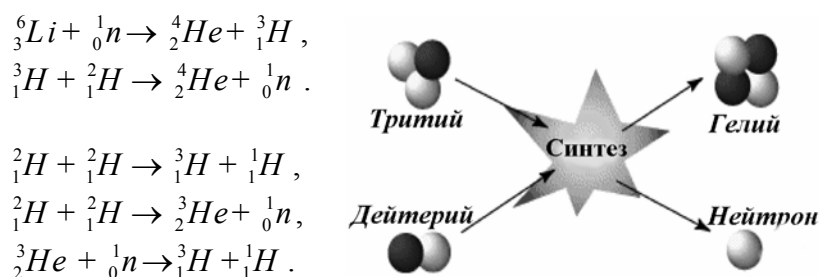


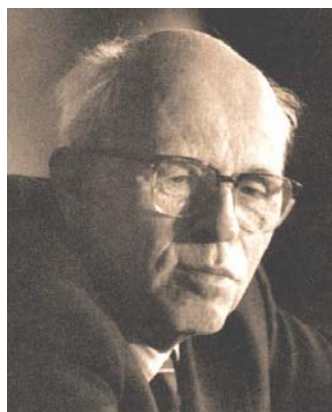
Рис.9.2. Одна из реакций термоядерного синтеза

Необходимая для протекания этих реакций температура и нейтроны создаются взрывом атомного «запала» – цепной реакцией деления ядер $^{235}_{92}\text{U}$ или $^{239}_{94}\text{Pu}$. Количество энергии, высвобождающееся при взрыве мощной термоядерной бомбы, колоссально и сопоставимо с энергией землетрясений. Отцом американской водородной бомбы считают известного физика Эдварда Теллера, венгра по происхождению.

Естественно, в гонке вооружения участвовали и другие страны. Термоядерное оружие изготовили и испытали на различных полигонах Англия, Франция, СССР, Китай. Отцом водородной бомбы в нашей стране полагают А.Д. Сахарова, хотя, по-видимому, таких отцов было больше.



Э. Теллер



А.Д. Сахаров

Западные страны размещали полигоны для испытания атомных и водородных бомб по всему миру. Испытания самых мощных бомб осуществляли как у себя в стране, так и далеко за пределами своих территорий: на атоллах Океании, в Сахаре, в пустынях Австралии (см. рис.9.3 – 9.6) Первые испытания: Англия – 03.10.1952; Франция – 03.12.1960; Китай – 16.10.1964; Индия – 18.05.1974.



Рис.9.3. Расположение полигонов по миру

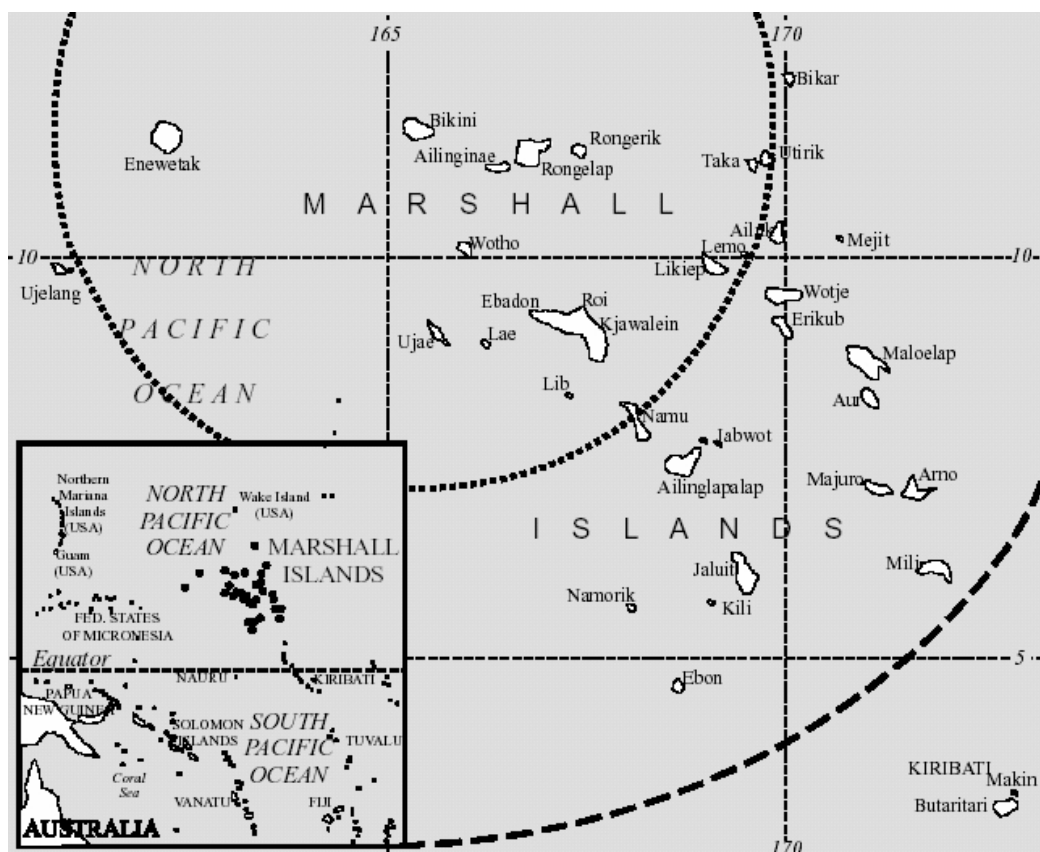


Рис.9.4. Ядерные полигоны в Тихом океане. Наиболее известные полигоны на атоллах Эвениток, Бикини, Ронгелап, Рогерик, Алингинае и др

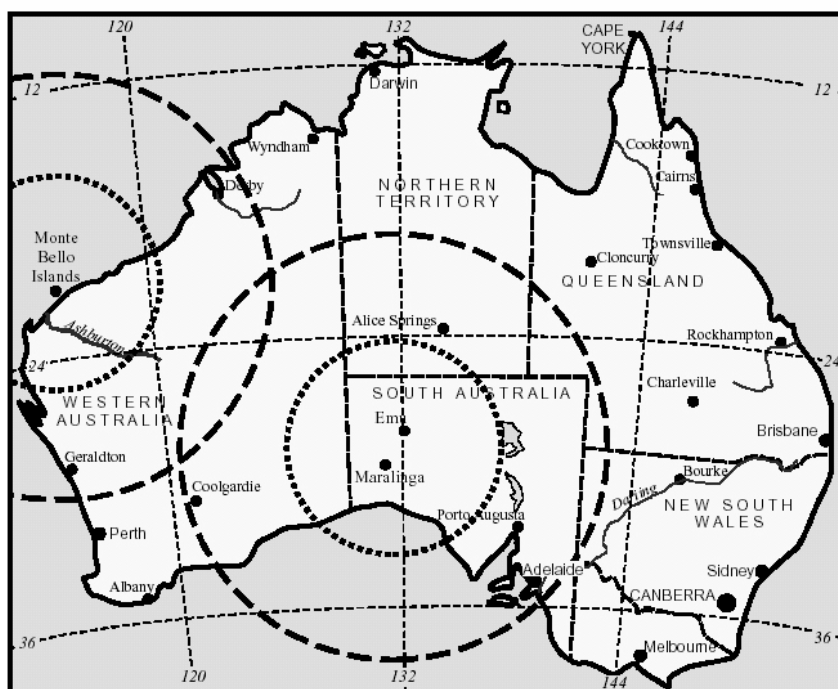


Рис.9.5. Английские ядерные полигоны в Австралии

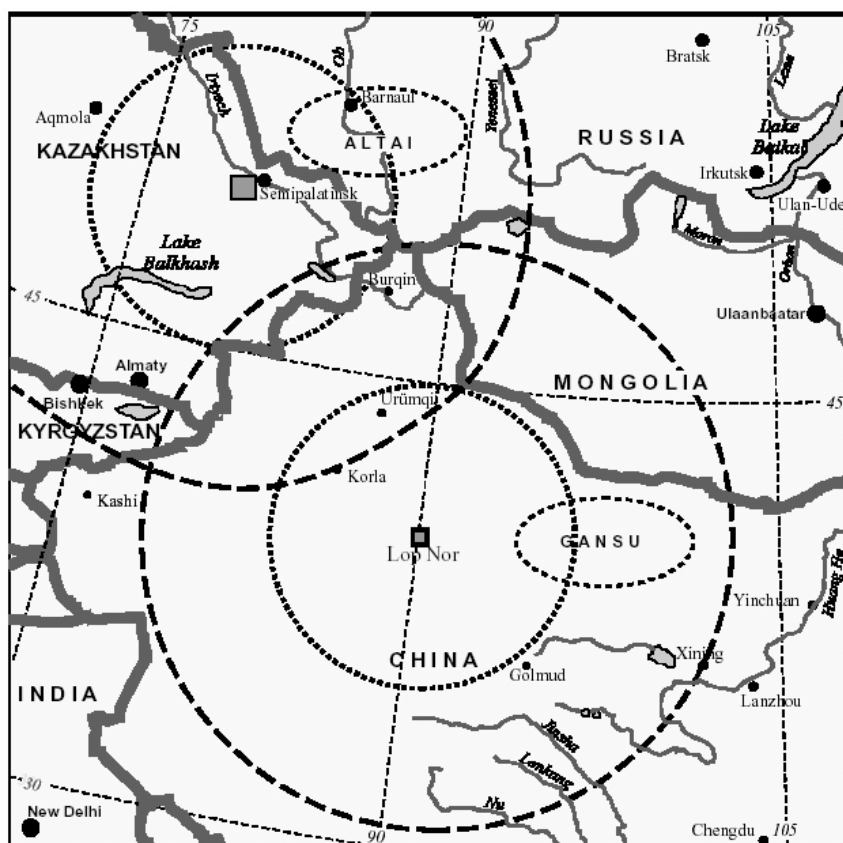


Рис.9.6. Семипалатинский полигон в СССР и полигон Лог Нор в Китае

Эти испытания не могли не сказаться на жителях прилегающих регионов. Было отселено население многих атоллов, но это не исключило заражение заселенных территорий. Наибольший резонанс во всем мире получил инцидент с 23 членами команды японского рыболовецкого судна «Фукуру Мару» («Счастливый дракон»). Дракон оказался не таким уж счастливым. В предрассветные часы 01.03.1954 г команда судна, которое находилось в южной части Тихого океана, в ужасе увидела, что солнце встает на западе. Вот как много лет спустя один из рыбаков Йосио Мисаки вспоминал об этом: *«Небо на западе внезапно осветилось, и море засверкало ярче, чем днем. Мы смотрели на этот ослепляющий и какой-то тяжелый свет. Семь или восемь минут спустя раздался жуткий звук, будто сходит лавина. Потом на горизонте появился разноцветный огненный шар»*.

Сами того не зная, рыбаки приняли вынужденное участие в испытаниях американской водородной бомбы «Браво» на атолле Бикини, примерно в 85 милях от них. Взрыв был эквивалентен примерно 12 Мт – в 750-1000 раз мощнее, чем атомная бомба, сброшенная на Хиросиму. К тому же детонация оказалась вдвое сильнее, чем ожидали американские ученые. Несколько часов спустя на палубу «Дракона» посыпался белый пепел (следствие испарения – конденсации известняков). Несколько членов команды собрали себе в мешочки это странное вещество – на память. К вечеру все, кто находился на борту рыболовецкой лодки, были больны. После возвращения в Японию весь экипаж был госпитализирован. Оценка полученной дозы ~200 рентген. Один из них, радист Айкичи Кубояма, умер спустя семь месяцев от почечной недостаточности, которую связывали с воздействием радиации. Несколько сотен обитателей Маршалловых островов в Тихом океане и около 30 американцев, работающих на испытаниях, тоже заболели из-за ядерных выбросов.

Инцидент спровоцировал кризис в отношениях между США и Японией – отчасти оттого, что Америка старалась держать в тайне свои ядерные испытания. В конце концов, американское правительство принесло свои извинения и выплатило два миллиона долларов компенсаций.

Но это не все. Опасаясь ядерного загрязнения, японцы уничтожили тонны рыбы, пойманной в этом районе океана. На протяжении нескольких месяцев после случая с «Драконом» японцы избегали есть рыбу; в результате рыболовная промышленность и связанные с ней отрасли понесли многомиллионные убытки.

Инцидент возродил беспокойство японцев по поводу ядерного оружия. Этот страх едва удалось подавить после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки в 1945 году, теперь он снова выплеснулся наружу. Один из эффектов – выпуск в 1954 г фильма «Годзилла – царица чудовищ» – история об огромном огнедышащем ящере, разбуженном ядерными испытаниями и мимоходом уничтожающем Токио. Усилились традиционные для Японии протесты против ядерного оружия. К августу 1955 года в Японии было собрано 32 миллиона подписей протестующих против американских ядерных испытаний. В том же месяце первая Всемирная конференция против ядерного оружия прошла в Хиросиме.

В 1976 г был открыт музей «Счастливого дракона», где главным экспонатом является сам «Дракон», кроме того выставлены фотографии, оборудование и документы, связанные с инцидентом. Ежегодно музей посещают около 300 тысяч человек. Через несколько лет после случая в Тихом океане американский физик-ядерщик Ральф Лэпп объяснил, почему так важно помнить историю «Счастливого дракона»:

«Истинная разрушительная мощь ядерного оружия была продемонстрирована на палубе «Счастливого дракона» ... Если люди в ста милях от взрыва могут погибнуть от безмолвного прикосновения бомбы, это значит, что мир внезапно становится слишком маленьким шариком для того, чтобы человек мог позволить себе бездумно играть с атомом. Это откровение, явленное нам таким странным образом через опыт 23 человек, может когда-нибудь поставит их плавание в один ряд по значимости с путешествием Колумба».

Первая водородная бомба СССР – разработчик А.Д. Сахаров – была сконструированная по схеме «деление – синтез – деление», т.н. «слойка» и испытана 12.08.1953 г на Семипалатинском полигона. Ее мощность составила 400 кт. «Слойка» открыла эру «грязных» бомб, сочетающих высокую общую мощность с большим удельным энерговыделением по реакции деления. Напомним, что реакция деления (а не синтеза) является источником наиболее опасных радионуклидов – ^{90}Sr и ^{137}Cs , определяющих (в зависимости от типа и мощности взрыва) местную, региональную или глобальную радиационную и радиоэкологическую обстановку. В «слойке» вклад реакции синтеза в суммарное энерговыделение не превышал 15-20%, что близко к теоретическому пределу. По существу, это была бомба деления на ^{238}U , лишь незначительно усиленная тритием и ^6LiD . Не случайно ее испытание, к тому же проведенное в наиболее неблагоприятных с точки зрения радиационных последствий условиях в виде наземного взрыва, явилось причиной сильнейшего локального и регионального радиоактивного загрязнения: на территории полигона и окружающих его областей Казахстана и России выпало 82% стронция-90 и 75% цезия-137 из суммарного их количества, выброшенного в атмосферу за все время функционирования Семипалатинского полигона вообще! И.В. Курчатов, отмечая успех испытаний, писал А.Д. Сахарову: «Тебе, спасителю России, спасибо!»

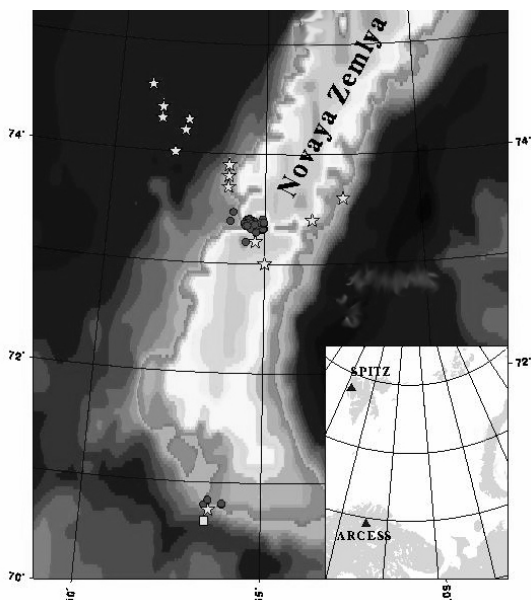
Определенная ограниченность «слойки» стимулировала поиски новых конструктивных решений. Новый механизм - обжатие вторичного термоядерного узла энергией излучения первичной атомной бомбы был открыт в марте-апреле 1954 г, что приписывают то Я.Б. Зельдовичу, то А.Д. Сахарову, то им обоим, то коллективному

разуму – идеи носились в воздухе. Термоядерная бомба РДС-37 была испытана 22.11.1955 на Семипалатинском полигоне на высоте 1500 м (носитель – самолет Ту-16. Проектная



Я.Б. Зельдович

мощность бомбы составила около 3,6 Мт, однако, для уменьшения вероятных серьезных разрушений за пределами полигона, она уменьшена до половины номинала и составила около 1,7 Мт. Это был первый в мире случай планового уменьшения энерговыделения термоядерного боеприпаса. Но и при половинном энерговыделении РДС-37 «натворила дел». В поселках, лежащих на расстоянии 60-70 км от эпицентра взрыва, была разрушена часть домов, а стекла в окнах вылетали даже в г. Семипалатинске (175 км) и далее – вплоть до 350 км. К сожалению, пострадали и люди: двое погибли и несколько десятков получили легкие ранения. В дальнейшем все испытания мегатонного класса проводились лишь на Новоземельском полигоне.



Самая мощная водородная бомба, на волне «холодной войны» была по приказу Н.С. Хрущева испытана в СССР на полигоне Новая Земля (30.10.1961) в период работы XXII съезда КПСС. Бомба весила 27 т и имела мощность 50 Мт (по некоторым фактическим оценкам 58 Мт), что примерно в 10 раз больше, чем общая мощность бомб, взорванных за время второй мировой войны. Она была сброшена на парашюте с высоты 4000 м. Взрыв произошел в атмосфере. Взрывная волна трижды обогнула Земной Шар².

Рис.9.7. Полигон Новая Земля. Светлые звездочки – испытания в атмосфере, темные кружки – подземные и подводные испытания. Справа внизу показаны норвежские контрольные сейсмические станции.



Шесть самых мощных бомб,
испытанных СССР:
23.10.1961 (12,5 Мт);
30.10.1961 (50 Мт); 05.08.1962 (21,1 Мт);
25.09.1962 (19,1 Мт); 27.09.1962 (более 10 Мт);
24.12.1962 (24,2 Мт).

Н.С. Хрущев обещает показать США «Кузькину мать»

² В. Б. Адамский, Ю. Н. Смирнов. 50-мегатонный взрыв над Новой Землей. ВИЕТ № 3, 1995.
Г.А. Гончаров. К пятидесятилетию в СССР возможности создания термоядерного реактора. УФН, т.171, 2001, №8, с. 894-901.
Из Архива Президента Российской Федерации. УФН, т.171, 2001, №8, с. 902-908.

Свои первые термоядерные бомбы испытали: Англия – 08.11.1957; Китай – 17.06.1967; Франция – 24.08.1968.

Суммарное количество испытаний ядерного оружия по странам: США – 1030, последнее 23.09.1993; СССР – 715, последнее 25.10.1990; Франция – 210, последнее 27.01.1997; Англия – 45, последнее 26.11.1991; Китай – 43, последнее 1997.

Вернемся к анализу данных, приведенных на рис. 9.1. Наивысший пик загрязнений поверхности Земли от выпадений продуктов ядерных взрывов приходится на 1963 г (годовая индивидуальная эквивалентная доза – 150 мкЗв). С переходом на испытания под землей, сокращением числа испытаний и мощности зарядов количество выпадающих из атмосферы радионуклидов существенно уменьшилось.

В 2000 г годовая индивидуальная эквивалентная доза снизилась до 5 мкЗв. Она формируется сохранившимися радионуклидами, прежде всего, ^{14}C , ^{90}Sr и ^{137}Cs . Средняя



годовая доза на 10% выше в Северном полушарии, где были проведены основные испытания, и ниже в Южном полушарии. Средние радиационные нагрузки на население даже в периоды интенсивных испытаний не превышали 7% от уровня, создаваемого природными источниками. Однако наблюдались повышенные загрязнения локальных участков территории вблизи мест испытаний.

А. Сахаров и Э. Теллер на 80-летию Теллера

Ядерные технологии.

В период пуска и отработки технологий заводов ядерного оборонного циклов (1945-1960 гг.) вследствие технологических несовершенств и инцидентов имели место случаи облучения персонала и местного населения, проживающего ниже по течению рек или в направлении ветров, переносящих радиоактивные загрязнения. Не избежала таких аварий и Россия, атомная промышленность которой насчитывает уже более 50 лет. Наиболее тяжелые радиологические последствия за все это время дали первые годы функционирования ПО МАЯК и авария на ЧАЭС.

В первом случае при запуске технологий имело место переоблучение персонала, а у некоторых жителей населенных пунктов, расположенных на берегах реки Течи, в которую комбинат сбрасывал загрязненные воды, были зарегистрированы случаи хронической лучевой болезни.

При аварии на ЧАЭС пострадало большое количество персонала, была загрязнена значительная территория Украины, Белоруссии и граничащие с ними области РФ: Брянская, Калужская, Тульская, Орловская. Были отселены все проживающие в 30-ти км зоне вокруг ЧАЭС. Сотни тысяч ликвидаторов устраняли последствия аварии. Причины аварии на ЧАЭС и ее последствия подробно проанализированы в лекции №11. Проблемы радиационных загрязнений территории Урала освещены в лекции №12.

Совокупные радиологические последствия аварий в атомной промышленности за все время ее существования (более 50 лет, число работников до 1,5 млн.) таковы³:

³ Л. Большов, Р. Арутюнян, И. Линге, О. Павловский. О роли радиационных факторов в экологических рисках для населения России, ч.1 и ч.2. ИБРАЭ РАН. Публикация в ИНТЕРНЕТ 15-10-2001: <http://daily.sec.ru/> см. раздел: Промышленная и экологическая безопасность.

- Персонал – число пострадавших с клиническими симптомами не превышает 700 человек, из них со смертельным исходом – 56 человек.

- Среди населения, проживающего на побережье реки Теча, куда в 1949-1951 гг. производился сброс высокорadioактивных отходов, клинические симптомы были зафиксированы только в начале 50-х годов (первичная диагностика – 940, уточненный диагноз – менее 100). Отдаленные эффекты, достоверно установленные среди этой же когорты, – менее 50 случаев дополнительных лейкозов и других онкозаболеваний.

Современные заводы этого профиля характеризуются весьма низким уровнем радиационных нагрузок на персонал. В табл. 9.1 (оценки UNSCEAR) приведены индивидуальные эффективные годовые дозы, от искусственных источников на рабочих местах. Мировое производство энергии на АЭС продолжает расти. По тем же оценкам вся совокупность ныне действующих АЭС создает для населения эффективную индивидуальную дозу менее 0,2 мЗв в год.

Таблица 9.1. Повышенная радиационная опасность на рабочих местах от искусственных источников (2000 г).

Искусственные источники радиации, место работы	Число обследованных работников, тыс.	Средняя годовая эффективная доза, мЗв
Ядерный топливный цикл, включая добычу и переработку урановых руд	800	1,8
Промышленное использование радиации	700	0,5
Источники в средствах защиты.	420	0,2
Использование радиации в медицине	2320	0,3
Образование и ветеринария	360	0,1
Всего от искусственных источников	4600	0,6

Деятельность предприятий ядерного топливного цикла.

Особое внимание привлекает возможность облучения населения предприятиями различных стадий ядерного топливного цикла. В районах урановых рудников и гидрометаллургических заводов в окружающую среду могут поступать газообразные, жидкие и твердые отходы, содержащие уран и дочерние продукты его распада. Из рудников через вентиляционную систему в атмосферу выбрасывается ^{222}Rn . Урановые отходы (хвосты) с обогатительных фабрик также содержат радиоактивные вещества, которые могут поступать в воздух в виде аэрозолей. Скорость эманации ^{222}Rn из отвалов хвостохранилища в среднем примерно равна 1 Бк/м²·с при содержании Ra 1 Бк/кг. При получении сырья для выработки 1 ГВт (эл) энергии, в окружающую среду поступает 20 000 ГБк радона из рудника, 880 ГБк с перерабатывающего завода, 1000 ГБк из хвостохранилища.

При переработке топлива, отработанного в ядерных реакторах АЭС, из него извлекают уран и плутоний для повторного использования, а также некоторые долгоживущие радионуклиды, которые могут быть использованы в хозяйственных целях (^{137}Cs , ^{90}Sr и др.). Перед поступлением на переработку ТВЭЛы обычно выдерживают не менее 120 суток, чтобы распались короткоживущие радионуклиды, главным образом ^{131}I .

Радионуклиды, имеющие основное значение в выбросах заводов по переработке облученного топлива, это, как правило, долгоживущие радионуклиды ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{90}Sr ,

^{106}Ru , ^{129}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs и изотопы трансурановых элементов. Расчеты показывают, что, если исключить аварийное облучение (Чернобыль, ПО “Маяк” и др.), то годовая доза на одного человека, связанная с их деятельностью, в настоящее время не превышает 0,1 мкЗв.

В результате работы атомных электростанций радиоактивные отходы образуются в газообразном, жидком и твердом виде. В окружающую среду удаляются (после прохождения систем очистки) только газообразные и частично аэрозольные и жидкие отходы. Твердые отходы хранятся на площадке АЭС, а затем направляются на захоронение. К газообразным отходам относятся радиоактивные благородные газы (РБГ) и йод (табл. 9.2.).

Таблица 9.2. Характеристика выбрасываемых из реакторного топлива РБГ.

Нуклид	Состав РБГ, (%).	
	Реактор. ВВЭР	Реактор РБМК
^{41}Ar	0,2	0,3
^{85}Kr	6,0	0,7
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	5,4	6,6
^{87}Kr	1,0	13,4
^{88}Kr	2,2	18,6
^{133}Xe	72	35,2
^{185}Xe	13,2	25,4
Всего РБГ	111-277 ТБк/(ГВт·год)	~2775 ТБк/(ГВт·год)
Суммарная доза: (зона 1 - 10 км)	0,079 мкЗв/(ГВт·год)	1,2 мкЗв/(ГВт·год)

Более высокая доза облучения для РБМК объясняется не только большим выбросом, но и его изотопным составом радионуклидов.

Облучение в медицинских целях.

Использование ионизирующей радиации для медицинской диагноза и терапии получило широкое распространение во всем мире, хотя количество процедур и их характер широко варьируется при переходе от страны в стране. Это определяется экономическим развитием страны, наличием квалифицированного медицинского персонала и специальной техники. Наблюдающийся рост числа медицинских процедур с использованием ионизирующих излучений в первую очередь обусловлен возможностью ранней диагностики ряда тяжелых заболеваний, таких как рак и туберкулез.

Диагностические экспозиции характеризуются относительно низкими дозами, получаемыми индивидуальными пациентом – обычно эффективные дозы варьируются в интервале 0,1-10 мЗв, что в ряде случаев выше ежегодных доз, получаемым каждым человеком от всех природных источников. Как правило, этого вполне достаточно, чтобы получить необходимую клиническую информацию. Напротив, терапевтические процедуры требуют весьма высоких доз (обычно в интервале 20-60 Гр), локально получаемых конкретным органом или частью организма, чтобы подавить болезнь (преимущественно рак), или облегчить состояние пациента. Относительно малое число диагностических или терапевтических процедур проводят на добровольцах в научных целях.

Медицинская радиология использует широкий набор методов, используя все новые технологические достижения (табл.9.3.) Чаще всего используют рентгеновское излучение, формирующее наибольший вклад в радиационную экспозицию в медицине. В лучевой терапии, как правило, используют внешние стационарные источники излучения, хотя в некоторых случаях применяют малогабаритные закрытые источники контактного типа и даже вводят радиоактивный препарат в локальный очаг заболевания.

Таблица 9.3. Эволюция приборной базы радиологических процедур

Дата	Этапы развития
1895	Открытие рентгеновских лучей, первый снимок
1920-е	Контрастные снимки с использованием сульфата бария
1930-е	Внутривенные контрастные средства
1940-е	Ангиография
1950-е	Флюороскопия с усилением интенсивности снимков; катеторная техника
1960-е	Первые работы по созданию ярких экранов с РЗЭ
1970-е	Компьютерная томография (КТ)
1980-е	Съемка с использованием магнитного резонанса; приборная радиология
1990-е	Внутриполостная радиологическая техника

По классификации UNSCEAR⁴ все страны Мира по уровню медицинского использования ионизирующих излучений и состоянию здравоохранения разделены на 4 категории (группы). В качестве классифицирующего критерия выбрано отношение числа врачей N к числу обслуживаемых жителей M (табл.9.4.). В таблице также указана процентная доза населения Мира, проживающего в странах разных групп по состоянию на 1996 г (население Земли составляло 5 млрд. 600 млн. человек)

Таблица 9.4. Классификация стран по состоянию здравоохранения.

Категория	N	M	% доля населения
I	1 и более	1000	26
II	1	1000 - 3000	53
III	1	3000 – 10 000	11
IV	1	Более 10 000	10

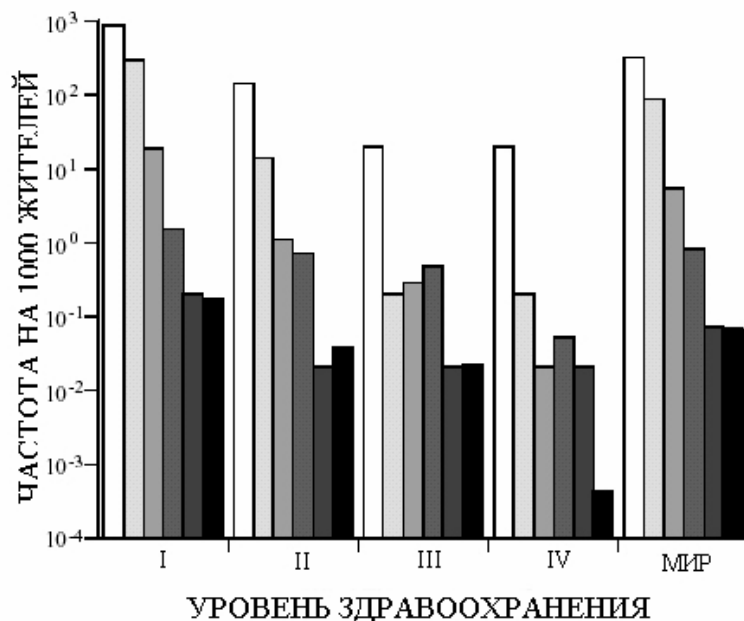


Рис.9.8. Оценка глобальных ежегодных частот медицинских диагностических и терапевтических процедур (1991-1996).

Шесть столбиков в каждой группе соответственно: общемедицинская рентгеновская диагностика; то же при лечении зубов; ядерная диагностика; общая радиотерапия; терапия с использованием закрытых источников; ядерная терапия.

Анализ ситуации показывает, что диагностические и лечебные технологии процедуры главным образом сконцентрированы в странах I категории, которые представляют одну четверть человеческой популяции. На нее приходится более

⁴ UNSCEAR Report (2000), Annex D

50% всех обращений (процедур) и формируется более 80% коллективной дозы от всех диагностических процедур по Миру.

Россия находится в I категории, не уступает по числу врачебного персонала развитым странам, но проигрывает по качеству лечебно-диагностического оборудования.

Диагностические процедуры – в сумме 2 млрд.500 млн. существенно перевешивают число терапевтических процедур – 5,5 млн., т.е. соотношение 450 /1. Более всего используются рентгеновские лучи. На общемедицинскую диагностику приходится 78 % процедур (в среднем 330 процедур на 1000 жителей); на диагностику в зубоврачебных кабинетах приходится 21 % процедур (в среднем – 90 на 1000). На ядерную медицину – только 1 % (в среднем – 5,6 на 1000).

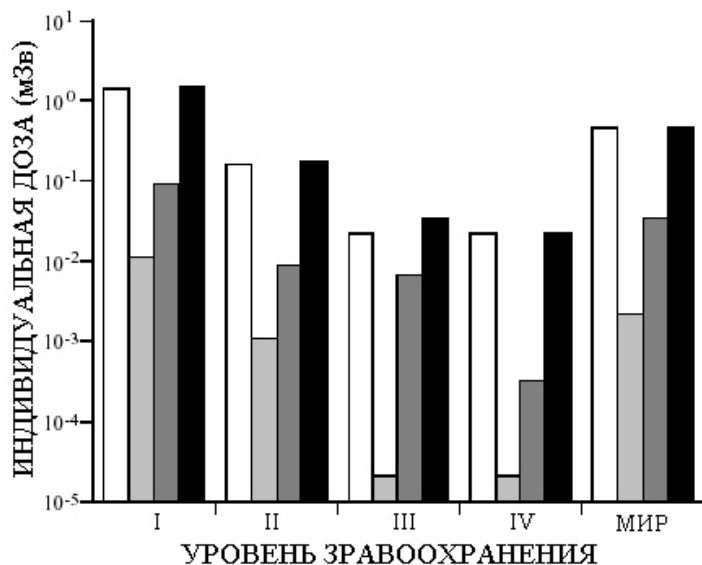


Рис. 9.9. Оценки среднемировых годовых индивидуальных доз от медицинских диагностических процедур (1991-1996 гг.). (В четырех колонках для каждой группы представлены: медицинская рентгеновская диагностика; рентгеновская диагностика зубов; ядерная диагностика; суммарно все виды диагностики).

Полная коллективная доза от всех диагностических экспозиций оценивается примерно в 2 500 млн. чел·Зв, что соответствует 0,4 мЗв на человека; ядерная медицина формирует только 6 % этой суммы (0,03 мSv мЗв).

Более 90 % от суммы лучевых терапий осуществляют с помощью стационарных установок или закрытых источников (в среднем 0,8 и 0,07 на 1000). Радиоактивные фармпрепараты используется только в 7% всех терапевтических процедур (в среднем 0,065 на 1000 жителей).

Развитие медицинской диагностики во всех странах приводит к увеличению уровня облучения каждого человека и популяции в целом. В настоящее время облучение населения в медицинских целях дает наибольший вклад в дозу облучения по сравнению с другими источниками излучения. В первую очередь речь идет о рентгенодиагностических процедурах.

В России в среднем на одного человека в год приходится одна рентгенодиагностическая процедура (рентгенография – 0,44; рентгеноскопия – 0,19; флюорография – 0,37). Эквивалентные поглощенные дозы в различных органах и тканях в результате рентгенодиагностических процедур лежат в диапазоне 0,01 - 50 мЗв на одно обследование. При обследовании грудной клетки (сердце, легкие) реализуются поглощенные дозы, близкие к минимальным, более высокие дозы наблюдаются при рентгенографии желудочно-кишечного тракта. Средние годовые индивидуальные дозы в России составляют: для красного костного мозга – 1,7 мЗв, для желудочно-кишечного тракта – 1,3 мЗв, для гонад – 0,35 мЗв. Годовая эквивалентная доза облучения всего тела составляет 1,5 мЗв.

Однако из этого не следует делать вывод о необходимости исключения ионизирующего излучения из арсенала средств диагностики и лечения. Следует иметь в виду, например, что своевременное обнаружение пневмонии при помощи рентгеноскопии легких уменьшает число смертельных исходов в 200 раз, то же можно сказать и о диагностике других заболеваний. В то же время потенциальный вред, связанный с облучением при медицинской диагностике для здоровья ничтожен.

Снижению радиационных нагрузок на организм способствует обновление материальной базы диагностической аппаратуры, в частности замена рентгеновской аппаратуры на компьютерные томографы, использования методов ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и др. новейшие системы. Правда, эти системы весьма дороги.

Лекция 10. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ



Открытия «невидимых» рентгеновских лучей, а вскоре и таинственного явления радиоактивности, соответственно 1895 и 1896 гг., впервые познакомили человечество с наличием ионизирующих излучений искусственного и естественного происхождения. От своих открытий человечество испытало что-то вроде эйфории: стало возможным заглянуть внутрь организма, рассмотреть все его «устройство». Вера в живительные лучи, как символ прогресса, была столь велика, что их стали применять в медицине направо и налево, а радиоактивные элементы добавляли в зубную пасту, в лечебные ванны и даже принимали внутрь, как целебное средство.

Работы по биологическому воздействию радиации с первых шагов активно велись и в России¹. Уже и 1896 г профессор кафедры физиологии Военно-медицинской академии (Санкт-Петербург) И.Р. Тарханов опубликовал полученные им в опытах на лягушках и насекомых данные, свидетельствующие об отчетливом действии ионизирующих излучений на центральную нервную систему и на развитие животных. Им был сделан вывод, что «... влияние лучей должно распространяться и на обмен веществ в сложных организмах, а отсюда и на ход всех функций». Им же впервые сформулирована идея рентгенотерапии: «X-лучи могут служить не только для фотографирования и для диагноза, как думали до сих пор, но и для воздействия на организм. И мы не удивимся, если в недалеком будущем лучами этими будут пользоваться с лечебной целью». Этот прогноз оказался точным. Очень скоро лучевая терапия заняла и продолжает, по сей день занимать ведущее положение среди эффективных методов лечения злокачественных новообразований.

Вместе с тем, одновременно стали появляться сообщения о неприятных последствиях действия облучения. Первооткрыватель радиоактивности А. Беккерель неожиданно для себя получил ожог от ампулы с радием, которую 6 часов носил в жилетном кармане. П. Кюри, узнавший об этом, сознательно поставил на себе эксперимент, привязав ампулу с препаратом радия к руке. В результате ожог и глубокая язва, которую пришлось залечивать более двух месяцев. Первая публикация описания радиационного повреждения кожи появилась в 1897 г, когда Х.Д. Хокс, студент Колумбийского Университета (Нью-Йорк), описал тяжелый воспалительный дерматит на своих руках, полученный от воздействия рентгеновского аппарата. В том же году серьезно повредил свои руки в результате эксперимента У. Додд, первый рентгенолог Массачусетского Госпиталя, которому впервые язвенные участки рук лечили хирургически, путем пересадки кожи.

Заметим, что первые радиологи и ученые, работавшие с рентгеновскими лучами в начале XX века, мало обращали внимания на меры предосторожности. Многие из них умерли от лейкоза и раковых опухолей кожи и костей. Аналогичная картина наблюдалась и на первых стадиях изучения радиоактивности. В 1928 г в Лондоне был воздвигнут обелиск, на котором высечены имена 136 человек, не щадивших себя в стремлении

¹ С.П. Ярмоненко Радиобиология человека и животных. М.: Высшая школа, 1988. 424 с.

поставить X-лучи на службу человечеству. В 1936 г. в Гамбург-Эппендорфе установлен такой же монумент с надписью: *«Памятник посвящается рентгенологам и радиологам всех наций, врачам, физикам, химикам, техникам, лаборантам и сестрам, пожертвовавшим своей жизнью в борьбе против болезней их ближних. Они героически прокладывали путь к эффективному и безопасному применению рентгеновских лучей и радия в медицине. Слава их бессмертна»*. А на гранях камня – печальный мартиролог со 169 фамилиями тех, кто скончался от облучения.

