

# Основные нормы безопасности по радиационной защите

А.Д. Гонзалес\*

Третье издание Основных норм безопасности Агентства по радиационной защите, опубликованное в 1982 г., было новым шагом на пути обеспечения радиологической безопасности. Ученые поняли необходимость такой защиты еще в начале этого века, и к 20-м годам появились предложения по установлению стандартных единиц измерения и принятию международных количественных рекомендаций по вопросу радиационной защиты. В 1928 г. с образованием Международной комиссии по Х-лучам и радиационной защите (ныне Международная комиссия по радиологической защите [МКРЗ]) стало возможным создать количественные рекомендации по ограничению доз, получаемых работающим в радиационных условиях персоналом. И только через четверть века вышли рекомендации МКРЗ пределов доз облучения населения.

Задача МКРЗ всегда заключалась в рассмотрении фундаментальных принципов, на которых должна базироваться радиационная защита, а также вопросов их практического применения; непосредственно осуществлять эти принципы должны были национальные органы. При образовании МАГАТЭ в его Уставе как одна из основных функций была провозглашена разработка норм безопасности. В 1962 г. Агентство опубликовало первое издание Основных норм безопасности по радиационной защите. Третье издание этого документа, разработанного совместно со Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), Международной организацией труда (МОТ) и Агентством по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР, было выпущено в 1982 г. в виде Серии изданий МАГАТЭ по безопасности № 9.

За основу этих норм взяты рекомендации МКРЗ, дополненные и представленные для практических целей в виде свода подробных указаний, которые полезны не только для собственных нужд Агентства, но и для государств-членов в качестве основы для разработки и применения собственных правил. При публикации в 1967 г. второго издания Совет управляющих Агентства рекомендовал всем государствам-членам привести национальные правила в соответствие с этими нормами.

## Система ограничения доз

Важной чертой последнего издания Основных норм безопасности является то, что оно включает

недавно рекомендованную МКРЗ систему ограничения доз, которая вместе с ее дополнительными требованиями может найти чрезвычайно широкое применение в области защиты от опасности, создаваемой деятельностью человека. Эта новая система устанавливает требования, применяемые по отношению к отдельному человеку, т.е. пределы индивидуальных доз, которые не должны превышать; это общие требования для нормирования защиты здоровья. Но система также вводит требования, применяемые к источнику, способ, редко используемый в других системах защиты. Эти требования предполагают, что, независимо от того, насколько малыми могут быть индивидуальные дозы, должны выполняться следующие два условия: а) деятельность, связанная с ионизирующим излучением, должна быть оправдана с точки зрения радиологической опасности; б) усилия к дальнейшему снижению радиационного облучения должны быть постоянными, если только выгоды — в терминах уменьшения дозы — оправдывают затраченные на них усилия. Это второе условие известно как оптимизация радиационной защиты\*.

*Требования, связанные с отдельными лицами.* Нормы безопасности устанавливают первичные основные пределы доз для определения опасного диапазона индивидуальных доз. Вторичные пределы, связанные с первичными пределами доз, устанавливаются, например, в терминах пределов поступления радиоактивного вещества в организм.

Облучение ниже пределов доз обеспечивает поддержание индивидуального радиологического риска от всех контролируемых источников ионизирующего излучения на таком низком уровне, что это не должно вызывать беспокойства индивидуума. В данном случае целью является не контролирование суммарного вреда, причиняемого отдельными источниками, а ограничение индивидуального риска от облучения всеми источниками. Однако, так как индивидуум может быть облучен несколькими источниками, пределы доз нельзя применять для ограничения индивидуальной дозы от какого-то одного источника; это скорее означает, что для каждого источника следует использовать „верхнюю границу источника“ для того, чтобы сумма доз от всех источников не могла достигнуть пределов дозы (Рис. 1а). Доля

\* Оптимизация радиационной защиты является сокращенным термином, используемым для обозначения требования, что все облучения должны поддерживаться на практически достижимом низком уровне с учетом экономических и социальных факторов.

