

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 504.75

Н.В. Барановская, Т.Н. Игнатова, Л.П. Рихванов

УРАН И ТОРИЙ В ОРГАНАХ И ТКАНЯХ ЧЕЛОВЕКА

Изучены уровни накопления и распределения радиоактивных элементов в органах и тканях человека на примере жителей Томского района. Всего исследовано 48 органов и тканей. Выявлены особенности в распределении радионуклидов в организме человека, которое происходит под влиянием не только геохимических условий места проживания людей, но и физиологических особенностей самого организма. Определены органы-концентраторы радиоактивных элементов и особенности их накопления в системах организма человека.

Ключевые слова: уран; торий; биогеохимия; накопление; распределение; организм человека.

О необходимости определения количественного элементного состава организма человека еще в 30-х годах XX в. писал академик, естествоиспытатель В.И. Вернадский [1]. В настоящее время эта проблема остается весьма актуальной. Наиболее полной сводкой по химическому составу человека на сегодняшний день являются данные доклада рабочей группы II МКРЗ по условному человеку [2], в которые включена информация по составу 71 органа и ткани 150 взрослых, погибших в результате несчастных случаев, полученных с использованием единого метода анализа, а также обобщены данные из других источников, часто пересчитанные. В этой сводке представлены данные по 47 химическим элементам, в том числе естественным радионуклидам [2]. В справочниках по дозиметрии и радиационной гигиене имеется также некоторая информация по удельной активности урана и тория в органах и тканях человека [3 и др.].

Развитие представлений о химии, распространении, поведении этих естественных радионуклидов происходило главным образом в связи с развитием атомной энергетики и достижений химии [4, 5]. В настоящее время мы располагаем информацией об их химических свойствах [6 и др.], геохимических особенностях поведения в разных типах почв, пород и индикаторных показателях [7, 8], а также специфике влияния на живые организмы [2, 5, 9–11 и др.]. Тем не менее, несмотря на данные обстоятельства, вопрос о количественном содержании тория и урана в компонентах живой природы, а также биогеохимическом аспекте их поведения остается не до конца изученным и по сей день. Это, по-видимому, в значительной степени связано с аналитическими трудностями их определения в живом веществе (ЖВ).

Для изучения элементного состава органов и тканей человека (ОТЧ) использовались биопсийные пробы [12], представляющие собой удаленные при патолого-анатомических исследованиях кусочки органов и тканей у погибших от несчастных случаев людей.

Биопсийный материал доставлялся в растворе формалина и хранился в холодильнике, перед озолоением взвешивался в фарфоровых тиглях. Озолоение производилось в муфельной печи в соответствии со следующей схемой: в течение часа температура повышалась до 200°C, затем озолоение шло до постоянной массы при температуре 550–600°C, после озолоения материал взвешивался, крупные частицы истирались в агатовой ступке. Далее пробы развешивались по 100 мг в пакеты

из фольги и отправлялись на два современных высокочувствительных анализа: инструментальный нейтронно-активационный [13] и метод индуктивно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием [13].

Таким образом, нами были изучены ОТЧ на содержание 56 химических элементов, в том числе были получены первые данные о содержании группы редкоземельных элементов и точные данные о содержании радиоактивных элементов.

В данной работе делается акцент на уровни накопления и процессы возможного распределения естественных радиоактивных элементов в органах и тканях человека. Изучение особенностей миграции, рассеяния и концентрирования радиоактивных элементов невозможно без представления о связи между химическими, физико-химическими свойствами этих элементов и биохимическими особенностями организма.

Уран и торий являются элементами, встречающимися в природе в количествах, представляющих практический интерес, в отличие от других актинидов. В ЖВ их содержание несоизмеримо меньше. Первые количественные характеристики U и Th в живых организмах даны в работах А.П. Виноградова [14], E. Burkser [15], J. Hoffman [16–18].

