

Радиация и человек*

И. Я. Василенко

доктор медицинских наук,

Государственный научный центр — Институт биофизики

О. И. Василенко[†]

доктор физико-математических наук,

физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Радиация является физическим фактором, в условиях которого возникла и продолжает эволюционировать жизнь на Земле. Человек постоянно подвергался и подвергается внешнему и внутреннему облучению.

1 Источники облучения

Источниками облучения являются естественный радиационный фон Земли, техногенно изменённый естественный фон и искусственный радиационный фон. В результате деятельности человека радиационный фон Земли изменился. Изменение его затрагивает не только профессиональные группы, но и население Земли в целом, поскольку повысились дозы облучения. Значение этого остаётся одной из наиболее сложных проблем радиобиологии.

Естественный радиационный фон (ЕРФ) представляет собой ионизирующие излучения (ИИ) природных источников космического и земного происхождения. Космические излучения представляют собой поток ядерных частиц, приходящих из различных областей мирового пространства и состоящих из протонов (92 %), ядер гелия (α -частиц), ядер лития и других элементов. Это первичное космическое излучение взаимодействует с атомами и молекулами атмосферы, образуя вторичное космическое излучение, состоящее в основном из электронов, нейтронов, мезонов

*И. Я. Василенко, О. И. Василенко. “Радиация и человек.” // Проблемы глобальной безопасности. 2002, N 6, С. 13–16.

[†]E-mail address: vasilenko@depni.sinp.msu.ru

и γ -квантов. У поверхности Земли излучение состоит в основном из μ -мезонов и (в меньшей степени) нейтронов. Они и являются источником облучения всех живых организмов, включая человека. Уровни излучения зависят от географической широты и высоты над уровнем моря. В атмосфере, литосфере, биосфере в результате ядерных реакций, инициируемых космическими лучами, постоянно образуются космогенные радионуклиды. Из 20 космогенных радионуклидов наиболее значимы ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ лет) и ^3H ($T_{1/2} = 12.35$ лет), как изотопы основных биогенных элементов.

Земная радиация обусловлена естественными радионуклидами, которые содержатся в земной коре. Из нераспавшихся к настоящему времени сохранились 23 радионуклида, получивших название примордиальных. Сроки их жизни сопоставимы с возрастом Земли. Наибольшее значение имеют ^{40}K и семейства урана, тория и актиния. По мере распада последних образуются ещё 40 радиоизотопов. Тело человека также слегка радиоактивно, так как в его тканях содержатся следовые количества естественных и антропогенных радионуклидов.

Технологически изменённый естественный радиационный фон (ТИ-ЕРФ) представляет собой ИИ природных источников, претерпевших изменения в результате деятельности человека. Радионуклиды поступают на земную поверхность вместе с извлекаемыми полезными ископаемыми, продуктами сжигания органического топлива. Они содержатся в строительных материалах, воздухе, воде, продуктах питания.

Искусственный радиационный фон Земли обусловлен в основном продуктами ядерного деления урана и плутония (ПЯД) при испытаниях ядерного оружия и выбросами радионуклидов АЭС, промышленными и энергетическими реакторами.

2 Биологическое действие радиации

В основе биологического действия ИИ лежит передача энергии в процессах ионизации и возбуждения атомов и молекул в органах и тканях человека. Эффект зависит от величины поглощённой дозы, её мощности, вида излучения, радиочувствительности, физиологического состояния организма и действия многих других вредных агентов нерадиационной природы. Взаимодействие α -, β -, γ -, n -излучений с веществом является сложным процессом, зависящим от вида излучения, конечным звеном которого, как было отмечено, является ионизация (отрыв элект-

трона от атома) или возбуждение (переход электрона на более удалённую орбиту).

Во второй физико-химической фазе образуются химически высокоактивные радикалы и перекиси. Возникшие радикалы взаимодействуют с растворёнными в организме различными соединениями и дают начало вторичным радикалам, сроки жизни которых значительно больше.

В третьей химической фазе продукты предшествующих реакций вступают во взаимодействия с органическими молекулами клеток. Особое значение имеют реакции с белками в ядрах клеток и структурные перестройки ДНК — однонитевые и двухнитевые разрывы.

Процессы, происходящие в начальных физико-химических этапах, длительность которых крайне мала, определяют развитие лучевого поражения. В четвёртой биологической фазе физико-химические и биологические изменения свойств молекул трансформируются в клеточные повреждения. Длительность биологической фазы может затянуться на многие годы и даже на всю жизнь человека.