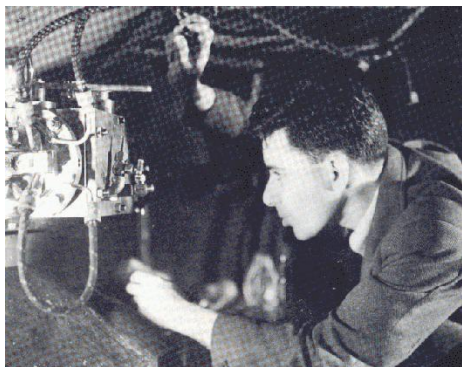
К 1959 г в списке жертв значились уже 360 человек, среди них – 13 наших соотечественников. Некоторые были мучениками из мучеников. У. Додд из Бостона умер от рака после 46 операций. Конечно, этот список много длиннее.

В 20-е гг. прошлого столетия молодые работницы часовых фабрик, раскрашивая циферблат люминесцентной краской, часто для придания кисточкам остроконечной формы смачивали их во рту слюной. Люминесцентная краска содержала радий, который, поступая в организм через желудочно-кишечный тракт, откладывался в растущих зонах костей. Возникшие из этих отложений радия очаги излучения вели к образованию опухолей, которые стали клинически явными спустя многие годы. Впоследствии почти каждая бывшая работница фабрики, обследование которой удалось провести, умерла, если не от лейкоза или его осложнений, то на более позднем сроке от рака костей.

Среди жертв радиации и корифеи: М. Кюри (злокачественная острая анемия), И. Кюри (лейкемия). Они не только работали с открытыми препаратами радия, но и во время 1-й Мировой войны рентгенологами и радиологами в полевых госпиталях. От рака умер и Ф.Ж. Кюри – он решительно выступал против того, чтобы диагноз его заболевания использовался в качестве аргумента для запугивания молодых исследователей.

Иногда к катастрофическим последствиям приводила полная некомпетентность. В истории радиологии известен случай с промышленником и общественным деятелем из Филадельфии Э. Байерсом. В течение трех лет он принимал препараты радия в качестве лекарства. В результате произошло накопление радия в костях (радий – щелочноземельный элемент), что вызвало сильный некроз костной и других тканей и послужило причиной его смерти.

Растущее осознание научной общественностью необходимости принятия регулирующих мер в отношении облучения привело к ускорению создания ряда специальных мер. В 1928 году на II Международном конгрессе радиологии – независимом, неправительственном органе экспертов, была учреждена Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ). В начале МКРЗ была известна как Международный комитет по защите от рентгеновских лучей и радия. Эта организация объединила специалистов, работавших в данной области, с целью разработки основных принципов и выработки рекомендаций по радиационной защите. Члены МКРЗ избирались и сейчас избираются с учетом их личного опыта в области медицинской радиологии, радиационной физики, генетики и в других смежных областях, при этом особое внимание уделяется обеспечению сбалансированного подбора специалистов по отраслям знаний, а не по принципу представительства стран. Рекомендации МКРЗ повсеместно принимаются в качестве основы для национальных правил и норм, регулирующих облучение лиц, работающих с источниками ионизирующих излучений, и населения.



Первой жертвой при изготовлении атомной бомбы на процедуре установления критической массы ядерного горючего в мае 1945 г стал канадский физик Луис Слотин.

Луис Слотин.

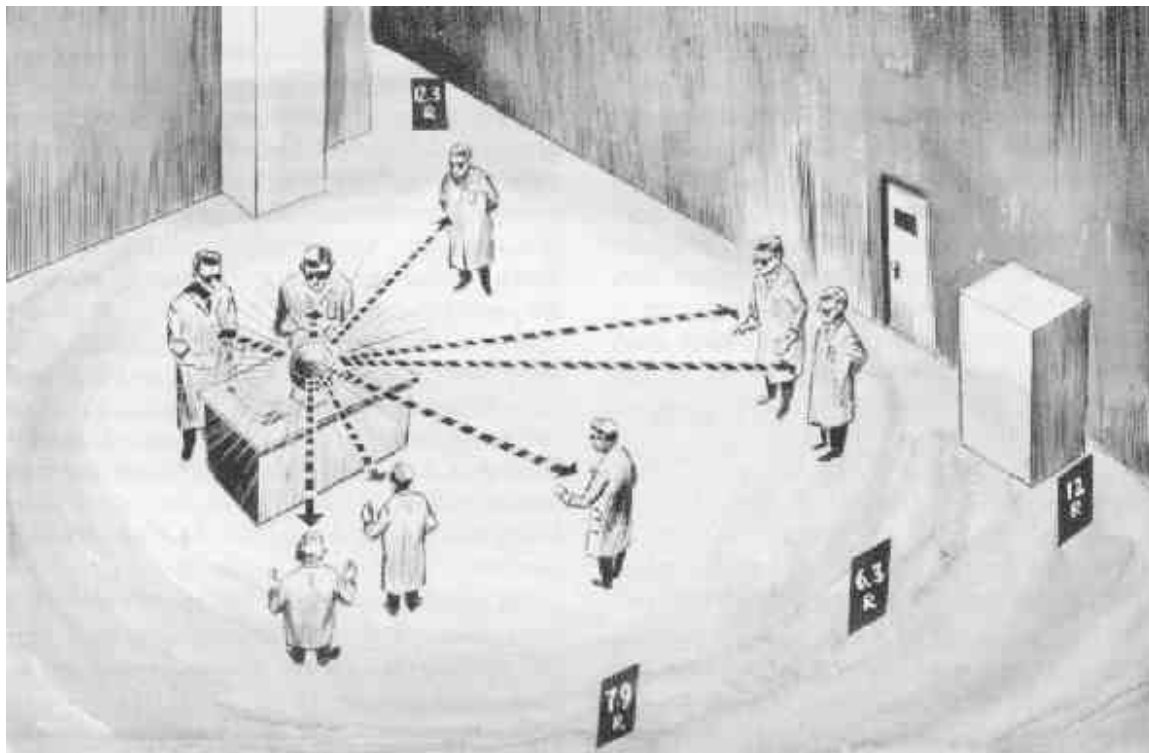


Рис. 10.1. Схема эксперимента, приведшая к облучению персонала.

Принципиальный пересмотр отношения к проблемам облучения работающего с радиацией персонала и гражданского населения связан с развертыванием программ по созданию ядерного оружия и атомной энергетики. Шок от варварской бомбардировки Хиросимы и Нагасаки не прошел до сих пор. Массовый характер и особенности нового вида поражений человека обусловили необходимость изучения эффектов общего облучения, прежде всего в смертельных и близких к ним дозах, процесса патогенеза, возникающего в результате действия радиации. Эти проблемы и основанные на их решении разработки средств и методов диагностики, профилактики и лечения острой лучевой болезни и комбинированных радиационных поражений стали приоритетными практическими задачами радиобиологических исследований с конца сороковых годов.

Авария на Чернобыльской АЭС показала, что и в мирных условиях возможны радиационные инциденты с тяжелыми последствиями.

Были раскрыты причины легочных заболеваний шахтеров, работающих в урановых шахтах, и ни о чем не подозревающих жителей, чьи дома построены в зонах с повышенным содержанием радона или из содержащих радий материалов. Такие примеры можно было бы продолжить.

Признавая обеспокоенность международной общественности по поводу последствий выпадения радиоактивных веществ, как результат испытания ядерных взрывных устройств, Генеральная Ассамблея Организации Объединенных Наций в 1955 г создала научный Комитет по действию атомной радиации (НКДАР ООН – в английской транскрипции – UNSCEAR). Этот комитент уполномочен заниматься сбором, изучением и распространением информации о наблюдаемых уровнях ионизирующего излучения и радиоактивности (как естественной, так и искусственной) в окружающей среде, и о влиянии такого излучения на человека и окружающую его среду. Доклады НКДАР ООН широко признаются в качестве авторитетных документов.

Еще одна международная организация – Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) – была создана 29 июля 1957 г. МАГАТЭ дислоцируется в Вене, Австрия. Основными целями МАГАТЭ являются *«достижение более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире»* и *«обеспечивать, чтобы помощь, предоставляемая по его требованию, или под его наблюдением или контролем, не была использована таким образом, чтобы способствовать какой-либо военной цели»*.

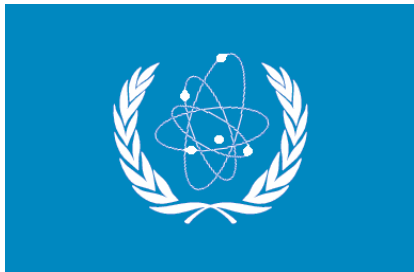


Рис.10.2. Символика МАГАТЭ

В частности, в отношении здравоохранения и безопасности Устав Агентства ставит ему в обязанность создавать или принимать нормы безопасности по защите здоровья и сведению к минимуму опасности жизни и собственности, включая нормы, касающиеся рабочих мест.

Эти нормы должны применяться как для собственных работ Агентства, так и для тех работ, при которых используются материалы, услуги, установки и информация, поставляемые Агентством или при его посредничестве. При необходимости Агентство должно консультироваться или сотрудничать с другими органами и специализированными учреждениями системы ООН при разработке или принятии указанных норм безопасности.

Аналогично с ООН, Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и другим специализированным организациям системы ООН, МАГАТЭ представляет собой межправительственную организацию. Агентством управляет Совет управляющих, который состоит из представителей 34 государств-членов, а также Генеральная конференция, представляющая все государства-члены Агентства, число которых превышает насчитывает 110. Агентство имеет собственную программу, утверждаемую Советом управляющих и Генеральной конференцией, и собственный бюджет, сумма которого в настоящее время составляет около 216 млн. долл. в год и который финансируется взносами государств-членов. Россия также является членом МАГАТЭ.

Являясь автономной организацией, Агентство в то же время является членом системы Организации Объединенных Наций и направляет доклады о своей работе Генеральной Ассамблее и другим органам Организации Объединенных Наций.

Обсудим некоторые специфические особенности воздействия ионизирующего излучения на живые организмы². Главные из них:

1. Высокая эффективность поглощенной энергии. Малые количества поглощенной энергии излучения могут вызвать глубокие биологические изменения в организме.
2. Наличие скрытого, или инкубационного, периода проявления действия ионизирующего излучения. Этот период часто называют периодом мнимого благополучия. Продолжительность его сокращается при облучении в больших дозах.
3. Действие от малых доз может суммироваться или накапливаться. Этот эффект называется кумуляцией.
4. Излучение может воздействовать не только на данный живой организм, но и на его потомство. Это так называемый генетический эффект.
5. Различные органы живого организма имеют свою чувствительность к облучению. При ежедневном воздействии дозы 0,002–0,005 Гр уже наступают изменения в крови.

² Э. Дж. Холл. Радиация и жизнь. М.: «МЕДИЦИНА», 1989, с.256.

6. Не каждый организм в целом одинаково реагирует на облучение.

7. Суммарный эффект воздействия зависит от частоты облучения. Одноразовое облучение в большой дозе вызывает более глубокие последствия, чем фракционированное.

Все живые существа состоят из клеток – основных строительных «кирпичиков» жизни. Поэтому при обсуждении механизмов воздействия радиации необходимо осуществить рассмотрение на клеточном уровне. Любой орган, будь то головной мозг, кровь, кости или железы, образован скоплением клеток. Все клетки взрослого организма имеют набор хромосом, в которых содержится в кодированной форме полная генетическая информация, точно определяющая размер, форму и тип данного живого существа. Каждая клетка слона среди миллионов клеток его организма содержит информацию, которая делает его слоном, а каждая клетка мышцы содержит информацию, делающую ее мышью.

Число хромосом в клетке зависит от биологического вида организма. Обычная клетка человека содержит 46 хромосом и такое же их количество имеется в клетках большинства других высших млекопитающих. В клетках сумчатых животных, являющихся одной из боковых ветвей эволюционного процесса, число хромосом меньше и иногда оно составляет одиннадцать. У растений содержание и размер хромосом сильно варьирует, но, как правило, их меньше, чем в клетках у животных, к тому же они имеют большой размер и упрощенную форму.

У высших животных первая клетка нового организма возникает в момент оплодотворения, когда сперматозоид и яйцеклетка соединяются в одно целое. Половые клетки имеют множество особенностей, но самая замечательная состоит в том, что число хромосом, которое они содержат, в два раза меньше, чем во всех остальных клетках организма. Поэтому генетический материал потомка состоит наполовину из материала одного родителя, наполовину – из материала другого. Например, первая клетка нового человеческого организма содержит 23 хромосомы, полученные от матери, и столько же от отца.

Итак, единая клетка, возникшая при оплодотворении, затем делится с образованием двух клеток, каждая из которых снова делится, после чего получаются уже четыре клетки и так далее. На этой ранней стадии развития все клетки способны к делению и поэтому новая популяция клеток возрастает с очень большой скоростью. На более поздней стадии развития некоторые клетки «дифференцируются», т.е. становятся специализированными, способными выполнять определенные функции, и не могут продолжать деление. Так, одни из них превращаются в клетки мозга, другие – в клетки печени и так далее.

По истечении времени формируется зрелый организм, состоящий из дифференцированных и делящихся клеток, каждая из которых наследует генетические особенности обоих родителей.

Последствия, которые вызывает воздействие излучения в организме человека, можно классифицировать в зависимости от величины полученной дозы:

- изменения в соматических клетках, приводящие к возникновению рака;
- генетические мутации, оказывающие влияние на будущие поколения;
- влияние на зародыш и плод, вследствие облучения матери в период беременности;
- смерть непосредственно в момент облучения.

Первые два последствия воздействия радиации обычно связаны с ситуациями, когда огромное число людей подвергается небольшим дозам излучения во время экспозиций в медицинских целях или в результате работы на атомных электростанциях. Воздействие радиации на развивающийся зародыш или плод представляет собой особый экстремальный случай, поскольку все усилия надо направлять на его исключение.

Возникновение четвертого эффекта – смерти непосредственно в момент излучения, связано с получением огромной дозы радиации, что возникает только в катастрофических ситуациях, например при взрыве атомной бомбы или аварии на ядерном реакторе.

То, что радиация может вызывать рак у животных и человека – факт бесспорный. Мы об этом выше уже упоминали. Раковая опухоль возникает в тот момент, когда соматическая клетка, выйдя из-под контроля организма, начинает неистово делиться, несмотря на создаваемую угрозу для живого существа в целом. В результате формируется крупная одиночная масса клеток или группа более мелких образований.

Первопричиной, заставляющей соматические клетки вести себя подобным образом, считают нарушения в генетическом механизме, называемые мутациями. Мутация, происходящая в половой клетке, оказывает действие на будущие поколения. Мутация, произошедшая в соматической клетке, приводит к последствиям, касающимся только конкретного индивидуума. Раковая клетка воспроизводит себя посредством деления на две клетки, которые в свою очередь делятся вновь, и так далее. Все образующиеся потомки первоначальной раковой клетки являются раковыми. Так происходит рост опухоли.

Одной из разновидностей рака является лейкоз (белокровие) – болезнь, характеризующаяся избыточным содержанием в крови неполноценных белых клеток (белых кровяных телец или лейкоцитов). Ее еще часто называют «раком крови». Циркулирующие в крови белые клетки сами по себе не делятся, но они образуются в результате активного деления стволовых клеток³ костного мозга и лимфатических узлов. Изменение в одной или более стволовых клетках буквально наводняет организм неполноценными белыми клетками, что собственно и представляет собой лейкоз. Связь между облучением организма и возникновением лейкоза хорошо доказана.

Например, в Великобритании в 30-х и начале 40-х годов более 14000 больных, заболевшие анкилозирующим спондилитом⁴, были подвергнуты лечению с помощью больших доз рентгеновского облучения. Лечение оказалось успешным. Болевой синдром исчезал, и пациенты в течение многих лет жили спокойно. Когда же ретроспективно проанализировали их судьбу, оказалось, что у многих из них лейкоз стал более частой причиной смерти, чем у остального населения. Правда, число заболевших было небольшим: на 14000 человек приходилось приблизительно 70 случаев лейкоза. Но на такое же число людей, не подвергавшихся лечению рентгеновскими лучами, можно ожидать приблизительно всего 2 случая заболевания. Даже зная такую статистику, большинство больных, все еще выбирают радиационную терапию, довольствуясь явным и стойким облегчением болевого синдрома, и идут на риск оказаться одним из обреченных в дальнейшем на смерть от лейкоза на каждые 200 человек, лечившихся подобным образом. Однако такие перспективы не пугают тех, кто болен и испытывает сильную боль. Аналогичных примеров множество.

Выжившие после атомной бомбардировки жители Хиросимы и Нагасаки представляют самую большую группу людей, тело которых было целиком подвергнуто облучению. Эти люди на протяжении многих лет, прошедших после войны, были много раз обследованы, и им было предоставлено специальное медицинское обслуживание. Несмотря на это, сейчас трудно сказать, кто был облучен, а кто – нет, и еще труднее определить дозы, которые они получили. К тому же многие случаи облучения осложнялись обычными последствиями воздействия взрывной волны. Под медицинским

³ Клетки-родоначальницы циркулирующих в крови эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов.

⁴ Воспалительное заболевание позвоночника, сопровождающееся разрушением позвонков и сращиванием хрящевых поверхностей.

контролем находятся и их потомки (во всех поколениях), родившиеся у выживших после бомбардировок жителей Хиросимы и Нагасаки.

Радиационные аспекты применения атомной бомбы вызвали сильную эмоциональную реакцию общественности. Это понятно, поскольку поражающее воздействие радиации было неизведанным, а все неизведанное всегда порождает страх. Однако справедливости ради следует заметить, что большинство жителей Хиросимы в момент взрыва стали жертвами ударной волны, пожаров и падающих обломков зданий и погибли в результате причин, не отличающихся от тех, которые имели место при многочисленных воздушных налетах на Кельн, Эссен, Лондон или Ковентри во время второй мировой войны. Человеческие потери в момент атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки были значительно меньше, чем таковые, связанные с бомбардировками американской авиацией городов Дрездена или Токио в конце второй мировой войны, которые сопровождались колоссальными разрушениями и пожарами.



Рис.10.3. Радиологическая лаборатория в г. Хиросиме



Рис.10.4. Радиологическая лаборатория в г. Нагасаки

Однако нет сомнения в том, что некоторые из переживших атомную бомбардировку людей впоследствии умерли от лейкоза. Уровень избыточной смертности достиг своего пика в начале 50-х годов, т.е. через 5–7 лет после атомных взрывов. Но через 20 лет новых случаев этого заболевания, обусловленных радиоактивным облучением, зарегистрировано не было. Из 113006 человек, выживших, будучи облученными при взрыве,

приблизительно 100 умерли от лейкоза, обусловленного действием радиации. Это число не точно, так как в любой группе, состоящей более чем из 100000 индивидуумов, некоторые заболевают лейкозом в результате нерадиационных причин. Частота появления лейкоза среди выживших жертв атомной бомбардировки зависела от того, на каком расстоянии от взрыва они находились, т.е. от полученной дозы излучения. Наибольшая частота появления лейкоза отмечена у тех, кто находился близко от эпицентра взрыва, и меньшая – у тех, кто был дальше. Поскольку частота возникновения лейкоза зависит от дозы радиации, это дает абсолютное доказательство тому, что именно радиация служит причиной данного заболевания.

По прошествии многих лет стало очевидным, что лейкоз не является единственной формой рака, вызываемого радиацией. Выяснилось, что у японцев, выживших после атомной бомбардировки, намного чаще, чем у остального населения, выявляли рак легкого, молочной железы и, особенно, щитовидной железы. Данные типы раковых заболеваний развиваются гораздо медленнее, они и позже выявляются. Показано, что спустя 50 лет на каждый случай радиационного лейкоза приходится приблизительно 3 случая т.н. солидных раков, т.е. раковых опухолей.

До сих пор дебатировались последствия внутриутробного облучения плода с точки зрения более высокой чувствительности развивающегося организма к инициированию раковых заболеваний. Однако статистически достоверных данных, по-видимому, нет. Определенную информацию также можно получить из анализа последствий атомных бомбардировок японских городов. У матерей, бывших беременными в момент атомного взрыва, родилось около 2000 детей. Эти дети, находясь в утробе матери, получили среднюю дозу, приблизительно равную 0,14 Зв, т.е. дозу, довольно значительную и намного превышающую ту, что имела место в ранее зафиксированных медицинских исследованиях. Если бы гипотеза о высокой чувствительности внутриутробного организма в качестве причины развития рака под действием излучения была абсолютно верной, тогда следовало ожидать возникновения 12 случаев злокачественных заболеваний у этих 2000 детей из Хиросимы и Нагасаки. На самом деле был выявлен всего 1 случай подобного заболевания, что почти полностью совпадало с тем уровнем заболеваемости, который обычно прогнозируется, как средний для всего населения Японии без учета каких бы то ни было последствий радиации. По всей видимости, в настоящее время нет доказательства повышенной склонности к канцерогенезу у плода по сравнению с организмом взрослого человека.

Последствия получения больших доз облучения при их высокой мощности достаточно хорошо изучены. Большой объем информации был получен в результате исследования историй болезни различных людей – например, жертв бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, пациентов, которые получили большие дозы облучения в ходе медицинского лечения, в частности, по поводу радиотерапии рака. (Моментальная польза, которую получал пациент, перевешивала риск того, что радиотерапия может со временем привести к индуцированию других раковых заболеваний). Известно, например, что некоторые последствия облучения для здоровья не проявляются до тех пор, пока не будет поглощена определенная минимальная, и вместе с тем, большая доза. Очень большая доза, полученная за короткое время, приводит к гибели в течение нескольких дней.

Боле чем столетний исторический опыт изучения влияния радиации на организм человека преподает нам важные уроки, заключающиеся в следующем:

- Факт развития раковых заболеваний у японцев вследствие взрывов атомных бомб достоверен, и признан всеми.
- Ретроспективно у людей было выявлено большое число случаев раковых заболеваний, обусловленных действием искусственной радиации при интенсивном использовании рентгеновских лучей в медицинских целях в ситуациях, которые сегодня мы бы сочли неоправданными.

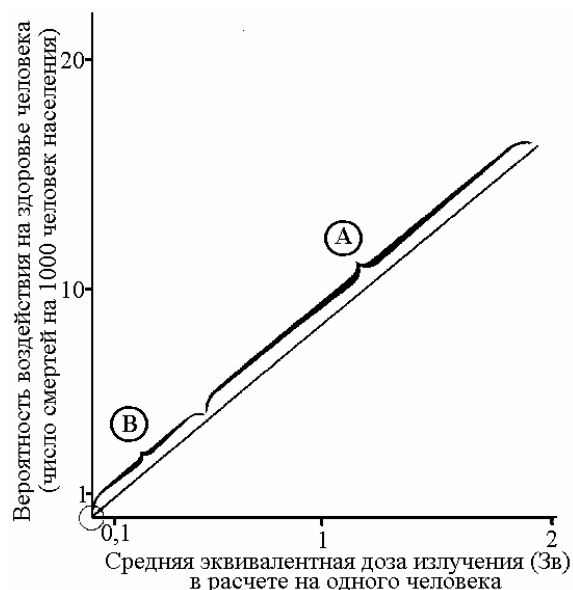
- Практически все население планеты постоянно (в течение всей жизни) подвергается воздействию малых доз низкофоновому излучению.

Вокруг роли последнего фактора, как фактора определяющего риск развития рака, идут ожесточенные научные споры. Здесь обнаруживаются две основные трудности.

Во-первых, нет прямого доказательства развития рака в результате действия излучения очень низкого уровня. Случаи возникновения рака, превышающие обычный уровень заболеваемости, настолько редки, что для получения статистически убедительной информации необходимо обследовать большое число лиц, что практически трудно выполнимо. Например, для четкого выявления дополнительных случаев рака молочной железы в результате одноразового рентгенологического обследования на современном оборудовании, при котором каждая молочная железа получает дозу 0,01 Гр, необходимо обследовать 100 млн. женщин. Согласно оценкам, такая доза смогла бы вызвать 6 дополнительных случаев рака на 1 млн. женщин в год сверх «нормального» уровня заболеваемости, составляющего около 1910 случаев на 1 млн. женщин. Вполне понятно, что обследование 100 млн. женщин не реально. Любой такой анализ осложнялся невозможностью выделения «контрольной» группы населения, которая вообще не подвергалась облучению.

Во-вторых, часто забывают, что мы – в дополнение к радиации – в нашей повседневной жизни можем подвергаться воздействию не менее 1500 факторов, которые способны вызывать рак. Например, в список канцерогенов попадают многие химические вещества: дымовая сажа, парафиновое масло, угольный деготь, асбест, компоненты химических красителей, некоторые органические растворители и др. Канцерогенное воздействие могут оказывать ультрафиолетовое излучение, грибковые токсины пищевых продуктов, вирусы и даже тепло. Лишь в исключительных случаях можно убедительно показать, что данное раковое заболевание произошло вследствие конкретного радиационного облучения.

В-третьих, не ясно, как экстраполировать эффект высоких доз радиации на малые дозы? Тем не менее, обычно предполагается, что радиационное облучение даже на уровнях естественного фона, может воздействовать на здоровье человека. Обычно в качестве гипотезы принимается положение, в соответствии с которым вероятность эффекта строго пропорциональна дозе вплоть до нулевого значения. Как поясняется в докладе НКДАР ООН от 1982 года, «... гипотеза предназначена для применения к



большим популяциям, состоящим из индивидуумов обоих полов и различных возрастов, а не к отдельному индивидууму. Эта гипотеза не противоречит огромному объему экспериментальных и эпидемиологических данных. Имеются основания полагать, что она не приводит к недооценке риска в случае малых доз и низких мощностей доз, представляющих интерес для Комитета, а на самом деле она может приводить лишь к завышенной оценке этого риска».

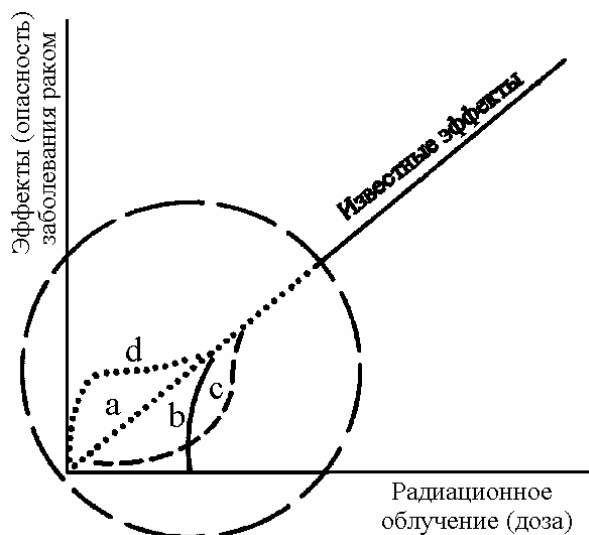
Рис. 10.5. Линейная модель действия радиации

Мысль о том, что риск пропорционален экспозиции или дозе не является уникальной в отношении радиации. Она одинаково справедлива в отношении многих других факторов, которые вызывают рак. Какой бы предел не устанавливался для воздействия таких факторов, определенный риск будет всегда: лишь при нулевой дозе риск может быть устранен совсем. Вспомним высказывание Парацельса: «*Ни что не лишено ядовитости*».

Уменьшить дозу до нуля практически невозможно. В частности, мы не можем избежать воздействия естественного радиационного фона. Меры радиационной защиты направлены лишь на поддержание риска последствий для здоровья на разумно достижимом низком уровне. Это центральная предпосылка в рекомендациях МКРЗ. Поэтому, простейшее решение – воспользоваться линейной зависимостью между дозой и полученным эффектом, допуская, что «*риск развития рака пропорционален полученной дозе радиации*». В таком случае, если доза 1 Гр вызывает, скажем, 600 дополнительных раковых заболеваний в данной популяции людей, тогда доза 0,01 Гр должна будет вызвать 6 случаев. Другими словами, если дозу уменьшить в 100 раз, то число дополнительных случаев заболевания уменьшится во столько же раз.

Как уже отмечалось, основная информации о воздействии радиации на здоровье человека была получена в результате изучения историй болезни людей, ставших жертвами атомных бомбардировок в Японии. Эти данные использовались для построения части «А» графика на рис.10.5. Часть «В» представляет собой экстраполяцию данных, использованных для построения части «А».

Рис.10.6. по существу представляет собой увеличенное изображение части «В» рис. 10.5. Некоторые исследователи указывают порог, ниже которого риск практически равен нулю (b); другие утверждают, что фактический риск является непропорционально более низким (c) или более высоким (d), чем тот, который прогнозируется с помощью линейной модели (a). Большинство радиационных биологов полагают, что следует использовать линейную модель (от правила врачей – «Не навреди!»).



Иначе говоря, принимают гипотезу ЛБД (линейно-беспорогового действия) атомной радиации и рассматривают природный радиационный фон как низший предел вредного действия радиации (спонтанный канцерогенез, наследственные аномалии).

Рис.10.6. Предлагаемые модели радиационных эффектов при малых дозах

Однако, как отмечалось выше, попытки убедительно доказать, что какая-либо одна теория является правильной, обречены на неудачу ввиду того, что прогнозируемые эффекты являются незначительными и их трудно идентифицировать. Чтобы выяснить, какая теория является правильной, необходимо было бы провести эксперименты в контролируемых условиях на весьма большой популяции, а также на протяжении нескольких поколений, если бы мы задались целью определить генетические эффекты. Другая сложность состоит в том, что наблюдения практически невозможно проводить в условиях больших групп населения, небольших изменений в картинах развития таких заболеваний, которые могут быть результатом воздействия мало интенсивного излучения, а также отличать их недвусмысленным образом от аналогичных картин заболевания, которые могут быть обусловлены целым рядом других факторов. Наблюдаемые колебания

в заболеваемости могут быть также просто обусловлены совершенствованием диагностики. Если предположить, что срок жизни «среднего» человека составляет 70 лет, то суммарно накопленная им эффективная поглощенная доза в результате только воздействия природной фоновой радиации будет равна примерно 0,14 Зв, а среднегодовая доза при этом составит около 2 мЗв. Вопрос «прямо пропорционально ли приращение дозы риску с близкой к нулю области на кривой зависимости доза–эффект, или нет?» – не принципиален. В этой области приращения дозы могут быть меньше колебаний, которые являются результатом вариаций природного фонового излучения в зависимости от места и образа жизни человека. Важнее установить, не несет ли с собой приращение дозы в точке на кривой, где кумулятивная суммарная доза индивидуума уже высока, пропорциональное приращение риска?

Самым значительным единичным искусственным источником – вкладчиком в кумулятивную эффективную поглощенную дозу индивидуума 20 назад считали использование рентгеновских лучей и других радиационных источников в медицинской диагностике и терапии. При рентгенографии грудной клетки человек получал дозу порядка 0,2 мЗв, т.е. \approx десятую долю среднегодовой дозы индивидуума, получаемой в результате воздействия фонового излучения. На Международном симпозиуме по биологическому воздействию мало интенсивного излучения в Венеции в 1983 году проф. Э. Почин говорил: *«Даже при дозе 0,5 мбэр (5 мкЗв) в сутки, полученной в результате воздействия природного фонового излучения, весьма маловероятно, что на клетку будет попадать более одной частицы в сутки. Эта вероятность, по-видимому, составляет порядка 10^{-6} . Если, следовательно, на процессы повреждения и восстановления в одной клетке не влияет одновременное повреждение, происходящее в других клетках, находящихся вдали от нее, величина повреждения в любой ткани в значительной степени должна быть прямо пропорциональна количеству треков частиц в этой ткани. Следовательно, зависимость доза–эффект должна быть линейной при малых приращениях дозы, с которыми мы в основном имеем дело в случае с немедицинским облучением населения».*

Несмотря на имеющиеся проблемы и неясности, некоторые научные центры провели анализ информации, касающейся развития рака в группах людей, получивших относительно высокие дозы облучения, и подошли к оценке риска развития раковых заболеваний в тех случаях, когда множество людей подвергалось действию намного более низких доз. В частности, это сделано Национальной академией наук США – комитетом BEIR («Биологические последствия ионизирующих излучений» – BEIR-I, BEIR-II, BEIR-III). В табл. 10.1. (Э. Дж. Холл) обобщены по состоянию на середину 80-х гг. некоторые наиболее надежные оценки риска развития лейкоза, рака щитовидной и молочной желез, а также всевозможных видов рака, возникших в результате общего облучения тела. Оценки получены на основе простой линейной экстраполяции.

Таблица 10.1. Оценка риска заболевания лейкозом и раком.

Вид злокачественного заболевания	Старые дозиметрические единицы (число случаев на 1 млн. человек, облученных дозой 1бэр)	Единицы Международной Системы (число случаев на 1000 человек, облученных дозой 1Зв)
Лейкоз	15—25	1,5 – 2,5
Рак щитовидной железы	50—150	5—15
Рак молочной железы	50—200	5—20
Все виды рака в результате общего облучения организма	100	10

К настоящему времени расстановка акцентов несколько изменилась. Выяснился значительный вклад ингаляционных воздействий на организм радона и его дочерних продуктов и, вследствие совершенствования аппаратуры, снизились дозы от медицинских процедур (рис. 10.7.).

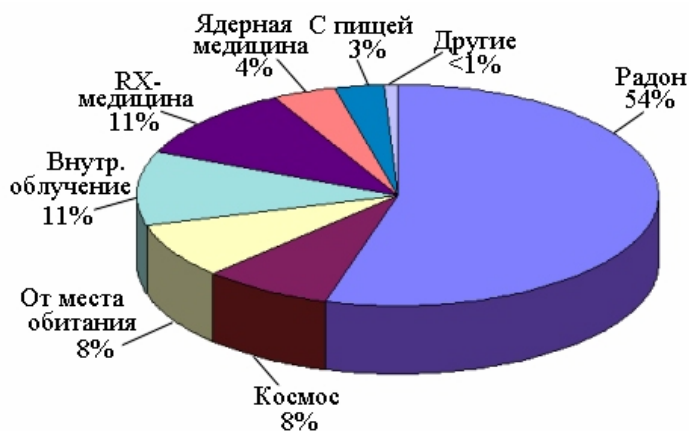


Рис.10.6. Долевые вклады источников излучения в формирование поглощенной дозы для населения США. В России также на первом месте стоит радон.

Согласно BEIR-V, риск заболеть и умереть от рака составляет 0,08% на каждый бэр одновременно полученной радиации. Эффект снижается в 2-4 раза (0,04-0,02%/бэр), если доза

получена в течение продолжительного промежутка времени (хроническое воздействие). Эти оценки риска являются усредненными для всех возрастов мужчин и женщин и всех форм рака и, как следствие, грешат значительной неопределенностью.

Обычно наблюдаемый уровень смертности от всех форм рака колеблется от 1200 до 1800 случаев на 1 млн. человек в год. При такой вариабельности дифференцирование 35-40 случаев радиационно-индуцированного рака не всегда возможно.

Факт, что воздействие мало интенсивного излучения все еще остается неясным после проведения исследований в течение ста лет, свидетельствует не только о том, что, если последствия его существуют, то они являются небольшими, но и о том, что процесс изучения носит исчерпывающий характер. Некоторые люди проявляют беспокойство, веря при этом в наихудшее, при появлении на страницах печати сообщений о спорах среди ученых. Но дело не в том, что непринципиальное научное сообщество просит людей принять излишний риск.

Объективные исследователи из-за сложности накопления достоверных данных иногда расходятся во мнениях. Другими словами, ученые делают все от них зависящее, чтобы понять происходящие естественные процессы, и вовсе не пытаются ввести в заблуждение друг друга и общественность.

Таблица 10.2. Средняя годовая индивидуальная эффективная доза в 2000 г от основных источников облучения населения и риск возникновения онкологических заболеваний.

Источник облучения	Средняя годовая инд. эфф. доза, мЗв	Число случаев рака на 1 млн. чел. в год
Все природные источники	2,4	28
Рентгенодиагностика	0,4	6
Продукты ядерных взрывов	0,005	0,05
Последствия Чернобыльской аварии	0,002	0,025
Ядерные источники (в нормальных условиях)	0,0002	0,0025
Сумма	~2,8	~34

Несколько слов о проблеме генетических последствий воздействия радиации^{2, 5, 6}.

Наследственные признаки всех живых организмов не являются неизменными во времени. Выработанный на протяжении миллионов лет эволюции совершенный механизм деления и созревания половых клеток не застрахован от ошибок. Этот механизм ошибается, что приводит к возникновению разнообразных изменений в наследственных особенностях потомков – мутаций. При этом у потомков может изменяться число или строение хромосом, равно как и тонкая структура генов. Воздействие разнообразных факторов окружающей среды, включая радиацию и ряд химических соединений, приводит к увеличению частоты мутаций.

Датой рождения радиационной генетики принято считать 1927 г. Это связано с публикацией американского генетика, впоследствии – лауреата Нобелевской премии Германа Мёллера, который, используя точные количественные методы, показал, что рентгеновские лучи вызывают повышенную частоту появления мутантных потомков у дрозофил, родителей которых подвергали облучению.



Г. Мёллер

С полным правом, наряду с Г. Мёллером, одним из основателей радиационной генетики может считаться Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский⁵, выполнивший ряд пионерских работ. Он установил влияние дозы излучения на интенсивность мутационного процесса, обнаружил явление радиостимуляции малыми дозами и провел анализ первичных пусковых механизмов возникновения мутаций под влиянием излучений; ему принадлежит первая монография по радиационной генетике, опубликованная, в 1931 г.

Н.В. Тимофеев-Ресовский

С тех пор ионизирующая радиация стала одним из основных инструментов исследования механизмов действия мутагенных факторов на клетки и целостные организмы. Используя который, биологи пытались решить широчайший круг проблем – от изучения воздействия излучений на растворы биополимеров, до влияния радиации на эволюцию биосферы. Однако до 1945 г эти исследования носили фундаментальный характер и мало интересовали широкие слои населения.



⁵ Гуськов Е.П. Славутич-Портал - Генетика, радиация и здоровье UkrHammer.

06 Март 2007. Опубликовал

⁶ Юрий Дуброва. Радиация и мутации у человека. <http://vesti.ru/nauka/2000/06/19/radiation/>

⁵ Д. А. Гранин. Зубр. Л.: «Советский писатель». 1987.

Н. В Тимофеев-Ресовский. Очерки. Воспоминания. Материалы (отв. Ред. Н.Н. Воронцов) М. Наука. 1993. 400 с.

В.А. Гончаров, В.В. Нехотин Неизвестное об известном. По материалам архивного следственного дела на Н.В. Тимофеева-Ресовского. //Вестник РАН, 2000, т.70, N3, с.249-257.

В.И. Иванов. Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский: учёный и учитель // Биологич. науки. 1990. N 4. С. 140– 152.

Трагические бомбардировки Хиросимы и Нагасаки вызвали принципиальный перелом в общественном сознании и желание лично разобраться в том, «Что есть Что?». Информация поступала, главным образом, от журналистов и общественных деятелей.

Профессионалы хранили молчание и государственные секреты. Все это создавало массу информационного шума, вымыслов, легенд и давило на психику.

Следует заметить, что вплоть до окончания второй мировой войны большинство радиационно-генетических экспериментов проводили на плодовых мушках-дрозофилах. Эти крошечные насекомые размножаются с огромной скоростью, а поэтому многие поколения, причем при большой численности особей, можно получить за короткий период времени. У дрозофил нетрудно увидеть последствия летальных мутаций, проявляющихся резким уменьшением численности потомства, или обнаружить появление рецессивных мутаций через несколько поколений, в виде явных уродств крыльев или изменения цвета глаз. Но вопрос – «Каковы генетические последствия воздействия радиации на человека?» ответа не имел, а генетика человека, как наука, в то время практически не существовала. Ученые даже не знали, сколько хромосом в ядре клетки человека.

