

90-288



Объединенный
институт
ядерных
исследований
Дубна

K-681

P19-90-288

В. И. Корогодина

О ПРИНЦИПАХ ОЦЕНКИ
РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ
ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА

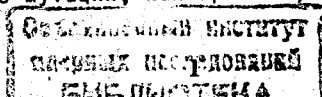
Направлено в журнал "Природа"

1990

Проблема воздействия на людей ионизирующих излучений стала актуальной с конца сороковых - начала пятидесятых годов в связи с атомной бомбардировкой японских городов Хиросима и Нагасаки, нарастанием испытаний ядерного оружия и развитием атомных технологий. Биологов и медиков, особенно генетиков, эта проблема не застало врасплох - исследования по радиационной генетике и по радиобиологии животных, проводившиеся в разных странах уже несколько десятилетий, позволяли четко сформулировать основные аспекты этой проблемы и наметить пути ее научной разработки. Это получило свое отражение в докладах на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся в 1955 г. в Женеве /1/.

Два вопроса, обсуждавшихся на этой конференции, представляют для нас особый интерес: 1. Какие дозы облучения относительно безопасны для здоровья отдельных людей (что необходимо знать для установления так называемой предельно допустимой дозы облучения для персонала, непосредственно занятого на атомных производствах) и 2. Какое влияние оказывает облучение, даже в относительно малых дозах, на большие группы населения, в пределе - на все человечество (что необходимо знать для оценки возможных последствий повышения содержания радиоактивных изотопов в среде в результате испытаний ядерного оружия и аварийных выбросов ядерных производств). Работа А.Д.Сахарова, о которой пойдет речь ниже, непосредственно относится ко второму вопросу, чем я и ограничу, в основном, дальнейшее изложение.

В 1927 г. Г.Меллер (США) на V Международном генетическом конгрессе сообщил научной общественности о том, что ионизирующие излучения могут вызывать генетические изменения (мутации) у плодовой мушки дрозофилы. В последующие годы работами генетиков разных стран было доказано, что мутагенное действие ионизирующих излучений универсально - частота мутирования генов и хромосом увеличивается в результате облучения у всех живых существ, от микроорганизмов до человека. В тридцатые годы были выявлены основные закономерности радиационного мутагенеза и установлен фундаментальный факт: частота возникновения новых мутаций возрастает прямо пропорционально дозе облучения. Это означает, что генетическое действие излучений не имеет порога: сколь угодно малые дозы, хотя и с очень низкой частотой, но обязательно вызывают те или иные мутации, увеличивая "мутационный груз" популяций облученных организмов. Такие мутации, как правило, неблагоприятны, итогом



чего является повышенная смертность потомков (вплоть до очень отдаленных) облученных организмов, получающих эти мутации "по наследству". Для дрозофилы и мышей, наиболее изученных в этом отношении, были определены "удваивающие дозы", т.е. такие дозы облучения, которые повышают частоту мутирования в два раза по сравнению со "спонтанным фоном".

Основываясь на таких данных, а также на результатах обследований семей рентгенологов, профессионально подвергавшихся облучению, разные авторы предприняли в пятидесятых годах оценку величины удваивающей дозы для человека. Полученные результаты колебались в широких пределах, от 3 до 150 рад, но наиболее обоснованной, пожалуй, является доза в 15-30 рад^{1/2}.

Что означает удваивающая доза для человека? Это означает, что если спонтанно, без дополнительного облучения, на один миллион жителей Земли ежегодно рождается около 70 тысяч детей с наследственными дефектами, обуславливающими самые разные заболевания или способствующими их возникновению, то в том случае, если все человечество будет облучено в дозе 15-30 рад, число таких "наследственно отягощенных" потомков может возрасти до 120-140 тысяч на миллион, т.е. "прирост" составит от 2 до 4 тысяч на миллион на 1 рад облучения. Характерной особенностью радиационного мутагенеза, как я уже отмечал, является его "беспороговость" - частота возникновения мутаций на единицу дозы не зависит ни от ее (дозы) величины, ни от распределения облучения во времени. Другая особенность - это то, что генетические дефекты, возникающие в половых клетках облученных людей, могут проявляться (но обязательно проявятся в той или иной форме!) даже у самых отдаленных их потомков, вплоть до нескольких десятков поколений, так что последствия даже однократного облучения будут растянуты на сотни и тысячи лет.