3 Единицы измерения ИИ

Облучение человека носит, как правило, комбинированный характер, то есть сочетает внешнее и внутреннее облучения. Поглощённая доза измеряется энергией ИИ, переданной единице массы облучаемого вещества. Единица измерения поглощённой дозы — грей (Гр) равен 1 джоулю, поглощённому 1 кг вещества ($1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$). Основные радиологические величины и единицы приведены в таблице 1 на с. 7. Эффект биологического действия ИИ зависит не только от количества поглощённой энергии, но и от её пространственного распределения в веществе, которое характеризуется линейной передачей энергии (ЛПЭ), что учитывается при оценке различных видов излучения показателем относительной биологической эффективности (ОБЭ). Для рентгеновского и γ -излучений ОБЭ равен 1. Коэффициент ОБЭ для других видов излучений определяется, как отношение дозы стандартного (рентгеновского) излучения к исходному, дающему тот же биологический эффект. Величина коэффициента ОБЭ зависит не только от ЛПЭ, но и от ряда других физических и биологических факторов (величины дозы, кратности облучения и др.). Для оценки различных видов излучений коэффициенты качества используют только в радиобиологии. Величины их в зависимости от ЛПЭ равны $1 \div 20$. Для оценки возможного ущерба здоровью в условиях хронического облучения в области радиационной безопасности введено понятие "эквивалентная доза", равная произведению поглощённой

дозы данного вида излучения на весовой множитель ИИ, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма. Величина его для фотонов и электронов разной энергии равна 1, для нейтронов в зависимости от их энергий — $5 \div 20$, протонов — 5, α -частиц, осколков деления, тяжёлых ядер — 20. Облучение при поступлении в организм радионуклидов носит, как правило, неравномерный характер. Для оценки ущерба в таких условиях вводится понятие "эффективная доза", учитывающее разную чувствительность различных тканей к облучению и применяемое при оценке возможных стохастических эффектов: злокачественных новообразований (ЗНО) и генетических нарушений (ГН). Эффективная доза равна сумме взвешенных доз во всех органах. Значения весовых множителей различны. Для половых желёз он равен 0.20; красного костного мозга, лёгких, желудка, толстого кишечника — 0.12; для других органов — 0.05. Так, например, если поглощённая доза в щитовидной железе равна 1 Гр, то эффективная доза будет равна 5 сГр (5 бэр). Для оценки облучения групп населения и даже населения Земли в целом используют сумму доз, полученных всеми членами группы. Эта сумма называется коллективной дозой и выражается в человеко-зивертах (чел · Зв).

4 Облучение населения

Средние индивидуальные эффективные дозы облучения населения Российской Федерации от естественных, техногенных и других источников приведены в таблице 2. Вклад природных источников составляет примерно 20 %, техногенных — 40 %. Медицинское использование ИИ вносит самый большой и возрастающий вклад в антропогенное облучение: лучевая диагностика, лучевая терапия, ядерная медицина вносят примерно 40 %. Нагрузки от каждого источника имеют широкое индивидуальное распределение, обусловленное концентрацией внутри помещений радона, который вносит наибольший вклад в дозу облучения от естественных источников, содержанием радионуклидов в продуктах питания, воде и медицинским облучением. Величин индивидуальных доз могут различаться в 10 и больше раз. Дозы облучения населения в зонах ближних радиоактивных выпадений при испытаниях ядерного оружия в большинстве случаев можно отнести к категории малых (единицы–десятки сГр). В отдельных случаях они достигали поражающих значений ($1 \div 2$ Гр). По данным НКДАР (научный комитет по действию атомной радиации) при ООН эквивалентные дозы, полученные жителями Северного полушария в результате глобальных выпадений ПЯД, составили 4.5 мЗв, Южного

полушария — 3.1 мЗв. В основном дозы формировались за счёт ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{14}C . В режиме нормальной эксплуатации АЭС выбросы радионуклидов незначительны (таблица 2 на с. 2) и в основном они обусловлены радиоизотопами РБГ и йода ($^{131-135}\text{I}$). В случае возникновения аварии загрязнение окружающей среды и лучевые нагрузки на население могут оказаться значительными. Авария на ЧАЭС является примером такой ситуации. Облучению в поражающих дозах подвергся персонал станции и пожарные. Большинство жителей в зонах радиоактивных выпадений подверглось гамма-облучению в пределах $5 \div 10$ мЗв и лишь незначительная часть в дозах до $100 \div 200$ мЗв. Более высокими были дозы облучения щитовидной железы, особенно у детей, радиоизотопами йода, поступившего в основном с молоком. В отдельных случаях они достигали единиц грей. Отмечено около 1800 случаев рака щитовидной железы. Радиогенного рака других органов у населения не зарегистрировано. Дозы облучения участников ликвидации последствий аварии (УЛПА) 1986 г. оценены в пределах $6.5 \div 110$ мЗв, в среднем 77 мЗв, у УЛПА 1987 г. — в пределах $9.3 \div 63$ мЗв, в среднем 47 мЗв.