\* А.Д. Гонзалес — руководитель Секции радиологической безопасности в Отделе ядерной безопасности МАГАТЭ.



(а) Основные Нормы безопасности по радиационной защите обеспечивают достаточный уровень индивидуальной защиты через *связанные с отдельными лицами требования*, которые устанавливают, что облучение отдельных лиц контролируруемыми источниками или в результате контролируемой деятельности не должно превышать установленные Нормами *пределы доз*. Полная индивидуальная доза должна определяться без учета естественного фоновое излучения и медицинского облучения. Если возможно облучение от нескольких источников, то должны быть установлены *верхние границы источников*, представляющие собой долю от пределов доз отдельных источников облучения



(б) Нормы предусматривают дополнительную защиту через *связанные с источником требования*, которые устанавливают *оправданность деятельности*, с использованием источника и *оптимизацию радиационной защиты*, которая должна применяться с этим источником. Это учитывает сумму всех доз, даже малых от источника, независимо от места и времени облучения

Рис. 1

облучения от природных источников не техногенного происхождения во внимание не принимается. Индивидуальные медицинские облучения пациентов, кроме диагностических, также не учитываются, так как в таких случаях, как считают, индивидуальная выгода превышает риск.

**Требования, связанные с источником.** Требование *оправданности* деятельности означает, что для предотвращения облучения, не являющегося необходимым, компетентные органы не должны разрешать деятельности, связанной с облучением ионизирующим излучением, если только осуществление такой деятельности не дает общей положительной выгоды. Требование *оптимизация* радиационной защиты означает, что планирование, проектирование, применение или эксплуатация источников и процессов должны осуществляться таким образом, чтобы облучение было на практически достижимом низком уровне с учетом экономических и социальных факторов (Рис. 16).

Хотя, казалось бы, что оправданность должна быть очевидным требованием, регулирующие органы могут иногда разрешать начало какой-либо деятельности, не задаваясь вопросом, превышает ли социальная выгода вредное воздействие от такой деятельности. Концепция оправданности предупреждает регулирующие органы: прежде чем принять решение об одобрении начала деятельности, связанной с облучением ионизирующим излучением, следует оценить тот радиологический вред, который данная деятельность может причинить обществу.

Оптимизация относится ко всем ситуациям, при которых на радиационное облучение от источника можно воздействовать защитными мероприятиями. Подобное требование можно было бы принципиально использовать при планировании защитных действий в случае, когда источник излучения может выйти из-под контроля. Оптимизация требует, чтобы необходимый „оптимальный” уровень защиты определялся из соответствующего баланса между защитными действиями и выгодой от таких действий, выраженной в терминах уменьшения радиационного ущерба. Нормы безопасности вводят методы анализа затраты — выгоды в качестве практического руководства для осуществления оптимизации радиационной защиты.

## Основные понятия и величины, требующие размышления вопросы и проблемы применения

**Риск и ущерб.** Для понимания и применения системы ограничения доз важно разобраться в концепциях риска и ущерба, используемых в Нормах безопасности.

**Риск,** связанный с конкретной радиационной дозой, определяется как вероятность того, что индивидуум получит определенное радиационное воздействие в результате получения такой дозы. Величины между 0 и 1 представляют вероятность (т.е. степень достоверности) того, что радиационная доза принесет вред облученному индивидууму. Следовательно, требования, связанные с отдельными ли-

цами, направлены на поддержание индивидуальной вероятности радиологических вредных последствий ниже соответствующего низкого уровня.

**Ущерб** определяется как математическое ожидание вредных последствий от источника. При оценке ущерба принимается во внимание как вероятность, так и серьезность возможного вредного воздействия. Числовое значение, отражающее ущерб, может быть очень большим в зависимости от величины вреда, который ожидается от источника. Оно зависит не только от полученных индивидуальных доз, но также и от числа людей, облученных данным источником. Ущерб используется для классификации связанных с источником требований радиационной защиты.

