

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

РАДИОАКТИВНЫЕ МИКРОЭЛЕМЕНТЫ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

А.Ю. Бушманов

Гос. науч. центр РФ “Институт биофизики”, ул. Живописная, 46, Москва 123182 Россия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиация, микроэлементы, радионуклиды, ядерные отходы.

РЕЗЮМЕ: Обзор воздействия естественных и техногенных радиоактивных микроэлементов на здоровье человека. Приведены данные по средним дозам облучения населения различными источниками. Охарактеризована роль ряда радиоактивных элементов в биологических циклах и аути их поступления в организм человека. Обсуждаются проблемы регенерации отработанного ядерного топлива.

Естественные радиоактивные микроэлементы. Жизнь на Земле связана с постоянным внешним и внутренним облучением. Одним из источников облучения являются естественные радионуклиды, причем вклад в мощность дозы зависит от состава пород и почв, в которых они содержатся. Всего на Земле более 300 естественных радиоизотопов различных элементов. Земля — это смесь стабильных и радиоактивных элементов, более и менее равномерно распределенных. При формировании земной поверхности в ней содержались радионуклиды практически всех элементов. К настоящему времени остались радионуклиды с огромным периодом полураспада в миллиарды лет. Наиболее широко распространены радионуклиды ряда распада урана и тория и ^{40}K , ^{87}Rb . Внутреннее облучение радионуклеидами происходит в основном путем поступления через органы дыхания. Космогенные радионуклиды (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na и прочие) дают небольшой вклад в дозу (0,015 мЗв в год). На долю радионуклидов земного происхождения (^{40}K , ^{87}Rb , радионуклиды распада U, Th и др.) приходится 1,35 мЗв в год. Большая часть внутреннего облучения обусловлена продуктами распада U и Th-радоном и торонем, являющихся короткоживущими α -излучающими газами. При их распаде образуется большое число дочерних продуктов. Радон вместе с дочерними продуктами распада обеспечивает 3/4 годовой индивидуальной эквивалентной дозы, получаемой от земных источников.

Техногенные радиоактивные микроэлементы. Источником техногенного загрязнения внешней среды следует считать испытания ядерного оружия и выбросы предприятий атомной энергетики. Результатом этого стало также нарушение земной оболочки, сопровождающееся перераспределением естественных радионуклеидов. В результате сжига-

Таблица 1.
Средние дозы облучения населения от естественных и техногенных источников (Булдаков и др., 1999).

| Источник излучения: | Вид облучения: | Доза, мЗв в год: |
|--|----------------------|------------------|
| Естественный радиационный фон | Внешнее | 0,65 |
| | Внутреннее | 1,35 |
| Технологический измененный естественный радиационный фон: Радионуклиды, содержащиеся в строительных материалах, воздухе, помещении | Внешнее | 0,1 |
| | Внутреннее | 1,3 |
| Минеральные удобрения | Внешнее и внутреннее | 0,0001 |
| Угольные электростанции | Внешнее и внутреннее | 0,002 |
| Искусственный радиационный фон: Атомные электростанции | Внешнее и внутреннее | 0,0002 |
| Испытания ядерного оружия | Внешнее и внутреннее | 0,025 |
| Рентгено- и радиоизотопная диагностика | Внешнее и внутреннее | 1,4 |
| Суммарная доза излучения от всех источников | Внешнее и внутреннее | ~5 |

ния минерального топлива, переработки минералов, широкого использования в сельском хозяйстве минеральных удобрений, содержащих следовые количества радионуклеидов, введение радионуклеидов в потребительские товары, повышается содержание радионуклеидов в атмосфере, почве, воде (см. табл. 1).