5 Лучевые поражения

Острые лучевые поражения при внешнем облучении хорошо исследованы в эпидемиологических наблюдениях и в опытах на различных видах животных. Последствия облучения человека могут проявиться в форме детерминированных и стохастических эффектов. Первые развиваются лишь после гибели критического числа функциональных клеток в органах и тканях, т.е. имеют порог. Потеря даже значительного числа клеток на большинство органов и тканей организма заметного вредного влияния не оказывает. Величина порога зависит от радиочувствительности органа и для отдельных органов существенно различается. Повышенной радиочувствительностью отличаются красный костный мозг, семенники, хрусталики глаз и особенно зародыш и плод. Тяжесть поражения, включая формирование отдалённой патологии, зависит от поглощённой дозы, мощности дозы, вида излучения и физиологического состояния организма. В таблице 3 на с. 9 приведены данные о тяжести лучевого поражения человека в зависимости от дозы острого внешнего облучения.

При неравномерном облучении тяжесть болезни меньшая. Чем неравномернее облучение критических органов, тем меньше тяжесть болезни. Эффективность хронического облучения ниже острого. Клинические проявления болезни зависят от мощности дозы. При облучении с низкой мощностью дозы защитные механизмы организма могут обеспечить го-

меостаза организма в течение длительного времени и даже в течение всей жизни (облучение от естественного фона). Облучение в дозе 0.05 Гр/год не позволяет выявить повреждения клиническими методами. Хроническое облучение в дозе 0.1 Гр/год может вызвать снижение устойчивости организма, а в дозе 0.5 Гр/год развитие хронической лучевой болезни. Развитие хронической лучевой болезни можно ожидать при накопленной дозе в несколько грей. Для хронической лучевой болезни характерна широкая вариабельность ответной реакции, зависящей от многих факторов (исходного состояния здоровья, физиологических особенностей организма, действия других вредных факторов нерадиационной природы, условий жизни и др.).

6 Малые дозы

Наиболее сложной радиобиологической проблемой остаётся оценка малых доз радиации. Если повреждённая клетка не погибает, то повреждение восстанавливается. Считают, что примерно 90 % повреждений восстанавливается. В случае неполноценного восстановления оставшиеся изменения в клетке могут передаться дочерним клеткам и в конечном счёте привести к развитию рака. Риск повышается с увеличением дозы облучения. Такие эффекты считают стохастическими (вероятностными). МКРЗ (международная комиссия по радиационной защите), НКДАР при ООН и НКРЗ (национальная комиссия по радиационной защите) РФ при оценке малых доз исходят из линейной беспороговой зависимости (ЛБЗ) доза-эффект, считая, что облучение в любой дозе, отличной от нуля, может индуцировать ЗНО и ГН. Наследственные болезни, вызываемые повреждением генетического аппарата могут проявиться в следующем или в последующих поколениях. В основе эффекта ГН лежит повреждение дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) в ядре клетки. Двухнитевые разрывы в ДНК рассматриваются как наиболее важная причина критических повреждений. Убедительных экспериментальных и эпидемиологических данных справедливости ЛБЗ нет. Мутации в ДНК под воздействием внешней среды происходят постоянно. Большинство из них либо нейтральны, либо полезны, а вредные отсеиваются в каждом поколении под действием естественного отбора. В процессе эволюции у человека выработались и генетически закрепились системы защиты от различного рода вредных агентов, в том числе и от радиации. Об этом свидетельствует известное явление гормезиса (повышение устойчивости организма к действию вредных факторов, в том числе и облучению в малых дозах) и общебиологический закон Арндта-Шульца. Есть основа-

ния считать, что и для стохастических эффектов существует порог. Речь может идти лишь о его величине. Многолетние наблюдения за 86500 пострадавшими в Хиросиме и Нагасаки не выявили ЗНО при дозах ниже 20 сГр. У потомков пострадавших не были зарегистрированы ГН. Такие нарушения наблюдали лишь в опытах на животных

Рекомендованные МКРЗ номинальные коэффициенты стохастических эффектов, исходя из ЛБЗ, приведены в таблице 4 на с. 12. Эти величины крайне незначительны. Доказать, что они обусловлены действием малых доз радиации практически невозможно, поскольку они могут быть вызваны не только радиацией, но и множеством других причин. В популяции в 1 млн. человек от спонтанных злокачественных новообразований различной локализации умирает примерно 200000 чел., а около 10 % живых новорождённых детей имеют те или иные генетические дефекты.