Как показывает обзор литературных данных, уран в микроколичествах (10^{-5} – 10^{-6} %) обнаруживается во всех тканях растений, животных и человека. В золе растений (при содержании урана в почве около $2 \cdot 10^{-4}$) его концентрация составляет $1,5 \cdot 10^{-5}$ % [19]. В наибольшей степени U накапливается некоторыми грибами и водорослями (последние активно участвуют в биогенной миграции U по цепи вода – водные растения – рыба – человек) [11]. В организм животных и человека U поступает с пищей и водой в желудочно-кишечный тракт, с воздухом – в дыхательные пути, а также через кожные покровы и слизистые оболочки [11]. Соединения U всасываются в желудочно-кишечном тракте: около 1% от поступающего количества растворимых соединений и не более 0,1% труднорастворимых; в лёгких всасываются соответственно 50 и 20%. Распределяется U в организме неравномерно. Основными местами отложения и накопления являются скелет, лёгкие и бронхо-лёгочные лимфатические узлы, селезёнка, почки, печень [10, 20]. Нередко уран в литературе называют «почечным ядом». В скелете содержится более 90% отложившегося в организме урана. В крови U (в виде карбонатов и комплексов с белками) длительно не циркули-

рует. Содержание U в органах и тканях животных и человека, по литературным данным, не превышает 0,1 мг/кг [21]. На характер миграции и распределения оказывает влияние валентность урана. Установлено, что шестивалентный уран накапливается в почках до 20%, в скелете – 10÷30% и в незначительном количестве откладывается в печени, тогда как четырехвалентный уран накапливается в печени и селезенке до 50%, в костях и почках до 10÷20% [5, 7, 22]. Такое распределение связывают с тем, что четырехвалентный уран легко присоединяется к белкам и не проникает через мембраны клеток. Шестивалентный уран такими свойствами не обладает [9].

Анализ имеющейся доступной информации по содержанию урана в ОТЧ показывает, что уровень его содержания колеблется от 0,00052 мг/кг (красный костный мозг) до 0,0319 мг/кг (надпочечники) [3. С. 85]. Имеются данные о содержании урана в головном мозге человека на уровне 0,0001 мг/кг, в волосах – 0,13 мг/кг [21]. При пересчете с активности (мБк/кг) была получена информация о том, что содержание урана колеблется от 0,0004 мг/кг (в красном костном мозге, щитовидной железе, почках) до 0,0163 мг/кг (костях) [3. С. 84; 22. С. 203], по данным [23] в костях содержится урана 0,0026–0,06 мг/кг. По данным [22. С. 203] в мышечной ткани содержится 0,0009 мг/кг, в костной ткани – от 0,000016 до 0,07 мг/кг, в крови – 0,0005 мг/л. Из иностранных данных [16–18, 24] имеются представления о накоплении урана в печени и селезенке примерно 0,01 мг/кг, наименьшие содержания отмечаются в головном мозге – 0,0003 мг/кг (зола). В теле человека содержится 100÷125 мкг урана, из которых 70 мкг депонировано в скелете [2]. Эти величины широко варьируют и, по-видимому, отражают содержание урана в воде, воздухе, пище. Вклад питьевой воды в суммарное поступление урана в организм человека незначителен [19]. Суточное поступление с пищей оценивается в $1,9 \cdot 10^{-6}$ г, а с воздухом – в $7 \cdot 10^{-9}$ г. Выводится уран из организма с мочой и калом в количестве $0,5 \div 5 \cdot 10^{-7}$ и $1,4 \div 1,8 \cdot 10^{-6}$ г соответственно [3, 9, 25]. В районах с нормальным естественным радиационным фоном годовое поступление урана оценивается в 4,5 мкг [3].

Существует мнение, что U необходим для нормальной жизнедеятельности животных и растений, однако его физиологические функции до конца не выяснены [19].