Основным источником радиоактивного загрязнения внешней среды стали испытания ядерного оружия, проведенные до подписания договора об их запрещении, и предприятия атомной энергетики. При ядерных взрывах в окружающую среду поступают

радионуклиды деления, наведенной активности и неразделившаяся часть заряда (уран, плутоний). По характеру излучения все радионуклиды деления и наведенной активности относят к β или β, γ -излучателям. Наибольшую опасность в начальный период в зонах радиоактивных выпадений, как источник внешнего и внутреннего облучения, представляют радиоизотопы йода ($^{131-135}\text{I}$), а в последующем — ^{137}Cs и ^{90}Sr . Облучение за счет глобальных выпадений радионуклидов незначительно. Оно достигает около 0,03 мЗв в год, что составляет 1,5% от естественных источников излучения. В зонах ближайших выпадений дозы облучения достигают поражающих. В результате испытаний к 1973 г. в биосферу было выброшено, по оценкам различных авторов, только одного ^{90}Sr 0,6 Эбк (16 Мки). Еще больше поступило ^{137}Cs . Радиоактивность атмосферы северного полушария за счет ^{14}C при интенсивных испытаниях возросла примерно на 50%. В период испытаний в зависимости от их интенсивности, зон и районов земного шара удельная активность приземного слоя воздуха по долгоживущим искусственным изотопам колебалась в пределах от $3,7 \cdot 10^{-6}$ до $5,5 \cdot 10^{-4}$ Бк/л (от $1 \cdot 10^{-16}$ до $1,5 \cdot 10^{-14}$ Ки/л). Из большого количества радиоактивных осколков, возникающих при ядерных взрывах и выпадающих в составе глобальных осадков, основную роль в возможном дополнительном внутреннем облучении играют ^{90}Sr и ^{137}Cs , с которыми можно сравнивать величину дозы за счет ^{14}C . По данным НКДАР при ООН, ^{14}C может давать вклад в интегральную дозу облучения гонад к 2000 г. до 20%, а костного мозга — 10% (Ильин и др., 1999).

Являясь аналогами по (своим химическим свойствам), Са и К, ^{90}Sr и ^{137}Cs активно включаются в биологические циклы и поступают в организм человека по пищевым цепочкам:

- Атмосфера — почва — растение (через корневую систему) — молоко и мясные продукты — человек;
- атмосфера — растения (задержка на листьях и поглощение листьями) — молоко и мясные продукты — человек;
- атмосфера — растения — человек и т.д.

Общее поступление ^{14}C в атмосфере в результате испытаний термоядерного оружия оценивают в 220 ПБк ($6 \cdot 10^6$ Ки). Максимальная концентрация “оружейного” углерода была в 1965 г., превышая естественное содержание в два раза. В настоящее время она достигла естественного уровня (Ильин и др., 1999).

Относительно короткий период полувыведения ^{137}Cs из организма (около 100 дней) приводит к тому, что при его хроническом поступлении с рационом довольно быстро (практически через несколько периодов) устанавливается равновесие. В дальнейшем при постоянстве активности пищи ^{137}Cs в организме не накапливается. Уменьшение активности рациона по этому изотопу способствует быстрому снижению активности тела человека. Напротив, при поступлении в организм ^{90}Sr , имеющего значительный период полувыведения (примерно 1,8–105 дней), равновесия не возникает. В связи с этим при дли-

тельном сохранении постоянного уровня активности рациона по этому изотопу происходит постепенное накопление в костной ткани и последующее присутствие его в организме практически на протяжении всей жизни человека (Ильин и др., 1999).

Предприятия атомной энергетики могут загрязнять внешнюю среду на всех этапах ядерно-топливного цикла: добыче и переработке урановых руд, превращении руды в ядерное топливо, изготовлении тепловыделяющих элементов, производстве энергии реакторах, хранении и переработке топлива, повторного использования делящихся материалов, хранения и утилизации радиоактивных отходов.

При добыче урановых руд, их переработке и изготовлении ядерного топлива загрязнение внешней среды обусловлено поступлением в атмосферу и водоемы, главным образом, радона и его дочерних продуктов, ^{210}Pb , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po . Отвалы белых руд, хранилища вблизи обогатительных фабрик (100%-ного извлечения урана из руды добыть невозможно), также являются источником загрязнения среды. Этому способствуют ветровая и водная эрозия (Булдаков и др., 1999).