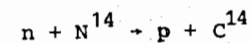
К середине пятидесятых годов стало ясно, что некоторые "беспороговые эффекты" облучения могут наблюдаться не только у потомков, но и у самих облученных организмов. Об этом свидетельствовали как специальные эксперименты на лабораторных животных, так и наблюдения за людьми, перенесшими то или иное облучение либо в связи со спецификой их работы, либо в лечебных целях (в тридцатые годы облучение в небольших дозах довольно широко применялось для лечения самых разных заболеваний). Это - возникновение злокачественных опухолей, связанное с мутациями не в половых клетках, а в соматических, т.е. в клетках разных тканей и органов самого облученного организма. Беспороговость канцерогенного действия излучений обусловлена тем, что в его основе лежит мутагенный эффект. Но возникают опухоли часто лишь спустя много лет (до десяти и более) после перенесенного облучения. Это обстоятельство, а также большие индивидуальные различия в чувствительности организмов к такому действию излучений и относительно низкая частота "лучевой индукции" опухолей

(примерно несколько случаев на сто человек при дозе 100-200 рад) не позволяют достаточно надежно определить форму связи частоты возникновения рака с дозой облучения, и все оценки здесь до сих пор еще в значительной мере носят приближенный характер.

К "беспороговому" или, точнее, проявляющимся даже при малых дозах (порядка десяти рад) можно, пожалуй, отнести и такое последствие облучения, как повышение чувствительности к стрессовым воздействиям и различного рода заболеваниям, что может быть связано с нарушениями иммунной системы. Такие эффекты малых доз менее всего изучены, в основном, по двум причинам. Во-первых, опыты такого рода на животных очень трудоемки и мало надежны для экстраполяции их результатов на человека. Во-вторых, наблюдения над людьми, перенесшими небольшое облучение, требуют больших выборок и хорошо сформированных "контрольных групп", в каждом же отдельном случае невозможно решить, обусловлено ли понижение устойчивости к болезням перенесенным ранее облучением или другими причинами. Поэтому оценки здесь - наименее надежны.

Таков, в общих чертах, был "научный фон", когда А.Д.Сахаров опубликовал свою работу "Радиоактивный углерод ядерных взрывов и непороговые биологические эффекты"^{1/3}. Принципы оценки радиационной опасности, сформулированные в этой работе, сохраняют актуальность до настоящего времени. Остановлюсь коротко на этих принципах и на их сегодняшнем значении.

"При взрыве всех видов ядерного оружия, включая и так называемую "чистую" (безосколочную) водородную бомбу, - пишет А.Д.Сахаров, - в атмосферу попадает огромное количество нейтронов, которые захватываются азотом воздуха по реакции



с образованием долгоживущего радиоактивного изотопа углерода C^{14} " (стр.36). Углерод C^{14} обогащает содержание радиоактивного углерода в "обмениваемом резервуаре" углерода атмосферы, попадая затем в водные бассейны и ткани живых организмов, в том числе в организм человека. Поступая в ткани человека, радиоактивный изотоп углерода при своем распаде "вызывает радиационное поражение, измеряемое дозой $7,5 \cdot 10^{-4}$ р (р - рад, В.К.) на мегатонну (Mt) мощности взрыва" (стр.36). Средняя продолжительность жизни этого изотопа - 5570 лет. Поэтому действие "добавочного" углерода C^{14} , по оценке А.Д.Сахарова, может растянуться примерно на восемь тысяч лет.