**Ожидаемая коллективная доза.** Компонентом, связанным с ущербом, является „компонент здоровья” или математическое ожидание эффекта, который, в предположении пропорциональности между дозой\* и риском в диапазоне доз ниже пределов доз, пропорционален всем дозам, получаемым от источника независимо от уровня, места и времени облучения. Суммарная доза характеризуется величиной, называемой *ожидаемой коллективной дозой*, которая образуется двойным суммированием (или интегрированием при учете дифференциальных составляющих) по пространству и времени: I) все индивидуальные мощности доз от какого-либо источника суммируются для получения коллективной мощности дозы для этого источника как функции времени; II) все коллективные мощности доз суммируются по времени для получения ожидаемой коллективной дозы.

**„Минимальная” доза.** Одним из вопросов, связанных с суммированием индивидуальных мощностей доз, является вопрос, не следует ли прекращать суммирование, когда индивидуальные мощности доз становятся очень малыми (например, когда они пренебрежимо малы для индивидуума). Это может быть, например, в случае, когда индивидуальную мощность дозы можно сравнить с флуктуациями естественного фона. Такой уровень мощности дозы иногда называется „минимальной” дозой и считается находящимся вне сферы интересов регулирующих органов. Однако, хотя доза может быть незначительной для индивидуума, обществу может быть нанесен существенный вред, складывающийся из суммы множества незначительных доз, что является фактом, который не могут игнорировать органы власти. С другой стороны, если обе дозы, индивидуальная и коллективная, незначительны, концепция „минимальности” могла бы использоваться для целей регулирования. Следовательно, в целом, Нормы безопасности не предусматривают никакого обоснования для пренебрежения даже малыми индивидуальными мощностями доз при оценке

\* Термин *доза* используется в смысле *эффективной эквивалентной дозы*, величины, введенной в Нормы безопасности для определения поглощенной дозы с учетом типа ионизирующего излучения и радиочувствительности органов и тканей организма человека.