Количество выбрасываемых радионуклидов в процессе эксплуатации реакторов зависит от их типа, конструкции и применяемых систем удаления радиоактивных отходов. В режиме нормальной эксплуатации атомных электростанций (АЭС) выбросы незначительны. Они в основном обусловлены радиоизотопами РБГ и йода.

В отработанном топливе содержатся радионуклиды деления и ТУЭ. Основная часть отработавших тепловыделяющих элементов в настоящее время хранится в специальных хранилищах. Транспортировка их производится в специально оборудованных контейнерах. На радиохимических заводах при переработке топлива из него извлекаются уран и плутоний. В выбросах радиохимических заводов основное значение имеют ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{137}Cs , ^{129}I и радиоактивные изотопы ТУЭ (Булдаков и др., 1999).

В процессе регенерации отработавших тепловыделяющих элементов образуются высокоактивные радиоактивные отходы. После хранения в жидком виде отходы переводятся в твердое состояние для последующего захоронения в оборудованные для этих целей хранилища, рассчитанные на хранение в течение длительных сроков. Хранилища оборудуются в геологически стабильных районах. При хранении отходов особую проблему могут создать долгоживущие радионуклиды, например ^{129}I .

В целом радиоактивные выбросы АЭС значительно ниже нормы (табл. 2). Сбросы от АЭС в водоемы составляют менее 20% от принятых в стране нормативов. Радиоактивные сбросы АЭС значительно ниже допустимых значений и создают дозу для отдельных физических лиц не более 2% дозы, обусловленной естественным радиоактивным фоном (табл. 2,3).

АЭС при нормальной эксплуатации загрязняют окружающую среду, в том числе радионуклидами,

Таблица 2.
Максимальные среднесуточные радиоактивные выбросы АЭС России (Нигматулин, 1999).

| Показатель | Тип реактора | АЭС | Значение на 18 марта 1999г. | % ДОП. нормы |
|-------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|--------------|
| Инертные радиоактивные газы, Ки/сут | ввэр | Нововоронежская | 2,67 | 0,28 |
| | РБМ | Смоленская | 43,95 | 2,93 |
| Долгоживущие нуклиды, Ки/сут | ВВЭР | Нововоронежская | 0,04 | 0,13 |
| | РБМ | Курская | 0,66 | 1,10 |
| 131I, Ки/сут | ВВЭР | Кольская | 0,05 | 0,23 |
| | РБМ | Курская | 0,31 | 0,77 |

Таблица 3.
СБРОСЫ РАДИОНУКЛИДОВ С ДЕБАЛАНСОВЫМИ ВОДАМИ АЭС КОНЦЕРНА "РОСЭНЕРГОАТОМ" [(мКи/год)/(%ДС)] (НИГМАТУЛИН, 1999).

| Радионуклид | Балаковская | Белоярская | Билибинская | Калининская | Кольская | Курская | Нововоронежская | Смоленская |
|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| ⁵¹ Cr | | | <u>0,26</u> 0,0010,7 | | | | | |
| ⁵⁴ Mn | <u>0,35</u> 0,018 | | <u>0,006</u> | <u>1,2</u> 0,06 | | <u>0,03</u> 0,0003 | | <u>0,02</u> 0,0003 |
| ⁵⁸ Co | <u>0,16</u> 0,0025 | 2,3 | <u>0,09</u> 1,24 | 0,001 | | | | |
| ⁶⁰ Co | <u>1,74</u> 1,16 | <u>2,5</u> 0,49 | <u>0,028</u> | <u>1,2</u> 0,52 | | <u>0,08</u> 0,002 | | <u>0,02</u> 0,001 |
| ⁹⁰ Sr | | <u>0,81</u> | | <u>0,006</u> 0,05 | | | <u>0,12</u> 0,024 | <u>0,03</u> 0,07 |
| ¹³¹ I | | | | | | | | <u>0,01</u> 0,0002 |
| ¹³⁴ Cs | <u>8,3</u> 13,4 | <u>1,77</u> 2,21 | | <u>5,3</u> 5,3 | <u>0,63</u> 0,1 | | | <u>0,04</u> 0,04 |
| ¹³⁷ Cs | <u>12,1</u> 17,3 | <u>39,5</u> 15,2 | | <u>13,5</u> 22,5 | <u>21</u> 0,31 | <u>0,13</u> 0,0004 | <u>14,5</u> 5,8 | <u>0,11</u> 0,14 |