Для оценки возможных последствий такого дополнительного (по сравнению с "естественным фоном") облучения человека А.Д.Сахаров использует представление о "непороговых биологических эффектах радиации": вызывание мутаций, обуславливающих различные аномалии у потомства; различные

злокачественные новообразования, включая лейкемию; а также, возможно, нарушения иммунологических реакций, в результате чего повышается опасность самых разных заболеваний и ускоряется старение. Примерная оценка возможной гибели людей за счет этих эффектов, проведенная А.Д.Сахаровым, дает величину порядка $5 \cdot 10^{-4}$ на 1 рад, а испытание бомбы мощностью в 1 Мт чревато дополнительной смертью только за счет онкологических заболеваний и генетических нарушений на всем земном шаре в течение 8 тысяч лет около 6600 человек. Это, как подчеркивает А.Д.Сахаров, заниженная оценка, - в действительности число жертв может быть значительно большим.

Не вдаваясь в обсуждение точности таких оценок (для чего мы и сегодня, спустя тридцать лет, еще не располагаем надежными данными), отмечу две особенности подхода А.Д.Сахарова к проблеме радиационной опасности, актуальность которых становится все более значимой.

Первая особенность - это оценка радиационной опасности по не пороговым эффектам. Другими словами, это оценка негативных последствий действия малых доз, т.е. таких доз облучения, после которых не возникает симптомов собственно "лучевой болезни", проявляющейся в различных нарушениях кроветворения и функций тонкого кишечника.

С сожалением должен отметить, что биологическое действие малых доз на млекопитающих и человека до сих пор систематически не изучалось. Классическая радиобиология, а вслед за ней и радиационная медицина основное внимание обращали на выяснение закономерностей и механизмов действия на организм излучений при относительно высоких дозах, порядка сотен и тысяч рад. После облучения в таких дозах "регистрируемый эффект" - гибель облученных клеток или животных - наступает в течение нескольких часов, недель или месяцев. Здесь успехи очень велики: мы сегодня многое знаем о закономерностях проявления таких "острых последствий" облучения и о лежащих в их основе молекулярных и клеточных механизмах. Еще одна особенность классического подхода - требования высокой однородности используемых в экспериментах объектов и выборок. В ходе таких исследований и сложилась концепция пороговости действия излучений, отражающая тот факт, что для проявления "острых эффектов" необходимо, чтобы доза облучения превысила некоторый "порог" (например, несколько десятков рад). С прагматической точки зрения "пороговая концепция" сыграла свою положительную роль, особенно на ранних этапах развития ядерных технологий, когда персонал соответствующих предприятий неизбежно подвергался некоторому облучению: пороговая концепция позволяла установить ту предельно-допустимую дозу облучения для лиц "категории А" (5 бэр в год) ^{14/}, которая не угрожает непосредственно их здоровью. Что же касается непороговых эффектов облучения людей "категории А", то ввиду относительно небольших выборок надежно выявить их очень трудно, и поэтому ими практически пренебрегали.

В силу сказанного, однако, за рамками классической радиобиологии и радиационной медицины оставались как особенности действия на животных и человека малых доз облучения, так и проблема различий в индивидуальной радиочувствительности. Изучение этих вопросов требовало специальных методических подходов: использования в экспериментах очень большого числа объектов, больших продолжительностей наблюдения, регистрации ряда показателей, не относящихся непосредственно к лучевой болезни, и т.п. Все это требовало больших затрат средств и времени и не всегда казалось целесообразным. Тем не менее хорошее знание "классических эффектов" облучения позволяло выявлять и такие его последствия, которые не укладываются в классическую схему и могут быть названы "неклассическими". Число работ, посвященных неклассическим эффектам, постепенно нарастает. В ходе таких исследований начинает выявляться, что биологическое действие малых доз чревато рядом ранее неизвестных и еще не изученных достаточно особенностей.