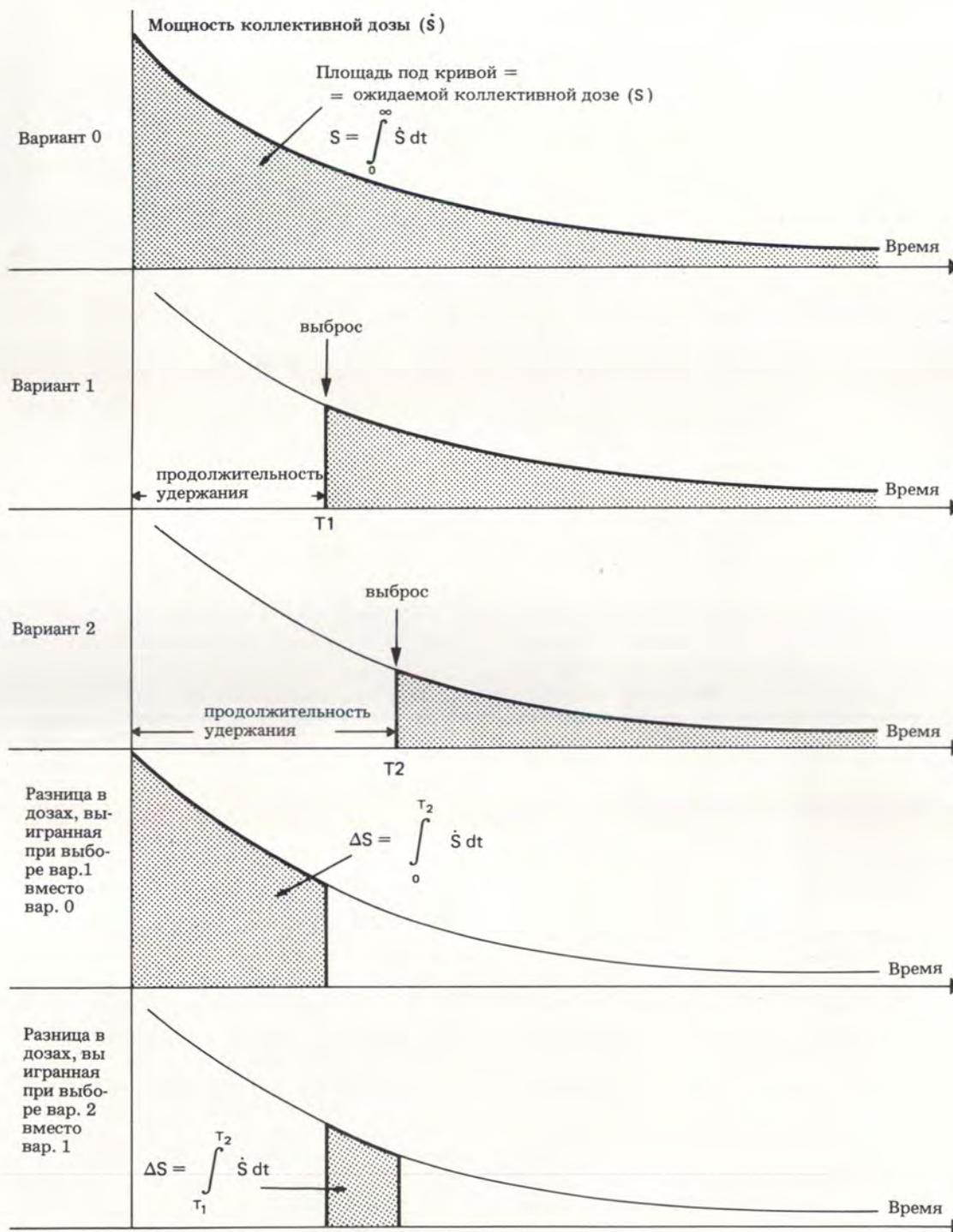


Рис. 2 Неопределенность при определении доз в отдаленном будущем для оценки ожидаемой коллективной дозы не важна для процесса оптимизации радиационной защиты. Например, на рисунках показаны мощности коллективных доз в функции времени для трех вариантов контролирования выброса радиоактивных веществ в окружающую среду. Площадь под кривой равна ожидаемой коллективной дозе для каждого варианта. При варианте 0 контроль полностью отсутствует, мощность коллективной дозы будет воздействовать от нулевого момента времени до бесконечности. При варианте 1 происходит полное удержание до момента времени  $T_1$ , после которого контроль не предполагается; мощность коллективной дозы будет воздействовать от  $T_1$  до бесконечности. При варианте 2 события будут развиваться как при варианте 1, только до момента времени  $T_2$ . При выборе варианта 0 или 1 будут учитываться только дозы, полученные между нулевым моментом времени и  $T_1$ . Аналогично при выборе варианта 1 или 2, будут учитываться только дозы, полученные между  $T_1$  и  $T_2$ . Если других вариантов не имеется, то любые дозы, полученные после  $T_2$ , не влияют на принятие решения

коллективной мощности дозы. Однако, Нормы не запрещают регулирующим органам пренебрегать незначительными индивидуальными дозами при условии, что они приводят к незначительной коллективной дозе.