меньше, чем тепловые. В органическом топливе, особенно в каменном угле в значительных количествах содержатся естественные радионуклиды. Ситуация меняется в случае аварий, которые по масштабам могут носить локальный, местный и общий характер. Распространяются выброшенные радионуклиды при крупных авариях на огромных территориях. Примером таких аварий являются аварии в 1957 г. в г. Уиндскейле (Англия), в 1979 г. в Три-Майл Айленде (США) и в 1986 г. на Чернобыльской АЭС, когда распространение выброшенных радионуклидов приняло глобальный характер.

Крупная авария произошла на Южном Урале при тепловом взрыве хранилища с радиоактивными отходами. Большинство аварий связано не только с несовершенством техники, но и с человеческим фактором (недостаточная профессиональная подготовка персонала, нарушение установленных регламентов эксплуатации и др.).

Радиационно опасными микроэлементами в рудниках и шахтах по добыче урана являются представители семейства урана и радия, тория и актиния. В процессе радиоактивного распада в цепочках проявляют наиболее опасное токсическое действие ²²⁷⁻²³²Th,

^{235}U , $^{224,226,228}\text{Ra}$, и $^{220-222}\text{Rn}$. По мнению ряда авторов, ^{220}Rn с продуктами его распада является тем естественным радионуклидом, который создает основную поглощенную дозу излучения в легких и может привести к развитию рака легких. У работников урановых шахт и рудников еще в XIX веке констатировали высокую смертность от рака легких. И в XX веке вплоть до настоящего времени высокая заболеваемость раком легкого регистрируется у стажированных рабочих “забойной группы”, работавших в 1950–60-е годы (Булдаков и др., 1999). В современных условиях с улучшением условий труда заболеваемость раком легкого на урановых шахтах значительно снизилась. Существует вероятность развития почечной патологии вследствие поступления через органы дыхания урана, развития костной патологии при хроническом поступлении радия, развития поражения печени из-за поступления соединений тория в организм. Проведение специальных мероприятий по защите работающего персонала от вредных факторов производственной среды, включая и радиоактивные микроэлементы, не позволяет формироваться хронической профессиональной патологии.

Обогащение урана и выделение ^{235}U производится после добычи уран-содержащей руды. На этой стадии переработки действующими радионуклидами являются не только изотопы урана, но и весь спектр естественных радионуклидов, со всеми продуктами распада. После переработки и обогащения шламы, содержащие практически все естественные радионуклиды, выводятся в хвостохранилища. Удельная радиоактивность шламов существенно выше, чем неотработанные рудные местонахождения. В составе отходов присутствуют уже в сконцентрированном виде почти все естественные радионуклиды, кроме извлеченных основных количеств радионуклидов урана и тория. Отходы фактически обогащены радием, радоном и продуктами его распада. Эти элементы летучи. В условиях открытых хвостохранилищ концентрация этих радионуклидов в воздухе рабочей зоны может быть повышенной. При этом основные дозы излучения будут реализованы в легких и костной ткани. Не исключено и внешнее γ -излучение. Следует учитывать, что в большинстве случаев хвостохранилища, расположенные вне санитарно-защитной зоны, не имеют достаточной охраны и в лучшем случае снабжены знаками радиационной опасности. Поэтому контакт с высокозагрязненными участками, длительное пребывание человека в зоне действия хвостохранилища может распространяться не только на профессиональных рабочих, но и на лиц из населения. Во всех случаях при работе или пребывании человека в регионе хвостохранилища на организм действует комплекс факторов, среди которых существенное место занимают радиоактивные вещества α -, β -, и γ -излучатели, которые при поступлении в организм способны вызывать соответствующие реакции.