Так, в последние десятилетия установлено, что даже однократное облучение клеток в нелетальных для них дозах может ощутимо повышать частоту появления нежизнеспособных потомков. Это наблюдается у всех видов изученных клеток, продолжается на протяжении сотен клеточных делений и сопровождается повышением чувствительности таких клеток к самым разным неблагоприятным воздействиям ^{15/}. Было обнаружено также, что у значительной доли выживающих после облучения клеток генетические нарушения могут не только проявляться, но и вновь возникать с очень высокой частотой также на протяжении сотен клеточных делений ^{16/}. У высших растений однократное облучение семян также может приводить к длительно развивающимся генетическим аномалиям, нередко выявляемым "без затухания" на протяжении минимум трех поколений ^{17/}. Известно также, что частота мутирования хромосом в лимфоцитах человека ^{18/}, а также частота онкогенной трансформации клеток ^{19/} при действии низких доз излучений значительно больше, чем следовало бы ожидать при прямолинейной экстраполяции от высоких доз, а облученные животные и даже их потомки более чувствительны к химическим онкогенам, чем контрольные, необлученные ^{10/}. Печальный опыт Чернобыля показал, что у людей, подвергшихся облучению, но не испытавших лучевую болезнь, значительно чаще наступают самые разные заболевания ^{11/}, что прямо указывает на вызываемую облучением депрессию иммунной системы. Все это заставляет думать, что использование даже беспороговой концепции может приводить примерно к десятикратной недооценки риска малых доз облучения ^{12/}. Хотя результаты таких исследований еще не систематизированы и не охвачены единой системой представлений, но даже то, что уже известно, позволяет утверждать, что концепция непороговых биологических эффектов радиации, на которую опирался А.Д.Сахаров, - единственно верный подход к оценкам возможной

опасности облучения относительно малыми дозами не только больших контингентов населения, но даже отдельных индивидуумов.

В этом отношении поучительно провести сопоставление непороговой концепции с общепринятой сейчас для оценки возможной опасности облучения концепцией "предельных доз". Так, согласно официальным нормам радиационной безопасности /14/ предельной дозой для населения "категории Б", т.е. не работающего непосредственно с источниками излучений, считается доза 0,5 бэр/год (бэр - биологический эквивалент рентгена). Считается, что облучение в такой дозе не грозит людям лучевой болезнью и поэтому совершенно безопасно. Если же применить подход, развитый А.Д.Сахаровым, то оказывается, что при достаточно большом числе лиц, перенесших такое облучение, вероятность проявления различных непороговых эффектов может достигать величины порядка 0,1, т.е. до десяти процентов самих облученных людей или их потомков могут испытать различного рода аномалии. С этим, по-видимому, и приходится сталкиваться человечеству не только в результате испытаний ядерного оружия, но и в результате аварий ядерных реакторов, утечки отходов ядерных производств и т.п.

Проблема "предельных доз облучения" еще более усложняется в связи со следующими двумя обстоятельствами. Во-первых, при ядерных авариях типа чернобыльской в окружающую среду, а затем и в организм человека попадают радиоактивные изотопы самых разных элементов, в том числе источники альфа-излучения и "горячие частицы" (представляющие собой микроскопических размеров сплавы самых разных изотопов), действие которых на здоровье людей практически не изучено. Во-вторых, мы еще очень мало знаем о различиях в индивидуальной чувствительности людей к воздействиям малых доз, особенно изотопов разной природы. Известно, однако, что у животных, например мышей, при внешнем облучении радиочувствительность разных представителей гетерогенной популяции может различаться до десяти раз, так что некоторые животные после облучения в дозе 50 рад чувствуют себя так же плохо, как другие - после дозы 500 рад. Особенно высоко чувствительны к облучению эмбрионы животных и человека в период закладки и формирования разных тканей и органов. Так, анализ данных по Хиросиме и Нагасаки показывает, что облучение женщин на 8-15 неделях беременности уже в дозах 1-2 бэр удваивает частоту случаев рождения детей с тяжелой умственной отсталостью /13/. Если у человека различия в радиочувствительности разных индивидов и лиц разного возраста столь же велики, как у других млекопитающих, то пагубные последствия облучения для отдельных групп населения могут быть значительно выше, чем "в среднем" для большой популяции. Очевидно, что при решении вопроса о предельных дозах следует ориентироваться на наиболее радиочувствительных представителей населения.