**Интегрирование до бесконечного предела.** Другим серьезным вопросом является осуществление интегрирования мощности коллективной дозы по бесконечному отрезку времени. В частности, некоторые виды деятельности могут быть связаны с долгоживущими радионуклидами, которые могут являться причиной облучения в течение тысяч и даже миллионов лет. Для обоснования регулирующему лицу должен быть известен полный характер облучения, хотя и существует значительная неопределенность в оценках коллективной дозы для очень продолжительных отрезков времени. Однако, при оптимизационных оценках следует принимать во внимание только ту часть дозы, на которую могут оказывать воздействие защитные мероприятия, и только тот отрезок времени, в течение которого можно контролировать радиационное облучение. Облучение на более поздних этапах не влияет на результат оптимизации. Следовательно, для оптимизационных оценок нет необходимости в интегрировании мощности коллективной дозы на бесконечном отрезке времени. Используются не абсолютные значения ожидаемых коллективных доз, а разность значений доз, ожидаемых для имеющихся вариантов. Разность двух интегралов по бесконечным пределам интегрирования является величиной конечной. Это может быть проиллюстрировано примером: если в системе контроля радиоактивной среды вариант 1 задерживал бы радиоактивное вещество до момента времени  $T_1$ , вариант 2 — до момента  $T_2$ , а вариант 0 совсем не имел бы контролирующей системы, тогда выгода от выбора варианта 1 вместо варианта 0, или варианта 2 вместо варианта 1 может быть измерена уменьшением ущерба, которое определяется интегралом по конечному отрезку времени (Рис. 2).

**Анализ стоимость—выгода.** Для осуществления количественной оптимизации анализ „стоимость—выгода” не является единственным методом. Для оптимизации радиационной защиты могут также применяться и другие количественные или более качественные методы. Однако, анализ „стоимость—выгода” является простым методом для демонстрации достижения баланса между полученными выгодами в терминах снижения радиационного ущерба и защитными усилиями. Это достигается в случае, когда сумма величин, приписываемых усилиям, затраченным на дальнейшее улучшение защиты, и суммарному снижению ущерба, достигает минимума (Рис. 3). Если защитные усилия легко могут быть оценены в терминах *стоимости защиты*, то оценка ущерба для получения так называемой *стоимости ущерба* является особенно трудной проблемой.

**Определение стоимости ущерба для здоровья.** Основные нормы безопасности требуют, чтобы при определении ущерба для здоровья учитывались все дозы от данного источника без исключения. Нормы

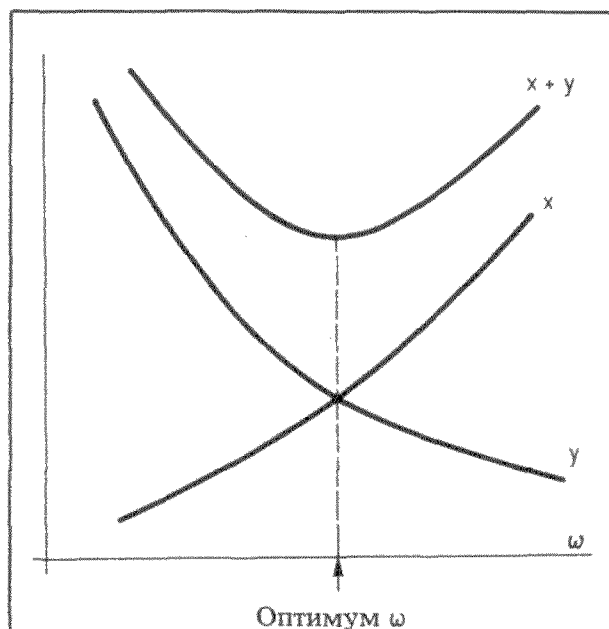


Рис. 3 Оптимизация радиационной защиты может быть осуществлена методом анализа „стоимость—выгода”. В этом случае задача заключается в отыскании такого уровня защиты, при котором сумма *стоимости защиты*  $X$  и *стоимости ущерба*  $Y$  минимальна. В некоторых случаях процесс минимизации относительно прост, как показано на рисунке, так как стоимость и защиты, и ущерба являются непрерывными функциями одного защитного параметра  $\omega$ . Это случай, когда защитным параметром является, например, толщина биологической защиты или расход в системе вентиляции. В других случаях существуют возможные защитные варианты, которые не всегда могут быть определены единственным параметром; в этом случае оптимум может быть достигнут только с помощью многократно повторяющегося процесса, в котором проверяются постепенно увеличивающиеся уровни защиты до достижения точки, в которой выполняется условие минимальной полной стоимости.