На этапе изготовления тепловыделяющих элементов происходит упаковка, прессование и закры-

тие в блоки порошков и таблеток из смеси ^{235}U и ^{238}U , а для реакторов-размножителей смесь готовится с добавлением $^{239,241}\text{Pu}$. В процессе работы по изготовлению тепловыделяющих элементов в воздух рабочей зоны могут поступать аэрозоли $^{235,238}\text{U}$, и $^{239,241}\text{Pu}$. Если тепловыделяющие элементы готовятся из старых запасов ^{239}Pu , сопутствующим нуклидом является ^{241}Pu и ^{241}Am . Это соответственно β и β - γ излучатели трансуранового ряда. ^{241}Am радионуклид высокой токсичности. Он всасывается в легких и в желудочно-кишечном тракте почти в 10 раз быстрее и больше, чем ^{239}Pu . Как и ^{239}Pu , ^{241}Am при поступлении в организм концентрируется в костной ткани и в отдаленном периоде способен вызывать развитие костных опухолей. Поэтому в работе по изготовлению тепловыделяющих элементов необходима защита органов дыхания от поступления внутрь радионуклидов трансуранового ряда.

В тепловыделяющих элементах, помещенных в реакторы и подвергающихся воздействию нейтронов, происходит процесс выгорания ^{238}U , накопление ^{235}U и ^{239}Pu . В процессе распада ^{238}U образуется несколько сот новых радионуклидов с периодом полураспада от нескольких секунд до 24400 лет. Образованные радионуклиды создают высокое γ -поле. При нарушении тепловыделяющих элементов в канале реактора радионуклиды попадают либо в I и II контур охлаждения реактора, либо уходят в атмосферу. В случае разрушения тепловыделяющего элемента среды биологической защиты реакторы загрязняются смесью радионуклидов, вышедших из тепловыделяющих элементов. Это прежде всего группа трансурановых и трансплутониевых элементов, в большинстве своем α -излучатели, большой спектр β -излучателей, включая короткоживущие радионуклиды йода, стронций, церий, цирконий и ниобий, рутений и родий, цезий.

Кроме радионуклидов, из тепловыделяющих элементов в средах биологической защиты всегда присутствуют элементы наведенной активности. Это радионуклиды цинка, фосфора, железа и водорода в виде ^3H . Поэтому работа по обслуживанию реактора всегда сопряжена с возможностью поступления в организм работающих любых радионуклидов искусственного происхождения. При этом в большинстве своем радионуклиды находятся не только в качестве нерастворимых окислов, но и в растворимой форме, а такие нуклиды, как $^{125-133}\text{I}$, ^3H весьма летучи и поступление их в организм ингаляционным путем вполне реально. Выделяющиеся в процессе распада ядер аргон, криптон и ксенон проникают в организм не только с вдыхаемым воздухом, но создают дозу излучения в коже. На следующей стадии производственного передела происходит растворение отработанных тепловыделяющих элементов и извлечение из них прежде всего ^{239}Pu , ^{235}U , других трансурановых элементов, таких как ^{239}Np , ^{241}Am , ^{252}Cf . В процессе технологического передела из раствора выделяется ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{90}Sr . По необходимости из раствора выделяют другие радионукли-