Первое систематическое исследование последствий воздействия радиации на человека проведено американскими и японскими исследователями на базе ≈ 110000 выживших жертв Хиросимы и Нагасаки, которое было начато в 1946 г. Это единственное, до настоящего времени, широкомасштабное изучение генетических последствий на человеке.

Исследовались: частота мертворождений, смертность, пороки развития и заболеваемость среди потомков облученных родителей. Позже, по мере развития генетики человека, у детей начали изучать изменчивость хромосом и некоторых генов.

Первая публикация, посвященная анализу генетических последствий взрывов атомных бомб в Японии на наследственность человека, принадлежит американским генетикам Шеллу и Нилу, которым совместно с японскими коллегами не удалось выявить какого-то значимого нарушения в кариотипах⁷ людей, пострадавших от взрыва и их потомков. Статья написана достаточно осторожно, с многочисленными оговорками на недостаточность и предварительность полученных данных, однако вызвала бурю протестующих писем, в которых авторов статьи обвиняли в таком грехе, как непрофессионализм и некомпетентность – общественность считала, что результаты занижены.

Несколько позже появились сообщения о результатах цитологических⁸ исследований, проведенных в Японии у детей, родители которых уцелели после взрывов атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки. Анализировали семьи, в которых один из родителей был облучен дозой не менее 100 рад и имевшие детей, рожденных до и после взрыва. Было исследовано 185 детей из 98 семей, в которых 57 детей появились до взрыва бомбы, а 128 - после.

Кариотипы детей оказались нормальными, за исключением трех случаев, которые были связаны с генетическими нарушениями, возникшими до взрыва.

Последующие мониторинговые исследования состояния людей, переживших атомную бомбардировку и их потомков, в целом не изменили ранее полученные данные, которые свидетельствовали об отсутствии значительных генетических последствий. Международные коллективы генетиков и врачей обследовали 72216 детей, родители которых пережили бомбардировку, и не выявили ни увеличения числа случаев врожденных дефектов, ни аномалий хромосом, ни увеличения количества раковых

⁷ Кариотип - диплоидный набор хромосом в соматических клетках организма; типичная для вида совокупность их признаков: число, размер, форма и особенности строения, постоянные для каждого вида.

⁸ Цитология – наука о клетке, изучающая строение, химический состав, функции, индивидуальное развитие и эволюцию клеток живого организма

заболеваний по сравнению с нормой. Эти результаты так же вызвали негативную реакцию общественности – ибо *«всем известно»*, что *«генетические нарушения должны быть!»*, а их не находят!

В конечном итоге была проведена колоссальная работа по анализу десятков тысяч потомков облученных родителей.

Основной результат этих работ – полное отсутствие влияния эффектов радиации на изученные признаки. При этом многие родители получили достаточно высокие дозы облучения при взрывах бомб. В чем же дело?

Причин несколько.

1. Над общественным сознанием довлел багаж знаний, полученных при исследованиях на дрозофилах:

- считалось, что насекомые намного устойчивее к действию излучения, чем человек, и их облучали в диапазоне доз 500-3000 рентген;
- выход числа мутаций полагали линейно зависящим от дозы, а саму зависимость определяли методом экстраполяции к «нулевой точке», которая всегда точно проходила именно через ноль – точку пересечения координат, в которой отсутствие мутаций совпадает с отсутствием радиации;
- доза, приводящая к удвоению числа самопроизвольных мутаций, оценена ≈ 5 бэр, а число мутаций одинаково для данной дозы радиации и не зависит от того, происходит облучение однократно и интенсивно или распределено на протяжении некоторого периода времени. Правда, продолжительность жизни дрозофилы невелика, и о распределении во времени можно говорить весьма условно. Это привело к тревожной мысли, что эффекты радиации носят кумулятивный характер (могут накапливаться в течение жизни), т.е. небольшая доза радиации, полученная сегодня, затем, на следующей неделе и в следующий месяц, приводят к генетическим нарушениям, которые, суммируясь, становятся постоянной частью того генетического бремени, которое несет подвергнутая вредному воздействию группа населения.

2. Объем статистики, полученный на выживших жертвах ядерных бомбардировок и их потомках, недостаточен для получения абсолютно достоверных результатов. Чтобы найти одну мутацию по определенному гену необходимо изучить не десятки (как это было сделано в реальности), а сотни тысяч детей. Очевидно, что специальных экспериментов на людях никто ставить не будет.

3. Выяснилось, что последствия воздействий радиации, полученные для дрозофил и млекопитающих, сильно отличаются, т.е. что выводы о последствиях действия облучения, полученные в экспериментах на дрозофиле и экстраполированные на человека, некорректны. Принципиальный прорыв наступил, когда в США Национальная лаборатории Окриджа реализовала проект широкомасштабных исследований действия радиации на млекопитающих в самых различных аспектах биологии и медицины. Он получил название «Грандиозная мышь». В данном исследовании планировалось изучить более 1 миллиона мышей, но ко времени окончания эксперимента количество использованных животных составило почти 7 миллионов особей. Практически в научных центрах всех стран мира эти эксперименты не прекращаются до сих пор. Выбранная для экспериментов генетическая линия мышей характеризовалась наличием семи специфических локальных мутаций, происходящих самопроизвольно. Шесть из них включают в себя изменения окраса покровов тела, а седьмая – укорочение ушей. Когда животных подвергали действию излучения, частота появления указанных семи мутаций увеличивалась и превышала частоту этих мутаций, происходящих самопроизвольно. Что же выяснилось в результате дорогих и длительных экспериментов?

- Во-первых, различия в индивидуальной чувствительности разных особей к радиационному воздействию достигали 20-кратных значений. Поэтому при любом рассмотрении вопроса о радиационной чувствительности следует включать ее среднюю величину.

- Во вторых, если доза радиации растягивается в времени, то одномоментное облучение вызывает более значительный эффект, чем та же доза, полученная через определенные периоды – т.е. на протяжении времени доза не накапливается и принцип кумуляции дозы, установленный на дрозофиле, на млекопитающих не распространяется.
- В третьих, особи мужского пола более чувствительны к радиационным последствиям облучения, чем самки.
- В четвертых, чем больше промежуток времени между временем облучения и оплодотворением, тем меньшее количество мутаций вызывает радиация у потомства. Для млекопитающих и, в частности, человека, достаточно шести месяцев, чтобы свести до минимума генетические последствия, вызванные радиационным воздействием.
- Расчеты показывают, что удвоение частоты самопроизвольных, спонтанных мутаций находится в диапазоне 0,5-2,5 Зв (*1 Зв соответствует поглощенной дозе в 1 Дж/кг; 0,01 Зв = 1 бэр*). Заметим, что на дрозофиле величина удваивающей дозы была установлена на уровне 0,05 Зв.

Подведем некоторые итоги относительно генетических последствий действия радиации на человека;

- Лишь только 1–6% от общего числа самопроизвольных мутаций у человека могут происходить за счет естественного радиационного фона. В прошлом считали, что самопроизвольные мутации – следствие влияния низких уровней естественного радиационного фона, которому подвергается все живое. Теперь, когда мы знаем о радиационной чувствительности мутаций, ясно, что это вовсе не так.
- Человек чувствителен к возникновению генетических мутаций в результате облучения не более, чем мышь, на что указывает отсутствие видимых генетических нарушений у потомков оставшихся в живых жителей Хиросимы и Нагасаки.
- Для человека установлена (по специфическим локальным мутациям у мышей) доза радиации 0,5-2,5 Зв, удваивающая частоту появления естественных (самопроизвольных) мутаций.
- На основе данных о все тех же специфических локальных мутациях подсчитано, что доза в 0,01 Зв, полученная каждым поколением населения на протяжении бесконечно длительного времени, увеличит частоту самопроизвольных мутаций приблизительно на 1%. Другими словами, если каждое поколение населения подвергать указанной дозе облучения на протяжении многих поколений, то это могло бы вызвать от 60 до 1000 мутаций на 1 млн. родившихся дополнительно к тем самопроизвольным мутациям, частота которых составляет около 107000 на 4 млн. родившихся. Непосредственный подсчет радиационных генетических последствий в первом поколении показывает, что число дополнительных нарушений на 1 млн. родившихся, соотнесенное на каждый Зв облучения родителей, составляет от 500 до 6500. Оценка основана на систематическом наблюдении дефектов в скелетном аппарате мышей.
- Таким образом, данные, полученные на млекопитающих в течение более чем 40-летнего эксперимента «характеризуют радиацию как слабый мутаген в отношении млекопитающих»⁸.

Все изложенное выше вовсе не должно априорно убеждать, что радиационное воздействие для человека безопасно! Число обследованных людей мало с точки зрения изучения генетических последствий. Кроме того, пока сменилось малое число поколений. Следовательно, *отсутствие доказательств не должно рассматриваться как доказательство отсутствия!*

Однако необходимо различать, как это принято для большинства физических и химических факторов, с которыми контактирует человечество в техногенной среде,

⁸ Проблемы и последствия аварии на ЧАЭС обсуждаются в Лекции №12.

биологические последствия их воздействий, которые зависят от мощности дозы и продолжительности контакта.

Радиация может вызвать острую лучевую болезнь и летальный эффект если поглощенная доза превысит 3-5 Зв. Меньшие дозы вызывают нарушения соматических органов и тканей. Наиболее чувствительными к облучению являются кроветворные ткани – красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы теряют способность к нормальному функционированию уже при дозах облучения 0,5-1,0 Зв. Весьма чувствительны к облучению хрусталик и семенники, в то время как яичники у взрослых женщин гораздо менее чувствительны к действию радиации. Среди соматических эффектов, проявляющихся после воздействия радиации, наибольшую опасность представляют злокачественные преобразования клеток, приводящие к появлению клонов опухолевых тканей.

В результате, как это часто бывает, перед человеком встает проблема выбора. В качестве примера ранее рассмотрено добровольное лечение около 14000 человек, страдающих от анкилозирующего спондилита (дегенеративная деформация позвоночника, которая сопровождается сильнейшими болями). Облучение позвоночника высокими дозами радиации снимало болевой синдром, и в течение многих лет пациенты не испытывали нужду в использовании других болеутоляющих препаратов. Наблюдение за этими пациентами показало, что из них 70 человек умерли от лейкоза, в то время, как в контрольной выборке на 14000 человек выявлено всего два подобных случая. У врачей и пациентов всегда стоит проблема выбора меньшего из зол – то ли страдать всю жизнь от невыносимой боли, то ли рискнуть, избрав облучение в надежде, что судьба уберет от случая попасть в 0,5% рискующих заболеть лейкозом.

Трудно представить возможные последствия для многих тысяч людей, если бы исчезла рентгенологическая диагностика – как бы работали стоматологи, травматологи и хирурги, если бы они не имели рентгеновских снимков? Что делать, когда без изотопной медицины нельзя поставить диагноз о состоянии внутренних органов? Следует ли запретить радиационную онкологию?

Эти вопросы бесполезно задавать себе и другим людям. Борьба против распространения и за запрещение ядерного оружия – благородное дело. Огульная борьба против использования атомной энергии в любых целях – медицинских, сельскохозяйственных, энергетических или других – мракобесие или политическая недобросовестность. Политика запугивания широких масс населения радиационной опасностью на государственном уровне и в средствах массовой информации трансформировалась в радиофобию, легла в основу многих общественных движений, дезориентирует население, отвлекает внимание, материальные ресурсы и средства от более актуальных и насущных проблем общества, требующих неотложного решения.

Несколько слов о риске в повседневной жизни. Все мы подвергаемся риску, обусловленному различными причинами. Некоторые из этих причин можно исключить (например, отказавшись от участия в опасном виде спорта), а другие значительно уменьшить (например, бросив курить), однако невозможно устранить все. Некоторые причины риска обусловлены проживанием людей в обществе. Использование угля, нефти и ядерной энергии для производства электрической энергии, например, приводит к возникновению причин риска, которые либо невозможно исключить, либо причин, риск от которых можно уменьшить мерами по борьбе с загрязнением окружающей среды. В целом общество принимает риск, обусловленный этими причинами, соизмеряя его с полезностью электроэнергии в качестве одной из форм энергии. Риск индивидуума заболеть раком не сводится к воздействию радиоактивных загрязнений. В настоящее время более 2000 химических соединений, с которыми мы сталкиваемся на производстве и в быту, относятся к канцерогенам. Но раковые заболевания – не единственный

потенциальный эффект воздействия загрязняющих веществ. Оксиды серы и азота, а также другие вещества, содержащиеся в выбросах электростанций, работающих на каменном угле, являются виновниками возникновения «смога» и «кислотных дождей», вызывают тяжелые заболевания органов дыхания.

Очевидно, необходимо знать причины рисков, которым мы подвергаемся, и вклад каждого из них⁹. Считается, например, что табачный дым и химические загрязняющие вещества в атмосфере промышленных городов являются причиной примерно 25% всех заболеваний раком со смертельным исходом. Еще 35% можно отнести к результатам воздействия факторов питания, и 20–30% – к воздействию других факторов окружающей среды. За последние 50 лет рост смертности от заболевания раком легких примерно на 90% можно приписать вреду от курения сигарет. Остальные 10% могут быть результатом воздействия широко распространенных загрязняющих веществ, содержащихся в атмосфере, таких, как выбросы бытовых и промышленных печей, выхлопы бензиновых и дизельных двигателей, пылевые и дымовые частицы, возникающие при использовании резиновых шин, асфальта, красок, промышленных химикатов и пр. Мало интенсивное излучение может быть лишь весьма незначительным «вкладчиком» в общий ущерб.

Некоторым людям может показаться, что в отдельных видах деятельности нет особой нужды и что любой риск, связанный с такой деятельностью, можно устранить простым отказом от этой деятельности: например, запрещением производства и использования асбеста или полным отказом от атомной энергетики. Ситуация далеко не так проста, и подобная мера могла бы привести к общему увеличению риска. Рассмотрим пример с атомной энергетикой. В ходе нормальной эксплуатации на АЭС и других ядерных установках происходят выбросы небольших количеств радиоактивных веществ. Следовательно, они вносят свой вклад в получаемую нами суммарную дозу от мало интенсивного излучения – в среднем по европейским странам около 1/700 всей величины (немногим более 0,1 %). Поэтому они могут быть причиной примерно 1/700 последствий для здоровья человека, обусловленных воздействием всех природных и искусственных излучений. А если бы атомная промышленность не существовала, то уменьшилось ли бы суммарное вредное воздействие на здоровье человека на эту величину?

Чем бы мы ни пытались заменить атомную энергетику (включая вариант, при котором ее не заменили бы ничем), все равно наблюдалось бы определенное воздействие на здоровье человека. Использование угля и нефти связано с более серьезными последствиями для здоровья человека, чем последствия эксплуатации АЭС. Поэтому использование любого (или обоих) из этих источников энергии в качестве замены не привело бы к общему улучшению охраны здоровья людей, а скорее бы явилось причиной его ухудшения. Гидроэнергетика в тех случаях, когда ее можно использовать в качестве альтернативы, может показаться безопасной. Однако прорывы плотин приводили к гибели тысяч людей, а затопление больших территорий при строительстве водохранилищ выводили из оборота высокоэффективные сельскохозяйственные угодья и коренным образом изменяли состояние окружающей среды огромных территорий. Производство и использование энергии является рискованным делом. Важно знать причины, обуславливающие риск, сводить их к минимуму и по мере возможности избегать их.

И еще одно соображение – необходимость обсудить проблему *«Радиационного гормезиса»*. Если воздействие высоких доз ионизирующего излучения оценивается

⁹ В.М. Жуковский. Научно-технический прогресс и проблемы цивилизации (радиоактивность). Изв. Уральского гос. Ун-та «Проблемы образования, науки и культуры», Екатеринбург. Выпуск 12, №23, 2002, с. 22-32.

В.М. Жуковский. Человек в радиоактивном мире. Социальные последствия открытия радиоактивности. Наука Общество Человек. Вестник УрО РАН №3 (5), 2003, с. 77-82.

однозначно отрицательно, то влияние малых доз радиации продолжает обсуждаться в научных кругах либо с позиций парадигмы линейно-беспорогового действия, либо – с позиций радиационного гормезиса. Последнее понятие заимствовано из фармакологии и означает способность многих веществ, при их введении в организм, оказывать в зависимости от дозы диаметрально противоположное действие. Еще со времен Парацельса было известно, что сильные яды, взятые в малой дозе, могут быть эффективными лекарствами. На этом базируется такое направление медицины, как гомеопатия. Существование фармакологической инверсии отражает, переведенный с латыни, смысл понятия «гормезис».

В радиобиологии уже десятки лет существуют две непримиримых точки зрения, связанные с различными оценками влияния на биоту малых доз радиации:

- Подход №1 – проблем малых доз не существует, все закономерности больших доз можно экстраполировать на малые дозы.

- Подход №2 – малые дозы по эффекту принципиально отличны от больших, и методология их изучения должна отличаться от принятой в современной радиобиологии.

Термин «радиационный гормезис» предложен в 1980 году американским исследователем Т.Д. Лакки и прочно вошел в радиобиологию после серии его публикаций¹⁰. В отечественной науке это явление систематически исследовались А.М. Кузиным и его сотр., начиная с 1971 г.¹¹. Сторонники теории гормезиса исходят из следующих соображений:

- Любая форма жизни на Земле с момента зарождения в течение всей жизни связана с непрерывным внешним и внутренним облучением от космических источников и радионуклидов, находящихся на Земле. Действительно, отсутствие радиационного генерирования мутаций можно ожидать только при полном отсутствии радиационного фона. Однако средняя годовая эффективная эквивалентная доза от естественных источников радиации составляет 2 мЗв, причем в разных районах земного шара эта величина варьирует от 0,3 мЗв в Европе и Японии до 250 мЗв в Бразилии, недалеко от Сан-Паулу. Для сравнения – дозы радиации излучаемой источниками, которые используются в медицине, составляют основную часть излучений техногенных источников радиации – около 0,4 мЗв в год. Следовательно, полностью освободиться от естественной радиации принципиально невозможно, как и избавиться полностью от мутационного процесса,

- Большие дозы радиации оказывают неблагоприятные эффекты на живые организмы, т.е. угнетают деление клеток, рост и развитие, а малые дозы – стимулируют практически все физиологические процессы. Эксперименты, в которых организмы существовали бы в отсутствие радиационного фона, впервые были поставлены в 1965 г во Франции, и далее продолжены А.М. Кузиным в СССР и Т.Д. Лакки в США. Снижение природного фона естественной радиации оказывало неблагоприятный эффект на рост и размножение клеток. Напротив, зарегистрированы многочисленные факты, когда малые дозы излучения оказывали благотворное влияние на организм (достаточно вспомнить бальнеологические курорты, где больные принимали радоновые ванны). Существование такого парадоксального явления как радиационный гормезис подтверждено в разных лабораториях и на различных объектах.

- Гамма облучение в малых дозах стимулирует прорастание семян, вызывает увеличение вегетативной массы растений. Малые дозы активируют иммунную систему у разных видов животных и ключевые мембранно-связанные ферменты, активируют репарационные системы и, что очень немаловажно, повышают устойчивость клеток и

¹⁰ T.D. Luckey Ionizing radiation promotes protozoan reproduction. Radiat.Res. 1986, Vol. 108, p 215-221.

T.D. Luckey. Radiation Hormesis. Boca Raton, Fl., (1990), 120 p.

¹¹ А.М. Кузин. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. М., Наука 1991, 116 с.
А.М. Кузин. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. М. Наука., 1995, 157 с.

организма к последующим более высоким дозам облучения. Как в гомеопатии, конкретные величины малых доз зависят от видовой характеристики. Для млекопитающих они лежат в диапазоне до 0,5 Гр. Эксперименты свидетельствуют о том, что под влиянием малых доз ионизирующих излучений естественная продолжительность жизни животных увеличивается на 10-12% по сравнению с контрольными группами¹².

- Сторонники идеи радиационного гормезиса не без оснований считают, что атомная радиация является естественным, постоянно действующим на организм фактором, без которого нормальное существование невозможно, как невозможна жизнь без гравитации, магнитного поля или кислорода. А.М. Кузин предложил непротиворечивую гипотезу, объясняющую различные эффекты больших и малых доз облучения. Большие дозы облучения влияют на радиочувствительные ткани, в то время как малые дозы изменяют регуляторные функции радиоустойчивых тканей. Большие дозы вызывают в клетках патологические эффекты, поскольку кванты энергии разрушают ДНК и этот процесс усиливается биологически активными веществами клетки. Малые дозы активируют свойства мембран и цитозоля, не затрагивая генетический аппарат. Поразительное противоречие между издревле широко используемыми в бальнеологии радоновыми ваннами, целебные эффекты которых никто не подвергает сомнению, и опасностью радонового облучения давно обсуждается в медицинской и биологической литературе, однако прийти к какому-либо пониманию механизмов этих эффектов вряд ли будет возможно вне идей радиационного гормезиса.

Изложенные факты убедительны и возражений не вызывают. Тем не менее, следует принять во внимание, что одновременно реализуются две группы последствий. Парадигма линейно-беспорогового действия обращает внимание на наличие отличных от нулевых, малых вероятностей возникновения раковых заболеваний под действием низкофонового излучения. Это же низкофоновое излучение может стимулировать в организме некоторые обменные процессы, что приводит к объективному улучшению самочувствия. Однако, вероятность заболеть раком после таких процедур отнюдь не уменьшается!

Наиболее свежие представления о влиянии низкофонового излучения на человека представлены ведущими российскими специалистами, участниками Круглого стола



«Ядерное будущее России и мира»⁶. В частности, в 2006 г Лев Александрович Булдаков, академик РАМН, заместитель директора ГНЦ «Институт биофизики», лауреат Государственной премии, автор более 200 научных работ, в беседе с журналистом четко высказал свое мнение: *«Радиация в малых дозах полезна для всего живого на Земле».*

Л.А. Булдаков

Ниже приводится текст репортажа:

Корр.: Лев Александрович, Вы большую часть своей жизни посвятили изучению радиации. Недавно вышла Ваша новая книга «Радиационное воздействие на организм –

¹² Ю.И. Москалев. Отдаленные последствия ионизирующих излучений. М. Медицина, 1991. 342 с.

E.J. Calabrese, L.A. Baldwin, C.D. Holland. Hormesis: a highly generalizable and reproducible phenomenon with important implications for risk assessment // Risk Anal., 19, 2, 1999, 261-281.

⁶ Материалы «Минатом.ру»

положительные эффекты». В ней Вы доказали благоприятное влияние низких доз радиационного воздействия на все земные организмы и растения.

Если можно, коротко скажите об этом.

Л.Булдаков: В течение миллиардов лет жизнь на нашей планете развивалась при постоянном воздействии определенных доз радиации и без нее она просто немыслима. Изучением этого явления занимается наш Институт биофизики и сотни ученых во всем мире. Мои многочисленные собственные исследования, а также данные отечественной и мировой литературы говорят о том, что ионизирующее излучение является фактором окружающей среды и в малых дозах не представляет опасности для здоровья. Ведущие ученые в области радиобиологии обнаруживают даже не пагубное, а, наоборот, благотворное, защитное влияние низких доз общего радиационного воздействия на человека. По нашему мнению, это обуславливает уменьшение заболеваемости, сокращение преждевременной смертности, ускорение развития организмов.

Корр.: Это понятно. Но во время чернобыльской катастрофы пострадали сотни тысяч людей, которые находились далеко от АЭС и не могли получить большие дозы облучения?

Л.Булдаков: Взрыв на Чернобыльской атомной станции – это, конечно, колоссальная техногенная катастрофа, которая отбросила на много лет развитие ядерной энергетики во всем мире, подорвала доверие к величайшему изобретению человечества – атомной энергии. Но я больше чем уверен, что масштабы этой катастрофы сначала были недооценены, а затем искусственно преувеличены – и политиками, и учеными, и медиками, и особенно средствами массовой информации. На месте взрыва на ЧАЭС сразу погибли 28 человек, затем в течение 5 лет умерли еще 14 человек, хотя в клинику к нам в институт сначала поступили из Чернобыля 140 острых больных. Единственную патологию, которую мы находили после чернобыльской аварии – это заболевание щитовидной железы у детей. Частота этих заболеваний увеличилась в 2 раза. Конечно, гибель каждого человека – это трагедия для его семьи. Но на дорогах России ежегодно погибают 30 тысяч человек. У меня до сих пор остается впечатление, что тогда действовали какие-то колоссальные силы, которые хотели запугать людей, дискредитировать нашу атомную отрасль, развалить Советский Союз. И можно сказать, что им это удалось. Во всем мире было прекращено строительство атомных станций, сразу же всюду возобладала точка зрения «зеленых» и даже самые развитые страны в энергетике вернулись к каменному углю – самому вредному из всех добываемых энергоносителей. А ведь выпадение радиоактивных веществ после чернобыльской аварии на самом деле было минимальным. Самыми загрязненными в России были районы в Брянской области, но уже через 2 года уровень радиации там не отличался от природного фона.

Корр.: Но ведь только в России тысячи чернобыльцев-ликвидаторов, которые официально имеют льготы?

Л.Булдаков: Да, Алла Пугачева, Иосиф Кобзон и другие наши замечательные певцы и артисты, которые приезжали с концертами в Славутич – тоже «чернобыльцы», хотя, к счастью, никакого облучения они не получали, потому что даже в 100 метрах от реактора вообще уже дозы никакой не было, кроме следа. В зоне следа можно было получить максимум 5 рентген в сутки. Дозиметристы из нашего института тогда составили специальную карту, где были указаны все участки. Но политика государства и особенно местных властей была такая – раз ты побывал в этом районе, то вне зависимости от дозы облучения можешь получить документы «чернобыльца» и соответствующие льготы от государства. В связи с этим было много злоупотреблений, в том числе инвалидность давали по всякому поводу, особенно на Украине. Я думаю, что реально пострадавших во время чернобыльской аварии на порядок меньше, чем получивших документ «чернобыльца».

Корр: А учитывались ли рекомендации специалистов по радиации, Минздрава, когда принимались законы по социальным льготам для участников ликвидации и пострадавших территорий?

Л.Булдаков: В этом плане в наших рекомендациях власти не нуждались. Здесь главное значение имела политика. Другое дело, что мы, врачи, использовали те наработки и тот опыт, который был приобретен, например, во время аварии на ПО «Маяк» в 1957 году - особенно при лечении острой лучевой болезни. Я ведь на «Маяке» проработал 30 лет. И, конечно, никому не пожелаю попасть под радиоактивное облако. Дозы там ничтожно малы, но психологически, даже просто от страха и внушения, практически каждый четвертый-пятый человек реально чем-то болеет. Это во всем мире так.

Корр: Но все-таки малые дозы – сколько это?

Л.Булдаков: Это непростой вопрос, потому что для каждого организма – своя малая доза. Уровень радиационного воздействия в 10-15 рентген стимулирует все процессы жизнедеятельности. Если больше 30 рентген, считается, что организм уже не компенсирует клеточные потери и начинается заболевание. Еще в 1460 году было сказано эскулапами, что «только доза определяет – быть веществу ядом или лекарством». Так мы устроены и с этим ничего не поделаешь.

Корр: Лев Александрович, после чернобыльской катастрофы безопасность на атомных станциях повысилась в разы, дальше повышать ее, возможно, экономически невыгодно. Как учитываются Ваши разработки в ядерных технологиях, в реакторостроении?

Л.Булдаков: Главное – это доза. Сейчас дозы на атомных станциях не отличаются от естественного фона радиации. Строится все с большим запасом. Можно еще вкладывать миллиарды в защиту, но если дозы нет, то зачем это делать. Поймите, если убрать естественную радиацию, в которой наши предки жили миллионы поколений, мы все ослабеем. Это экспериментально доказано на микроорганизмах, на растениях, на мышах. Во время экспериментов сохранялись полностью все факторы, кроме ионизирующего излучения. Животные и растения погибали или их масса уменьшалась в несколько раз, мыши переставали плодиться. Как только повышали радиационное воздействие до природного фона и выше, все восстанавливалось.

Корр: Скажите, как Вы оцениваете уровень развития радиационной медицины в нашей стране после чернобыльской катастрофы?, учитывая, что именно у нас сделано много открытий в этой области?

Л.Булдаков: Именно у нас сделано много открытий в области радиационной медицины. Но после Чернобыля мы за последнее время здорово отстали в этом плане. Закрылись многие учреждения по этому профилю. Фактически осталась только лучевая терапия, которая применяется при лечении раковых больных, потому что других способов лечения мало. То есть после «чернобыльского синдрома» все это надо восстанавливать.

Корр: Лев Александрович, Вы ярый сторонник развития ядерной энергетики. Какая, по Вашему мнению, должна быть доля ядерной энергетики в нашей стране по сравнению с другими видами генерации электричества?

Л.Булдаков: Франция 70% электроэнергии вырабатывает на атомных станциях – вот вам лучший пример. А в принципе, я думаю, что в России вне зависимости от запасов и добычи нефти и газа в будущем будет только ядерная энергетика – и больше никакой. Это безусловно самая дешевая, безобидная и полезная энергетика на фоне всех остальных.

Глава 11. РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА НА УРАЛЕ И В ПРИЛЕГАЮЩИХ РЕГИОНАХ.

Введение. Уральский Регион со времен Петра Великого и до наших дней был и остается, как сказал поэт А. Твардовский Опорным Краем Державы. Развитая на протяжении 300 лет мощная индустриальная база (горнодобывающая, металлургическая, машиностроительная, химическая, оборонная, атомная отрасли промышленности и теплоэнергетика) сформировалась в условиях острого дефицита средств и времени, при наличии внутренних и внешних потрясений. Все задачи решались по принципу – *к ближайшему сроку и любой ценой!* В регионе доминировал технократический способ мышления. Решение социальных проблем и проблем защиты окружающей среды откладывались «на потом». Гуманитарная интеллигенция была бессильна переломить эти негативные тенденции. В результате, при наличии неблагоприятной экологической обстановки в России в целом, Уральский Регион относится к числу наиболее экологически неблагополучных регионов, а отдельные его территории по существу являются зонами экологического бедствия. Наличие трансграничного переноса загрязнений может приводить к негативному влиянию на состояние биосферы в России и на планете в целом. В полной мере это относится и к проблемам радиационной безопасности.

1. Характеристика региона. Свердловская область, как и весь Уральский регион в целом, является территорией для которой оценка радиационной обстановки и оценка влияния этой обстановки на здоровье населения является особенно актуальной. Причин этому несколько.

Во-первых, регион насыщен предприятиями атомной промышленности и энергетики: Белоярская АЭС, ПО «Маяк» (г. Озерск), Уральский электрохимический комбинат (г. Новоуральск), комбинат «Электрохимприбор» (г. Лесной). На территории региона – в Свердловской и Челябинской областях находятся пункты временного хранения радиоактивных материалов и пункты захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО «Радон»). А также пункт временного хранения монацитового сырья (предприятие «Уралмонацит»).

Во-вторых, территория Уральского региона неоднократно подвергалась радиоактивному загрязнению в результате штатной деятельности ПО «Маяк» (сброс жидких радиоактивных отходов в р. Теча и газо-аэрозольные выбросы предприятия). А также возникавших на предприятии аварийных ситуаций (взрыв емкости с жидкими радиоактивными отходами в 1957 г и ветровой разнос радиоактивных отложений с берегов озера Карачай в 1967 г). Менее масштабное, но достаточно серьезное с точки зрения радиационного воздействия на население радиоактивное загрязнение имело место в пос. Озерный и Костоусово, где жилые здания и территория населенных пунктов были загрязнены в результате несанкционированного использования торийсодержащих отходов обогащения монацитового песка.

В-третьих, вся территория Уральского региона относится к зонам повышенной потенциальной опасности от воздействия природных радионуклидов и, в первую очередь, радона.

В-четвертых, территория Уральского региона подвергалась воздействию испытаний ядерного оружия на Семипалатинском, Ново-Земельском и Тозком полигонах, а также серии «мирных» подземных взрывов.

Для сравнительного анализа целесообразно учесть и оценить нерадиационные источники риска, характерные для населения Свердловской области. Все это нашло отражение, например, в публикациях.¹

2. Естественный радиационный фон в Уральском регионе обусловлен геолого-геофизическими особенностями земной коры и присутствующими в ней минералами и горными породами, содержащими уран-238 и торий-232 с их дочерними продуктами распада, а также калий-40. Для Урала характерно распространение многочисленных гранитных интрузий, а также зон разломов и участков их пересечений, которые являются путями ускоренной миграции многих элементов. Как следствие этого, наблюдаются локальные скопления радионуклидов в горных породах, мозаично разбросанные по значительным территориям. Практически в любом районе наиболее заселенной части Уральского региона можно обнаружить участки с локальным повышением природного радиационного фона. В частности, они зафиксированы в окрестностях таких населенных пунктов как: Алапаевск, Арамилы, Асбест, Березовский, Билимбай, Богданович, Верхние Серги, Верхняя Пышма, Екатеринбург, Каменск-Уральский, Касли, Краснотурьинск, Красноуральск, Кушва, Кыштым, Нижний Тагил, Первоуральск, Ревда, Реж, Среднеуральск, Сухой Лог, Сысерть, Чебаркуль и др.

Дозы внутреннего облучения от содержащихся в организме человека радионуклидов (в первую очередь ^{40}K и ^{210}Pb и ^{210}Po) практически одинаковы для всех людей и составляют в сумме 0,32 мЗв/год.

Внешнее облучение населения за счет естественного фона определяется в основном окружающими горными породами и созданными на их основе строительными материалами. Иными словами, дозы внешнего гамма-облучения складываются из доз, полученных внутри помещений и доз облучения, полученных на открытой местности. При этом доминирует облучение в жилищах, а также в других помещениях, где население проводит максимальное время. По результатам обследования жилого фонда и общественных зданий в Свердловской области (выполнены институтом Промэкологии УрО РАН и службами Санэпиднадзора) мощность экспозиционной дозы гамма-излучения составляет $13,1 \pm 3,6$ мкР/ч. Средняя мощность дозы гамма-излучения на открытой местности колеблется в диапазоне 7-13 мкР/ч со средним значением около 10 мкР/ч, что примерно на 20% выше среднемирового уровня. Суммарная годовая эффективная доза облучения оценивается как 0,77 мЗв/год. Переводный коэффициент между экспозиционной дозой и эффективной дозой равен $0,69 \cdot 10^{-2}$ Зв на 1 Рентген (рекомендации Публикации 51 МКРЗ).

3. Радон. Значительно большее значение для Уральского региона имеет проблема радона, источником которого являются многочисленные участки территорий с повышенным содержанием в горных породах урана-238 и тория-232. Радон, будучи инертным газом, обладает высокой подвижностью в горных породах, хорошо растворяется в воде. Поэтому он может переноситься на значительные расстояния по зонам тектонических разломов и сдвигов земной коры, а также по водоносным зонам.

Во всем мире нормировать содержание радона и его дочерних продуктов в воздухе помещений начали только с 1980 г. Осознание актуальности данной проблемы привело к установлению государственных нормативов на допустимое содержание радона в воздухе жилых помещений. Соответствующие рекомендации сделаны и МКРЗ (см. лекцию 8, табл. 8.1).

¹ В.И. Уткин, М.Я. Чеботина, А.В. Евстигнеев и др. Радиоактивные беды Урала. Екатеринбург, УрО РАН, 2000, с. 94.

Урал атомный, Урал промышленный. Мат. VII Межд. экол. Симп. Екатеринбург, УрО РАН, 2000, с. 354.

В Уральском регионе около 10% заселенных районов можно отнести к радоноопасным территориям. Уровень концентрации радона и его дочерних продуктов в воздухе домов существенно зависит от естественной и искусственной вентиляции, тщательности заделки окон, стыков стен, коммуникационных каналов, проветривания помещений и др. причин. На Урале наиболее высокие концентрации радона регистрируются в жилых домах. Следует помнить, что однократное проветривание в течение часа снижает концентрацию радона в помещении примерно в 100 раз. В одноэтажных зданиях, как правило, содержание радона выше, чем в атмосфере многоэтажных.

Для оценки облучения населения Свердловской области за счет радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) институтом Промэкологии УрО РАН проводились измерения как объемной активности ^{222}Rn и его дочерних продуктов распада, так и измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) ^{220}Rn (торона). Объемную активность радона измеряли при помощи интегральных трековых детекторов (80 населенных пунктов). Общее количество обследованных объектов превысило 2500. В населенных пунктах, где измерения проводились в жилых помещениях, проживает около 2 миллионов человек, что составляет 43% населения Свердловской области².

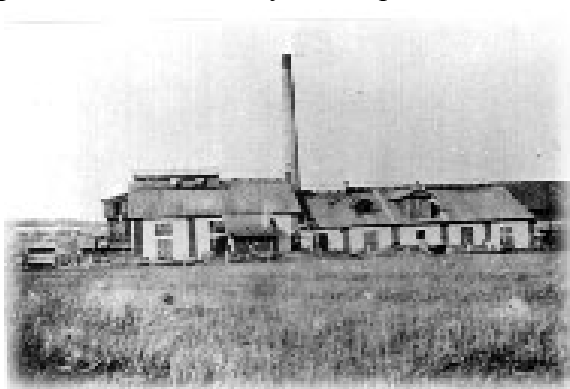
Среднегодовая доза от воздействия изотопов радона и их ДПР для жителей Свердловской области составляет 1,3 мЗв/год. Средняя величина ЭРОА радона в 1,6 раза превышает соответствующую среднемировую величину (16 Бк/м³). Особенность: средневзвешенное значение среднегодовой ЭРОА торона превышает среднемировое значение (0,3 Бк/м³) в 5,7 раза.

Доля домохозяйств, в которых ЭРОА изотопов радона превышает нормируемые значения, а также значения годовых эффективных доз:

- в 5,2% случаев A_{Rn} превышает 100 Бк/м³, ($E_{\text{эфф}} > 4,3$ мЗв/год);
- в 1,1% случаев A_{Rn} превышает 200 Бк/м³, ($E_{\text{эфф}} > 8,6$ мЗв/год).

Таким образом, почти в 20 тысячах жилищ Свердловской области, в которых проживает более 50 тысяч человек, ЭРОА изотопов радона превышает российский национальный норматив – 200 Бк/м³. Величина 100 Бк/м³, превышает почти в 90 тысячах домохозяйств.

4. Радий. Западный Урал и прилегающие территории связаны с историей промышленного получения радия в России. Первоначально исходным сырьем служила



урановая руда Тюя-муонского месторождения (Ферганская обл.). Еще в 1918-м г Совнаркомом были выделены средства на изучение радиоактивных материалов и организацию опытного завода по извлечению радия из урановой руды в г. Березники.

Рис.11.1. Первый (опытный) российский радиевый завод в Бондюгах.

² М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко. Радон: измерение, дозы, оценки риска. Екатеринбург, УрО РАН, 1997, с.232.

М.В. Жуковский, А.В. Кружалов, В.Б. Гуревич, И.В. Ярмошенко. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург, УрО РАН, 2000, с.180.