рекомендуют применять константу „альфа” для связи стоимости ущерба с ожидаемой коллективной дозой. Так как для сравнения стоимость ущерба следует представлять в тех же единицах, что и стоимость защиты, то „альфа” обычно выражается в денежных единицах на единицу коллективной дозы. Это вызвало широко распространившееся заблуждение, касающееся философских и этических последствий такого подхода, будто жизни человека может быть приписана какая-то стоимость в денежном выражении. Однако, Нормы безопасности со всей очевидностью утверждают, что они не устанавливают денежного выражения стоимости жизни человека и не ограничивают стоимости защиты, необходимой для поддержания индивидуального облучения в рекомендуемых пределах. Оптимизация требует, чтобы в случае существования возможности любого дальнейшего уменьшения облучения принимались бы во внимание экономические и социальные факторы с целью обеспечения опти-

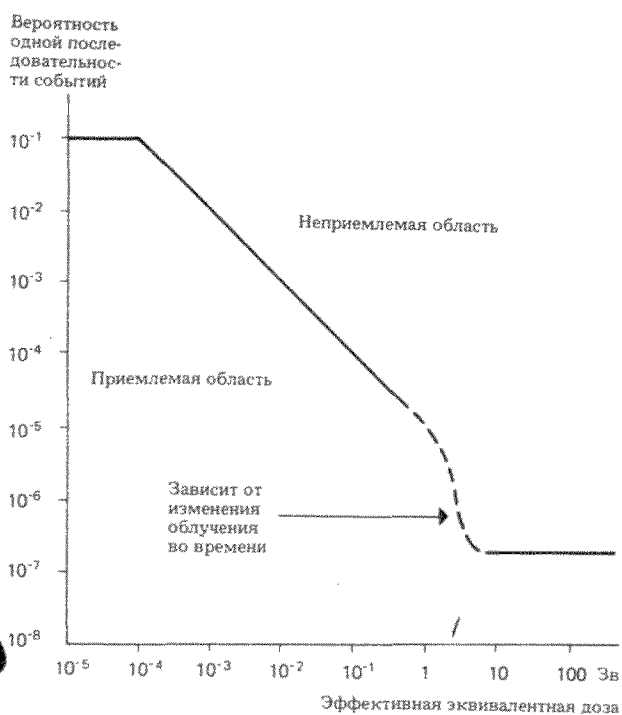


Рис. 4 В случае возможного облучения, которое может быть оценено только на вероятностной основе, все еще может применяться принцип ограничения индивидуального риска, предусматриваемый связанными с отдельными лицами требованиями Норм безопасности. В этих случаях будет требование, что математическое ожидание индивидуальной годовой дозы никогда не должно превышать верхней границы годовой дозы, установленной для данного источника. Это можно сформулировать в виде кривых критерия приемлемости как функции вероятности от дозы. На рисунке приводится кривая критерия приемлемости для хранилища радиоактивных отходов, представленная на Международной конференции МАГАТЭ по обращению с радиоактивными отходами. Данную кривую следует применять для каждой из рассмотренных десяти последовательностей развития разрушительных событий при верхней границе риска  $2 \cdot 10^{-6}$  1/год

мального использования имеющихся ресурсов для достижения такого уменьшения.