ды типа ^{95}Nb , ^{95}Zr , 103 и ^{106}Ru , ^{106}Rh , 141 и ^{106}Ce , ^{144}Pr . Как правило, перед растворением тепловыделяющие элементы выдерживаются несколько недель и месяцев для распада короткоживущих радионуклидов, таких как I, Na, P. Однако и после выдержки небольшое количество короткоживущих радионуклидов в рабочий раствор попадает. Поэтому в радиохимическом производстве персонал контактирует со всеми искусственными радионуклидами, получающимися в ядерном реакторе при бомбардировке урана нейтронами деления. Миграционная способность этих радионуклидов различна и зависит как от физико-химического состояния радионуклида в растворе, так и от способа выделения радионуклида из раствора. Пропорционально концентрации того или иного радионуклида в готовой продукции происходит поступление его в окружающую производственную среду и, следовательно, в организм человека. Среди “производственных” радионуклидов наибольшую опасность в радиохимическом переделе представляют 239 и ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{137}Cs , ^{90}Sr и группа радионуклидов редкоземельных элементов (Булдаков и др., 1999).

На ряде производственных участков, где готовят изделия из ^{239}Pu , ^{235}U , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{106}Ru и выделяют ^{238}Pu , 237 и ^{239}Np , ^3H наибольшую опасность и возможность поступления в организм имеет радионуклид, из которого производится изделие или раствор. При этом обычно присутствуют и другие радиоактивные вещества, с которыми в течение производственного процесса работает персонал радиационно опасного производства. Этот факт наличия в производственной среде нескольких радионуклидов усложняет оценку влияния производства на организм, причем зачастую отмечается комбинированное взаимодействие с более агрессивными органическими и неорганическими сложными химическими соединениями.

При лабораторных работах с применением различных искусственных и естественных радионуклидов используются радиоактивные микроэлементы в небольших количествах, концентрация которых и воздействие на организм на рабочем месте меньше предельно допустимых значений. Это обстоятельство не исключает вероятности поступления радионуклидов в окружающую среду, а при длительном поступлении в организме могут накапливаться и значительные количества радиоактивных микроэлементов с значимой дозой облучения в критических органах. Как правило, при лабораторных работах

применяют молекулы, меченые радионуклидом ^{32}P , ^{226}Ra , ^3H , ^{14}C . В научно-исследовательских и диагностических целях часто используют радиоактивные микроэлементы технеция, хрома, йода, серы в различных соединениях. Только при несоблюдении правил безопасности при систематическом использовании радионуклидов не исключено поступление радиоактивных микроэлементов в организм работающих.

Развитие человечества привело к неизбежному постоянному контакту с радиоактивными микроэлементами, и этот факт нельзя игнорировать. Внедрение в организм радиоактивного микроэлемента приводит к определенным, как правило, закономерным изменениям всего элементного баланса человека (Skalny et al., 1999; Скальный, Кудрин, 2000). Если процессы взаимовлияния отдельных радионуклидов на некоторые естественные микроэлементы активно изучались на рубеже 1960–70-х годов, то комплексная оценка изменений минерального гомеостаза стала возможна только на сегодняшнем этапе в связи с внедрением в научно-исследовательскую практику современных высокоточных методов (эмиссионная и масс-спектрометрия, нейтрально-активационного анализ и др.). Подобные исследования представляются достаточно перспективными и позволят найти новые подходы к предупреждению негативного влияния радиоактивных микроэлементов на здоровье человека и препятствовать развитию патологических состояний.

Литература

- Булдаков Л.А., Василенко И.Я., Калистратова В.С. и др. 1999. Радионуклеиды и производственная деятельность человека. М. 160 с.
- Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. 1999. Радиационная гигиена. М.: Медицина. 384 с.
- Нигматулин Б.И. 1999. О состоянии и перспективах развития атомной энергетики // Журн. Ядерное общество. № 1. С.8–17.
- Скальный А.В., Кудрин А.В. 2000. Радиация, микроэлементы, антиоксиданты и иммунитет. М.: Лир Макет. 427 с.
- Skalny A., Bushmanov A., Alekseenko E., Skalnaya M., Bykov A. 1999. Multielement hair analysis in monitoring of Chernobyl disaster veterans health // Abstr. 2nd Int. Symp. on trace elements in human: New perspectives, 7–9 Oct. 1999, Athens, Greece. P.88.