М.В. Жуковский. Радиационное воздействие на население: оценка радиационных рисков и потенциального ущерба здоровью (на материалах Свердловской обл.). Автореферат докторской дисс., Екатеринбург, 2003.

Однако Гражданская война и непригодность завода для решения поставленной задачи вынудило переместить производство радия в другое место – на химический завод в Бондюжи, который расположен на Каме, (ныне г. Менделеевск, Татарстан).

В декабре 1921 г. Бондюжский завод выдал первые миллиграммы радия. По словам сотрудников местного музея, руду доставляли из Березников на баржах (одну баржу утопили) и складировали на берегу Камы.

После переработки завезенного из Средней Азии сырья, производство было остановлено, а его история на долгие годы забыта. В 1991 г. специалисты Госкомприроды Татарии впервые решили исследовать радиоактивные загрязнения в Менделеевске. Их опасения оправдались: уровень радиации в силикатном цехе химзавода (бывший пробный радиевый завод) намного превышал норму, а за цехом лежали отвалы переработанной в двадцатые годы руды. По результатам обследований построено временное хранилище для радиоактивных отходов и очищена площадь в сотни квадратных метров. По-видимому, эта работа должна быть продолжена.

Получение радия в промышленных масштабах было осуществлено на территории пос. Водный (27 км от г. Ухта, Республика Коми). Этот радиевый завод функционировал в течение 25 лет (1932-1957 гг.)³.

Добыча радия осуществлялась из природных вод, поступающих из сотен скважин, пробуренных на огромной территории. Загрязнение окружающей среды происходило из-за обильных разливов радиоактивной воды и несанкционированного рассыпания твердых отходов. К настоящему времени территория завода дезактивирована, отвалы производства засыпаны землей и огорожены. Однако многочисленные локальные загрязнения до конца не выявлены, а, следовательно, не ликвидированы. На самой территории бывшего завода радиационный фон в 10 и более раз превышает естественный фон.

5. Стройматериалы. На территории Свердловской области имеется две группы объектов, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате несанкционированного использования в строительстве минерального сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов. В 40-е гг. в пос. Озерный (60 км от Екатеринбурга) было открыто месторождение монацитового песка с высоким содержанием тория. В период с 1949 по 1964 год там работал завод по обогащению и переработке как собственного, так и привозного ториевого сырья для атомной промышленности. Сырье складировали на железнодорожных станциях Костоусово и Зюрьзя (недалеко от г. Красноуфимска, где был расположен комбинат «Победа» – теперь предприятие «Уралмонацит»). Поскольку торий в атомной промышленности не нашел применения, производство было приостановлено. Обогащенные монацитовые пески положены на склады «Уралмонацита». На территории поселка Озерной и станции Костоусово остались очаги локального техногенного загрязнения. Не предупрежденное об имеющейся опасности население бесконтрольно использовало оставшийся монацитовый песок для частного строительства и отсыпки дорог. В результате имело (и продолжает иметь) место достаточно серьезное с точки зрения радиационного воздействия на население радиоактивное загрязнение. Похожим образом вели себя работники других производств (Водный).

³ В.М. Жуковский. ВОДНЫЙ ПРОМЫСЕЛ. Первое промышленное радиохимическое производство в России. Екатеринбург, Изд-во УрГУ, 2002, с. 96.

В.М. Жуковский. Становление радиохимического производства в России. Вестник УрО РАН №3 (5), 2003, с. 58-71.

Локальные загрязнения зафиксированы на территории, прилегающей к пос. Двуреченск (45 км от Екатеринбурга). Они связаны с деятельностью Ключевского завода ферросплавов, где получали специальные сплавы железа с ниобием, цирконием, редкоземельными и другими металлами. Исходные концентраты редких металлов включали монацит – минерал, содержащий торий-232. Поэтому металлургические шлаки обладали активностью от 300 до 1100 Бк/кг. В течение многих лет радиоактивные шлаки несанкционированно складировались в лесной зоне, примыкающей к поселку, а также на территории свалки бытовых отходов и в отвалы на заводской территории. Пункт захоронения радиоактивных отходов построен только в 1985 г. Несанкционированная отсыпка шлаков на дороги, тротуары, использование их в качестве наполнителей бетонных конструкций жилых и садовых домиков привело к появлению многочисленных очагов техногенного загрязнения природными радионуклидами.

В обоих случаях реализовался суммарный эффект воздействия: гамма облучение плюс торон.

Таблица 11.1. Оценка дозовых нагрузок для жителей населенных пунктов Свердловской обл., загрязненных природными радионуклидами (по данным Института Промэкологии УрО РАН).

ДОЗЫ	Доза от ДПР торона		Доза от внешнего γ -облучения		Сумм. доза за 25 лет	
	Текущ., мЗв/г	Накоп., Зв	Текущ., мЗв/г	Накоп., Зв	Текущ., мЗв/г	Накоп., Зв
Двуреченск						
Макс. инд. доза	-	-	12	0,3	12	0,3
Ср. доза	-	-	0,91	0,02	0,91	0,02
Озерный						
Макс. инд. доза	13	0,3	12	0,3	22	0,6
Ср. доза	2,9	0,08	1,2	0,03	4,1	0,1
Костюсово						
Макс. инд. доза	4,7	0,1	15,2	0,4	19,9	0,5
Ср. доза	0,8	0,02	1,7	0,04	2,5	0,07

6. Ядерные взрывы. Уральский регион подвергся воздействию ядерных взрывов различной природы. Прежде всего, это полигоны для испытания ядерного оружия: южный (Семипалатинский – Северный Казахстан – 468 испытаний, суммарная мощность ~16,2 Мт) и северный (Новая Земля – 133 испытания, суммарная мощность ~263 Мт).

Первая советская атомная бомба РДС-1 (расщепляющийся материал – плутоний) успешно испытана 29-го августа 1949-го года на Семипалатинском полигоне. Зону загрязнений после взрыва определило преимущественное направление ветров: (С-В, В, Ю-В), обеспечивших перенос газообразных и аэрозольных продуктов взрывов. Наиболее крупные города в этой зоне – Барнаул и Усть-Каменогорск). На Семипалатинском полигоне 12 августа 1953 г была взорвана первая водородная бомба, т.н. «слойка».

Более мощные атмосферные взрывы на Ново-земельском полигоне привели к загрязнению не только Уральского и Западно-Сибирского регионов, но и внесли заметный вклад в глобальное загрязнение. Глобальные выпадения из тропосферы определяются в основном долгоживущими продуктами деления (цезий-137, стронций-90, углерод-14, тритий – периоды полураспада соответственно 30, 28, 5730 и 12,3 лет).

На Южном Урале (Оренбургская область, Тоцкий полигон) 14 сентября 1954 года состоялись воинские учения с участием 45 тыс. военнослужащих и применением ядерного оружия. Мощность взрыва, произведенного на высоте 350 м, составила 40 кт.

К моменту взрыва местное население было временно эвакуировано из населенных пунктов, прилегающих к месту взрыва. На разных расстояниях от предполагаемого места взрыва бы рассредоточено огромное количество различной военной и гражданской техники и скот. Были построены окопы блиндажи и различные укрытия. На разных расстояниях от эпицентра взрыва в укрытиях сидели солдаты. В эпицентре взрыва сгорел лес, практически без следа исчезли, словно испарились, все животные, была искорежена и сгорела вся военная техника, сгорели три отселенных деревни. За десятки километров от взрыва в домах были выбиты стекла. Облако взрыва и столб пыли высотой 12-15 км были северо-восточным ветром кратковременно вынесены за зону полигона. Считается, что общая длина радиоактивного следа составила примерно 210 км.

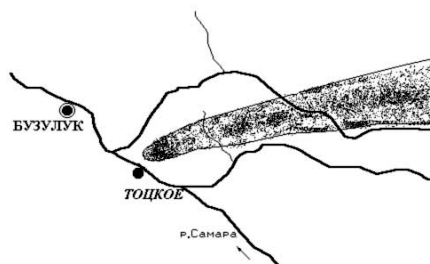
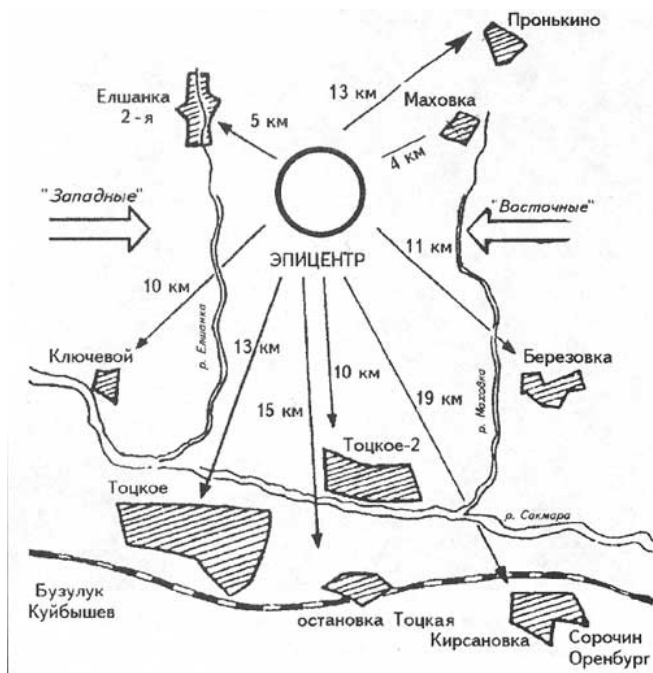


Рис. 11.2. Тоцкий взрыв, схема полигона и радиоактивный след.



Краткое сообщение о Тоцких учениях содержалось в газете «Правда» от 17.09.1954 г: «В соответствии с планом научно-исследовательских и экспериментальных работ в последние дни в Советском Союзе было проведено испытание одного из видов атомного оружия. Целью испытаний было изучение действия атомного взрыва. При испытании получены ценные результаты, которые помогут советским учёным и инженерам успешно решить задачи по защите от атомного нападения».

Однако в этом сообщении не было указано ни место испытаний, ни число пострадавших. Результаты Тоцких войсковых учений до сих пор остаются в значительной своей части закрытыми.

Вскоре после взрыва для жителей трех сгоревших деревень был построен новый поселок. Ввиду слабого контроля и отсутствия информации о загрязнении территории, к концу сентября люди вернулись к своим домам и пепелищам, стали их восстанавливать, собирать грибы и ягоды, заниматься скотоводством, земледелием, возить дрова из поваленного леса.

Современные обследования⁴ зоны Тоцкого полигона и прилегающих районов не выявили существенных превышений по стронцию-90, цезию-137 и тритию над контрольными показателями. Между тем, медицинские обследования населения Оренбургской области установили повышенную над средним уровнем частоту

⁴ А.Г. Васильев, В.М. Боев, Э.А. Гилева и др. Эколого-генетический анализ отдаленных последствий Тоцкого ядерного взрыва в Оренбургской области в 1954 г. (факты, модели, гипотезы). Екатеринбург, Изд-во «Екатеринбург», 1997, с.192.
Кино: Totskiy polygon.

онкологических заболеваний. Вопрос, связано ли это напрямую с последствиями испытаний, остается открытым.

На территории области расположены многочисленные крупные промышленные предприятия с невысоким уровнем технологий, способствующих дополнительному загрязнению природной среды. В частности, в зоне размещения Медногорского медносерного комбината, расположенного в восточной части Оренбургской области, загрязнение воздуха сернистым ангидридом, сероводородом, аэрозолями серной кислоты превышает нормативное значение в 3-90 раз. Почвы, отобранные на расстоянии 0,5-10 км от комбината, содержат повышенные количества меди, цинка, свинца, висмута, олова, мышьяка, кадмия и других элементов, специфических для выбросов предприятий по переработке медно-сульфидных руд. Этими элементами загрязнены воздух, снег, овощные культуры. Статистически значимое повышение смертности жителей г. Медногорска от онкологических заболеваний по сравнению с контрольным городом свидетельствует о негативном воздействии на здоровье населения повышенных концентраций химических загрязнителей.

Заметим, что на территории СССР и России, в частности, осуществлялись «мирные» подземные ядерные взрывы (ПЯВ) в хозяйственных целях (создание подземных газохранилищ, емкостей для захоронения вредных отходов промышленности, сейсмическое зондирование земной коры, повышение нефтеотдачи, строительство каналов и др.). За время существования программы на территории СССР было произведено 124 ПЯВ, из них 81 – на территории России.

Не избежала этой участи и территория Урала. На территории Пермской обл. произведено 8 взрывов, республики Башкортостан – 7, Оренбургской обл. – 5, и соседствующей с востока Тюменской обл. – еще 8 ПЯВ. Следовательно, эти территории подверглись дополнительному радиационному воздействию. Однако, сведения о сегодняшней обстановке в местах проведения ПЯВ взрывов отсутствуют. Программа прекращена с 1988 г в связи с принятием моратория на любые ядерные испытания. В табл. 11.2. приведены характеристики ПЯВ на территории РФ.

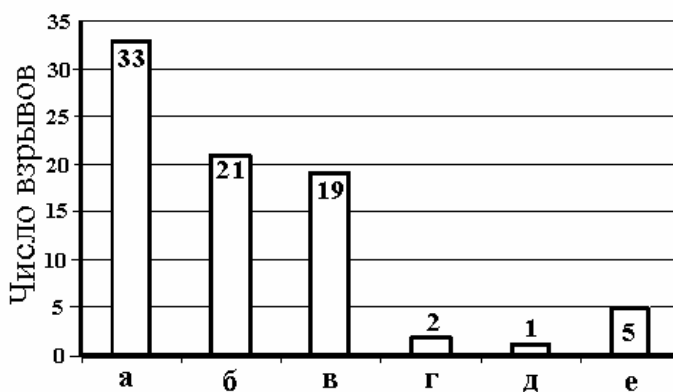
Таблица 11.2. Мощность (в кт ТЭ) ПЯВ в мирных целях и их распределение по регионам РФ.

Регион РФ	Количество ПЯВ	Суммарная мощн. (кт ТЭ)
Астраханская обл.	15	126
Саха-Якутия	12	151
Красноярский кр.	9	109
Пермская обл.	8	28
Тюменская обл.	8	107
Башкортостан	7	39
Оренбургская обл.	5	39
Архангельская обл.	4	63
Коми	4	29
Иркутская обл.	2	20
Мурманская обл.	2	6
Ивановская обл.	1	3
Калмыкия	1	8
Кемеровская обл.	1	15
Ставропольский кр.	1	10
Читинская обл.	1	10
ВСЕГО	81	764

На диаграмме рис.11.3. приведены сведения о целях проведения ПЯВ на территории РФ.

Рис.11.3. Назначение ПЯВ на территории РФ:

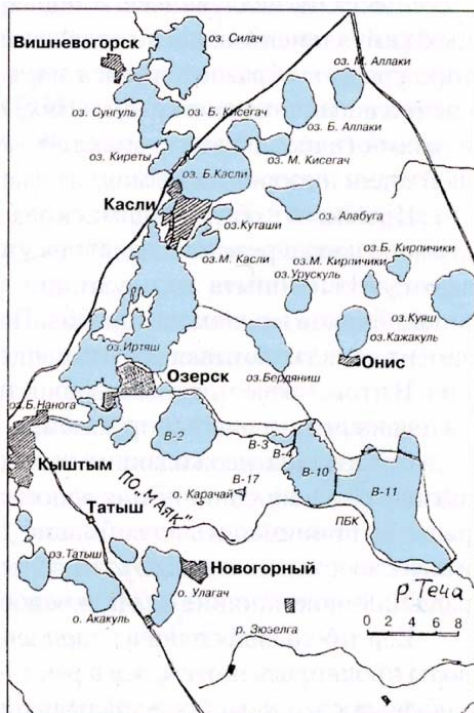
- а – сейсмозондирование
- б – повышение добычи нефти и газа
- в – создание подземных емкостей
- г – захоронение био-отходов
- д – перекрытие горящих скважин
- е – прочее (в т.ч. – попытка переброса вод северных рек в бассейн Волги



В качестве примера приведена схема проекта «Тайга» (1971 г) поворота северных рек в обмелевший бассейн Волги (3 взрыва – реки не повернули).

Рис.11.4. Проект «Тайга».

7. **ПО «Маяк»⁵**. Прежде всего – загрязнение промышленной территории и, исторически, облучение персонала в широком диапазоне величин в зависимости от совершенства технологических процессов. Главные факторы воздействия для населения: сброс загрязненных вод в природные водоемы, ВУРС, ветровая эрозия осушенных донных отложений, штатные газовой аэрозольные выбросы реакторов.



Последствия деятельности первого в нашей стране атомно-промышленного комплекса по наработке оружейного плутония (ПО «Маяк» Челябинской области) занимают особое место среди проблем формирования избыточного, относительно природного, радиационного фона. Именно здесь были наработаны методы лечения и реабилитации облученного персонала.

Рис.11.5. Схема дислокации ПО «Маяк».

Комбинат начали строить в 1946 г недалеко от гг. Кыштыма и Касли. На южном берегу озера Иртяш было выбрано место для строительства жилого комплекса (сейчас там г. Озерск). Первый промышленный в нашей стране уран-графитовый реактор типа АИ, предназначенный для наработки оружейного плутония, был сооружен на южном берегу озера Кызыл-Таш. Его запуск состоялся 19 июня 1948 г, и он проработал почти сорок лет.

⁵ В.Н. Новоселов, В.С. Толстиков. Тайна «сороковки». Екатеринбург, «Уральский рабочий», 1995, с. 320.
В. Ларин. Последствия атомных аварий на Урале, журнал «Энергия», 1996, №№ 3-6.

Одновременно было создано радиохимическое производство по выделению плутония из урановых блочков (именно из этого плутония изготовлен заряд бомбы РДС-1). В самые напряженные годы на производственном объединении работало до 8 реакторов, сейчас осталось только два. В 1987 г наработка оружейного плутония была прекращена, а работа ПО «Маяк» с радиоактивными веществами переориентирована на технологии гражданского назначения. Еще в 1977 г на базе первого радиохимического завода был создан завод РТ-1 по переработке облученного ядерного топлива реакторов энергетического, исследовательского и транспортного назначения. ПО «Маяк» стал одним из крупнейших в мире поставщиков радиоактивных источников и радиоактивных препаратов. Им освоены технологии остекловывания радиоактивных отходов, что повысило экологическую безопасность современного производства. Вместе с тем, это предприятие продолжает оставаться источником серьезной экологической опасности для населения⁶.

В первые годы своей деятельности (1949-1951 гг.) ПО «Маяк» сбрасывал слабоактивные воды реакторов и жидкие радиоактивные стоки радиохимического завода непосредственно в озеро Кызыл-Таш и вытекающую из него реку Течу, протяженность которой, до впадения в р. Исеть, составляет ~200 км. Это привело к радиоактивному загрязнению воды, донных отложений, почв и растительности пойменной зоны реки. Всего за период 1949-1956 гг. в открытую гидросистему Теча-Исеть-Тобол было сброшено 76 млн. м³ сточных вод общей активностью свыше 100 ПБк.

В 1952 г, когда стала очевидной опасность дальнейшего поступления жидких радиоактивных веществ в р. Течу, сток из озера Кызыл-Таш оградили плотиной. Озеро превратилось в два водоема-отстойника (№1 и №2). На протяжении около 20 км ниже по течению были сооружены еще девять водоемов отстойников (рис.11.6.).

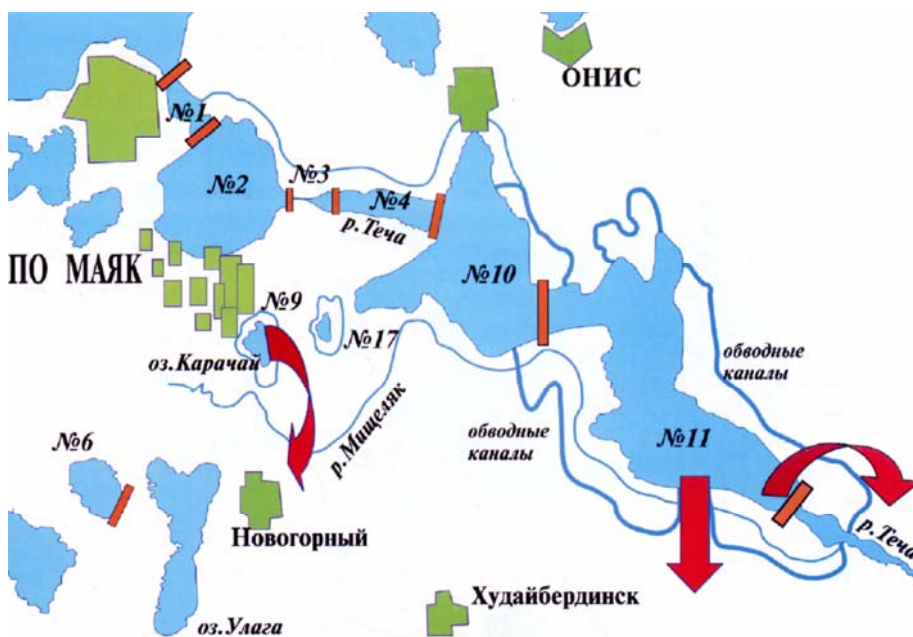


Рис.11.6. Каскад водоемов-отстойников
Стрелками показаны пути подземной миграции радионуклидов ⁷

Во всех случаях это сопровождалось подъемом уровня воды и частичным затоплением прилегающих территорий. В частности, водоем №4 (Метлинский пруд), где располагалась

деревня Метлино, практически затопил территорию деревни, и ее пришлось переселять на новое место. К настоящему времени на месте д. Метлино можно видеть водоем с островом, на котором сохранилась старинная церковь (рис.11.7).

⁶ А.Л. Федоров. По заказу совести. Вестник УрО РАН №4 (6), 2003, с. 68-75; №1 (7), 204, с.100-116; №2 (8), 2004, с. 73-84.

⁷ 16.01.2008 завершилась реконструкция, и состоялся торжественный пуск в эксплуатацию укрепленной плотины П-11 Теченского каскада водоемов.

Рис.11.7. Место прежней дислокации д. Метлино.



Рис. 11.8. Старая кирпичная мельница в д. Метлино, через створы которой проходили все воды в начальный период работы ПО «Маяк».



Предпринимались и меры, направленные на защиту населения, проживающего в пойме реки Течи, от воздействия радиационных загрязнений. Населению было запрещено использовать речную воду для питьевых и хозяйственных целей. Было организовано строительство колодцев, переоборудованы водопроводы с использованием подземных вод, возведено проволоочное ограждение вокруг загрязненной территории, введен запрет на рыболовство, охоту, выпас скота, сенокошение, огородничество. Однако, закрытость деятельности ПО «Маяк» не позволило дать населению объективную информацию.



Рис.11.9. Дети на берегу р. Течи

Работы по реабилитации поймы интенсивно продолжались в течение последующих лет, ведутся они и сейчас. Важную защитную роль должна была сыграть эвакуация населения из наиболее неблагоприятных пунктов, расположенных в верхней части реки. Всего с берегов Течи в 1954 - 1960 гг. было переселено около 7,5 тыс. человек из 19 населенных пунктов. В их числе: Метлино (12 км по течению р. Теча от

места сброса радиоактивных вод), Асаново (28 км), Курманово (76 км), Карпино (85 км), Ветроудка (86 км), Осолодка (106 км), Бакланово (125 км), частично отселены жители Муслумово (67 км), Бродокалмака (97 км), Нижне-Петропавловского (131 км). Теоретическая эффективность этого мероприятия несомненна. Однако практическое его

исполнение запоздало на 5-7 лет. Ко времени переселения жители прибрежных населенных пунктов уже получили основную дозу как внешнего, так и внутреннего облучения.

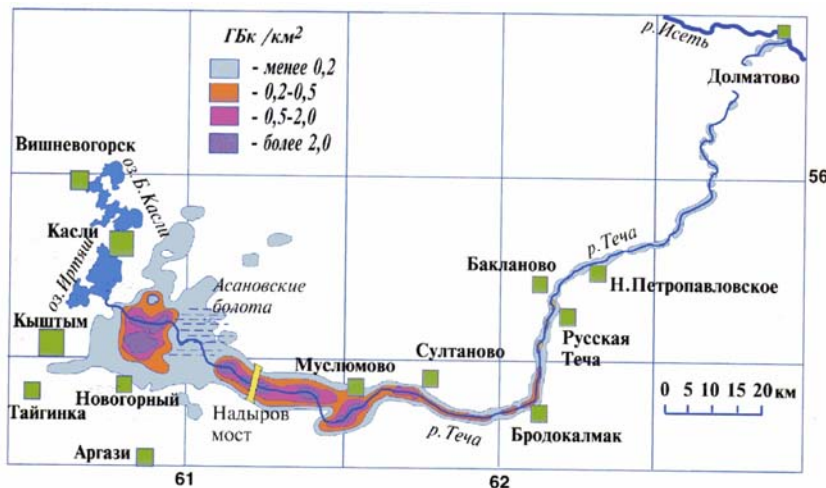


Рис.11.10. Концентрация Cs-137 в донных отложениях реки Течи

К 1960 г организованный сброс жидких радиоактивных стоков реку практически прекратился. Однако к тому времени большая часть поймы, и дно реки были уже в значительной степени загрязнены. К сожалению, через тело плотины последнего водоема №11 в реку Теча постоянно просачиваются воды, загрязненные радионуклидами.

Одновременно с началом сооружения каскада водохранилищ, жидкие радиоактивные отходы средней активности (1951 г) стали сбрасывать в озеро Карачай. В озере накопилось более 4,4 ЭБк радиоактивных веществ, главным образом цезий-137, стронций-90 и иттрий-90. Более половины (52%) радионуклидов сконцентрировано в донных отложениях, примерно 41% проникла в коренные породы дна водоема, остальные – содержатся в воде. Мощность дозы облучения на берегу озера варьирует от 0,03-0,04 Зв/ч до 6-7 Зв/ч. В засушливом 1967 г уровень воды в озере существенно понижался. Обнажившейся на береговой полосе высохшие радиоактивные илы под действием ветровой эрозии в количестве порядка $2,2 \cdot 10^{13}$ Бк были рассеяны в восточном и северо-восточном направлениях на расстояние до 75 км от озера. Однако основная часть поднятой в атмосферу пыли осела неподалеку от комбината, и на территорию ВУРС 1957 г. Поэтому пылевое загрязнение обычно обсуждают совместно с проблемой ВУРСа.

После катастрофического разноса радиоактивной пыли с берегов озера Карачай было принято решение его засыпать. Глубина озера была небольшой – в среднем 1,5 м, но большая площадь не позволила быстро решить эту задачу. Работы начались уже в мае 1967 г, и к 1971 г по периметру озера была насыпана дамба, оконтурившая площадь 36 га. Второй этап засыпки Карачая стартовал в конце 1984 г, когда было решено не только засыпать его грунтом, но и закрыть полыми бетонными блоками. К 1995 г его акватория сократилась до 15 га, и работы продолжают. Однако озеро находится на водораздельной части рельефа. Это приводит к постепенному растеканию подземных вод. Под озером образовалась линза радиоактивно-загрязненных подземных вод, которая движется вдоль меридионального разлома. В южном направлении она уже прошла под ложем р. Мишеляк, притока р. Течи, в которую отмечены выходы радиоактивности.



Рис.11.11. Засыпка озера Карачай.

В результате многолетней деятельности ПО «Маяк», на его промплощадке накоплено более 37 ЭБк (1 млрд. Ки) активности жидких и твердых радиоактивных отходов. Значительная часть их депонирована в открытых природных средах.

Часть высокоактивных радиоактивных расходов (7,4 ЭБк на 1 января 1995 г)

остеклована. Для захоронения твердых отходов была создана серия могильников, из них 25 капитальных, бетонных, многобарьерного типа для высокоактивных отходов. Часть из них (13 могильников) заполнена и законсервирована. Остальные находятся в эксплуатации. Для отходов средней и низкой активности было создано 206 грунтовых приповерхностных могильников в виде траншей и котлованов. Из них 155 законсервировано, остальные находятся в рабочем состоянии. По современной

технологии хранения, радиоактивные отходы сплавляются со специальными материалами. При этом образуется стеклообразная масса, которая заливается в емкости из нержавеющей стали. После охлаждения емкости устанавливаются в подземные, хорошо вентилируемые хранилища. Весь процесс остекловывания происходит в специально оборудованных помещениях при дистанционном управлении. В настоящее время остекловыванию подвергаются все вновь образующиеся жидкие отходы высокой активности, а также часть ранее образованных радиоактивных отходов.

Наиболее крупная радиационная авария с выбросом радионуклидов в окружающую среду произошла на ПО «Маяк» 29.09.1957. Рекомендую посмотреть сноску 6 – воспоминания непосредственного участника событий, начальника смены А.Л. Федорова.

Причина аварии связана с нарушением системы охлаждения бетонной емкости объемом $\sim 250 \text{ м}^3$, содержащей жидкие высококонцентрированные растворы осколочных элементов. Произошло повышение температуры, испарение воды, дальнейший саморазогрев и взрыв $\sim 70\text{--}80 \text{ т}$ высокоактивных отходов, которые находились преимущественно в форме нитратно-ацетатных соединений. Мощность взрыва оценивается в $\sim 70\text{--}100 \text{ т}$ тринитротолуола. Было выброшено около 740 ПБк (2 млн. Ки) активности. Для сравнения отметим, что при аварии на ЧАЭС было выброшено 1850 ПБк (5 млн. Ки) активных продуктов. Большая часть радионуклидов (670 ПБк) осела на промплощадке вокруг хранилища. Оставшиеся 10% были подняты в воздух, и радиоактивное облако прошло в сторону Тюмени, образовав Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС).

Состав выброса: $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ - 5,4%, $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ - 24,9%, $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$ - 66%, $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$ - 3,7%, ^{137}Cs - 0,036%. При этом на плотность загрязнения в 1 Ки/км² по ^{90}Sr на момент выпадения приходится 4,6 Ки/км² ^{95}Zr и ^{95}Nb , 12,2 Ки/км² ^{144}Ce и около 0,7 Ки/км² ^{106}Ru .

В зону ВУРСа попали десятки населенных пунктов, прежде всего в Челябинской области. Краем следа были задеты города Багаряк и Каменск-Уральский. В дальнюю часть ВУРСа попал город Камышлов. Вследствие загрязнения территорий Челябинской и Свердловской областей, из хозяйственного использования были выведены 106 тыс. га земель, из которых 55% составили сельхозугодия. С загрязненных территорий Челябинской области было отселено 10200 человек. Среди выселенных деревень и поселков оказались Бердяуш, Кожанкуль, Салтыково, Талимасец, Кирпичниково, Караболка, Трошниково, Юго-Конево и др. Другими словами, челябинцам и здесь досталось больше других.

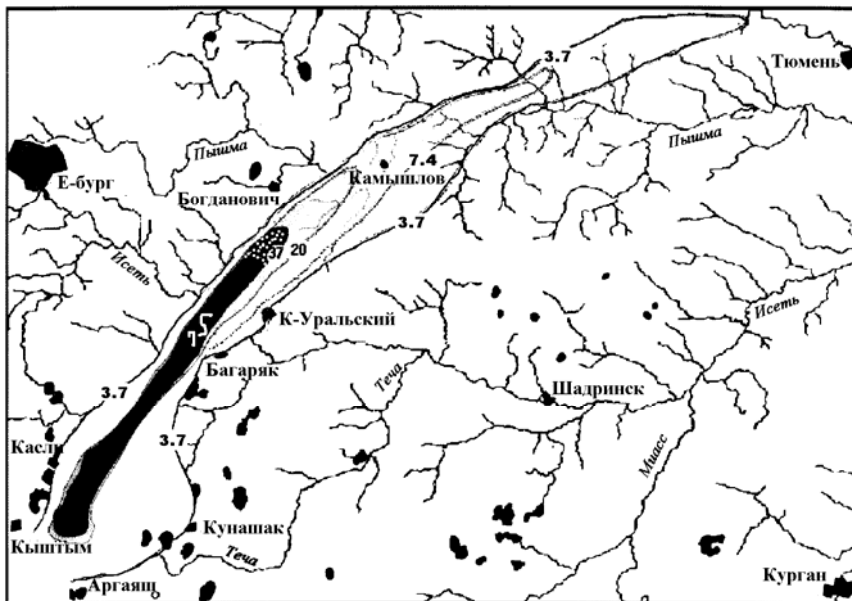


Рис.11.12. Схема ВУРС. На изолиниях указаны предельные концентрации Sr-90 (ГБк/км²)

В Свердловской области наивысшие уровни загрязнения по ^{90}Sr зафиксированы для Каменского района и составляют: для периферии следа 0,1 Ки/км², а на его оси – до 7-10 Ки/км².

Сравнительная оценка популяционного радиационного риска населения для зоны ВУРС Свердловской области приведена в таблице 11.3⁸.

Таблица 11.3. Популяционные радиационные риски в зоне ВУРС Свердловской области.

Источник облучения	Количество онкозаболеваний		Ожидаемое количество потерянных человеко-лет жизни	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
ВУРС	190/73	250/75	2100/660	3100/700
Диагностика	580	930	6000	11300
Газо-аэрозоли	105/102	240/220	170/160	570/550
Радон	2700/1500	540/310	30500/17500	7600/4300

Таким образом, эффективные дозы облучения населения в зависимости от места их проживания и возраста на момент аварии лежат в диапазоне от нескольких мЗв до 200-250 мЗв. Дополнительное радиационное воздействие на население зоны ВУРС Свердловской области представляют газо-аэрозольные выбросы ПО «Маяк», осуществляемые предприятием с 1949 г.

Для 96 населенных пунктов, расположенных вдоль Восточно-Уральского радиоактивного следа на расстоянии от 70 до 220 км от ПО «Маяк», из суммарных значений эффективной дозы были вычленены значения эффективных доз, обусловленные газо-аэрозольными выбросами. В основном дозы от газо-аэрозольных выбросов были сформированы в период с 1950 по 1965 год. Критической группой населения является та же группа, что и для ВУРС, т.е. дети 1953-1955 года рождения. При этом для периферических участков следа в Каменском районе, где плотность загрязнения по ^{90}Sr не превышала 1 Ки/км², эффективные дозы от аварии 1957 года и дозы от штатной деятельности предприятия в первые годы его функционирования имеют сопоставимое значение.

Разработка комплексов научных рекомендаций по оздоровлению радиационно-экологической ситуации, возникшей в результате деятельности ПО «Маяк», на современном этапе начата в 1990 г в рамках специально созданных комиссий АН СССР и президента СССР. Эти рекомендации предусматривают дальнейшую реабилитацию загрязненных территорий, решение проблем компенсационных льгот населению за причиненный ущерб, улучшение медицинского обслуживания людей, подвергшихся облучению, широкое распространение экологических знаний. Все это позволит осознанно соблюдать ограничительные меры и таким образом избежать многих последствий отрицательного воздействия радиации на здоровье жителей региона.

Из всего изложенного выше следует, что, для уменьшения рисков радиационного воздействия, население должно иметь объективную информацию о наличии, типах и мощности возможных или реальных источников излучения. Следует знать элементарные приемы защиты (рис.11.13).

При наличии соответствующих источников поглощенная доза уменьшается при уменьшении мощности источника (например, при проветривании помещений, где может накапливаться радон - рис. а). Это же происходит, если человек находится за защитным экраном (рис. б), в удалении от источника облучения (рис. в) или находится существенно меньшее время вблизи источника (рис. г).

⁸ М.В. Жуковский. Радиационное воздействие на население: оценка радиационных рисков и потенциального ущерба здоровью (на материалах Свердловской обл.). Автореферат докторской дисс., Екатеринбург, 2003.

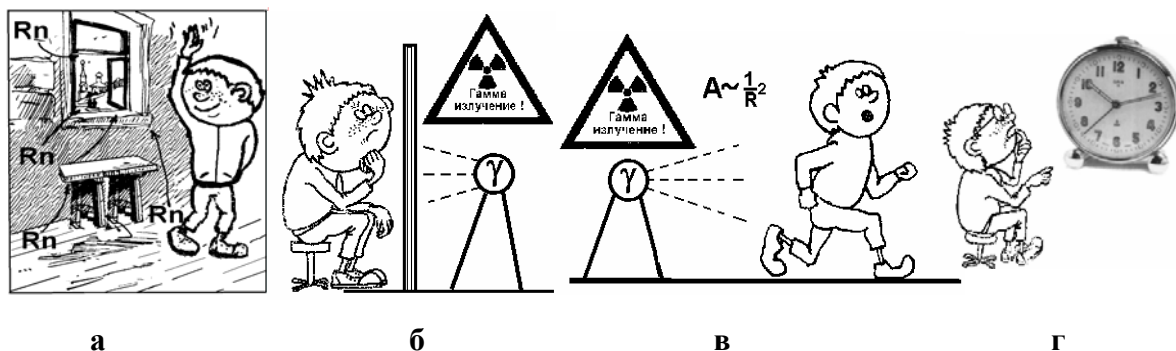


Рис.11.13. Иллюстрации к способам защиты.

Радиационное воздействие на население от штатной работы других радиационно-опасных предприятий (Белоярская АЭС, Уральский электрохимический комбинат, комбинат "Электрохимприбор", спецкомбинат "Радон") существенно меньше, чем флуктуации природного радиационного фона.

8. Медицина. Медицинские диагностические обследования обеспечивают максимальные дозы облучения населения от искусственных источников излучения.

Для крупных городов Свердловской области средние дозы медицинского облучения составили порядка 1,7-1,8 мЗв/год, а для сельских районов - 1,1 мЗв/год.



Величина средней эффективной дозы медицинского облучения по области в целом 1,4 мЗв/год в целом несколько выше, чем значение 1,1 характерное для Российской Федерации в 1990 г.

Рис.11.14. Радиотерапия.

Как уже отмечалось ранее, к облучению от медицинских процедур необходим иной подход, чем к другим видам техногенного облучения. Польза для пациента от проведения рентгенодиагностических обследований существенно превышает потенциальный риск от радиационного воздействия.

Из табл. 11.3. следует, что наибольший вклад в формирование поглощенной дозы для гипотетического индивидуума вносит радон.

Отступление: Комментарий профессионала – врача-радиолога Гуськовой Ангелины Константиновны – ныне она член-корр. АМН, лауреат Ленинской премии, заслуженный деятель науки РСФСР, профессор Института биофизики АМН. А.К. Гуськова выпускница Свердловского мединститута, которая была распределена на п/я «Челябинск-40», где создавались первые цехи комбината «Маяк». Она была рядом с теми, кто запускал на Урале первый промышленный реактор, хватая рентгены, осваивал производство плутония и отливал из него первые полусферы для первой советской атомной бомбы⁹. Рекомендую ознакомиться с новейшими материалами, опубликованными в журнале «Наука и жизнь»¹⁰

⁹ Гуськова А.К. Атомная отрасль страны глазами врача, М.:, Изд-во Реальное время, 2004.-240с.

¹⁰ Ж. Наука и жизнь, 2007, №4. «Профессор Ангелина Гуськова: на лезвии атомного меча». Черников В.Г. Озерский Вестник №76 от 10 июля 2002 г. «Байсоголов и другие», с.3.



Гуськова Ангелина Константиновна



Первые врачи, начавшие борьбу с лучевой болезнью в Челябинске-40 (слева направо): В. И. Кирюшкин, В. Н. Дощенко, А. К. Гуськова, Г. Д. Байсоголов, Е. А. Еманова.