Последние рекомендации МКРЗ по анализу „стоимость—выгода” для оптимизации радиационной защиты предполагают, что, хотя методы анализа „стоимость—выгода” требуют определения цены изменения продолжительности жизни анонимных индивидуумов, для определенных индивидуумов не приписывается никакой стоимости. Действительно, коэффициент „альфа” представляет собой сумму, ассигнуемую обществом для избежания облучения, величиной в единицу коллективной дозы, и величина этой суммы определяет достигнутый уровень радиационной защиты. Это не имеет ничего общего с тем, чтобы оценить человеческую жизнь, это рациональный способ сохранить многие жизни. Это соответствует тому, что общество должно принять тот наивысший возможный уровень радиационной защиты, который может быть принят без конфликта с другими законными потребностями и обязанностями общества.

**Проблемы распределения.** Интересный вопрос состоит в том, следует или нет одинаково оценивать ущерб, нанесенный в разных местах или в разное время. Общий этический принцип, заключающийся в том, что усилия по улучшению условий жизни должны предприниматься независимо от того, где и когда ожидается обитание живого организма, кажется, является единственным рациональным отношением к проблеме. В Нормах не делается различия в оценке вклада разных пространственных и временных компонентов ущерба. Однако, предполагалось, что оценка компонентов для разного времени могла бы проводиться путем определения соответствующих стоимостей разными весовыми

коэффициентами. Одни специалисты предложили, базирясь на экономических представлениях, использовать стоимости для будущих времен с отрицательными коэффициентами, используя расчетную концепцию дисконтирования будущих стоимостей для приведения их к настоящему времени; другие, исходя из этических соображений, рекомендовали положительные весовые коэффициенты, так как будущие поколения, которые на себе будут испытывать этот ущерб, лишены возможности участвовать в формировании процедуры оценки.

В связи с этим в Правилах Агентства по установлению пределов выброса радиоактивных веществ в окружающую среду (Серия изданий МАГАТЭ по безопасности № 45) указывается, что использование современной стоимости для определения будущих затрат является предметом тщательного анализа со стороны регулирующих органов, которые должны решить, разумно ли дозам, которые будут в далеком будущем, приписывать меньший вес, чем дозам в ближайшем будущем. Недавний проект отчета группы экспертов, собранной Папской Академией наук Ватикана, рекомендует для будущих доз, которые могут быть предотвращены за счет защитных мер, тот же весовой коэффициент, что и для доз, получаемых в настоящее время. В конце концов может оказаться, что иной подход не имеет практического смысла, так как во многих оптимизационных оценках должен будет учитываться ущерб, причиняемый только в относительно близком будущем.

**Трансграничные аспекты.** Так как радиационный ущерб, возникающий от источника в одной стране, может испытывать население другой страны, кажется очевидным, что будут определены цены трансграничным компонентам такого ущерба. МКРЗ

считает, что острота этой проблемы могла бы быть снижена, если бы можно было установить некоторый приемлемый на международном уровне минимальный предел значения коэффициента „альфа”. В любом случае, значение этого коэффициента, применяемое к другим странам, не должно быть меньше значения, применяемого к стране, в которой располагается источник. В ходе внедрения Норм безопасности Агентство уже начало подготавливать такое международное соглашение\*.

**Другие компоненты ущерба.** В соответствии с Нормами безопасности ожидаемая коллективная доза дает возможность измерять объективный ущерб здоровью от источника. Ожидаемые компоненты, обладающие более высоким индивидуальным риском, не учитываются как-то иначе, чем другие компоненты. Такой подход подкрепляется одной из философских основ системы ограничения доз, которая состоит в том, что ограничение предела дозы должно сдерживать индивидуальный риск на таком низком уровне, чтобы он не вызывал беспокойства индивидуума. Соответственно, оценки различных компонентов ожидаемой коллективной дозы, образующихся от доз, меньших, чем предел дозы, не должны быть разными. Однако, в Нормах признается, что в качестве отдельных компонентов радиационного ущерба могут действовать другие субъективные факторы, подобные факторам, имеющим значение при восприятии риска. Тогда, расширяя понятие ущерба, к компоненту ущерба, связанному со здоровьем, без его модификации можно добавить дополнительный компонент для учета этих факторов. В Нормах предполагается, что этот компонент является функцией средней индивидуальной дозы среди проявляющих беспокойство облученных людей.