Я здесь не касаюсь проблемы распространения непороговой концепции не только на группы людей разной численности, но и на окружающую нас живую природу. Столкнувшись с чернобыльской катастрофой, мы оказались несведущими в таком, например, вопросе, как влияние облучения всей биоты, населяющей достаточно обширные территории, на динамику численности микроорганизмов, различных растений и животных, обитающих в почве, на поверхности земли и в водоемах и, как следствие этого, на биоценозы в целом. Даже такие дозы облучения, которые некоторые авторы /14/ называют "стимулирующими" и легкомысленно относят к "безвредным", здесь могут приводить к тяжелым последствиям, вызывая деформацию видового состава ценозов и тем самым уменьшая их надежность, устойчивость к различным дополнительным воздействиям. Я хочу лишь еще раз подчеркнуть, что подходы к оценке опасности для людей радиоактивных загрязнений, развитые А.Д.Сахаровым тридцать лет назад, к настоящему времени приобрели еще большую злободневность.

Вторая особенность представлений, развитых в работе А.Д.Сахарова, - это оценка опасности радиационных воздействий на человека не по увеличению процента ожидаемых аномалий (таких, например, как заболевание раком), а по абсолютной величине подобных эффектов. Это очень важное обстоятельство. В процентном отношении - особенно ко всему населению большого региона, республики, страны или всего Земного шара - последствия атомных испытаний или радиоактивных загрязнений могут составить небольшую величину, как иногда говорят, "в пределах погрешностей измерений". Но этот аргумент, - подчеркивает А.Д.Сахаров, - не отменяет того факта, что к уже имеющимся в мире страданиям и гибели людей дополнительно добавятся страдания и гибель сотен тысяч жертв, в том числе в нейтральных странах, а также в будущих поколениях. Две мировые войны тоже добавили менее 10% к смертности в XX в., но это не делает войны нормальным явлением" (стр.45).

Моральный аспект проблемы действия на человечество испытаний ядерного оружия особенно волновал А.Д.Сахарова. Как он отмечает, весьма распространенный в литературе аргумент "... сводится к тому, что прогресс цивилизации и развитие новой техники и во многих других случаях приводит к человеческим жертвам. Часто приводят пример с жертвами автомобилизма. Но аналогия здесь не точна и не правомерна. Автотранспорт улучшает условия жизни людей, а к несчастьям приводит лишь в отдельных случаях в результате небрежности конкретных людей, несущих за это уголовную ответственность. Несчастья же, вызываемые испытаниями, есть неизбежное следствие каждого взрыва. По мнению автора, единственная специфика в моральном аспекте данной проблемы - это полная безнаказанность преступления, поскольку в каждом конкретном случае гибели человека нельзя доказать, что причина лежит в радиации, а также в полной беззащитности потомков по отношению к нашим действиям" (стр.43-44).