- А.К. Гуськова убеждена, что вокруг Атомного проекта слишком много мифов и легенд, а правда не только скрыта завесой секретности, но и искажена невежеством людей, в том числе тех, кто зачастую представляется общественности специалистом.

- Первые больные лучевой болезнью с ее хронической формой (ХЛБ) были выявлены в 1949 г, а с острой формой (ОЛБ) - в августе 1950 г.

- В разговоре с журналистом (Владимиром Губаревым) выяснилось, что Ангелина Константиновна участвовала в лечении практически всех больных, получивших серьезные радиационные повреждения (в институт Биофизики приезжали и гражданские и военные). *Журналист*: сколько человек в нашей стране погибло от лучевой болезни? *А.К.*: «Счет идет на единицы. Я помню их всех пофамильно за все 50 с лишним лет работы. 71 человек погиб от острой лучевой болезни, из них 12 получили ее на флоте, остальные - в промышленности и научных учреждениях Средмаша. Есть группа больных, к сожалению, их становится больше, которые попали в аварийные ситуации вне отрасли - при транспортировке источников радиации, в медицине. На "Маяке" было 59 случаев ОЛБ, погибли семеро».

- *Журналист*: А ХЛБ, то есть хроническая лучевая болезнь? *А.К.*: Хроников конечно же несравненно больше - шли ремонты на промышленном реакторе, случались аварии, да и допустимые уровни доз в те годы заведомо превышались. Если сейчас по нормам разрешенная доза составляет 2,5 сантизиверта (величина, оценивающая дозу облучения, эквивалентная рентгену), то тогда разрешалось 15, а реально люди получали и 30 и 100 сантизиверт. Шло быстрое накопление доз, и соответственно были разные проявления хронического облучения. Нашей большой профессиональной удачей было то, что нам удавалось выводить людей из зон облучения. Если получивший дозу будет находиться вне опасной зоны, то по истечении нескольких месяцев или одного-двух лет ХЛБ перестает сказываться. За первые 10 лет работы комбината мы таким образом "вылечили" несколько тысяч человек.

- *Журналист*: Условия труда были тяжелые? *А.К.*: «Невероятно! И когда мы говорим о ядерной мощи страны, о величии России, то обязательно следует помнить о том, что тысячи людей рисковали ради нее своим здоровьем и жизнью. К сожалению, у нас было двое больных, которых вывод из загрязненного цеха уже не спас. Они умерли от хронической лучевой болезни и ее осложнений. Было еще 11 человек, у которых после вывода из-под облучения появились признаки восстановления, однако побороть болезнь нам не удалось. В течение пяти-семи лет у них постепенно развился лейкоз. Тяжелые лейкозы были аналогичны тем, что наблюдались в Японии в 1945 году после атомных

бомбардировок. На "Маяке" от ХЛБ погибли 19 человек, в том числе 6 - от плутониевого поражения легких. Психологически работать с ними было мучительно, и мы очень переживали из-за невозможности им помочь».

«Еще одна группа пострадала на производстве, где получали металлический плутоний. Считалось, что его вывозят туда полностью очищенным от осколков деления ядра урана и пострадать от контакта с ним никто не может. На самом деле даже у "очищенного" плутония была высокая гамма-бета-активность. Группа специалистов, работавших с ним, получила дозу внешнего облучения поменьше, чем на основном производстве. Мы сразу же перевели их в "чистые" зоны. Но плутоний, попавший в организм, продолжал действовать, и, несмотря на все принятые меры, за десять лет мы потеряли шесть человек из-за плутониевого поражения легких».

• *Журналист*: У меня было представление, что погибших от "лучевки" в те годы было несравненно больше! *А.К.*: Это широко распространенное заблуждение. Мы стали свидетелями удивительных восстановительных процессов. В Институте биофизики есть такие данные: около 90 процентов наших пациентов восстановили свое здоровье! Несколько тысяч человек мы успели вывести с облученных участков.

• *Журналист*: Вспомним аварию 1957 года на "Маяке". *А.К.*: «Это была большая неожиданность для всех. Взрыв "банки" радиоактивных отходов в хранилище вне территории завода дал значительное загрязнение, образовав восточно-уральский след. Выброс шел в сторону города и "Маяка". Пострадали многие люди, не имевшие отношения к комбинату, - солдаты и жители окрестных деревень. Оценка доз была сделана сразу же. Мы проследили судьбу пострадавших, всех, за исключением военных. Они демобилизовались, и ничего об их судьбе нам неизвестно. Лучевой болезни мы не ожидали, но следить за всеми, кто попал под выброс, нужно было. К сожалению, в должной мере этого сделать не удалось. Хотя основное представление об их состоянии у нас сложилось».

• *Журналист*: Сейчас много говорят и пишут о реке Тече, о той опасности, которой подвергаются жители окрестных деревень из-за высокого уровня радиации. Что вы думаете по этому поводу? *А.К.*: Опасения обоснованны. С открытием комбината очень скоро стало ясно, что тех емкостей, которые приготовлены для сброса отходов, мало и они быстро переполняются. В качестве временной меры приняли решение сбрасывать активные отходы в болота и через них в реку. Была надежда, что радиоактивность отходов быстро уменьшится. Однако уже при первых исследованиях в 1951-1952 годах мы поняли, что этого не происходит, а значит, сбрасывать отходы в реку нельзя, ведь по берегам, особенно в верховьях, живут люди. Тогда и переключились на озеро Карачай. Уровень сбросов в Течу начал падать, но это не означало, что ее загрязнение радионуклидами снизилось. Исследования показали, что основные виновники радиоактивности отнюдь не долгоживущие нуклиды, а короткоживущая фракция. Это подтверждается и клиническими эффектами заболеваний. Оказалось, что никаких 900 случаев лучевой болезни, которые вначале диагностировались среди местного населения, не было, что главную опасность сбросы представляют для жителей верховьев Течи, тех, кто пользуется речной водой и ест свежую рыбу. Больных ХЛБ было всего 66 человек. Сейчас трудности в анализе ситуации заключаются в том, что нет полной корреляции материалов комбината, осуществившего сброс отходов, с выводами городских и областных служб.

• *Журналист*: Надо ли сейчас выселять жителей деревень, расположенных по реке? *А.К.*: Не надо, потому что их жизнь только ухудшится. 95 процентов дозы они уже получили. При отселении люди "уйдут" со своими дозами из-под нашего контроля. А сейчас он проводится, и это позволяет оценить состояние их здоровья за все прошедшие годы. По нашим данным, при естественной частоте онкологических заболеваний для данной группы населения порядка 2000 случаев, с облучением можно связать не более 55-ти.

Оценку А.К. Гуськовой последствий Чернобыльской аварии смотрите в соответствующей лекции.

Еще одной формой профессиональных заболеваний, отмеченной А.К. Гуськовой, является пневмосклероз, вызванный вдыханием аэрозолей различной природы. Особое место занимает плутониевый пневмосклероз. Негативные воздействия аэрозолей проявились на атомных производствах всех стран. Поскольку мы догоняли, условия на рабочих местах у нас были более жесткими. Рекомендую познакомиться с публикациями Садовского А.С. и Товмаша А.В.¹¹



Очистку воздуха обеспечивали стационарные фильтрующие установки и индивидуальные защитные средства типа респиратор ШБ-1 «Лепесток 200», в основу которого положен хорошо зарекомендовавший себя фильтрующий материал, называемый «фильтром Петрянова» - ФП.

Оператор
в «Лепестке»

Академик Петрянов –Соколов И.В.



¹¹ Садовский А.С., Товмаш А.В. «Плутониевый пневмосклероз глазами химика (история и причины профзаболевания), часть 1 и 2. Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ» 1735 <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/151/pdf>

Лекция 12. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АВАРИЯ

Овладение принципиально новым источником энергии – ядерной энергией предоставило человечеству исключительные возможности при решении своих насущных проблем. Разумность использования представившихся возможностей зависит от интеллекта и мировоззрения людей. Все началось с бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, переросло в гонку вооружений с испытаниями ядерных и термоядерных бомб во всех средах, а затем уже в 40-е годы физики и инженеры приступили к разработке ядерных реакторов, предназначенных для получения электрической энергии. Как обычно, приоритетным оказалось военное направление – производство реакторов для кораблей военно-морского флота. Особенно перспективным представлялось использование реакторов на подводных лодках, так как такие корабли имели бы практически неограниченный радиус действия и могли бы годами находиться под водой. Американцы сосредоточили свои усилия на создании корпусных водно-водяных реакторов, в которых и замедлителем нейтронов, и теплоносителем служила вода. Эти реакторы обладали высокой мощностью на единицу массы энергетической установки. В середине 1950-х годов американская подводная лодка «Наутилус» с атомным двигателем прошла под льдами Ледовитого океана. Аналогичные работы велись и в СССР.

Важный психологический эффект имел запуск первой в мире АЭС, работавшей на народное хозяйство. 27 июня 1954 г в г. Обнинск к реактору АМ (последняя буква в аббревиатуре означает «морской») был подключен турбогенератор мощностью 5000 кВт, который дал ток в электрические сети. Мы стали первопроходцами. Однако, пропагандистский шум скрыл от общественности тот факт, что, начиная с 60-х годов, возникло, а затем постоянно нарастало, отставание нашей страны в атомной энергетике. В конце 1987 г мощность АЭС в США составляла 90 млн. кВт (на их долю приходилось 17% общего производства электроэнергии), во Франции – 45 млн. кВт (70%), в Японии – 27 млн. кВт (25%), в СССР – 30 млн. кВт (10%).

Самый распространенный в мире тип энергетического реактора – водо-водяной реактор (ВВЭР, в латинской транскрипции – PWR). США, развивая атомную энергетику, пошли по пути использования именно таких реакторов. Их характерная особенность – огромный корпус (4,5 м в диаметре, 11 м высоты), рассчитанный на высокое давление (до 160 атм.). Производство и транспортировка таких корпусов к площадке АЭС – чрезвычайно сложная задача, но она была решена. Все высокоразвитые промышленные страны в конце 70-х годов переориентировали национальные программы на АЭС с американскими реакторами PWR.

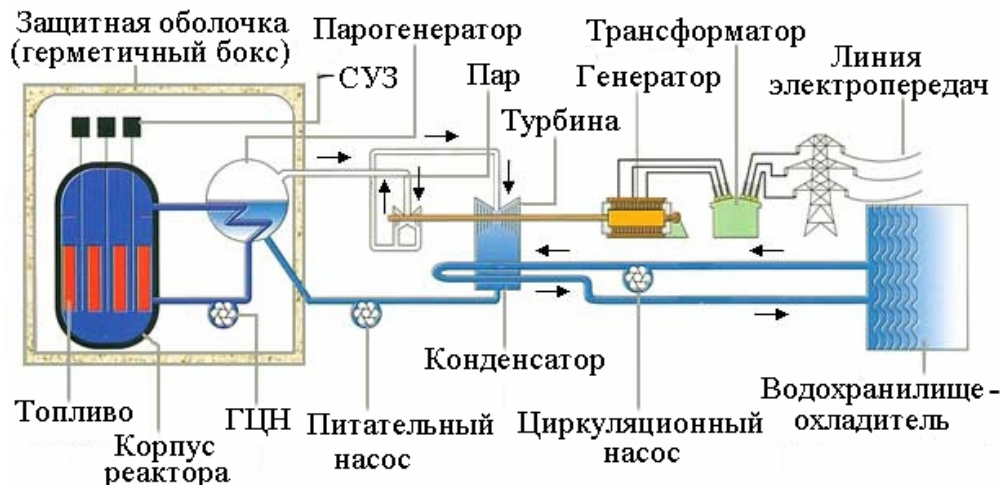


Рис.12.1. Принципиальная схема реактора ВВЭР.

Топливо – диоксид урана с содержанием изотопа U-235 3,6 – 4,4%. Реакторы ВВЭР двухконтурные. Первый контур – радиоактивный. Он включает в себя активную зону реактора и циркуляционные петли охлаждения с ГНЦ (главным циркуляционным насосом) и парогенератором. К одной из циркуляционных петель первого контура подсоединен компенсатор давления, с помощью которого в контуре поддерживается заданное давление воды, являющейся в реакторе одновременно и теплоносителем и замедлителем нейтронов.

Второй контур – нерадиоактивный. Он включает в себя парогенераторы, паропроводы, паровые турбины, сепараторы-пароперегреватели, питательные насосы и трубопроводы и др. оборудование. Парогенератор является общим оборудованием для первого и второго контуров. В нем тепловая энергия, выработанная в реакторе, от первого контура через теплообменные трубки передается второму контуру. Насыщенный пар, вырабатываемый в парогенераторе, по паропроводу поступает на турбину, которая приводит во вращение генератор, вырабатывающий электрический ток.

Работа PWR под высоким давлением заставила конструкторов закрыть их защитными колпаками (рис.12.2), которые должны препятствовать разнесу радиоактивных веществ аварийной потере герметичности корпуса, даже при падении на них самолета.

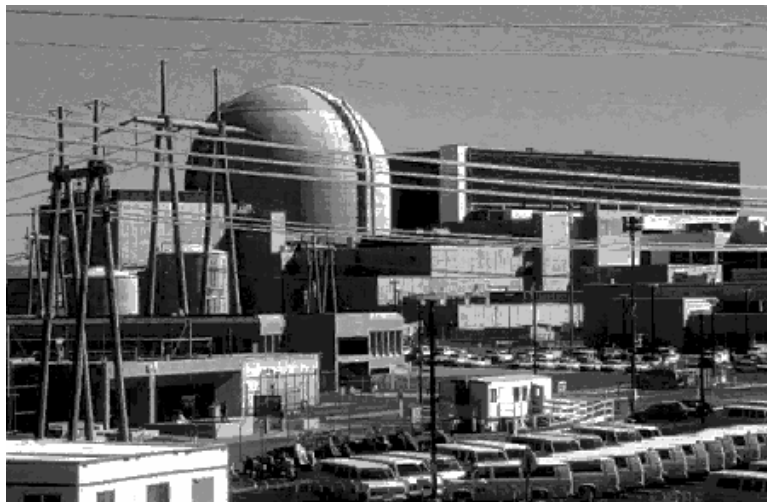


Рис.12.2. АЭС в Паоло-Верде, штат Аризона, США

Советский Союз не мог широко и быстро развивать промышленную базу для АЭС с реакторами ВВЭР. Первоначально лишь один Ижорский завод был способен изготавливать по одному корпусу реактора в год. Пуск Атоммаша состоялся только в конце 1970-х гг., к тому же завод не мог в течение нескольких лет выйти на запланированную мощность. Поэтому была рассмотрена альтернативная возможность строительства канального графитового реактора, не требующая производства гигантских корпусов.

В результате был создан реактор РБМК (реактор большой мощности канальный), который, как полагали разработчики, способен обеспечить приемлемые темпы развития атомной энергетики в собственной стране и в странах СЭВ. Именно на таком реакторе (РБМК-1000 – цифра – электрическая мощность в МВт) произошла катастрофическая авария на четвертом блоке Чернобыльской АЭС.

Реактор РБМК-1000 размещается в железобетонной шахте размерами 21,6х21,6х25,5 м. Масса реактора передается на бетон через металлоконструкции, которые служат одновременно защитой от радиационных излучений и вместе с кожухом реактора образуют герметичную полость – реакторное пространство.

Внутри реакторного пространства располагается графитовая кладка цилиндрической формы диаметром 14 и высотой 8 м, состоящая из собранных в колонны блоков размерами 250х250х500 мм с вертикальными отверстиями для установки каналов в центре. Для предотвращения окисления графита и улучшения передачи тепла от графита к теплоносителю реакторное пространство заполнено азотно-гелиевой смесью.

Технологические каналы, предназначенные для установки топливных кассет и организации потока теплоносителя, представляют собой сварные трубные конструкции. Части каналов, располагающиеся в пределах активной зоны, имеют диаметр 88 мм, толщину стенки 4 мм и изготовлены из циркония. Топливом служит диоксид урана с содержанием изотопа U-235 2,0 – 2,4%.

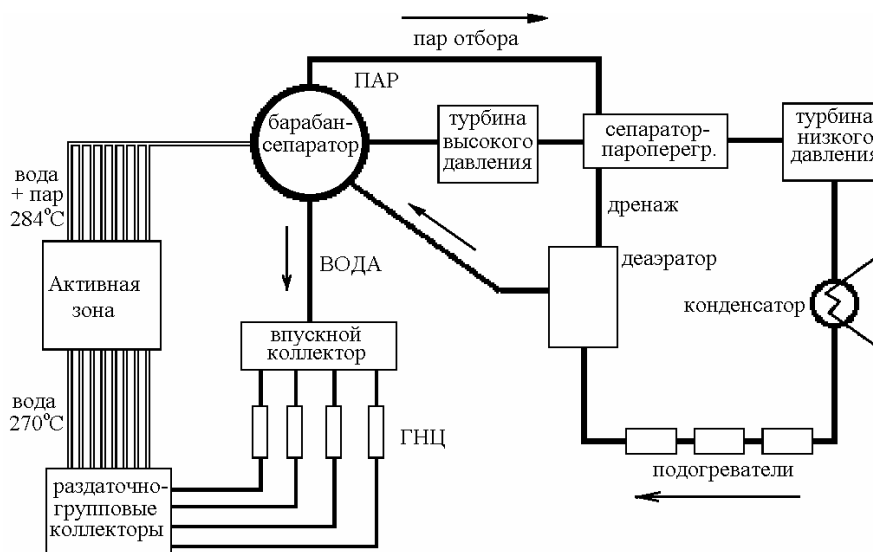


Рис.12.3. Принципиальная
схема реактора РБМК-1000

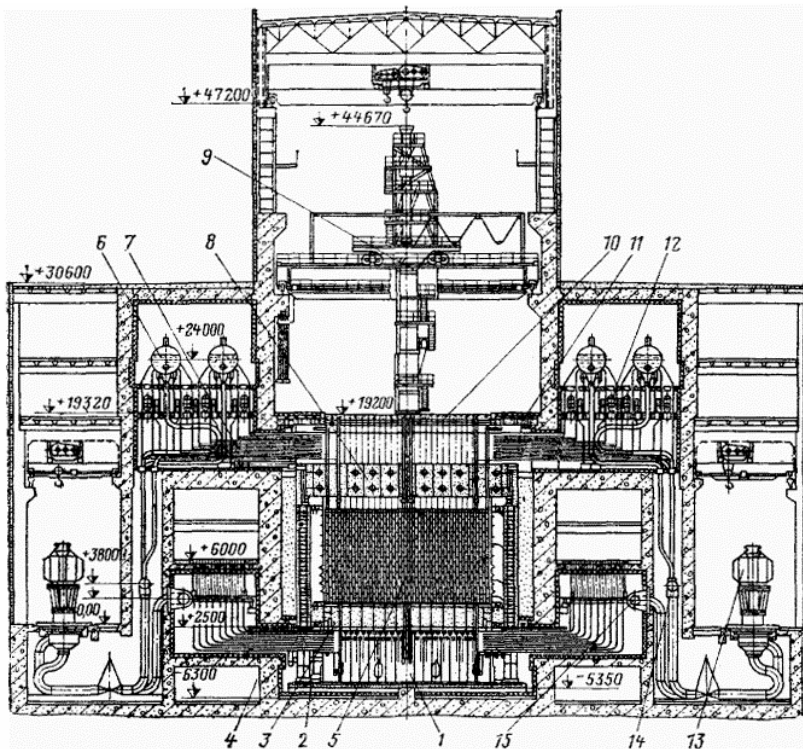


Рис.12.4. Конструкция реактора РБМК-1000.

1 - опорная металлоконструкция; **2** - индивидуальные водяные трубопроводы; **3** - нижняя металлоконструкция; **4** - боковая биологическая защита; **5** - графитовая кладка; **6** - барабан-сепаратор; **7** - индивидуальные пароводяные трубопроводы; **8** - верхняя металлоконструкция; **9** - разгрузочно-загрузочная машина; **10** - верхнее центральное перекрытие; **11** - верхнее боковое перекрытие; **12** - система контроля герметичности оболочек ТВЭЛОВ; **13** - главный циркуляционный насос; **14** - всасывающий коллектор; **15** - напорный коллектор.

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) – это циркониевая трубка высотой 3,5 м и толщиной стенки 0,9 мм с заключенными в нее таблетками диоксида урана высотой 15 мм. Две соединенные последовательно тепловыделяющие сборки, содержащие по 18 ТВЭЛов каждая, образуют топливную кассету, длина которой составляет 7 м. Топливная кассета устанавливается в технологический канал. Количество технологических каналов в реакторе – 1661. Вода подается в каналы снизу, омывает ТВЭЛы и нагревается, причем часть ее при этом превращается в пар. Образующаяся пароводяная смесь отводится из верхней части канала. Для регулирования расхода воды на входе в каждый канал предусмотрены запорно-регулирующие клапаны. Обратите *внимание!*, что реактор РБМК работает по одноконтурной схеме – нагретый на ТВЭЛх пар проходит через сепаратор и непосредственно поступает в турбину.

Управление реактором осуществляется равномерно распределенными по реактору 211 стержнями, содержащими поглощающий нейтроны элемент – бор. Стержни перемещаются индивидуальными сервоприводами в специальных каналах, конструкция которых аналогична технологическим. Стержни имеют собственный водяной контур охлаждения с температурой 40-70°C. Использование стержней различной конструкции обеспечивает возможность регулирования энерговыделения по всему объему реактора и его быстрое заглушение при необходимости.

Биологическая защита обеспечивает допустимую санитарными нормами радиационную обстановку во всех обслуживаемых помещениях вокруг реактора во время его работы. В биологической защите используются углеродистая сталь, железобетон, серпентинитовая галька, песок, вода.

Авария. Трагедия Чернобыля никак не должна рассматриваться как дискредитация атомной энергетики в целом, но она прямо указывает на принципиальные ошибки технической политики в этой области. Ошибки, которые нужно понять, признать и исправить. Взрыв реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС произошел в 1 час 23 минуты 26-го апреля 1986 г. С тех пор прошел уже 21 год. Причины аварии анализировали тысячи экспертов и десятки комиссий, опубликованы тысячи заключений и статей¹. Их можно расклассифицировать на две группы: системные, сделавшие аварию принципиально возможной, и прямые, непосредственно вызвавшие аварию.

Системные причины:

1. Перевод АЭС из Минсредмаша с его полувоенной дисциплиной и опытом работы с ядерными технологиями в Минэнерго, где ядерные реакторы рассматривались как специфические паровые котлы. Это сыграло свою отрицательную роль.
2. Ускоренное развитие атомной энергетики при объективной ограниченности средств создавало хроническую недостаточность технической базы, на которую опиралось обоснование принимаемых проектных и конструкторских решений. В частности, недостаточность вычислительной техники не позволила получить достоверные значения коэффициента реактивности реактора в зависимости от содержания пара в воде его главного контура.
3. С большим опозданием была создана Система Независимого Государственного Надзора за безопасностью атомной энергетики. К моменту аварии эта система еще не успела сформироваться и квалифицироваться.

¹ Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. Атомная энергия, т. 61, вып. 5, ноябрь 1986.

В.А. Сидоренко. Замечания к причинам и следствиям Чернобыльской аварии. Энергия, 2003, №4, с. 2-8.

Б. Горбачев. Чернобыльская авария (Причины, хроника, события, выводы). (Подробная и аналитическая публикация от 22 декабря 2002 - см. Электронную библиотеку Мошкова).

4. Уже в после аварийный период в совокупность причин (как причин «аварийного события», так и причин «катастрофического развития аварии») обобщалась понятием «низкой культурой безопасности» – понимай – «низкой культурой ядерной технологии». Это проявилось и на стадии разработки, и на стадии эксплуатации, а также и в сфере административного управления. Поэтому данный фактор по его сути также следует отнести «системным причинам аварии».

Непосредственные причины аварии:

1. В ночь на 26 апреля 1986 г персонал 4-го блока ЧАЭС в процессе подготовки и проведения электротехнических испытаний шесть раз грубо нарушил Регламент, т.е. правила безопасной эксплуатации реактора. Причём в шестой раз так грубо, что *грубее и не бывает* – вывел из его активной зоны не менее 204 управляющих стержней из 211 штатных, т.е. более 96%. В то время, как Регламент требовал от них: «*При снижении оперативного запаса реактивности до 15 стержней реактор должен быть немедленно заглушен*».

2. До этого были *преднамеренно* отключены почти все средства аварийной защиты. Тогда, как Регламент требовал: «*Во всех случаях запрещается вмешиваться в работу защиты, автоматики и блокировок, кроме случаев их неисправности...*». В результате этих действий реактор попал в неуправляемое состояние, и в какой-то момент в нем началась неуправляемая цепная реакция, которая закончилась тепловым взрывом реактора.

3. Общей причиной аварии явилась низкая культура работников АЭС. Речь идет не о квалификации, а о культуре работы, внутренней дисциплине и чувстве ответственности. Взрыв произошел вследствие ряда грубых нарушений правил работы, технологии и несоблюдения режима безопасности при работе реактора 4-го блока АЭС.

К сходным выводам пришли не только наши комиссии различных ведомств и уровней, но и международные эксперты. Генеральный директор МАГАТЭ Ханс Бликс в беседе с корреспондентом газеты «Правда» 14.04.87 г сказал: «...*причиной аварии были совершенно невероятные, как мы считаем, ошибки, допущенные операторами АЭС*». В каком режиме работал реактор видно из графиков на рис. 12.5 и 12.6. По всем канонам реактор должен быть заглушен еще более чем за полусутки до взрыва. Это было необходимо и технически безопасно.

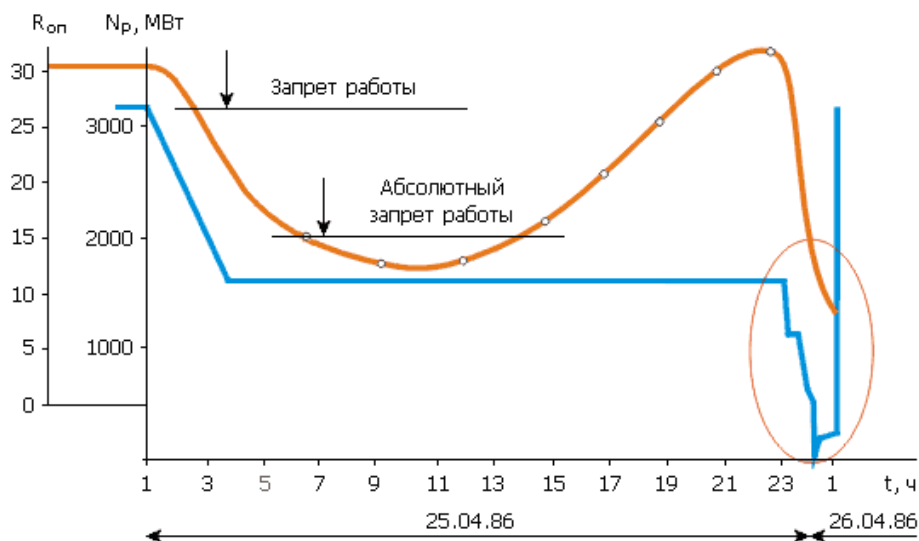


Рис.12.5. Мощность (N_p) и оперативный запас реактивности ($R_{оп}$) реактора 4-го блока на отрезке времени: 25.04.1986 – момент аварии 26.04.1986. Овалом выделен предаварийный и аварийный отрезки времени.

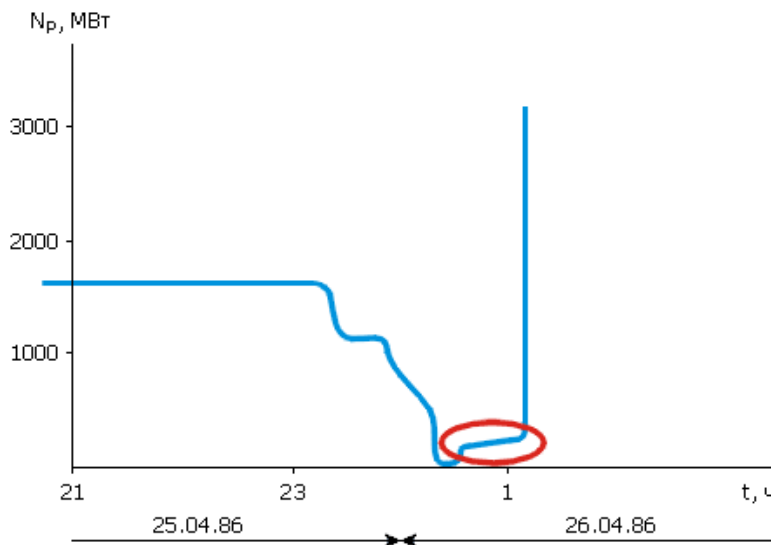


Рис.12.6. Увеличенный участок графика, обведенный овалом, на рис.12.5. (Обратите внимание на постоянный рост мощности реактора вплоть до самого взрыва).

Небольшое отступление и комментарий.

Для характеристики цепной реакции, осуществляемой в атомном реакторе, используют понятие о коэффициенте размножения нейтронов: $K = \frac{N_2}{N_1}$, где N_2

– число нейтронов следующего поколения, а N_1 – число нейтронов предыдущего поколения. При $K=1$ мощность реактора постоянна (критическое состояние), при $K > 1$ она возрастает (надкритическое состояние), а при $K < 1$ уменьшается (подкритическое состояние). Для пуска, поддержания стационарной работы и остановки реактора необходима система регулирования, позволяющая контролируемо изменять величину коэффициента размножения K . В реакторах типа РБМК замедлителем нейтронов служит графит, теплоносителем – вода, а среднее время жизни нейтронов (от рождения до исчезновения) приблизительно равно тысячной доле секунды. При таких малых временах создать надежную систему управления реактором было бы практически невозможно. Однако при делении ядра урана не все нейтроны рождаются мгновенно. Приблизительно 0,7% частиц появляются с запаздыванием в среднем на 12 секунд по отношению к моменту деления. Этого времени достаточно для управления реактором путем механического перемещения регулирующих стержней из материала, хорошо поглощающего нейтроны. Во всех случаях, когда изменение по какой-либо причине коэффициента размножения нейтронов не превышает доли запаздывающих нейтронов, т.е. K меньше 1.007, система регулирования обеспечивает возвращение реактора в критическое состояние. Если же в реактор внесено возмущение, после которого коэффициент размножения превышает 1.007, то система регулирования может не успеть вернуть реактор в критическое состояние, и тогда произойдет разгон (рост мощности) на мгновенных нейтронах. При быстром увеличении K на величину, значительно превышающую долю запаздывающих нейтронов, нарастание мощности может оказаться столь стремительным, что реактор взорвется.

Ядерный реактор, как и многие другие устройства, обладает обратными связями, которые могут быть как положительными, так и отрицательными. *Пример положительной обратной связи:* рост мощности реактора вызывает повышение температуры графита, что, в свою очередь, увеличивает коэффициент размножения нейтронов, а значит и мощность реактора. *Пример отрицательной обратной связи из биологии:* при чрезмерном увеличении численности популяции сокращается ресурсная база. Недостаток пищи приводит к снижению рождаемости, болезням и, как следствие, к сокращению численности популяции. Ресурсная база восстанавливается, и все возвращается на круги своя. Система является саморегулирующейся. Классический пример – модель «хищник – жертва». Технические устройства с сильными отрицательными обратными связями также

являются саморегулирующимися. И, наоборот, в устройствах с положительными обратными связями могут развиваться опасные неустойчивости. Такие устройства способны работать только при наличии системы регулирования, подавляющей обратные связи.

Реактор РБМК в определенных режимах может обладать положительными обратными связями. Поэтому он (как и паровой котел!) должен обладать надежной системой регулирования и защиты. В процессе эксплуатации реактора все возможные быстрые изменения его свойств не должны вызывать увеличения коэффициента размножения нейтронов до величины большей, чем 1.007. В противном случае нельзя исключить неконтролируемого разгона реактора на мгновенных нейтронах с непредсказуемыми последствиями. Другими словами, реактору РБМК необходим гарантированный запас возможности для работы регулирующих устройств (отсюда большое число регулирующих стержней). Коэффициент размножения нейтронов K растет при повышении температуры графита и при перегреве воды, с переходом последней из жидкого состояния в пар в количествах избыточных, относительно регламента.

Еще раз взгляните на рис. 12.5 и 12.6. В условиях непродуманного эксперимента, при отключенных системах защиты и запредельно малого запаса оперативной реактивности $R_{оп.}$ (не более 6...8 оставшихся управляющих стержней!) персонал потерял необходимый уровень мощности реактора. Пытаясь поднять его мощность в режиме неустойчивости, действия персонала привели к тепловому взрыву реактора. Строго говоря, в действительности последовательно произошли два взрыва с интервалом $\approx 10 - 20$ секунд.

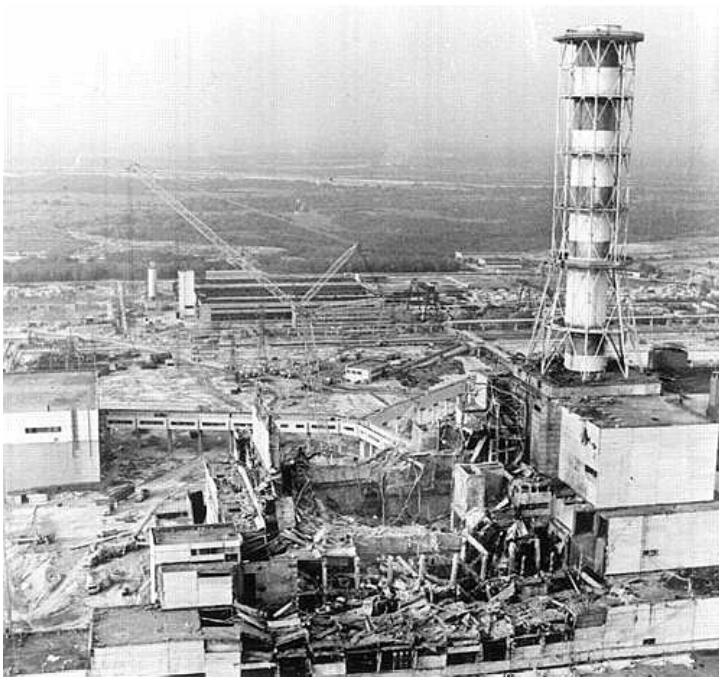


Рис. 12.7. Фото 4-го блока ЧАЭС после аварии.

Неуправляемая цепная реакция в реакторе 4-го блока началась, скорее всего, в небольшой части юго-восточного квадранта активной зоны на высоте от 1,5 до 2,5 м от основания реактора и вызвала местный перегрев охлаждающей воды. Когда давление пароводяной смеси превысило пределы прочности циркониевых труб технологических каналов, они разорвались. Перегретая вода почти мгновенно превратилась в пар высокого давления. Этот пар, расширяясь, подтолкнул массивную 2500-тонную крышку реактора

вверх. Двигаясь вверх, крышка последовательно, как в домино, разорвала остальную часть технологических каналов. Многие тонны перегретой воды почти мгновенно превратились в пар, и сила его давления уже довольно легко подкинула «крышку» на высоту 10...14 метров. В образовавшееся жерло ринулась смесь пара, обломков графитовой кладки, ядерного топлива, технологических каналов и других конструкционных элементов активной зоны реактора. Крышка реактора развернулась в воздухе и упала обратно ребром, раздавив верхнюю часть активной зоны и вызвав дополнительный выброс радиоактивных веществ в атмосферу. Следовательно, «первый взрыв» представлял собой процесс разрушения активной зоны реактора перегретым паром.

Параллельно с этими механическими процессами в активной зоне реактора начались различные химические реакции. Из них особый интерес вызывает экзотермическая пароконденсационная реакция. Она начинается при 900°C и бурно проходит уже при 1100°C . Расчеты показали, что в условиях аварии в активной зоне реактора 4-го блока только за счёт этой реакции в течение 3 секунд могло образоваться до 5000 м^3 водорода.

Перемешавшись с воздухом центрального зала, водород образовал детонационную воздушно-водородную смесь, которая затем взорвалась, скорее всего, от случайной искры или раскалённого графита. Сам взрыв, судя по характеру разрушений центрального зала, носил бризантный и объёмный характер, аналогичный взрыву известной «вакуумной бомбы».

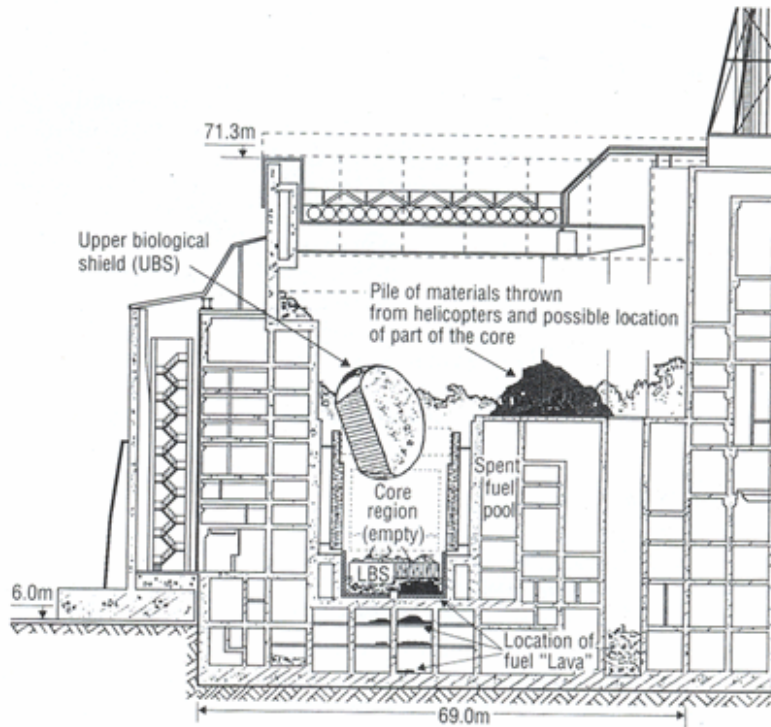


Рис.12.8. Схема 4-го блока ЧАЭС после аварии.

Именно он и разнес вдребезги крышу, центральный зал и другие помещения 4-го блока. Значительная часть расплавившегося топлива и конструкционных материалов в виде лавы перетекли в подвальные помещения под реактором.

Согласно официальным данным, в результате взрыва и последующего девятидневного горения графита в окружающую среду было выброшено 3,5% от содержащихся в реакторе радиоактивных осколков деления. Это вызвало опасное загрязнение значительных территорий.