**Потенциальные облучения.** Хотя, строго говоря, система ограничения доз применяется только к контролируемым источникам, те же основные принципы также можно мысленно применить к источникам, которые могут стать причиной облучения, или безоговорочно к облучениям, имеющим определенную вероятность реализации, например, в результате аварий на атомных электростанциях или в хранилищах радиоактивных отходов. Однако, прежде чем это можно будет сделать, необходимо ответить на несколько вопросов. Кажется приемлемым применить концепцию риска при оценках, касающихся индивидуума. Риск был бы в этом случае пропорционален произведению возможной индивидуальной дозы на вероятность ее реализации. Для решения вопроса, будет ли возможное облучение приемлемо с точки зрения индивидуума, были предложены критерийные кривые (Рис. 4).

С другой стороны, применение концепции ущерба в оценках, связанных с источником, является не таким простым, как в случае действительного облучения. Хотя в случаях возможного облучения математическое ожидание вреда может также быть фактором при определении, является ли определенный уровень защиты разумно достижимым. Не обяза-

тельно ограничиваться только этим фактором. Соответствующим параметром учета могли бы быть и суммарные последствия реально случившегося облучения. Действительно, хотя оптимизация защиты от возможных облучений могла бы основываться на ожидаемых коллективных дозах, статистическая неопределенность реального выхода может быть очень большой. Стандартное отклонение ожидаемой коллективной дозы пропорционально ожидаемой величине и обратно пропорционально квадрату вероятности реализации события. Для очень низких вероятностей, подобных приписываемым некоторым авариям, отклонение может быть на несколько порядков больше ожидаемой величины, что делает бессмысленным учет этой величины в процессе принятия решения. В таких случаях для определения оптимума среди набора имеющихся вариантов защиты можно было бы использовать дополнительный метод. Была высказана возможность применения нелинейных функций ценности (которые учитывали бы приписываемый ожидаемой величине вес по мере увеличения возможного облучения), или, как другой вариант, можно было бы добавлять к компоненту ожидаемой коллективной дозы компонент, который был бы прямо пропорционален возможному облучению.

### Виды на будущее

Некоторые критерии новой системы ограничения доз оспаривают положения предмета радиационной защиты. Агентство провело семинары и симпозиумы, подтвердившие жизнеспособность системы. Планируется направить усилия Агентства в области радиационной защиты на внедрение Норм безопасности. Некоторые практические вопросы уже решены, для других должны быть найдены соответствующие практические ответы.

Если можно будет решить известные проблемы использования принципов радиационной защиты в случае потенциального облучения, то область применения принципов системы ограничения доз будет расширена. Такие актуальные вопросы, как задачи ядерной безопасности или критерии для хранилищ радиационных отходов, могли бы более рационально трактоваться и, в конце концов, решаться. Поэтому Агентство с особым вниманием изучает эту проблему и непрерывно следит за научными достижениями по этому вопросу.

Система ограничения доз, включенная в Нормы Агентства, основывается на чрезвычайно сложной философии, которая, хотя и возникла первоначально из радиационной защиты, учитывает этику, социальные науки и другие дисциплины. Было высказано предположение, что подобный подход можно было бы применить к контролю над другими токсичными и мутагенными веществами. Нормы безопасности обеспечивают основную структуру для решения изложенных в уставе Агентства задач по ускорению и расширению вклада атомной энергии в дело мира, сохранения здоровья и процветания во всем мире, соответственно с учетом вредного воздействия ионизирующего излучения. Нормы безопасности могут также служить образцом для борьбы с другими опасностями для жизни человека.

\* Группа консультантов МАГАТЭ и ВОЗ подготовила документ, рекомендуемый минимальную величину коэффициента „альфа”, который будет рассмотрен на заседании консультативной группы в декабре этого года.