Этот этический принцип, сформулированный А.Д.Сахаровым тридцать лет назад, целиком приложим и к тем последствиям крупномасштабных аварий, которые произошли в 1957 г. в Челябинской области, и в 1986 г. в Чернобыле, в результате чего сотни тысяч людей оказались "подопытным материалом" чудовищного "эксперимента на людях", не давших на это своего согласия, проведенного без их ведома. Это следовало бы ясно осознавать и тем, кто до сих пор санкционирует испытания ядерного оружия, и тем, кто курирует строительство "удешевленных" атомных электростанций, и тем (прежде всего академику АМН СССР Л.А.Ильину, призванному обеспечивать радиационную безопасность населения нашей страны), кто ответственен за меры ликвидации последствий аварий такого рода, а также за рекомендации типа "деактивации" загрязненных радиоактивными изотопами продуктов сельского хозяйства путем добавления их к "чистым" продуктам и рассредоточения по различным регионам страны /15/, а также за волюнтаристическое повышение значений предельных доз облучения людей. Так, недавно было опубликовано /16/ "Заявление группы ученых, работающих в области радиационной безопасности и радиационной медицины, в связи с ситуацией, обусловленной аварией на Чернобыльской атомной электростанции", подписанное в числе прочих и Л.А.Ильиным. В этом заявлении приводится "обоснование" новой предельной дозы (или "концепции допустимой пожизненной дозы") для населения "категории Б" - 35 бэр, предложенной Национальной комиссией по радиационной защите при Министерстве здравоохранения СССР. Эта величина - 35 бэр - получена путем умножения "старой" предельной дозы 0,5 бэр в год на 70 лет - принятый авторами концепции срок жизни человека. При этом не указывается, за какой период эта доза - 35 бэр - может быть "набрана" - в результате однократного облучения или равномерного облучения на протяжении всей долгой жизни, в том числе на старости лет. Не учитываются также два следующих обстоятельства: во-первых, 35 бэр однократного (или даже в течение 2-3 лет) облучения существенно превосходит предельно допустимую дозу для лиц "категории А" - 5 бэр/год, что чревато различными патологиями у самих облученных людей, особенно у детей; во-вторых, доза в 35 бэр близка к дозам, удваивающим частоту мутаций у человека (см. выше), что чревато двукратным увеличением генетических аномалий у потомков лиц, получивших такую дозу до окончания репродукционного периода, особенно в случае больших групп населения.

Подходы к оценкам последствий испытания атомного оружия, развитые А.Д.Сахаровым в его статье, делают понятным его бескомпромиссную позицию по отношению к разработкам и испытаниям такого оружия, сформулированную следующим образом: "Прекращение испытаний непосредственно сохранит жизнь сотням тысяч людей и будет иметь еще большее косвенное значение, способствуя ослаблению международной напряженности, уменьшению опасности

ядерной войны - основной опасности нашей эпохи" (стр.44). Кроме того, как мы видели, работа эта содержит ряд принципиальных положений, имеющих важнейшее методологическое значение для всей проблемы оценки радиационной опасности, связанной с использованием ядерных технологий даже в сугубо мирных целях.

Литература

- I. Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся в Женеве 8-20 августа 1955 г. Том II. Биологическое действие излучений. М., Гос. издат. мед. лит., 1958.
2. Опасности ионизирующего излучения для человека. М., Изд. ин. лит., 1958.
3. Советские ученые об опасности испытаний ядерного оружия. М., Атомиздат, 1959, с.36-44.
4. Нормы радиационной безопасности и основные санитарные правила. М., Энергоиздат, 1981, с.11.
5. Бычковская И.Б. Проблема отдаленной радиационной гибели клеток. М., Энергоатомиздат, 1986.
6. Корогодин В.И. и др. Радиобиология, 1977, т.17, вып.4, с.492-499.
7. Олимпиаенко Г.С. и др. Сельскохозяйственная биология, сер. биология растений, 1989, № 3, с.136-138.
8. Luchnik N.V., Sevankaev A.V. Mut.Res., 1976, v.36, No.3, p.363-378.
9. Hill C.K., Han A., Elkind M.M. Int.J.Rad.Biol., 1984, v.46, No.I, p.II-15.
10. Vorobtsova J.E. In: Perinatal and Multigeneration Cancerogenesis. IARC, 1989, p.389-401.
11. "Правда", 1989, 13.IX.; "Известия", 1989, 3.IV.; 1989, 31.IV.; 1990, 7.I.
12. Baliga B.B. Sci. and Cult., 1981, v.47, No.I, p.30-34.
13. Miller R.W. Health Phys., 1988, v.55, No.2, p.295-298.
14. Кузин А.М. Особенности механизма действия атомной радиации на биоту в малых, благоприятных для нее дозах. Пушино, Изд. Научн. центра биол. исследований АН СССР, 1989.
15. "Известия", 1989, 3.IX.; "Соц. индустрия", 1989, 25.XI.
16. Медицинская радиология, 1990, № I, с.7-9.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 апреля 1990 года.