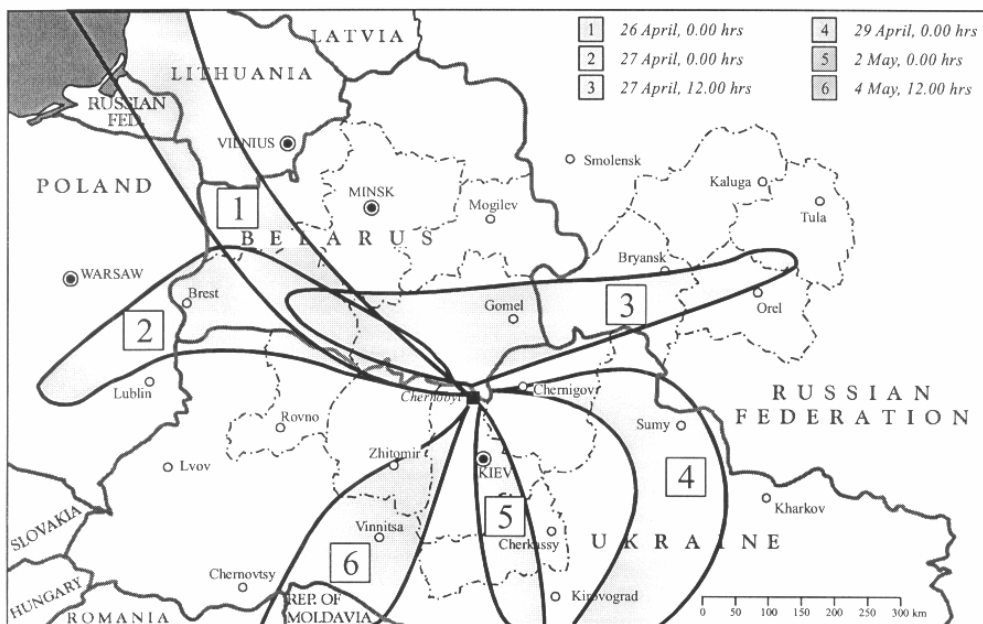


Рис. 12.9. Роза ветров в Чернобыле 26.04 – 04.05 1986 г.

[UNSCAR Report (2000), Annex J.]

Радиоактивные газы и пыль первоначально были вынесены в западном и северном направлении. В последующие дни ветер менялся по всем направлениям. Загрязнение радионуклидами определялось первоначально выпадениями из радиоактивных облаков, которые причудливо перемещались на обширной территории. Главные радионуклиды, формирующие дозовую нагрузку: ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs .

Среди них ^{131}I является короткоживущим ($T_{1/2}=8$ суток), но он быстро переносится в биосфере через воздух, молоко, листовые овощи и легко усваивается организмом человека, концентрируясь в щитовидной железе и обеспечивая интенсивное локальное облучение организма. Изотопы цезия более долгоживущие: ^{134}Cs – $T_{1/2}=2$ года, ^{137}Cs – $T_{1/2}=30$ лет. Они формируют дозовую нагрузку как за счет внутреннего облучения при попадании в организм с пылью, водой и пищей, так и внешнего облучения от выпадений на землю.

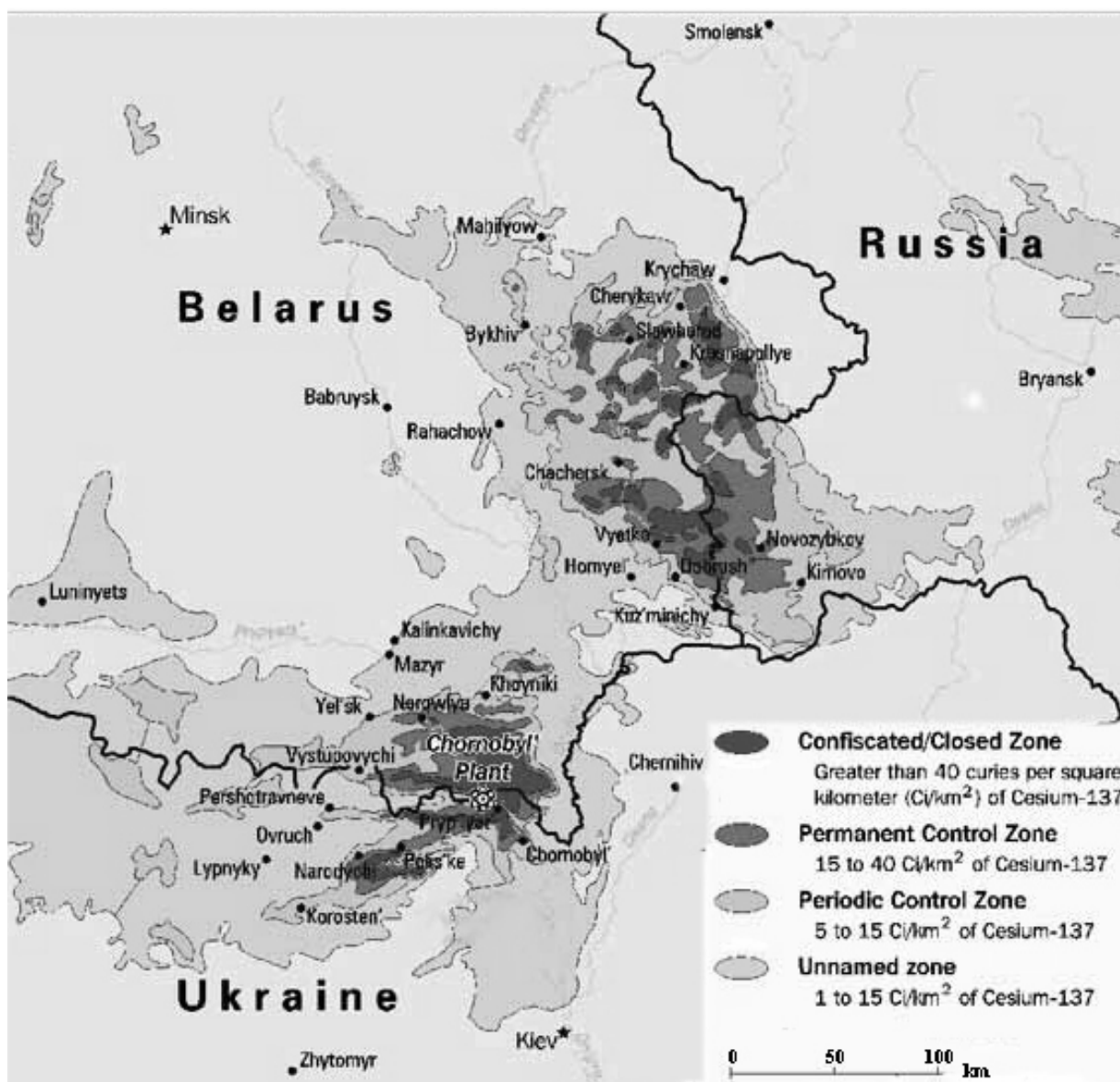


Рис.12.10. Карта загрязнений территорий после аварии на ЧАЭС.

Чернобыльская авария – это плата за прогресс техники и человеческого общества в целом. Исторически так было всегда. Мы и сейчас платим дань за овладение огнем, электричеством, за создание автомобилей, самолетов, кораблей, гидроэлектростанций, разнообразных заводов, современной военной техники и многого др., но не запрещаем всего перечисленного, полагая, по-видимому, имеющиеся риски приемлемыми.

Безусловно, что использование энергетических установок на ядерном топливе, должно быть хорошо обосновано с точки зрения безопасности. Так, Национальное агентство США с учетом принципов безопасности, прогнозирует возможное число смертельных исходов и травм среди 15 млн. жителей 32-километровых зон вокруг 100 ядерных реакторов, действующих на территории Америки, в год. В результате дорожно-транспортных происшествий может погибнуть 4200 человек и 375000 получить ранения. В результате драк – 1500 смертей и 75000 раненых. От электрического тока может погибать 90 человек в год, а от удара молнией – 8. Возможное число смертельных исходов от аварии реакторов прогнозируется как 0,3. Еще 6 человек могут получить травмы. Вероятность крупного бедствия на реакторах 100 АЭС, которая повлечет за собой 100 и более смертельных случаев, рассчитана как 1 раз в 10000 лет.

Скептики, сталкиваясь с подобными прогнозами, апеллируют к последствиям аварии на ЧАЭС. Ее масштабность и уникальность произвели мощное эмоциональное воздействие на человеческое сообщество, которое все еще не осмыслило соотношения «риск – цена – польза» для ядерной энергетики. Это обусловлено и тем, что в ней пострадали не только персонал и тушившие пожар пожарные, но и большая когорта ликвидаторов и не связанное с атомной проблематикой гражданское население². Обращаю внимание читателей на публикацию Б. Горбачева³ и публикацию UNSCEAR⁴.



Рис. 12.11. Ликвидаторы.



Рис. 12.12. Ликвидатор академик В.А. Легасов.

Зафиксированные официальные данные. Лучевые поражения получили только те лица, которые в момент аварии непосредственно принимали участие в ее локализации, 2 человека погибли в момент аварии, 29 человек скончались в больнице, у 203 была установлена лучевая болезнь разной степени тяжести, из них 172 были выписаны в хорошем состоянии. Всего было госпитализировано 300 человек. Случаев проявления лучевой болезни среди населения зарегистрировано не было.

² Чернобыльская авария – 13 лет после катастрофы. <http://www.ibrae.ac.ru/russian/13let.html>.

³ Б. Горбачев. Чернобыльская авария (Причины, хроника, события, выводы). (Подробная и аналитическая публикация от 22 декабря 2002 - см. Электронную библиотеку Мошкова).

⁴ UNSCEAR Report (2000), Annex J.

Таблица 12.1. Суммарное загрязнение европейских стран ^{137}Cs от чернобыльской аварии.

Страна	Площадь, 10^3 км^2		чернобыльские выпадения		
	страны	территории с загряз. выше 1 Ки/км^2	ПБк	кКи	% от суммы выпадений в Европе
Австрия	84	11.08	0.6	42.0	2.5
Белоруссия	210	43.50	15.0	400.0	23.4
Вел. Брит.	240	0.16	0.53	14.0	0.8
Германия	350	0.32	1.2	32.0	1.9
Греция	130	1.24	0.69	19.0	1.1
Италия	280	1.35	0.57	15.0	0.9
Норвегия	320	7.18	2.0	53.0	3.1
Польша	310	0.52	0.4	11.0	0.6
Россия (европ. часть)	3800	59.30	19.0	520.0	29.7
Румыния	240	1.20	1.5	41.0	2.3
Словакия	49	0.02	0.18	4.7	0.3
Словения	20	0.61	0.33	8.9	0.5
Украина	600	37.63	12.0	310.0	18.8
Финляндия	340	19.00	3.1	83.0	4.8
Чехия	79	0.21	0.34	9.3	0.5
Швейцария	41	0.73	0.27	7.3	0.4
Швеция	450	23.44	2.9	79.0	4.5
Европа в целом	9700	207.5	64.0	1700.0	100.0
Весь мир			77.0	2100.0	

Наиболее загрязненные территории достались на долю Украины, Беларуси и России (Брянская, Калужская, Тульская, Орловская области). С некоторых из них жителей отселяли: 116 тыс. – из 30-ти километровой зоны и 220 тыс. – с других территорий. Статус ликвидаторов получили ≈ 600 тыс. человек. Следовые загрязнения от взрыва на ЧАЭС зафиксированы на территории всего Северного полушария и даже в некоторых районах Южного полушария.

Ниже – приведены сведения о загрязнении территории России.

Таблица 12.2. Зонирование территории России, подвергшейся загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС, в соответствии с Законом РФ (по состоянию на 01.01.1999 г).

Область	Зона проживания с льготным соц.-эк. статусом		Зона проживания с правом на отселение		Зона отселения	
	Нас. Пункт	жителей, тыс. чел.	Нас. Пункт.	жителей, тыс. чел.	Нас. Пункт	жителей, тыс. чел.
Брянская	539	172	237	133	194	78.6
Калужская	284	88	68	4.4		
Орловская	885	142	15	0.5		
Тульская	1184	719	121	31.9		
Белгородская	79	74				
Воронежская	79	33				
Курская	168	119				
Ленинградская	29	8.4				
Липецкая	75	36				
Респ. Мордовия	16	11				
Пензенская	33	10				
Рязанская	320	123				
Тамбовская	7	2				
Ульяновская	5	2.8				
Итого	3703	1540.2	441	169.8	194	78.6

Наиболее загрязненная территория России – Брянская область.

С первых дней после аварии на Чернобыльской АЭС в целях снижения доз облучения населения на всех загрязненных территориях осуществлялись следующие мероприятия: переселение, дезактивация и захоронение радиоактивных отходов, ограничение доступа на загрязненные территории и прекращение хозяйственной деятельности, специальные меры в сельском и лесном хозяйстве, ограничение потребления загрязненных продуктов питания и другие.

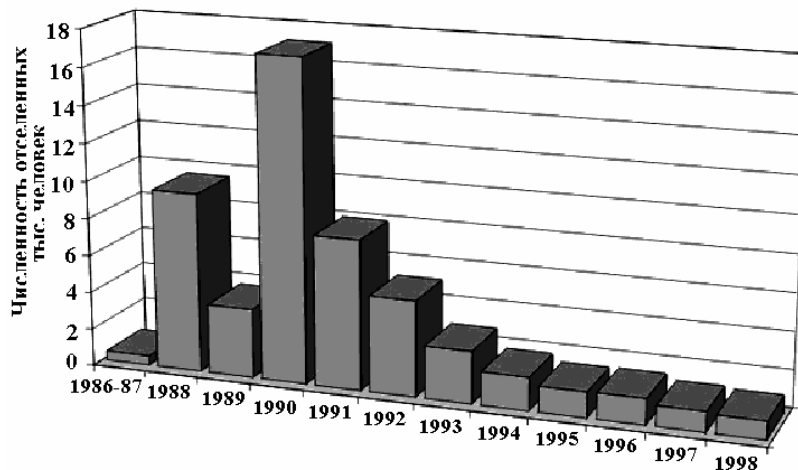


Рис. 12.13. Динамика отселения жителей из населенных пунктов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению, тыс. чел.

Реализованный комплекс защитных мер обусловил значительное снижение доз облучения населения (см. рис. 12.14).

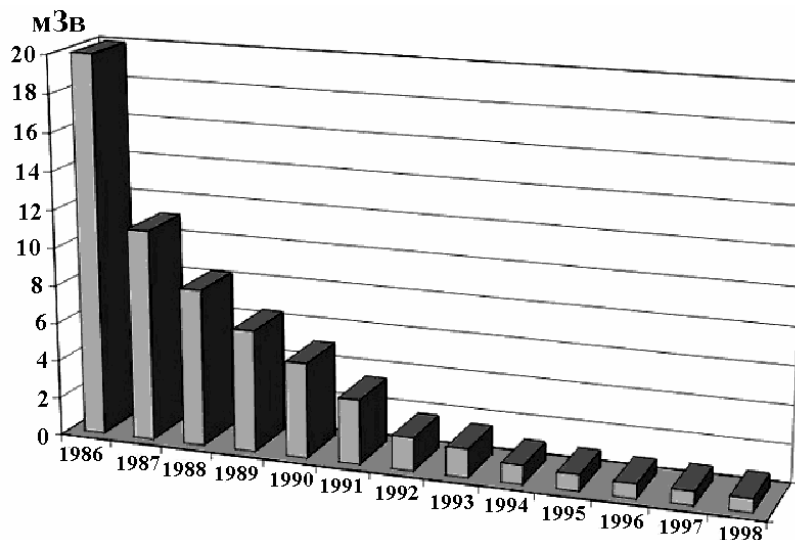


Рис. 12.14.. Динамика средних годовых доз облучения населения, проживающего в зоне загрязнения 15-40 Ки/км²

Для обеспечения учета лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие аварии на ЧАЭС, создан Российский государственный медико-дозиметрический регистр (РГМДР) (рис. 12.15). Число зарегистрированных в РГМДР лиц, подвергшихся радиационному воздействию после чернобыльской катастрофы, составляет свыше 500 тыс. человек (в т. ч. около 170 тыс. ликвидаторов). Регистр предусматривает регулярную диспансеризацию и три уровня ведения наблюдения: государственный, областной и районный.

На начало 1999 г в базе данных регистра РФ содержится информация на 508236 человек, из которых 167726 – ликвидаторы, 8709 – эвакуированные, 303602 – проживающие на радиоактивно загрязненных территориях, 18308 – дети ликвидаторов, 9891 – отселенные. Собрана углубленная верифицированная информация на 9961 онкобольных, 8628 умерших, верифицировано 69 случаев заболеваний лейкозом.

В целом невелики и дозы, накопленные за весь после аварийный период. За пределами четырех наиболее загрязненных областей накопленные за 13 лет дозы не превышают нескольких мЗв и сравнимы с годовой дозой фонового облучения (3–4 мЗв). Только у 35 тыс. жителей Брянской области они превышают 50 мЗв (табл. 12.3).

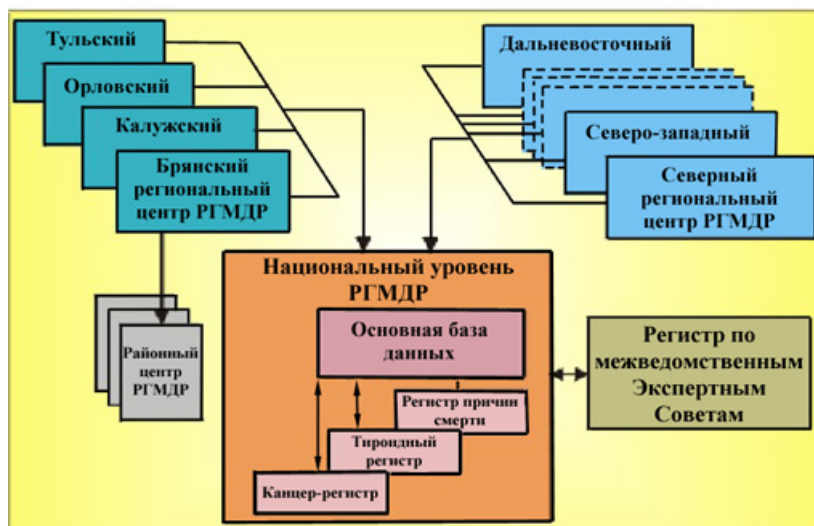


Рис. 12.15. Российский государственный медико-дозиметрический регистр

Таблица 12.3. Распределение населения по накопленной эффективной дозе за после аварийный период (тыс. чел.). *В остальных областях накопленные дозы не превышают 10 мЗв.

Область	Диапазон средней накопленной эфф. дозы, мЗв				
	10–20	20–50	50–70	70–100	выше 100
Брянская	34	191	30	2.6	1.4
Калужская	11	7			
Тульская	43	1.9			
Орловская	2.5				

При координации деятельности федеральных целевых программ, направленным на преодоление последствий радиационных аварий, специалистам МЧС приходится сталкиваться с разительными противоречиями в оценках последствий!

Приведем некоторые примеры.

1. Динамика не стандартизованных (грубых) показателей смертности после 1982 г в наиболее загрязненных областях в целом следует общероссийским тенденциям. При этом как до 1986 г, так и после смертность на территориях Брянской, Калужской, Орловской и Тульской обл. была выше средней по России. Самые высокие значения показателей смертности наблюдались в Тульской области, где самое «старое население». По данным за 1997 г, доля пенсионеров в населении: Тульской обл. – 27,3%; в Брянской – 24,6%; а в целом по России – 20,7%. Показатели смертности в зоне отселения Брянской обл. и в зоне с правом на отселение (Брянская и Тульская обл.) несколько выше областных уровней, но заведомо ниже показателей сельской смертности в этих областях.

1. Деятельность Регистра позволила установить повышенный уровень заболеваемости в когорте ликвидаторов по сравнению с аналогичными показателями контрольной группы (эндокринной системы в 10 раз, психические расстройства в 5 раз, сердечно-сосудистые в 4 раза). При этом отмечена тенденция к повышению заболеваемости эндокринной системы в наиболее молодой группе ликвидаторов (30–34 года). В то же время динамика и показатель смертности среди ликвидаторов в настоящее время характерны для мужского населения России в целом.

3. Отмечается увеличение темпов роста инвалидности у ликвидаторов за период с 1991 по 1994 гг. в 6,6 раза, с 1994 по 1997 гг. – в 1,6 раза. Основной причиной инвалидности являются болезни нервной системы, системы кровообращения и психические расстройства. Самый высокий темп роста инвалидности отмечается в возрастной группе 30–34 года и минимальный – в группе 50–54 года.

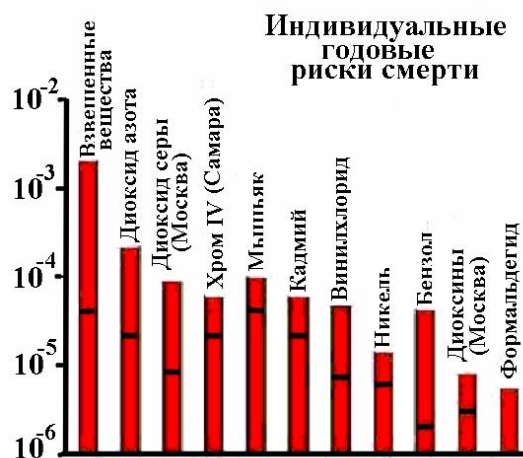
4. Среди населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях, отмечается устойчивая тенденция к росту заболеваемости злокачественными новообразованиями. Установлено, что величина стандартизованных показателей заболеваемости раком щитовидной железы среди населения Брянской, Тульской и Орловской областях по отношению к населению России имеет статистически достоверный рост с 1991 года, то есть после окончания латентного периода. Риск заболеваемости радиогенными раками щитовидной железы среди детей от 0 до 4 лет на момент облучения в 6–10 раз превышает риск для взрослого населения. Наиболее высокий уровень заболеваемости раком щитовидной железы отмечается у населения Брянской и Орловской областей. Однако связь с уровнями загрязнения территории радионуклидами не установлена и требуется проведение дополнительного изучения данной ситуации.

5. Оценка потенциального пожизненного ущерба для здоровья ликвидаторов, обусловленного облучением, сталкивается с маскировкой группы более мощных воздействий нерадиационной природы (социальных и техногенных) – см. табл. 12.4 и рис. 12.16.⁵

Таблица 12.4. Индивидуальные годовые риски смерти для населения России.

Подвержено, млн. чел		Риски
Все причины	85,5 (мужчин)	$2,0 \cdot 10^{-2}$ (среднее за 1996-1998 гг.)
Несчастные случаи	69 (мужчин)	$3,3 \cdot 10^{-3}$ (среднее за 1996-1998 гг.)
Сильное загрязнение воздушной среды	15,2	$1 \cdot 10^{-3}$
Зона отселения ЧАЭС	0,1 (загрязненные районы Украины, России, Белоруссии)	$8 \cdot 10^{-5}$
Население вблизи ГХК, СХК, ПО "Маяк"	0,9	$6 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-7}$
Население вблизи АЭС	0,3	$7 \cdot 10^{-7}$

Рис. 12.16. Риски загрязнения атмосферного воздуха в городах.



⁵ Л. Большов, Р. Арутюнян, И. Линге, О. Павловский. О роли радиационных факторов в экологических рисках для населения России. <http://daily.sec.ru/> Публикация от 15-10-2001

Интересно сопоставить точки зрения наших и зарубежных специалистов:

- Департамент энергии США в период 1977-1987 гг. провел массовые обследования персонала предприятий атомной промышленности, подвергавшегося внешнему облучению от кобальта-60. Были обследованы 39004 из 108 тыс. рабочих, занятых в отрасли, и полученные данные тщательно сопоставлены с результатами обследования контрольной группы из 33352 (из 700 тыс.) рабочих неядерных отраслей. Вывод: смертность среди получивших высокие дозы облучения, составила 76% от смертности в контрольной группе. Д-р Т.Д. Лаки (1997) обобщил все доступные данные по заболеваемости рабочих ядерных отраслей промышленности США и пришел к выводу, что среди них частота заболевания раком составляет 52% от частоты заболевания среди рабочих неядерных отраслей. Группа ученых Health Physics Society (1996) высказали мнение, что поиск отклонений от нормы в здоровье людей, получивших дозу 50 мЗв за год сверх ЕРФ, следует считать спекулятивным.

Большое внимание общественности привлек показ фильма: Е. Масюк. «Чернобыль. Трагедия и бизнес», НТВ, 1999 г. В нем утверждалось, что за 13 лет после аварии погибло от лучевой болезни 100 тыс. человек, а от последствий чернобыльской аварии – еще 200 тыс. человек. Практически одновременно в журнале «Медицинская радиология» (№1, 1999) опубликована статья д-р З. Яворовски. В ней радиологические последствия аварии оцениваются как очень ограниченные (см. табл. 12.5) в сравнении с другими техногенными катастрофами.

Таблица 12.5. Чернобыль: последствия для здоровья.

З. Яворовски (член Научного комитета по действию атомной радиации ООН)	Е. Масюк (журналистка)
... от лучевой болезни в ранние сроки погиб 31 человек и за 10 лет умерло еще 14. Риск фатальных онкозаболеваний среди населения не более 670 человек.	... за 13 лет от лучевой болезни погибло 100 000 человек, а от последствий чернобыльской аварии – еще 200 000 человек.

Общие потери человеческих жизней, уже состоявшиеся и ожидаемые в будущем, в результате воздействия радиации, ученый оценивает менее чем в 1000 человек. В 4-х авариях на нефтепроводах (1985-1995

гг.) в Мексике, Бразилии и России погибло свыше 2000 человек. В результате аварии на химическом заводе (Бхопал, Индия) погибло 1800 человек. За последующие 10 лет умерли еще 15000 человек; общее число пострадавших ≈ 200000 человек. Огромное число людей погибает в катастрофах на морском, авиационном и автомобильном транспорте. Заметим, что только в России от автотранспорта ежегодно гибнет 35000 человек, а в пять раз больше являются пострадавшими.

Большинство международных организаций, объединяющих специалистов в области воздействия радиации на здоровье, таких как Международная комиссия радиационной защиты, МАГАТЭ, Всемирная организация здравоохранения, Научный комитет по действию атомной радиации ООН ([UNSCEAR Report \(2000\), Annex J](#)) придерживаются близких к изложенным д-р Яворовски взглядов. К радиологическим последствиям чернобыльской аварии может быть отнесено только увеличение злокачественных новообразований щитовидной железы наблюдаемое, в загрязненных районах Белоруссии, России и Украины. Но и в данном случае многие специалисты находят объяснение этому факту в принципиальном улучшении методов диагностики. В качестве доказательств д-р Яворовски приводит такие факты: «... в нормальной популяции число клинически диагностируемых раков ЩЖ варьирует в пределах 1–20 сл. на 100 000 чел. в год. Но скрытые новообразования, т.е. обнаруживаемые лишь при гистологических исследованиях, составляют 6000–35000 сл. на 100 000 чел. в год, а у детей до 15 лет – 2500 сл. Поэтому за счет совершенствования методов диагностики возможности

выявления "радиационно индуцированных" раков ЩЖ поистине безграничны. Прецедент такого рода уже имел место в США в 70-х годах, когда проводилось скрининговое обследование лиц, у которых в медицинских целях облучались голова и шея. В период наиболее активного скрининга в 1974–1979 гг. частота выявления доброкачественных и злокачественных опухолей ЩЖ была в 21 раз выше, чем в другие годы».

У многих специалистов вызывают удивление данные по заболеваемости и инвалидности участников ЛПА на ЧАЭС. Дозы, полученные подавляющим большинством участников ЛПА, даже в 1986 году в большинстве случаев не превышали 100 мЗв (табл. 12.6).

Таблица 12.6. Средние индивидуальные и коллективные дозы по различным контингентам свидетелей и участников ЛПА на ЧАЭС в 1986 г. (Ретроспективная дозиметрия участников ЛПА, Киев, 1996 г.)

Контингент	Общая числ., чел.	Объем выборки, чел.	Кол-во лиц с определенной дозой, %	Средняя доза, Гр	Колл. доза, чел·Зв
Пациенты 6-й клинич. больницы	133	133	100	3.4	450
Охрана ЧАЭС)	658	658	100	0.56	370
Персонал ЧАЭС	2 358	2 358	100	0.087	210
УС-605	21 500	8 750	41	0.082	1 760
ПО "Комбинат"	31 021	26 296	—	0.0065	200
Военные	61 762	61 762	—	0.11	6 800
Все контингенты	117 432	—	—	0.083	9 800

Дозы, полученные черныбыльцами, можно сравнивать с профессиональным облучением работников атомной отрасли, как в России, так и в других странах. Эти работники, а их сотни тысяч, в течение профессиональной деятельности получили дозы до 50 мЗв/г, т.е. 100 мЗв за два-три года, а в целом за время работы до 1500 мЗв. Однако многочисленные

обследования этих контингентов, как правило, выявляли только один эффект, который получил название эффекта здорового рабочего. То есть общие показатели здоровья работников были выше, чем в других отраслях.

Еще более категоричны отдельные специалисты в оценке здоровья детей участников ЛПА. Широкомасштабные исследования, выполненные на когорте потомков лиц, подвергшихся до зачатия острому радиационному воздействию при взрывах атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки, к настоящему времени не выявили нарушения репродуктивной функции, учащения врожденных пороков, отклонений в физическом развитии, изменения частоты синдрома Дауна и других показателей. В 1998 г в России была опубликована монография, посвященная оценке здоровья и поиску генетических эффектов облучения лиц репродуктивного возраста. Исследовалось здоровье детей и внуков работников ПО «Маяк» – предприятия, где дозы облучения персонала в первые годы работы были очень высоки. Средние дозы персонала радиохимического завода в 1951 г составляли 1133 мЗв/г. Упомянутым исследованием, проводившимся с 50-х до середины 90-х годов, показано, что распространенность и структура отклонений у детей и внуков лиц, подвергавшихся хроническому, профессиональному облучению до зачатия, в основном, совпадали с таковыми в контроле и соответствовали данным национальной статистики. Потомки профессиональных работников ПО «Маяк» болели обычными болезнями и не имели какой-либо специфической патологии.

Таблица 12.7. Дозы облучения населения вокруг предприятий Минатома России в 1993-1996 гг.

Предприятие	Облучаемое население, тыс. чел.	Годовая эффективная доза, мЗв/год		
		Внешнее	Внутреннее	Сумма
ПО "Маяк"	320	0,01	0,10	0,11
ГХК	200	0,03	0,02	0,05
СХК	400	0,0004	0,005	0,0054

Многими специалистами производится сопоставление чернобыльских доз с дозами облучения от других источников (рис.12.17). Действительно, за исключением нескольких десятков населенных пунктов дозы дополнительного облучения являются лишь малой добавкой к фоновому облучению. А последние варьируются от 3 до 10 и более мЗв/год. Причем зачастую районы с сильно повышенным естественным фоном в течение десятилетий и столетий являлись и являются признанными курортами (Кавказские минеральные воды, Карловы Вары и др.).



Рис. 12.17. Влияние доз облучения от различных источников.

В части воздействия радиации на окружающую среду также можно сопоставить последствия чернобыльской аварии с влиянием некоторых промышленных объектов. Подобное сравнение показывает, что негативное влияние аварии на одну из наиболее чувствительных к радиоактивному загрязнению экосистем — лес оказалось весьма ограниченным.

Таблица 12.8. Влияние на окружающую среду (лес).

Чернобыльская авария	Промышленные объекты
Радиационное поражение затронуло не более 5% площади лесов 30-км зоны. Погибло 560 га леса.	Комбинат "Североникель": на месте леса образовалась техногенная пустыня площадью 7 000 га. Норильский горнометаллургический комбинат: в его округе погибло 600 000 га леса.

Некоторые итоги.

Анализ последствий катастрофы проводился и проводится как на государственном, так и на международном уровне. В 1990 г начал работу Международный наблюдательный комитет в составе 19 человек под председательством профессора Итцуо Шигемацу – директора Исследовательского центра радиационных эффектов в Хиросиме, который с 1950 года наблюдает и анализирует здоровье людей, выживших после взрывов атомных бомб. В районе Чернобыльской аварии побывало около 200 независимых экспертов из 23 стран и 7 международных организаций. Лаборатории разных стран, в том числе из Австрии, Франции и США помогали нашим ученым анализировать и оценивать собранный материал. В результате появился Международный Чернобыльский Проект, выводы которого стали достоянием ученых и специалистов всех стран.

Оказалось, оценки уровня радиации на «зараженной» территории, полученные нашими приборами, оказались сильно завышенными по сравнению с международными оценками. Суммарно внешняя и внутренняя дозы облучения по нашим данным составили 150-400 мЗв, то по оценке западных экспертов 80-160. Жители этих районов, как показали двухмесячные измерения, только в 10% случаев получили экспозицию выше минимального определяемого уровня 0,2 мЗв, а годовая доза не превысила естественный уровень радиационного фона –1,2 мЗв.

Но кто бы и что бы ни говорил, на загрязненных территориях фиксируются многочисленные отклонения в состоянии здоровья населения. Эти отклонения обусловлены как радиацией, так и другими причинами, в первую очередь – низким социально-экономическим уровнем жизни.

В материалах Международного Чернобыльского Проекта записано: *«Катастрофа вызвала и продолжает вызывать значительные психологические последствия, такие как страх и обеспокоенность, которые распространены широко за пределами зараженной зоны. Эти последствия обусловлены социо-экономическими и политическими последствиями изменений в СССР... Многие из клинических исследований проведены на низком уровне и дали ошибочные или противоречивые результаты в связи с отсутствием соответствующего оборудования, хорошо подготовленных специалистов и научной информации».*

Приведем анализ заболеваемости ликвидаторов, наблюдавшихся в Ростовском мединституте. Они мало отличаются от данных, которые получены в других регионах. В структуре заболеваемости первое место с большим отрывом от других патологий занимают болезни нервной системы и органов чувств – (34%). На втором месте – болезни органов дыхания (19%). На третьем болезни органов пищеварения (10%). Истинных радиационно-индуцированных патологий, а не их мимикрические симптомы, выявлено не было – лейкозов, радиационных гиперплазий щитовидной железы или помутнения хрусталика. Все выявленные в процессе обследования ликвидаторов заболевания связаны с нейроциркулярной и вегетососудистой дистонией, в результате которых развивается гипертрофия межжелудочковой перегородки, ишемические и стенические нарушения сердечной мышцы. Предположение о том, что инкорпорированные радионуклиды могут быть причиной подобных нарушений, впоследствии не подтвердилось.

Причина, и, вероятно основная, была названа авторами Международного проекта, которые отметили, что в случае Чернобыля, как и после других радиологических инцидентов, преобладают психологические эффекты. Природа этих эффектов достаточно сложна. Среди множества факторов, ведущим можно назвать радиофобию, ибо человек, присутствующий в опасной зоне, исторически ассоциирует себя с жертвой ядерного взрыва и ожидает для себя подобных же последствий. Такие негативные психологические состояния эксперты отмечали у жителей и загрязненных, и незагрязненных радиацией районов.

Одной из наиболее общих реакций организма на неадекватное воздействие каких-либо факторов внешней среды является стресс. Длительный стресс разбалансирует почти все важные системы организма, в том числе и нервную систему, вызывает в организме изменение гормонального статуса. Это снижает уровень иммунной защиты (особенно у мужчин) и увеличивает риск инфекционных заболеваний. Стрессы возникают как результат фобий – страхов. Можно выделить две основные формы – фобии неосознанные (инстинкты, заложенные природой) и фобии внушенные (страх перед начальством, Законом или радиацией). Единственный способ избавления от фобий – приобретение знаний, которые позволяют избежать опасности внезапного столкновения с каким-то неизвестным фактором и даже обратить его в свою пользу. Это единственная возможность затормозить развитие последовательности «Страх – Стресс – Смерть».

Другими словами, налицо т.н. «медицинские проявления» серьезного стресса населения. Поэтому важно устранить его причину, основа которой – серьезные ошибки в информировании населения. Это многократно проанализированное замалчивание проблемы сразу после аварии и обвал зачастую недостоверной, преувеличенной информации в конце 80-х годов.

Оценить реальные последствия чернобыльской аварии должны специалисты, однако уже сейчас ясно, что воздействие неадекватной информации СМИ наносит ущерб не меньший, чем собственно воздействие радиации.

Свежие дополнения:

1. Прежде всего, А.К. Гуськова о Чернобыльской аварии: *«Мне позвонили из медсанчасти. Говорят, на станции пожар, слышны какие-то взрывы. Вдруг связь забивается, слышно плохо. Это было через час после взрыва, то есть в половине третьего ночи. Наверное, я первой в Москве узнала о случившемся. Сразу же позвонила дежурному Третьего Главного управления Минздрава, сказала, что мне нужна хорошая связь с Чернобыльской АЭС, и попросила прислать машину. Вскоре я уже была в управлении. Оттуда связь лучше. Получила сведения о пострадавших. Рвота, краснота на теле, слабость, у одного пациента понос, то есть типичные признаки острой лучевой болезни».*

«В Москву (больница №6) двумя самолетами были доставлены 207 человек, в том числе 115 с первоначальным диагнозом острой лучевой болезни, подтвержденным впоследствии у 104-х. В Киев с подозрением на ОЛБ поступили около 100 человек (диагноз был верифицирован у 30). Позднее клиника ИБФ приняла еще 148 человек из числа первых участников, вызванных для расследования причин и минимизации последствий аварии. В ближайшие 2-3 года клиника продолжала лечение и обследование в стационаре ежегодно около 100 больных ОЛБ (повторно). Амбулаторные консультации получили в 1986 году 800 пациентов, дозиметрические исследования на спектральное излучение тела человека, определяющее наличие гамма- нуклидов, - 1200 человек. Всего за 4 года число обследованных составило соответственно 1119 и 3590».

Журналист: «...вокруг этих цифр споры идут до сих пор...». А.К.: «Среди специалистов - нет. Сейчас, к сожалению, находятся люди, которые перекраивают прошлое. Но реальность, жестокая реальность осталась в памяти до мельчайших подробностей. Умерло 27 человек. Выжило 10 из тех, кого мы считали безнадежными, в том числе двое очень тяжелых, которым мы вводили костный мозг. Некоторое время они жили с пересаженным костным мозгом, потом постепенно наступило его отторжение и восстановление собственного кроветворения. Всего было 13 пересадок».

Журналист: «Нелепостей в Чернобыле было много. Но все выполняли главную задачу - быстрее ликвидировать беду»! А.К.: «А для этого нужен был трезвый расчет. Один австрийский ученый при обсуждении чернобыльской трагедии в Вене в 1986 году

спросил: «"Надо ли было нагонять столько людей в Чернобыль? Был ли продуман план ликвидации аварии?" Что можно было тогда ответить на такие вопросы?»!

Журналист: «А сейчас»? *А.К.:* «Надо анализировать все, что делалось в Чернобыле. Ясно, к примеру, что было много лишних заходов вертолетчиков. Они совершили 1200 вылетов, низко опускались над реактором. Один экипаж погиб - вертолет упал в реактор. И такое было. Безусловно, следовало более жестко регламентировать число привлеченных людей, тщательно контролировать уровни доз. Многие рисковали, на мой взгляд, напрасно».

Журналист: «Могли бы вы подвести какие-то медицинские итоги аварии в Чернобыле? Хотя бы в вашей области»? *А.К.:* «В отношении диагноза лучевой болезни и помощи пострадавшим, думаю, все делалось на высоком уровне. И мир это оценил. В 1988 г, когда подводились первые итоги ликвидации аварии, ученые из разных стран пришли к единодушному выводу, что мы приложили максимум усилий, чтобы помочь людям. Мы правильно оценили предельную дозу облучения для аварийных работ - 25 бэр. Споров, признаюсь, по этому поводу было много, ведь военные установили другую предельную дозу - 50 бэр. Что греха таить, мы подстраховывались, нам нужен был трехкратный запас на возможное превышение регламентных величин».