Таблица 1

Основные радиологические величины и их единицы

| Физическая величина | Единица, её наименование, обозначение (международное, русское) | | Соотношение между внесистемной единицей и единицей СИ |
|--|--|-----------------------------------|---|
| | внесистемные | СИ | |
| Активность нуклида в радиоактивном источнике | кюри (Ci, Ки) | беккерель (Bq, Бк) | 1 Ки = $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк |
| Экспозиционная доза излучения | рентген (R, Р) | кулон на килограмм (C/kg, Кл/кг) | 1 Р = $2.58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг |
| Поглощённая доза излучения | рад (rad, рад) | грей (Gy, Гр) | 1 рад = 0.01 Гр |
| Эквивалентная доза излучения | бэр (rem, бэр) | Зиверт (Sv, Зв) | 1 бэр = 0.01 Зв |
| Мощность экспозиционной дозы излучения | рентген в секунду (R/s, Р/с) | ампер на килограмм (A/kg, А/кг) | 1 Р/с = $2.58 \cdot 10^{-4}$ А/кг |
| Мощность поглощённой дозы излучения | рад в секунду (rad/s, рад/с) | грей в секунду (Gy/s, Гр/с) | 1 рад/с = 0.01 Гр/с |
| Мощность эквивалентной дозы излучения | бэр в секунду (rem/s, бэр/с) | Зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с) | 1 бэр/с = 0.01 Зв/с |
| Интегральная доза излучения | рад-грамм (rad · g, рад · г) | грей-килограмм (Gy · kg, Гр · кг) | 1 рад · г = 10^{-5} Гр · кг |

Таблица 2

**Среднегодовые эквивалентные дозы
облучения населения России**

| Источник ионизирующего излучения | Вид облучения | Доза, мкЗв/чел | |
|--|--|---|--------------------------------|
| Естественный радиоактивный фон | внешнее | 650 | |
| | внутреннее | 1600 | |
| | всего | 2250 | |
| Технологически изменённый естественный радиационный фон: | естественные радионуклиды, содержащиеся в стройматериалах и воздухе помещений | внешнее | 100 |
| | | внутреннее | 1300 |
| | | всего | 1400 |
| | минеральные удобрения | всего | 0.15 |
| | угольные электростанции | всего | 2 |
| Искусственный радиационный фон: | АЭС | всего | 0.17 |
| | | глобальные выпадения вследствие испытаний ядерного оружия | внешнее внутреннее всего |
| | Рентгенодиагностика и радиоизотопная терапия | всего | 1400 |
| | Суммарная доза от всех источников | | ≈ 5080 |

Таблица 3

**Клинические формы, тяжесть и исходы
болезни при внешнем относительно
равномерном облучении человека**

| Доза облучения, Гр | Клиническая форма | Тяжесть поражения |
|--------------------|----------------------------|---|
| 0.25 | — | В организме не выявляют клинических проявлений облучения |
| 0.5 | — | Регистрируют незначительные изменения цитологического состава крови и другие скоро проходящие нарушения |
| 0.5 ÷ 0.75 | лучевая реакция | Лучевая реакция на облучение. Незначительное снижение числа лимфоцитов, лейкоцитов, тромбоцитов. Могут регистрировать незначительные нарушения иммунитета и др. |
| 1 ÷ 2 | костно-мозговая форма* ОЛБ | ОЛБ лёгкой степени (I) |
| 2 ÷ 4 | костно-мозговая форма* ОЛБ | ОЛБ средней степени (II) |
| 4 ÷ 6 | костно-мозговая форма* ОЛБ | ОЛБ тяжёлой степени (III) |
| 6 ÷ 10 | костно-мозговая форма* ОЛБ | ОЛБ крайне тяжёлой степени (IV) |
| 10 ÷ 20 | кишечная форма ОЛБ | Летальный исход на 8–16 сутки |
| 20 ÷ 60 | токсемическая форма ОЛБ | Летальный исход на 4–7 сутки |
| > 60 | церебральная форма ОЛБ | Летальный исход на 1–3 сутки |

* Частота летальных исходов при костно-мозговой ОЛБ в диапазоне доз $2 \div 10$ Гр возрастает от 5 до 100 % в сроки от 5 до 8 недель (без лечения).

Таблица 4

**Номинальные коэффициенты вероятности
стохастических эффектов
(МКРЗ, Публикация 60)**

| Облучённый | Ущерб, 10^{-2}Зв^{-1} | | | |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------|
| | смер- тельные случаи рака | несмер- тельные случаи рака | тяжёлые наслед- ственные эффекты | сум- марный эффект |
| Взрослые, работающие | 4.0* | 0.8 | 0.8 | 5.6 |
| Всё население | 5.0 | 1.0 | 1.3 | 7.3 |

* Для больших доз случаев смертельного рака в 2 раза больше.