Журналист: «Но ведь избежать просчетов невозможно!» *А.К.:* «Тем не менее, многое можно и нужно предусматривать! Аварию нельзя запланировать. Но если она случается, то необходимо определять ее масштабы и реальные меры ликвидации последствий. Главное, не посылать в опасную зону сто человек, если достаточно десяти. И еще. Обидно, что были люди, которые вводили общественность в заблуждение и пытались делать на Чернобыле политическую карьеру».

Журналист: «Таких я знаю множество»!

2. В связи с 20-летием аварии на ЧАЭС опубликовано множество «юбилейных» статей⁶.

Некоторые из них представлены в сноске-6. Одни профессиональны и аналитичны. Другие исключительно эмоциональны (по-другому и быть не могло) и по-разному оценивают причины, последствия катастрофы и сложившиеся ситуации для ликвидаторов и населения, как отселенного, так и оставшегося на загрязненных территориях. Читателю рекомендуется вникнуть в сущность физических, технических, биофизических процессов и ситуаций. Одновременно необходимо оценивать и гуманитарную и социальную стороны, ведь живем не на облаке...

⁶ * В.И. Глазко. «Чернобыль 20 лет спустя». Ж. ПРИРОДА, №5, 2006.

* АИФ Здоровье, №04 (441) от 23.01.2003. «Радиофобия: пустые страхи или незамеченная опасность». Беседа с докт. Мед. наук А.Ю. Бушменовым.

* *С.Т. Беляев, "Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы"* Ж. ПРИРОДА № 11, 1990.

*15 ЛЕТ КАТАСТРОФЕ НА ЧАЭС. Мартин РОТКЕВИЧ. <http://www.belgazeta.by/20010421.16/010081302>

*КАТАСТРОФА ИЛИ БЛЕФ? Ярослав РОМАНЧУК. <http://www.belgazeta.by/20010421.16/010090240>

*Чернобыль: самый большой блеф XXI века, материал из журнала Wprost 02.04 2005. Полный текст публикации - <http://liberty-belarus.org>

Глава 13. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Исторически человечество развивалось в условиях естественного радиационного фона (ЕРФ), обусловленного излучениями радиоактивных изотопов, содержащихся в земной коре, и космическим излучением. При этом происходила естественная адаптация организма к радиационной обстановке. В связи с возникновением в середине XX века ядерных технологий произошли значительные локальные изменения радиационной обстановки за счет загрязнения окружающей среды искусственными радиоактивными изотопами. Причиной этого послужили взрывы ядерного оружия, различного рода аварии на ядерных объектах, небрежное отношение к отходам ядерного производства и ряд др. Возник так называемый техногенный радиационный фон, представляющий опасность для нормального функционирования человеческого организма. Появились зоны радиационного риска (ЗРР), где длительное пребывание является нежелательным. Основным признаком зоны радиационного риска является повышенное значение мощности дозы ионизирующего излучения в данном месте. Принято различать три ступени радиационного уровня, представляющих различную степень опасности: фон, соответствующий мощности дозы $0,1 \div 0,2 \text{ мкЗв/ч}$ ($10 \div 20 \text{ мкР/ч}$), считается нормальным; $0,2 \div 0,6 \text{ мкЗв/ч}$ ($20 \div 60 \text{ мкР/ч}$) – допустимым; $0,6 \div 1,2 \text{ мкЗв/ч}$ ($60 \div 120 \text{ мкР/ч}$) – повышенным.

Существуют также естественные зоны радиационного риска: высокогорные районы, местности с выходом на поверхность радоновых источников, гранитных массивов и др. пород. К ЗРР можно отнести салоны находящихся в полете авиалайнеров и цокольные (или подвальные) этажи строений. При полете на высоте до 10 км мощность дозы космического излучения может достигать 7 мкЗв/ч . Во втором случае, опасность исходит от радиоактивных радона-222 и радона-220, являющихся газообразными продуктами распада урана-238 и тория-232, проникающих из грунта через фундамент и пол, а также от β, γ -активного калия-40, входящего в состав строительных конструкций. Длительное пребывание в таких помещениях может обусловить превышение суммарного избыточного облучения по отношению к естественному фону за календарный год в несколько раз.

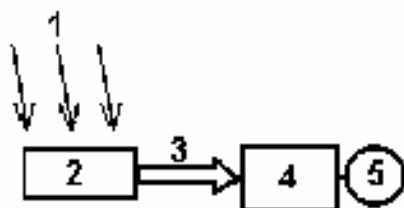
Уже в первые месяцы после открытия радиоактивности исследователи начали замечать вредное воздействие ионизирующих излучений (прежде всего, на кожу). То обстоятельство, что эти излучения непосредственно не воспринимаются нашими органами чувств, для широких кругов населения придало им ореол таинственности, загадочности и, как следствие, особой опасности. Еще бы! Оно на тебя таинственным способом воздействует, а ты даже об этом не подозреваешь! Отсюда возникла двудеиная задача: выявить зоны с повышенным по тем или иным причинам радиационным фоном; определить источники ионизирующих излучений и измерить формируемые ими дозы. Данные проблемы решает одна из ветвей прикладной ядерной физики – радиометрия и дозиметрия.

Экспериментальные методы исследований ядерных процессов основаны на наблюдении эффектов, создаваемых электрически заряженными частицами, движущимися с большой скоростью. В результате столкновений эти частицы ионизируют или возбуждают атомы и молекулы; причем эффекты, вызываемые ионизированными или возбужденными атомами и молекулами, удастся обнаруживать. Частицы, не имеющие заряда (например, γ -кванты, нейтроны), нельзя наблюдать непосредственно, так как они не вызывают ионизации. Тем не менее, исследование этих частиц возможно, поскольку они способны высвобождать из разных веществ вторичные электрически заряженные частицы, которые оказывают ионизирующее действие. Например, γ -кванты могут «извлекать» из электронных оболочек атомов или из ядер быстрые электроны, а нейтроны – освобождать из ядра протоны; и те и другие можно обнаруживать по их ионизирующему действию.

Основа регистрации любого вида излучения – его взаимодействие с веществом детектора. Детектор при этом рассматривается как устройство, на вход которого поступают ионизирующие частицы, а на выходе появляются сигналы. Вещество, представляющее собой чувствительный объем детектора, может быть газом, жидкостью, твердым телом, что и дает соответствующие названия детекторам: газовые, жидкостные, твердотельные.

Для определения дозиметрических характеристик регистрируемого излучения необходимо установить связь между сигналом, сформированным детектором, и дозой (или мощностью дозы) излучения.

Рис.13.1. Принципиальная схема регистрации ионизирующих излучений: 1- излучение; 2- детектор; 3- сигнал; 4- преобразователь сигнала; регистрирующее и показывающее устройство.



В ядерно-физических исследованиях определяют массу, заряд, энергию (скорость) и число частиц. Значения массы, заряда и энергии частиц можно получить, если известны ее пробег (то есть длина пути, пройденного частицей в исследуемом веществе,

например воздухе, до полной потери скорости), энергия, расходуемая на единицу длины пробега, и отклонение частицы во внешнем магнитном поле. Если заранее известна какая-нибудь величина, характеризующая частицу (например, масса), то для идентификации последней требуется меньше данных. Для счета частиц необходимо такое устройство, в котором раздельно регистрируется каждый акт ионизации, вызванной отдельной частицей.

Прежде всего, остановимся на основных экспериментальных методах, применяемых для обнаружения частиц. Для этого используют камеры Вильсона, т.н. пузырьковые камеры и метод ядерных эмульсий (метод толстых фото эмульсий).

Камера Вильсона (1911). Ее принципиальная схема изображена на рис. 13.2. Она заполнена газом с пересыщенным паром. Когда через камеру пролетает электрически заряженная частица, на возникающих на ее пути ионах конденсируются маленькие капельки жидкости, которые можно видеть при боковом освещении (подобно тому, как мы видим освещаемые сбоку частицы дыма от сигареты). Эти капельки столь плотно расположены на пути частицы, что сливаются в один след, благодаря этому траекторию частицы можно наблюдать визуально или фотографировать. Камера имеет стеклянные стенки. Пересыщение водяного пара (или пара другой жидкости) достигается в результате резкого охлаждения газа, которое возникает при быстром движении поршня

(адиабатическое расширение газа). Источник исследуемых частиц (например, радиоактивный препарат) либо помещается в камеру, либо он находится вне ее, и частицы попадают в камеру через окно в ее боковой стенке.

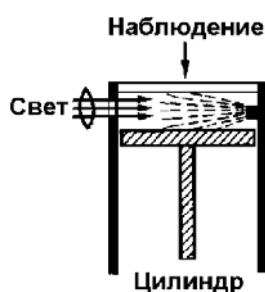
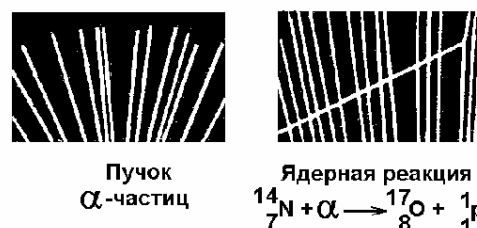


Рис.13.2. Принципиальная схема камеры Вильсона.

Рис.13.3. Треки частиц, зафиксированные в камере Вильсона.



На рис. 13.3 (слева) видны туманные следы пучка α -частиц. Каждый след образован отдельной частицей (ионом He^{2+}). Метод настолько чувствителен, что позволяет непосредственно наблюдать следы ядер и еще более легких частиц (например, электронов). На правой части рисунка видны следы реакции ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$. Путь α -частицы разветвляется в некоторой точке, где произошло ее столкновение с атомным ядром азота. Исходящий из этой точки сравнительно широкий след вызван ядром ${}^{17}_8\text{O}$, а более тонкий след – протоном (при одинаковых условиях туманный след тем шире, чем больше масса частицы). Электрон, вследствие малой массы, оставил бы за собой прерывистый след.

Для точного определения пробега частицы с двух перпендикулярных направлений делают стереоскопические снимки и по ним реконструируют траекторию частицы в пространстве. С целью определения скорости (или кинетической энергии) частицы камеру Вильсона помещают в магнитное поле напряженностью 1–2 тесла (Тл), под действием которого частицы отклоняются от прямолинейного пути. Кривизну траектории измеряют по фотографиям.

Большое преимущество метода камеры Вильсона состоит в том, что он позволяет непосредственно наблюдать отдельные частицы и превращения отдельных атомов. Поэтому и сейчас этот метод, и его разнообразные модификации остаются одними из важнейших средств ядерно-физических и ядерно-химических исследований. Однако метод имеет и недостатки. По техническим причинам состояние пересыщенного пара может поддерживаться только 0,1–0,2 с, то есть регистрация частиц возможна лишь в течение такого короткого времени. После каждого снимка проходит несколько секунд, прежде чем камера возвращается в рабочее состояние, вследствие этого камера Вильсона не позволяет вести непрерывные наблюдения за ядерными процессами. Другой недостаток заключается в том, что время освещения, необходимое для фотосъемки, намного превышает продолжительность ядерных процессов, поэтому не всегда удается достоверно установить, принадлежат ли видимые на снимке следы частиц к одному и тому же процессу или являются результатом различных явлений. Этот недостаток в значительной степени, но не полностью устранен в автоматических камерах Вильсона.

Пузырьковая камера (Глезер, 1952). Принцип ее действия состоит в следующем. В жидкости, нагретой до температуры выше точки кипения, в месте возникновения ионов образуются пузырьки пара. Эти пузырьки можно сделать видимыми подобно каплям тумана в камере Вильсона. Поэтому, если через перегретую жидкость камеры проходит электрически заряженная частица и ионизирует молекулы жидкости, то ее траекторию можно определить по оставшимся после нее пузырькам газа (рис. 13.4).



Рис. 13.4. Следы частиц в пузырьковой камере, наполненной пентаном.

Главное преимущество пузырьковой камеры заключается в том, что плотность жидкости в ней существенно выше, чем плотность газа, заполняющего камеру Вильсона. Общий путь частицы в жидкости во много раз короче, чем в газе (вследствие более частых столкновений с молекулами), поэтому с помощью пузырьковой камеры можно точно проследить за частицами сравнительно высоких энергий вдоль всей длины их пробега. Сначала пузырьковые камеры заполнялись эфиром или пропаном, но относительно сложная структура молекул этих веществ затрудняла интерпретацию процессов ионизации. Поэтому в настоящее время применяют камеры с жидким водородом, в котором эти процессы протекают значительно проще. Водородные камеры позволяют также непосредственно изучать воздействие частиц на протоны. Для исследования частиц очень

высоких энергий используются камеры, содержащие многие сотни литров жидкого водорода.

Метод ядерных эмульсий основан на том, что быстрые электрически заряженные частицы, подобно свету, вызывают изменения в светочувствительном слое фотографической пластинки. После прохождения частицы через микрокристаллы AgBr эмульсии в ней образуется ничтожно малое количество серебра, атомы которого создают центры проявления. После обычного фотографического проявления и удаления неизмененного AgBr, вдоль пути частицы в прозрачной желатиновой эмульсии остаются микроскопические зерна серебра.

Действие корпускулярного излучения на фотографическую пластинку известно давно (сама радиоактивность была открыта благодаря этому явлению). Однако в очень тонких эмульсионных слоях обычных фотографических пластинок траектории частиц не прослеживаются. Для ядерно-физических исследований изготавливают специальные пластинки с относительно толстым (0,1—0,6 мм) эмульсионным слоем, в котором концентрация AgBr значительно больше, чем в обычных пластинках. Проявившиеся на пути частицы зерна серебра лежат здесь достаточно близко друг к другу (в противном случае след частицы оказывается местами разорванным, что нередко приводит к ошибочным заключениям).

Следы, зарегистрированные методом ядерных эмульсий (рис.13.5), изучают и измеряют с помощью бинокулярного микроскопа, который позволяет получить стереоскопическую картину. След частицы тем толще, чем больше энергии теряет частица на данном отрезке пути. Поскольку потеря скорости очень быстрой частицей сопровождается повышением ее ионизационного воздействия, по расширению следа данной частицы можно сделать заключение о направлении ее движения. Масса частицы определяется по ее «рассеянию» на атомах эмульсии, то есть по тому, насколько искривляется ее след (на отрезке пути в 10 см удается обнаружить изменение направления на 0,03 мм). Чем меньше масса частицы, тем больше ее рассеяние. Энергию (скорость) частицы можно также установить по ее отклонению в магнитном поле, но в ядерной эмульсии путь частицы значительно короче, чем в камере Вильсона, поэтому для надежного измерения ее отклонения необходимо очень сильное магнитное поле (до 15 Тл).

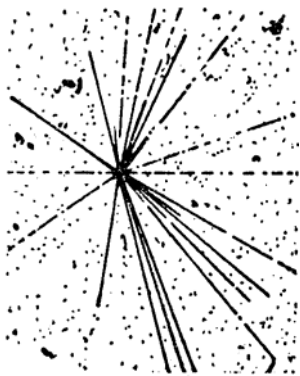


Рис.13.5. Картина взрыва атомного ядра в ядерной эмульсии.

Метод ядерных эмульсий обладает большим преимуществом – он обеспечивает непрерывную регистрацию частиц (на одной пластинке можно зарегистрировать много следов) и длительное хранение их следов. Вследствие большой плотности эмульсии пробеги частиц в ней приблизительно в 2000 раз меньше, чем в воздухе. Поэтому часто путь частицы начинается и заканчивается в эмульсии. Это особенно облегчает идентификацию частиц. Для наблюдений частиц очень высоких энергий готовят специальные *эмульсионные камеры*, в которых «сложено в стопку» много эмульсионных слоев и объем которых составляет от нескольких кубических сантиметров до многих литров. В такой камере можно прослеживать траектории частиц чрезвычайно высоких энергий (их пробег в воздухе составляет многие сотни метров).

Недостаток метода ядерных эмульсий состоит в том, что вследствие сложного химического состава эмульсии трудно установить вид атома, участвовавшего в наблюдаемом превращении. Чтобы исключить эту неопределенность, проводят эксперименты с эмульсиями различного состава. Кроме того, метод ядерной эмульсии требует чрезвычайно продолжительной обработки данных.

Рассмотренные выше экспериментальные методы предназначены для наблюдения траекторий частиц. Однако во многих случаях необходимо подсчитывать число частиц, попадающих за единицу времени в единицу объема или на единицу поверхности. Для этого используются различные *счетчики частиц*.

Ионизационные камеры. Под действием любого ионизирующего излучения в газе из нейтральных атомов и молекул образуются ионы. В обычных условиях образующиеся ионы существуют недолго, они рекомбинируют, т.е. вновь соединяются в нейтральные атомы и молекулы. В электрическом поле они довольно быстро перемещаются к соответствующим электродам.

Ионизационная камера (рис.13.6) представляет собой конденсатор, состоящий из электродов, между которыми находится газ. Электрическое поле создается от внешнего источника. При отсутствии радиоактивного источника ионизации в камере не происходит. Под действием ионизирующего излучения в газе камеры образуются положительные и отрицательные ионы, а в цепи возникает ток.

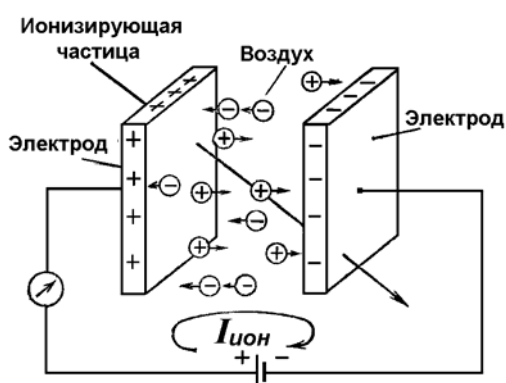


Рис.13.6. Схема включения ионизационной камеры.

Важнейшей характеристикой ионизационной камеры является ее вольтамперная характеристика, представляющая собой зависимость тока, протекающего через нее, от приложенной к ее электродам разности потенциалов.



Рис.13.7. Вольтамперная характеристика ионизационной камеры.

При низком напряжении на электродах ионизационной камеры (участок I) часть электронов и ионов образованных ионизирующим излучением в ее чувствительном объеме, будут находиться в беспорядочном диффузионном движении, препятствующем собиранию их на электродах камеры. При столкновении положительных и отрицательных ионов будет происходить процесс рекомбинации. Эти процессы – диффузия, рекомбинация – препятствуют эффективному собиранию ионов на электродах и уменьшают силу тока, протекающего через ионизационную камеру. По мере увеличения напряжения на электродах камеры ток через нее растет и, наконец, разность потенциалов достигает такой величины, при которой практически все ионы, образованные излучением, достигают электродов. Дальнейшее увеличение разности потенциалов практически не вызывает роста тока через камеру (участок II) при неизменных характеристиках поля излучения. Ток, соответствующий плато на вольтамперной характеристике, называют током насыщения. Именно эта область используется в ионизационных камерах для оценки интенсивности ионизирующего излучения. В области III имеет место т.н. газовое усиление, эффект которого используют в газоразрядных счетчиках.

Газоразрядные счетчики. С увеличением напряженности электрического поля ионизационного детектора будет увеличиваться скорость дрейфа ионов, образованных ионизирующим излучением. Очевидно, что электроны, обладающие небольшой массой по

сравнению с массой положительно заряженных ионов газа-наполнителя, будут двигаться с большей скоростью к собирающему электроду. При достижении определенной разности потенциалов кинетическая энергия ускоренных в электрическом поле электронов достигнет величины, при которой наступит ударная ионизация. Вновь образованные электроны также будут ускоряться в электрическом поле, и производить ионизацию атомов газа-наполнителя. Таким образом, возникает лавинный процесс. В результате общее число ионов лавинообразно возрастает, и каждая частица создает относительно большой импульс тока, который легко зарегистрировать после соответствующего усиления. В этом заключается принцип действия счетчика. Газоразрядные счетчики Гейгера-Мюллера (1919) широко применяются в дозиметрической аппаратуре для регистрации различных видов ионизирующих излучений. Высокая чувствительность, большой выходной сигнал, простота регистрирующих электронных схем, несложность конструкции, малые габариты и удобство в эксплуатации выгодно отличают газоразрядные счетчики от ионизационных камер.

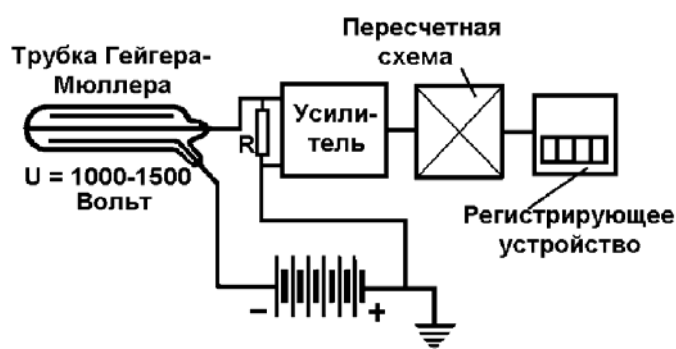


Рис.13.8. Принципиальная схема включения счетчика Гейгера-Мюллера.

Камера счетчика имеет форму трубки. На внутренней стороне ее находится цилиндрический электрод, другим электродом служит металлическая нить, протянутая вдоль

оси цилиндра. Разность потенциалов между электродами составляет 1000–1500 В. Когда в *счетную трубку (трубку Гейгера–Мюллера)* попадает ионизирующая частица, происходит лавинообразный процесс образования ионов, между электродами возникает короткий импульс тока, который подается затем на соответствующий усилитель. Усиленный импульс тока запускает регистрирующее устройство, автоматически считающее импульсы тока, т.е. попавшие в трубку Гейгера–Мюллера заряженные частицы. При благоприятных условиях можно получить очень короткий импульс тока, продолжительностью приблизительно 10^{-5} – 10^{-8} с. Поэтому, в одну секунду удастся сосчитать много частиц. Для успешного счета необходимо, чтобы разряд тока не только быстро развивался, но и столь же быстро гасился. Иначе следующая ионизирующая частица не будет зарегистрирована.

Наибольшее распространение получили самогасящиеся счетчики двух типов:

- наполненные смесью аргона (потенциал ионизации 15,7 В) при давлении 17 кПа и паров этилового спирта (потенциал ионизации 11,3 В);
- наполненные гасящей смесью инертных газов – неона с примесью аргона и одного из галогенов – хлора или брома (до 0,5 %), потенциалы которых (13,2 и 12,8 В) ниже потенциалов ионизации неона (21,5 В) и аргона.

В счетчиках, содержащих добавку спирта, прекращение возникшего разряда под действием вторичных электронов, выбитых с катода счетчика, достигается вследствие диссоциации многоатомных молекул спирта, которые поглощают γ -излучение как от возбужденных атомов аргона, препятствуя тем самым возникновению фотопоглощения на катоде, так и от нейтрализации положительных ионов на катоде счетчика.

Практически только ионы спирта достигают катода счетчика. Это объясняется тем, что ионы аргона в результате столкновений с молекулами спирта нейтрализуются, так как ион аргона имеет больший потенциал ионизации, чем молекула спирта. Положительные ионы спирта, подойдя к катоду на достаточно малое расстояние (10^{-7} см), вырывают из него при нейтрализации электроны и превращаются в возбужденные молекулы, которые диссоциируют гораздо раньше (10^{-13} с), чем испускают излучение (10^{-8} с). И разряд

счетчика гасится. Рабочее напряжение для счетчиков, заполненных аргонем с добавкой паров спирта 700–1600 В.

Время жизни самогасящегося счетчика определяется числом молекул спирта, наполняющих его объем. Обычно счетчик содержит около 10^{20} молекул спирта. При каждом импульсе диссоциируют $\approx 10^{10}$ молекул. Следовательно, продолжительность жизни счетчика составляет около 10^{10} отсчетов. Однако устойчивые гашения, как показал опыт, обеспечивают приблизительно до 10^8 разрядов.

У галогенных счетчиков в результате всех процессов состав смеси не изменяется, поскольку диссоциирующие на атомы у катода молекулы галогенов через некоторое время вновь образуют молекулы. Кроме того, галогенные счетчики имеют небольшое рабочее напряжение 300 – 400 В. К недостаткам следует отнести значительный наклон плато (более 5% на 100 В).

Сцинтилляционные счетчики. Механизм их работы основан на способности некоторых веществ (так называемых фосфоров, например ZnS, NaI, антрацена, и др.) локально испускать свет, когда на них попадают электрически заряженные частицы. Это явление сцинтилляции уже давно известно в связи с исследованиями радиоактивных излучений. После возбуждения, атом сцинтиллятора через очень короткое время (10^{-6} – 10^{-9} с) возвращается в основное состояние, и такой процесс сопровождается излучением света. Это явление удалось применить для автоматического счета частиц (приблизительно в 1947 г) лишь после изобретения фотоэлектронного умножителя. Основной частью счетчика (рис. 13.9) является сцинтиллятор, который под воздействием падающей частицы испускает свет.

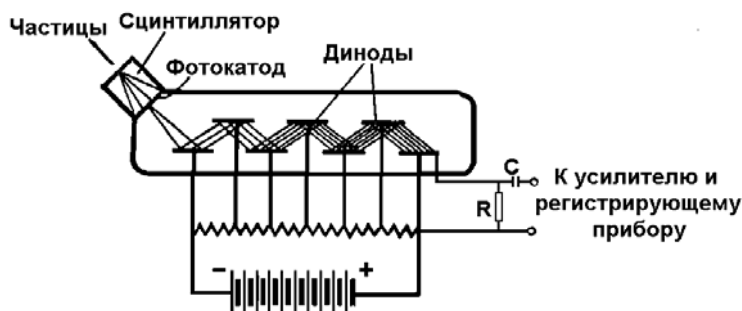


Рис.13.9. Схема работы сцинтилляционного счетчика.

Под действием этого света из т.н. *фотокаатода* в результате фотоэлектрического эффекта освобождаются электроны. Поток фотоэлектронов слишком мал для того, чтобы запустить счетное устройство

(механический счетчик). Однако с помощью умножителя вторичных электронов фототок можно усилить. Фотоэлектроны движутся к расположенному между фотокаатодом и анодом промежуточному электроду (первому диноду), имеющему положительный потенциал по отношению к катоду, поэтому на динод попадают ускоренные электроны. Под их воздействием из первого динода испускается больше электронов, чем из фотокаатода. Освободившиеся электроны ускоряются на пути ко второму диноду, из второго динода освобождается еще больше электронов и т.д. При достаточном количестве динодов число электронов возрастает во много миллиардов раз, и благодаря этому обеспечивается надежное срабатывание счетчика. Большое преимущество сцинтилляционного счетчика состоит в том, что он может разделять частицы, поступающие через очень короткие промежутки времени, т.е. его разрешающее время очень мало (10^{-8} – 10^{-9} с. У обычного счетчика Гейгера–Мюллера оно составляет 10^{-5} – 10^{-6} с). Кроме того, интенсивность сцинтилляций возрастает с энергией частиц, поэтому сцинтилляционный счетчик позволяет определять также и энергию частиц.

Кристаллические полупроводниковые детекторы. За последние десятилетия эти детекторы получили широкое распространение. Существенным составным элементом их является полупроводниковый кристалл, электрические свойства которого, в частности электропроводность, изменяются под действием ионизирующего излучения. В кристаллических детекторах применяются кристаллы кремния и германия с различного

рода добавками для улучшения их полупроводниковых свойств. При регистрации α -излучения пользуются тонкими кристаллами. Для эффективного детектирования γ -излучения, напротив, необходимы толстые кристаллы.

Фотографические детекторы. Их действие основано на способности ионизирующих излучений засвечивать чувствительный слой фотоматериалов аналогично видимому свету. Для детектирования обычно применяют рентгеновские пленки, представляющие собой чувствительную эмульсию, нанесенную с одной или с двух сторон на подложку из прозрачного пластика. В состав чувствительной эмульсии входит бромистое или хлористое серебро, равномерно распределенное в слое желатина. Эмульсия может наноситься также на стекло и бумагу. При воздействии ионизирующих излучений на чувствительную эмульсию образуется так называемое скрытое изображение: на поверхности зерен AgCl или AgBr происходит возникновение «центров проявления» – атомов металлического серебра.

Проявление скрытого изображения заключается в восстановлении металлического серебра в зернах, содержащих центры проявления. Те зерна, в которых образовались центры скрытого изображения, практически полностью восстанавливают серебро при проявлении, что приводит к почернению чувствительного слоя. В результате последующего закрепления происходит растворение и удаление из чувствительного слоя тех кристалликов бромистого или хлористого серебра, которые не содержали центров проявления и в которых, следовательно, не произошло образование металлического серебра. После этого эмульсия становится нечувствительной к действию излучения.

Облученная, проявленная и закрепленная пленка имеет определенную оптическую плотность почернения. Оптической плотностью почернения называется величина

$$S = \lg \frac{I_0}{I}, \text{ где}$$

I_0 – интенсивность видимого света, падающего на обработанную пленку;

I – интенсивность света, прошедшего через эту пленку.

Плотность почернения может изменяться в пределах от 0 до ∞ . На практике приходится определять плотность почернения, величина которой не превышает трех единиц. Почернение пленки может быть измерено с помощью фотометра или денситометра, и по данным этого измерения определяется поглощенная доза X .

Свойства пленки принято определять сенситометрической характеристикой (рис. 30), представляющей собой зависимость плотности почернения S от логарифма дозы X .

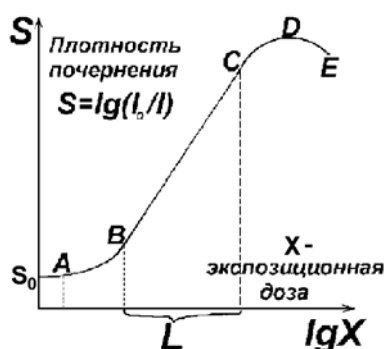


Рис.13.10. Сенситометрические характеристики фотопленки.

Не облученная, но проявленная и закрепленная пленка будет иметь некоторую плотность почернения S_0 , которая называется вуалью пленки. На сенситометрической характеристике можно выделить пять участков: S_0 -A – участок инерции, на этом участке почернение практически не увеличивается с увеличением $\lg X$; AB – область недодержки; BC – прямолинейный участок кривой или область нормальной экспозиции, этот участок является наиболее удобным для дозиметрических целей; CD – область передержки; DE – область соляризации. В последнем случае при увеличении дозы плотность почернения убывает. Соляризация может стать источником грубых ошибок, так как одному и тому же значению почернения соответствуют два различных значения дозы X . Диапазон доз, в пределах которого почернение пропорционально дозе, определяется т.н. ширитой эмульсии L . Угол Θ определяет контрастность пленки: чем больше Θ , тем

выше контрастность. Для того чтобы определить почернение S от действия излучения, необходимо из суммарного почернения вычесть почернение S_0 за счет вуали.

На фотографическом методе дозиметрии основан индивидуальный фото контроль (ИФК) – система контроля доз облучения, получаемых отдельными лицами. Из отечественных пленок для ИФК применяются пленки «Рентген XX» и «Рентген X».

Диапазон измеряемых доз для пленки «Рентген XX» равен 0,05–2 рад, для пленки «Рентген X» – 0,5–15 рад. Погрешность в определении дозы γ -излучения может превышать 30%. На плотность почернения пленки помимо поглощенной дозы влияют различие в чувствительности, различие условий проявления, температура проявителя. Точно нельзя учесть поправки на условия обработки пленки, поэтому все пленки, относящиеся к одной серии, должны обрабатываться одновременно и в одинаковых условиях. Кроме рабочих пленок оставляются контрольные и эталонные пленки. Контрольные пленки служат для определения вуали S_0 , которая должна вычитаться из суммарного почернения S . Эталонные пленки используются для построения градуировочной кривой. Градуировочная кривая зависимости плотности почернения от дозы строится экспериментально для каждой партии пленок при облучении известными дозами. С помощью градуировочной кривой по плотности почернения рабочих пленок определяются индивидуальные дозы.

Для определения плотности почернения S наиболее удобны фотоэлектрические денситометры (рис. 13.11).

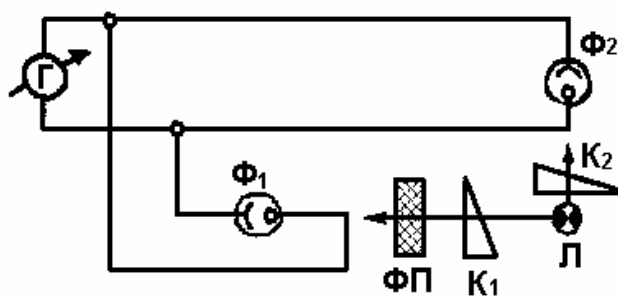


Рис. 13.11. Дифференциальный фотоэлектрический денситометр.

Прибор состоит из фотоэлементов Φ_1 и Φ_2 , включенных по дифференциальной схеме. Свет от источника $Л$ попадает на фотоэлемент Φ_1 через круговой

оптический клин K_1 и исследуемый образец фотопленки $\Phi П$, а на фотоэлемент Φ_2 через компенсационный клин K_2 . В отсутствие пленки обеспечивается равенство токов обоих фотоэлементов и, следовательно, равенство нулю тока гальванометра. Это достигается путем введения перед фотоэлементом Φ_1 определенной оптической плотности с помощью кругового клина K_1 , что соответствует нулевому отсчету по шкале оптической плотности клина. После помещения фотопленки $\Phi П$ освещенность фотоэлемента Φ_1 уменьшится, и в цепи гальванометра появится ток, величина которого пропорциональна плотности почернения пленки. Для возвращения стрелки в нулевое положение следует увеличить освещенность фотоэлемента Φ_1 до прежнего значения выведением клина K_1 на более прозрачный участок. По шкале клина отсчитывается оптическая плотность почернения фотопленки.

К числу достоинств фотографических детекторов следует отнести возможность их массового применения для индивидуального контроля доз, документальность регистрации полученной дозы, возможность совместной и раздельной регистрации дозы от β - и γ -излучений, возможность регистрации дозы нейтронного излучения, невосприимчивость к резкому изменению температур.

Недостатками фотографических детекторов являются малая чувствительность пленок, низкая точность, чувствительность к энергетическому спектру излучений, зависимость показаний от условий обработки пленки и громоздкость такой обработки, невозможность повторного использования облученных пленок.

Радиационный контроль можно разделить на:

- профессиональный-1 – (деятельность персонала напрямую связана с работой на предприятиях Минатома, на АЭС, использованием открытых и закрытых источников излучения);
- профессиональный-2 – (контроль квалифицированным персоналом радиационной безопасности учреждений, не использующих в своей деятельности источники ионизирующих излучений);
- индивидуальный радиационный контроль населения в мирных условиях, при чрезвычайных ситуациях и военных действиях.

Если при работе с радиоактивным веществом имеется опасность облучения, используются либо индивидуальные пленочные дозиметры, которые обычно проверяются в конце каждой недели, или немедленно при подозрении о переоблучении персонала. В этих целях также широко используются карманные γ -дозиметры типа ИД-1. По форме он напоминает авторучку и представляет собой компактное сочетание (электростатической) ионизационной камеры со струнным электроскопом. Электроскоп заряжается с помощью батареи, так чтобы он указывал нуль на шкале. Ионизация, вызываемая γ -излучением, приводит к частичному разряду, и нить соответственно перемещается по шкале. Отсчет полученной дозы производится по шкале с изображением нити, которое видно через окуляр, если обратить дозиметр к свету. Для обнаружения медленных нейтронов стенки дозиметра покрываются изнутри соединением бора, на ядрах которого с нейтронами проходит реакция $^{10}_5B(n, \alpha)^7_3Li$. При помощи этих простых приборов можно в любой момент определить дозу облучения персонала γ -лучами или нейтронами.

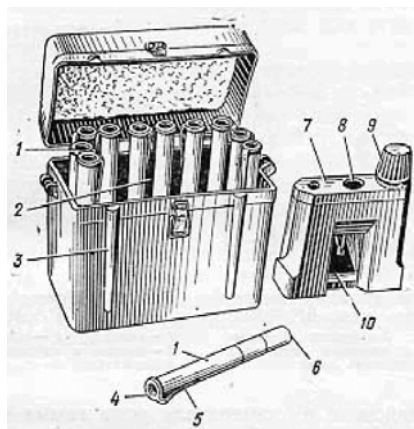
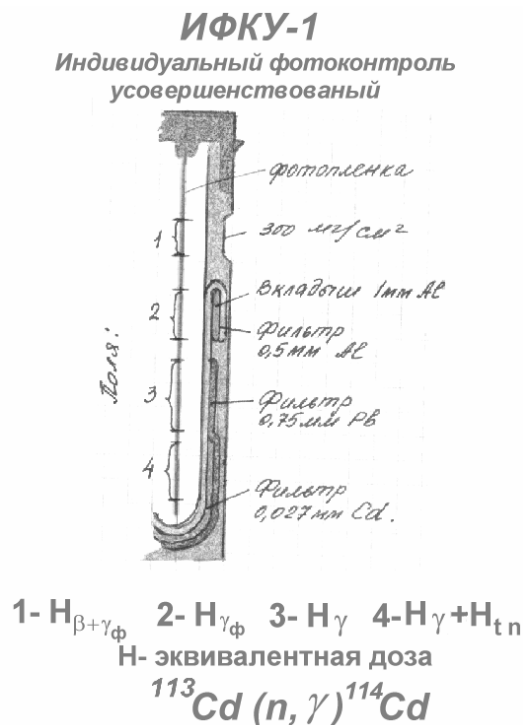


Рис.13.12. Комплект измерителей дозы ИД-1: 1- измеритель дозы ИД-1; 2- гнездо для зарядного устройства; 3- футляр; 4- окуляр; 5- держатель; 6- защитная оправа; 7- зарядное устройство ЗД-6; 8- зарядно-контактное гнездо; 9- ручка зарядно-контактного узла; 10- поворотное зеркало.

Рис. 13.13. Схема работы ИФКУ-1

В атомной промышленности используются усовершенствованные формы индивидуального фото контроля, в частности – устройство ИФКУ-1 (рис. 13.13). Излучение на фотопленку поступает через четыре индивидуальных окна, снабженных разными фильтрами. Это позволяет раздельно фиксировать различные формы ионизирующих излучений: $\beta + \gamma_f$ (фоновый уровень), γ_f , γ (дополнительное к фоновому), $\gamma + t_n$ (дополнительно тепловые нейтроны).



Получили распространение и трековые детекторы, которые позволяют обнаружить и сосчитать число треков (следов прохождения частиц ионизирующих излучений) на единице поверхности некоторого легкого материала, например, поликарбоната (рис.13.14). Они позволяют распознать источники, энергию излучений от основных компонентов реакторных материалов и формируемые ими дозы.

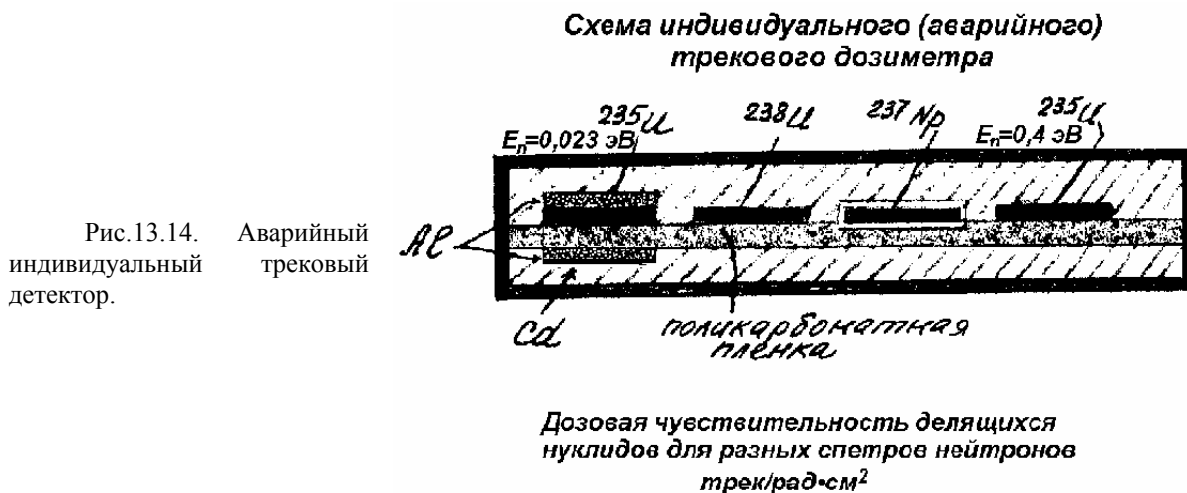


Рис.13.14. Аварийный трековый детектор.

Трековые детекторы широко используются и в дозиметрии излучения радона.

Спектр нейтронов	²³⁷ Np 0,5-10 МэВ	²³⁸ U 1,5-10 МэВ	²³⁵ U 0,4 эВ
Спектр деления	492	192	$1,17 \cdot 10^3$
За защитой H ₂ O	487	169	$1,6 \cdot 10^4$
За защитой B ₄ C	530	191	$1,01 \cdot 10^3$

Еще одним типом дозиметров, для работающих с излучениями, являются термолюминесцентные дозиметры. Термолюминесценция основана на испускании света при нагревании предварительно облученного неорганического кристалла, называемого термолуминофором. В практической дозиметрии используют LiF (Mg, Ti); CaF₂ (Mn), CaSO₄ (Dy), BeO (Na), алюмофосфатные стекла (Mn) и др. В скобках – легирующие добавки.

При поглощении энергии излучения, как центрами люминесценции, так и основным веществом люминофора, появляются свободные электроны, захватываемые электронными ловушками, а центры люминесценции ионизируются. Этот процесс называется запасанием светосуммы. При нагревании кристалла происходит освобождение электронов из ловушек и последующая рекомбинация свободных электронов с дырками на центрах люминесценции. Энергия, выделившаяся при рекомбинации, переводит центр в возбужденное состояние, при этом возникает термолюминесценция (рис.13.15).

При возбуждении кристаллофосфора ионизирующим излучением (*а*) в нем образуются свободные электроны и дырки, которые запасаются в дефектных местах (центрах захвата) и при комнатной температуре длительное время сохраняются (процессы 1 и 1'). Во время возбуждения наряду с процессами захвата электронов и дырок может иметь место излучательная рекомбинация (процесс 2, *а*).

При нагревании (*б*) электроны высвобождаются из ловушек (процесс 3) и рекомбинируют с центрами свечения противоположного заряда (дырочными центрами захвата) с испусканием люминесценции (процесс 2, *б*).

Облученный кристаллофосфор характеризуют зависимостью светового потока $\Phi_{\text{ТЛ}}$, испускаемого при нагревании от температуры T и соответствующей кривой термовысвечивания: $\Phi_{\text{ТЛ}} = \Phi_{\text{ТЛ}}(T)$.

При определенных температурах T_1 , T_2 и т.д. кривая термовысвечивания имеет максимумы $\Phi_{\text{ТЛ}}$. Мерой поглощенной дозы ионизирующего облучения D может служить как плотность потока энергии термолуминесценции, пропорциональная площади, ограниченной кривой термовысвечивания:

$S = \int \Phi_{\text{ТЛ}}(T) dT$, так и амплитуда наибольшего термопика $\Phi_{\text{ТЛ}}(\text{max})$.

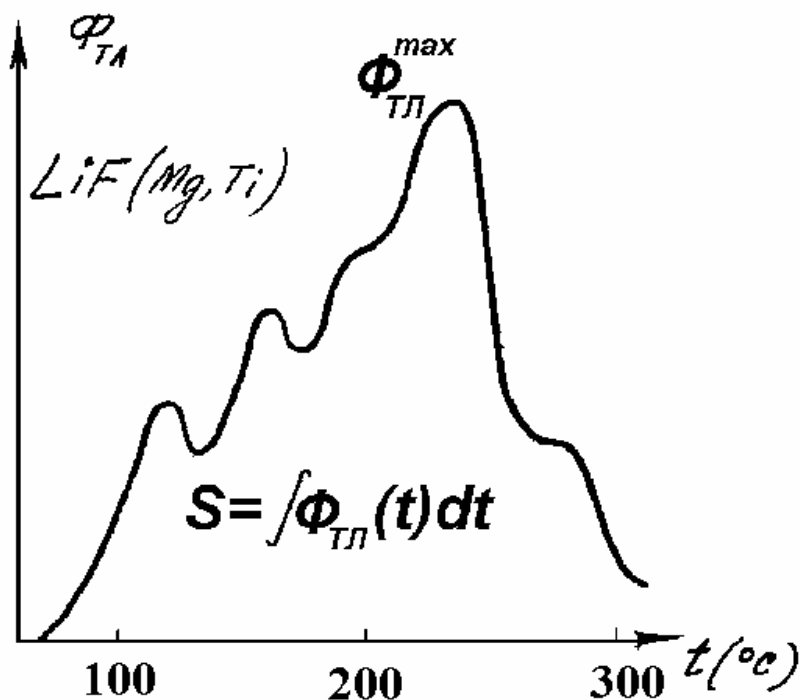
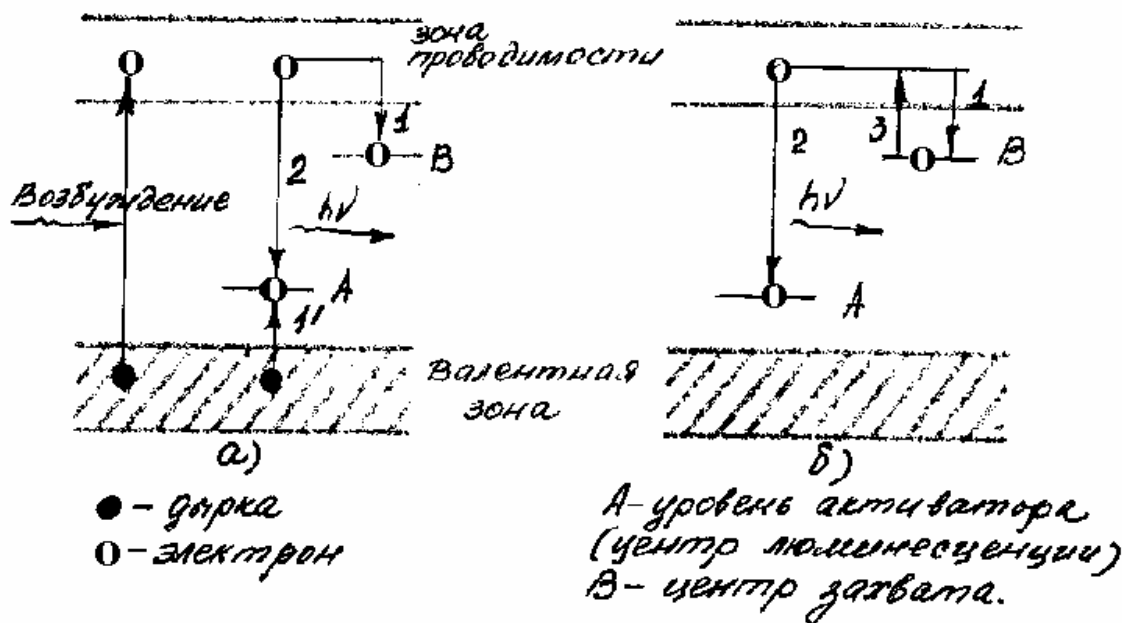


Рис.13.15. Схема работы термолуминесцентного дозиметра.

Дозовая характеристика ТЛ-дозиметров имеет несколько участков: участок фонового свечения ОА; участок линейной зависимости АВ протяженностью от $(3-5) \cdot 10^{-5}$ до 10^2 Гр; участок насыщения ВС или участок нелинейности BD. Дозиметрами данного типа пользовались, в частности, ликвидаторы аварии на ЧАЭС.

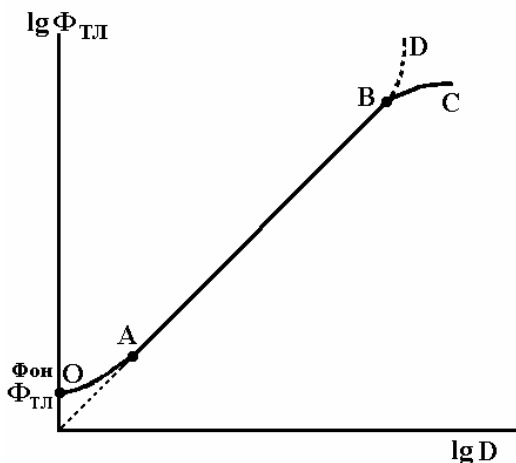


Рис.13.16. Дозовая характеристика ТЛ-дозиметра.

Наиболее эффективным средством борьбы с радиационным терроризмом и неумышленным радиационным загрязнением является радиационный контроль на входах и въездах в учреждение. Радиационный контроль на въездах обеспечивается транспортными радиационными мониторами. Они представляют собой высокочувствительные установки, обеспечивающие фиксацию изменения текущего значения радиационного фона на 15-20% в сторону увеличения в течение 0,5-1 с. Контроль на входах на объект наиболее эффективно осуществляется пешеходными радиационными мониторами. При использовании типового пешеходного монитора исключается пронос на объект любого радиоактивного источника, создающего мощность дозы более 20мкР/ч на расстоянии в 10 см. Контроль корреспонденции и ценных бумаг просто и эффективно производится компактными сигнализаторами-дозиметрами.

Контроль наличия источников внутри объекта подразделяется на:

- Мониторинг радиационной обстановки у VIP-персон. Его целесообразно производить постоянно включенным сигнализатором-дозиметром, который выдает световой и звуковой сигнал тревоги при превышении уровня мощности дозы 50-60мкР/ч.
- Инспекционное обследование помещений (чувствительность монитора должна обеспечивать достоверные результаты измерений за время 1-2 с, что позволяет обследовать помещения «на ходу»).
- Мониторинг радона в подвальных помещениях (используются специальные радиометры радона).



Особое место занимают приборы, предназначенные для МЧС и Минобороны, когда речь идет о возможности или реализации крупных аварий, террористических актов, испытаний или прямого использования ядерного оружия. В качестве примера, приведем описание нескольких приборов этого типа.

1. Измеритель мощности дозы ИМД.

Рис.13.17. Измеритель мощности дозы ИМД.

ИМД обеспечивает измерение мощности поглощенной дозы γ -излучения в диапазоне 10 мкрад/ч - 1000 рад/ч. Применяется в стационарных и носимых условиях, на летательных и подвижных объектах. Может использоваться для контроля за перемещением расщепляющихся материалов. Вес изделия - 1,6 кг.

2. Прибор радиационной и химической разведки ПРХР.



Рис.13.18. Прибор радиационной и химической разведки ПРХР.

ПРХР – газосигнализатор-дозиметр – обеспечивает измерение мощности гамма-излучения в диапазоне 0,2-150 Р/ч, а также наличие специальных веществ в воздухе. Индикация – световая, визуальная и звуковая. Обеспечивает выдачу команд на исполнительные механизмы объектов.

3. Измеритель мощности дозы ДП-3Б.

Прибор предназначен для измерения мощности экспозиционной дозы γ -излучения при ведении радиационной разведки с подвижных объектов. В комплект прибора ДП-3Б входят измерительный пульт, блок детектирования, соединительный кабель с прямым и угловым разъёмами, кабель питания, скобы для крепления, комплект ЗИП, техническое описание и формуляр.

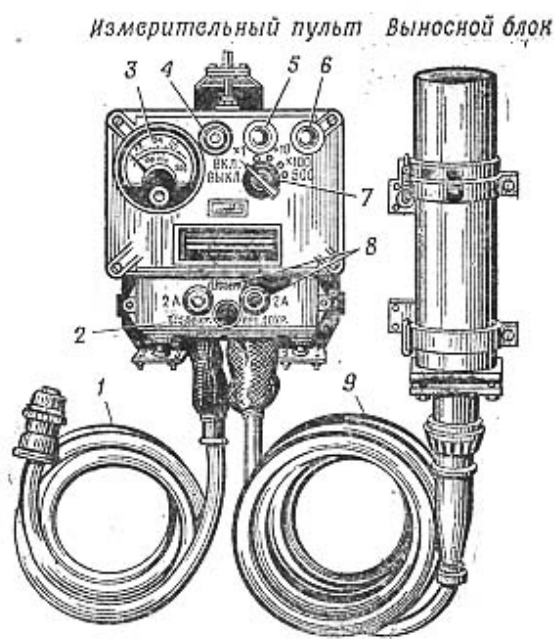


Рис.13.19. Измеритель мощности дозы ДП-3Б:

- 1-кабель питания;
- 2-кнопка ПРОВЕРКА;
- 3-микроамперметр;
- 4- лампочка подсвета; 5- указатель поддиапазонов;
- 6- лампа световой индикации;
- 7- переключатель поддиапазонов;
- 8 - предохранители;
- 9- соединительный кабель.

4. Измеритель мощности дозы ИМД-21Б.

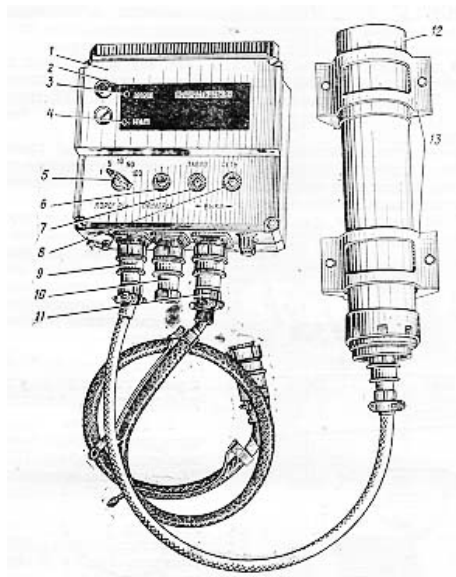


Рис.13.20. Измеритель мощности дозы ИМД-21Б: 1- блок измерения средней частоты; 2- индикаторное табло; 3- сигнальная лампа ПОРОГ; 4- индикатор включения питания прибора; 5- переключатель ПОРОГ; 6- кнопка ПРОВЕРКА; 7- тумблер ТАБЛО; 8- тумблер СЕТЬ; 9- разъем цепи блока детектирования; 10- заглушка множителя показаний; 11- разъем для цепи питания; 12- блок детектирования; 13- скобы для крепления блока детектирования.

По назначению аналогичен прибору ДП-3Б. Помимо измерения мощности экспозиционной дозы γ -излучения он выдаёт световой сигнал о превышении установленного порогового значения уровня радиации 1; 5; 50 и 100 Р/ч. Кроме того, прибор обеспечивает автоматический учет коэффициента ослабления γ -излучения объектом при ручной установке множителя показаний от 1 до 4 с дискретностью через единицу.

ИМД-21 устанавливается на подвижных и стационарных объектах.

5. Измеритель мощности дозы ДП-5В.

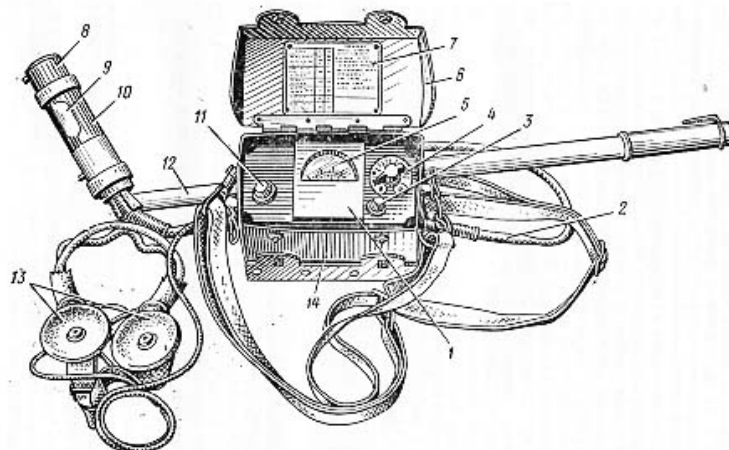


Рис.13.21. Измеритель мощности дозы ДП-5В:

1- измерительный пульт; 2- соединительный кабель; 3- кнопка сброса показаний; 4- переключатель поддиапазонов; 5- микроамперметр; 6- крышка футляра прибора; 7- таблица допустимых значений заражения объектов; 8- блок детектирования; 9- поворотный экран; 10- контрольный источник; 11- тумблер подсвета шкалы микроамперметра; 12- удлинительная штанга; 13- головные телефоны; 14- футляр.

Прибор предназначен для измерения уровней γ -радиации и радиоактивного загрязнения различных поверхностей по γ -излучению и позволяет обнаружить β -излучение. Прибор имеет звуковую индикацию ионизирующего излучения на всех поддиапазонах, кроме первого. В комплект прибора ДП-5В входят измеритель мощности дозы ДП-5В в футляре, два раздвижных ремня, удлинительная штанга (на профессиональном жаргоне ее часто называют «ключка», которую дозиметрист держит в руке и подносит к подозрительным объектам), делитель напряжения для подключения прибора к внешнему источнику постоянного тока напряжением 12 и 24 В, головные телефоны, комплект ЗИП, техническое описание, формуляр и укладочный ящик.

6. Индикатор-сигнализатор ДП-64.

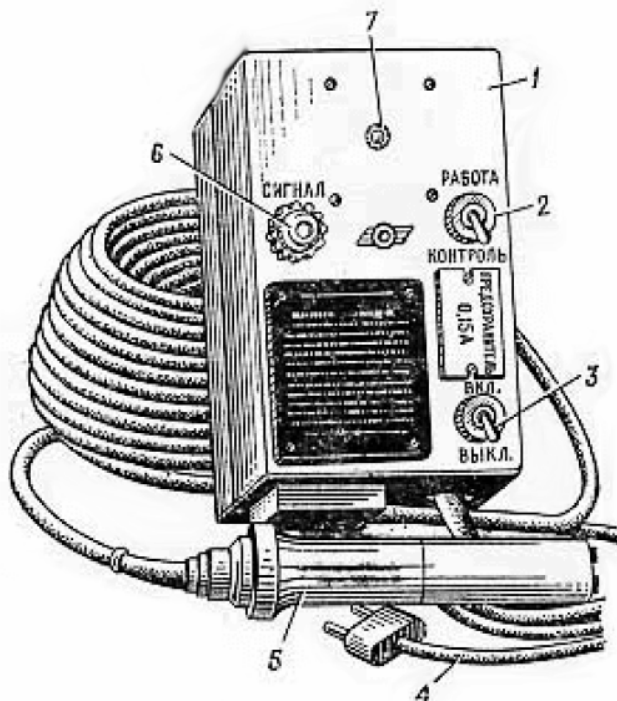


Рис.13.22. Индикатор-сигнализатор ДП-64:
1- пульт сигнализации; 2- тумблер РАБОТА-КОНТРОЛЬ; 3- тумблер ВКЛ.-ВЫКЛ.; 4- кабель питания; 5- блок детектирования; 6- сигнальная лампа; 7- динамик типа ДЭМ.

Прибор предназначен для непрерывного контроля за радиоактивным заражением местности в следящем режиме. По достижении мощности дозы γ -радиации 0,2 Р/ч автоматически включаются звуковая и световая сигнализации. Время срабатывания сигнализации не превышает 3 секунд.

Во многих случаях в настоящее время на входах в крупные учреждения, высшие учебные заведения или промышленные предприятия устанавливают световые табло, показывающие уровень естественного радиационного фона для

информирования населения. Для этих же целей продаются малогабаритные индивидуальные дозиметры с цифровой и звуковой индикацией. Иногда такие дозиметры встраивают в наручные часы.

В качестве примера приведу последние конструкции индивидуальных (в т.ч. бытовых) дозиметров.

1. «Говорящий» дозиметр-радиометр RSM 100S (Radiation Survey Meter RSM 100S. Это – интеллектуальный дозиметр-радиометр с речевым озвучиванием результатов измерения мощности дозы гамма-излучения, и голосовой оценкой полученных результатов:

- ☐ «Нормально» до 60 мкР/час;
- ☐ «Внимание» от 60 до 120 мкР/час;
- ☐ «Опасно» более 120 мкР/час.



2. Дозиметр ДКГ-12П (отечественный).

Дозиметры фотонного излучения ДКГ-12П1, ДКГ-12П2, ДКГ-12П3 представляют собой миниатюрные индивидуальные прямопоказывающие приборы для измерения мощности индивидуального эквивалента дозы и индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения и сигнализации о достижении установленных пользователем пороговых значений мощности дозы и дозы.



3. Дозиметр ДКГ-14П (отечественный).

Индивидуальный дозиметр фотонного излучения двухканальный ДКГ-14П представляет собой миниатюрный прямопоказывающий двухканальный прибор для измерения мощности эквивалентной дозы и эквивалентной дозы фотонного излучения, на кисти рук или мощности индивидуального эквивалента дозы и индивидуального эквивалента дозы на все тело.

В настоящее время, как в России, так и во всем Мире выпускается множество разнообразных радиометрических и дозиметрических приборов индивидуального пользования для операторов, потенциально связанных с вероятностью воздействия ионизирующих излучений, и населения, желающего контролировать среду своего обитания.

Условием нормальной жизни является доступ ко всей затрагивающей интересы человека информации. Это его конституционное право!



РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Адамский В.Б., Смирнов Ю.Н.* 50-мегатонный взрыв над Новой Землей. ВИЕТ № 3, 1995.
2. АИФ Здоровье, №04 (441) от 23.01.2003. «Радиофобия: пустые страхи или незамеченная опасность». Беседа с докт. Мед. наук А.Ю. Бушменовым.
3. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Пономарев-Степной Н.Н., Сидоренко В.А. Требования к атомным станциям XXI в. //Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 1. С. 3-14.
4. *Апплби Л. Дж., Девелл Л., Мишра Ю.К. и др.* Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиология после Чернобыля. Пер. с англ./ Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – М.: Мир, 1999. – 512 с.
5. *Беляев С.Т., "Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы"* Ж. ПРИРОДА № 11, 1990.
6. *Бликс Х.* (Генеральный директор МАГАТЭ). Беседа с корр. газеты «Правда» 14.04.87.
7. *Большов Л., Арутюнян Р., Линге И., Павловский О.* О роли радиационных факторов в экологических рисках для населения России, Ч.1 и Ч.2. Публикация от 15-10-2001 20:01 <http://daily.sec.ru/> Раздел: **Промышленная и экологическая безопасность**.
8. *Булдаков Л.А.* Радиоактивные вещества и человек. – М.: ЭнергATOMиздат, 1990. – 160 с.
9. *Булдаков Л.А.* Круглый стол «Ядерное будущее России и мира». Материалы «Минатом.ру».
10. *Васильев А.Г., Боев В.М., Гилева Э.А. и др.* Эколого-генетический анализ отдаленных последствий Тощкого ядерного взрыва в Оренбургской области в 1954 г. (факты, модели, гипотезы). Екатеринбург, Изд-во «Екатеринбург», 1997.
11. *Велихов Е.П.* Энергетика XXI век и Россия // Энергия. Экономика. Техника. Экология. 1999. № 12. С. 2-9.
12. *Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. М.:, 1989.
13. *Вернадский В.И.* Труды по радиогеологии. М: «Наука», 1997.
14. *Гончаров Г.А.* К пятидесятилетию в СССР возможности создания термоядерного реактора. //УФН, т.171, 2001, № 8, с. 894-901.
15. *Гончаров Г.А., Рябев Л.Д.* О создании первой отечественной атомной бомбы.//Успехи физических наук, 2001, т.171, №1, с. 79-104.
16. *Гончаров В.А., Нехотин В.В.* Неизвестное об известном. По материалам архивного следственного дела на Н.В. Тимофеева-Ресовского. //Вестник РАН, 2000, т.70, N3, с.249-257.
17. *Горбачев Б.* Чернобыльская авария (Причины, хроника, события, выводы). (Подробная и аналитическая публикация от 22 декабря 2002 - см. Электронную библиотеку Мошкова).
18. *Гранин Д. А.* Зубр. Л: «Советский писатель». 1987.
19. *Гусаров И.И. Иванов С.И.* О защитных эффектах малых доз ионизирующего облучения (Обзор литературы) – АНРИ №4 (27) с. 8-17, М.: 2001.
20. *Гуськов Е.П.* **СЛАВУТИЧ-ПОРТАЛ - ГЕНЕТИКА, РАДИАЦИЯ И ЗДОРОВЬЕ** 06 Март 2007. Опубликовал UkrHammer.
21. *Гуськова А.К.* Атомная отрасль страны глазами врача, М.:, Изд-во Реальное время., 2004.-240с.
22. *Жуковский В.М.* ВОДНЫЙ ПРОМЫСЕЛ. Первое промышленное радиохимическое производство в России. Екатеринбург: Изд. Ур. Ун-та, 2002.

23. Жуковский В.М. Научно-технический прогресс и проблемы цивилизации (радиоактивность). // Изв. Уральского гос. Ун-та «Проблемы образования, науки и культуры», Екатеринбург. Выпуск 12, № 23, 2002, с. 22-32.
24. Жуковский В.М. // Становление радиохимического производства в России. Вестник УрО РАН № 3 (5), 2003, с. 58-71.
25. Жуковский В.М. // Человек в радиоактивном мире. Социальные последствия открытия радиоактивности. Наука Общество Человек. Вестник УрО РАН № 3 (5), 2003, с. 77-82.
26. Жуковский М.В. Радиационное воздействие на население: оценка радиационных рисков и потенциального ущерба здоровью (на материалах Свердловской обл.). Автореферат докт. дисс., Екатеринбург, 2003.
27. Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б., Ярмошенко И.В. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург, УрО РАН, 2000.
28. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценки риска. Екатеринбург, УрО РАН, 1997.
29. Ж. Наука и жизнь, 2007, №4. «Профессор Ангелина Гуськова: на лезвии атомного меча».
30. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. //Атомная энергия, т. 61, вып. 5, 1986.
31. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: ЭнергATOMиздат, 1988. – 400с.
32. Иванов В.И. Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский: учёный и учитель // Биологич. науки. 1990. N 4. С. 140– 152.
33. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена. – М.: Медицина, 1999. – 384 с.
34. Коммонер Б. Замыкающийся круг. Природа, человек, технология. Л., Гидрометеоиздат, 1974.
35. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. – М.: 1989. –120 с.
36. Кузин А.М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. М: Наука, 1995.
37. Кузин А.М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. М: Наука, 1991.
38. Кузьмин И.И. Безопасность и техногенный риск: системно-динамический подход. // ЖВХО им. Д.И. Менделеева, 1990, т. 35, № 4, с. 415-420.
39. Ларин В. Последствия атомных аварий на Урале. //Энергия 1996, №№ 3-6.
40. Машкович В.П., Панченко А.М. Основы радиационной безопасности. – М.: ЭнергATOMиздат, 1990. – 176 с.
41. Медведев Ж.А. Сталин и атомная бомба.// Вестник РАН, том 72, № 1, с. 57-66 (2002).
42. Моисеев Н.Н. Судьба цивилизации. Путь Разума. М., 1998.
43. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М., 1985.
44. Москалев Ю.И. Отдаленные последствия ионизирующих излучений. М., Медицина, 1991.
45. Новоселов В.Н., Толстиков В.С. Тайна «сороковки». Екатеринбург, «Уральский рабочий», 1995.
46. Пархоменко В.П., Тарко А.М. Ядерная зима. // Экология и жизнь, № 4, 2000.
47. Первухин М.Г. Как была решена атомная проблема в нашей стране.//Новая и новейшая история, № 5, 2001.

48. *Погодин С.А., Либман Э.П.* Как добыли советский радий. М.: Атомиздат, 1997.
49. *Публикация 65 МКРЗ.* Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. М.: Энергоатомиздат, 1995.
50. *Радиация.* Дозы, эффекты, риск. – М.: Мир, 1988. – 78 с.
51. *Романчук Я.* Катастрофа или блеф? <http://www.belgazeta.by/20010421.16/010090240>
52. *Садовский А.С., Товмаш А.В.* «Плутониевый пневмосклероз глазами химика (история и причины профзаболевания), часть 1 и 2. Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ» 1735 <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2007/151/pdf>
53. *Сидоренко В.А.* Замечания к причинам и следствиям Чернобыльской аварии. //Энергия, 2003, №4, с. 2-8.
54. *У истоков советского атомного проекта:* Роль разведки, 1941-1946 гг. //ВИЕТ. № 3, с. 107-108 (1992).
55. *Урал атомный, Урал промышленный.* Мат. VII Межд. экол. Симп. Екатеринбург, УрО РАН, 2000. Также (*Урал атомный*) озаглавлен постоянный раздел в каждом выпуске Вестника УрО РАН, Екатеринбург.
56. *Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В. и др.* Радиоактивные беды Урала. Екатеринбург, УрО РАН, 2000.
57. *Тимофеев-Ресовский Н.В.* Очерки. Воспоминания. Материалы (отв. Ред. Н.Н. Воронцов) М. Наука. 1993. 400 с.
58. *Федоров А.Л.* По заказу совести. //Вестник УрО РАН № 4 (6), 2003, с. 68-75; № 1 (7), 2004, с.100-116; № 2 (8), 2004, с. 73-84.
59. *ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в РФ до 2005 года».*
60. *Холл Э. Дж.* Радиация и жизнь. М.: «Медицина», 1989.
61. *Черников В.Г.* Озерский Вестник №76 от 10 июля 2002 г. «Байсоголов и другие», с.3.
62. *Чернобыльская авария – 13 лет после катастрофы.* <http://www.ibrae.ac.ru/russian/13let.html>.
63. *Чернобыль: самый большой блеф XXI века,* материал из журнала Wprost 02.04 2005. Полный текст публикации - <http://liberty-belarus.org>
64. *Шуколюков Ю.А.* Аномальный ксенон Земли. Соросовский образовательный журнал № 9, 1997, с. 63-70.
65. *Ярмоненко С.П.* Радиобиология человека и животных. М.: Высшая школа, 1988.
66. 15 ЛЕТ КАТАСТРОФЕ НА ЧАЭС. Мартин РОТКЕВИЧ. <http://www.belgazeta.by/20010421.16/010081302>
67. Calabrese E.J., Baldwin L.A., Holland C.D. Hormesis: a highly generalizable and reproducible phenomenon with important implications for risk assessment // Risk Anal., 19, 2, 1999, 261-281.
68. *Granger Morgan M.* Risk Management should be about Efficiency and Equity. //FEATURE. 2000. V.34, Issue 1, pp. 32 A - 34 A.
69. *Luckey T.D.* Ionizing radiation promotes protozoan reproduction. Radiat.Res. 1986, Vol. 108, p 215-221. Nature. 22 May 1997. V.387. N6631. P.337.
70. *Luckey T.D.* Radiation Hormesis. Boca Raton, Fl., (1990), 120 p.
71. *Report of the United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, (2000).*
72. *Иванов В.К., Цыб Ф., Панфилов А.П. Агапов А.М.* Оптимизация радиационной защиты: «дозовая матрица». - М.: Медицина, 2006. - 304 с.

УКАЗАТЕЛЬ ПЕРСОНАЛИЙ

- Агрикола Г. 68
Адамский В.Б. 81
Александров В.В. 4
Александров С.П. 75
Алексеев П.Н. 8
Алиханов А.И. 67
Арутюнян Р. 8, 130, 140
Арцимович Л.А. 67, 69,
Байерс Э. 141
Бах А.Н. 62
Беккерель А.А. 10, 33, 88, 140
Белый А. 18
Бердяев Н.А. 18
Берия Л.П. 60, 74, 75
Бликс Х. 7,
Боев В.М. 115
Большов Л. 8, 130, 140
Бузиг Г. 61
Булганин Н.А. 60
Булдаков Л.А. 107
Бушменов А.Ю. 146
Ванников Б.Л. 58,
Васильев А.Г. 115
Велихов Е.П. 8
Вернадский В.И. 5, 18, 19, 51, 59, 60,
Виллар П. 13
Вильсон 148
Вин В. 25
Вуд 40
Гагаринский А.Ю. 8
Ган О. 47, 48, 53
Гейгер Г. 13, 152
Гейзенберг В. 50
Гранин Д.А. 100
Боте В. 50,
Вейцеккер К. 50, 52
Гейтель Х. 69
Георгиевский П.К. 75
Гепперт-Майер М. 17
Герц Г. 70
Гилева Э.А. 115
Глазко В.И. 146
Гольдштейн В. 14
Гончаров Г.А. 51, 81, 100
Горбачев Б. 130, 136
Грей Л.35,
Гувер Г. 68
Гурвич В.Б. 72,
Гуськов Е.П. 100
Медведев Ж.А. 54
Мейтнер Л. 41, 48
Мёллер Г. 100
Менделеев Д.И.15, 28
Мисаки Й. 124
Моисеев Н.Н. 4, 5, 10
Молотов В.М. 54
Москалев Ю.И. 107
Мюллер Х.Е. 69
Наметкин С.С. 62
Нил 101
Нобель А. 19
Новоселов В.Н. 117
Оппенгеймер Р. 46
Павловский О. 8, 130, 140
Пал 40
Парацельс 69, 97
Пархоменко В.П. 4
Первухин М.Г. 54
Перрен Ж.14, 59
Петр I (Великий) 110
Петржак К.А.23, 39, 61
Петрянов-Соколов И.В. 126
Пономарев-Степной Н.Н. 8
Понтекорво Б.43, 54, 58
Почин Э. 69, 98
Резерфорд Э. 13, 15, 19, 28, 29, 33
Рентген В.К. 10
Рикардо Д. 5
Риль Н. 57,
Рузвельт Ф.Д. 44
Рябев Л.Д. 51
Садовский А.С. 126
Сапрыкин В.А. 75
Сахаров А.Д. 76, 80,
Светлов П.А. 60
Сегре 45
Сиборг 45
Сидоренко В.А. 8, 130
Склодовская-Кюри М. 11, 12, 33, 69, 89
Слотин Л. 89-90
Смирнов Ю.Н. 81
Смит А. 5
Сноу Ч. 19
Содди Ф. 13, 15
Сталин И.В. 51, 63,
Сциллард Л.44
Тарко А.М. 4
Твардовский А.Т. 110

- | | |
|---|--|
| <p>Гуськова А.К. 123, 126, 145
 Демокрит 15, 26
 Додд У. 88, 89
 Доллежалъ Н.А. 59,
 Дорн Э. 110
 Дуброва Ю. 100
 Евстигнеев А.В. 175
 Жолио-Кюри И. 41, 89
 Жолио-Кюри Ф. 3, 41, 89
 Жуковский В.М. 6, 105, 113
 Жуковский М.В. 71, 72, 112, 122
 Завенягин А.П. 56, 69, 70, 74, 75
 Зелинский Н.Д. 62
 Зельдович Я.Б. 51, 80
 Зиверт Р. 36, 71
 Иоффе А.Ф. 52, 61, 63, 65, 67
 Иванов В.И. 100
 Капица П.Л. 53, 65
 Кафтанов С.Ф. 51, 63, 64
 Кеннеди 53
 Кикоин И.К. 67, 69, 73
 Колумб Х. 4
 Комаровский А.Н. 60
 Коммонер Б. 8
 Кружалов А.В. 72,
 Кубояма А. 79
 Кузин А.М. 106,
 Кузьмин И.И. 6
 Курчатов И.В. 23, 55, 65, 66, 67, 73, 74,
 75, 127
 Кэмпбелл 40
 Кэрнкросс Дж. 54
 Кюри П. 11, 12, 33, 86, 69, 107, 110
 Лаки (Lucy) Т.Д. 106, 141
 Ларин В. 186
 Легасов В.А. 214
 Линге И. 8, 130, 140
 Лэпп Р. 126
 Мак-Миллан 45
 Мальцев М.М. 75
 Марсен Э. 13
 Маркс К. 5
 Масюк Е. 141</p> | <p>Тарханов И.Р. 88
 Теллер Э. 76, 122, 129
 Тимошенко С.К. 51
 Тимофеев-Ресовский Н.В. 70, 100
 Толстиков В.С. 117
 Толстой Л.Н. 3
 Томсон Дж. Дж. 14
 Трумэн Г. 51
 Уол 53
 Уткин В.И. 111
 Федоров А.Л. 118,
 Ферми Э. 41, 50, 51, 64
 Ферсман А.Е. 60
 Флеров Г.Н. 23, 39, 53, 63, 64, 69, 75
 фон Арденне М. 70
 Френкель Я.И. 23
 Франк И.М. 59
 Фриш О. 41
 Фрумкин А.Н. 62
 Фукс К. 54, 58
 Хан О. 41
 Харитон Ю.Б. 51, 60
 Хлопин В.Г. 51, 60
 Хокс Х.Д. 88
 Холл Э.Дж. 4, 39, 91, 98
 Хрущев Н.С. 81
 Хэвеш 40
 Чадвик Дж. 14
 Чеботина М.Я. 111
 Черников В.Г. 123
 Чирков Б.Н. 75
 Царевский М.М. 60
 Шелл 101
 Штрассман Ф. 41, 53
 Шуколюков Ю.А. 61
 Щелкин К.И. 60,
 Эйнштейн А. 10, 15, 50, 51
 Эльстер Я. 69
 Энгельс Ф. 5
 Яворски З. 141
 Ярмоненко С.П. 88
 Ярмошенко И.В. 71, 72,
 Grangen Morgan M. 6</p> |
|---|--|

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ОТ АВТОРА	2
ЛЕКЦИЯ 1. Социальные последствия открытия явления радиоактивности	3
ЛЕКЦИЯ 2. Открытие радиоактивности и революция в физике	10
ЛЕКЦИЯ 3. Естественная радиоактивность	21
ЛЕКЦИЯ 4. Ионизирующие излучения	29
ЛЕКЦИЯ 5. Дозы облучения	33
ЛЕКЦИЯ 6. Открытие искусственной радиоактивности. Ядерная программа США	41
ЛЕКЦИЯ 7. Становление атомной программы СССР	51
ЛЕКЦИЯ 8. Естественный радиоактивный фон	61
ЛЕКЦИЯ 9. Искусственные источники ионизирующих излучений	75
ЛЕКЦИЯ 10. Биологическое действие ионизирующих излучений	88
ЛЕКЦИЯ 11. Радиационная обстановка на Урале и в прилегающих регионах	110
ЛЕКЦИЯ 12. Чернобыльская авария	127
ЛЕКЦИЯ 13. Методы обнаружения и измерения ионизирующих излучений	147
РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА	164
УКАЗАТЕЛЬ ПЕРСОНАЛИЙ	167
СОДЕРЖАНИЕ	169