Весьма интересными являются данные по накоплению продукта распада урана – радия – в костях челове-

ка [3. С. 90]. Активность радия в костях человека отражает как наличие в местах его проживания специализированных на уран геологических формаций (фосфориты, высокорadioактивные граниты и т.д.), так и наличие месторождений радиоактивного сырья и производств по его переработке. Содержание урана может колебаться в пределах двух-трех порядков. Повышенная концентрация урана в костях человека от 0,0081 до 0,036 мг/кг золы отмечается в районах испытания ядерного оружия [26].

По нашим данным [27], содержание урана в органах и тканях людей приближается к его содержанию в морской воде и значительно ниже геохимического кларка ноосферы.

Наши результаты, полученные по Томскому району, показывают, что содержание урана в ОТЧ колеблется от 0,00018 мг/кг в женской молочной железе до 0,00567 мг/кг в мужской коже (рис. 1, 2).

Согласно справочным данным, показанным на рис. 1, максимальные содержания урана фиксируются в поджелудочной железе и надпочечнике, но по результатам наших исследований концентраторами урана, вероятно, можно считать: пищевод, трахею, селезенку, почки, кожу.

Пищевод, поджелудочная железа, трахеи и бронхи женщин содержат урана на уровне 0,003–0,004 мг/кг живой массы, тогда как аналогичные органы мужчин содержат его меньше. Такие органы и ткани человека, как тонкий кишечник, щитовидная железа, почки, скелетная мускулатура содержат уран примерно в одинаковых количествах как у мужчин, так и женщин (0,001–0,002 мг/кг).

Сравнительный анализ накопления урана в органах и тканях человека Томского региона с аналогичными данными по жителям г. Москвы и Московской области [3. С. 84] показывает, что количество урана у сибиряков выше, чем у жителей Центрального района России.

Объяснить повышенное содержание урана в органах и тканях жителей Томского региона, вероятно, можно, рассмотрев геохимическую специфику Томской области, на территории которой располагаются крупные промышленные предприятия (ЯТЦ), а также наличием на территории области месторождений ураноносных бурых углей, титан-циркониевых россыпей и ряда других источников [8].

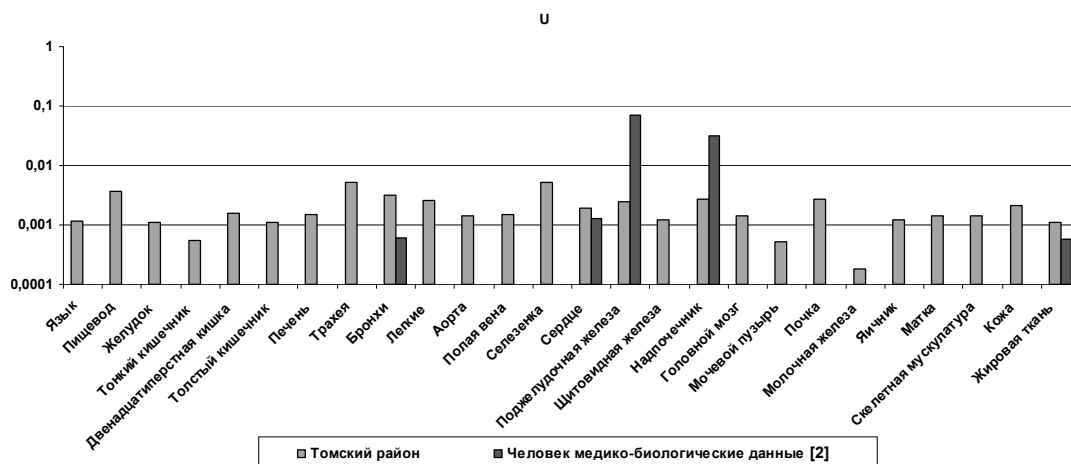


Рис. 1. Содержание урана в органах и тканях жителей Томского района, мг/кг сырой массы

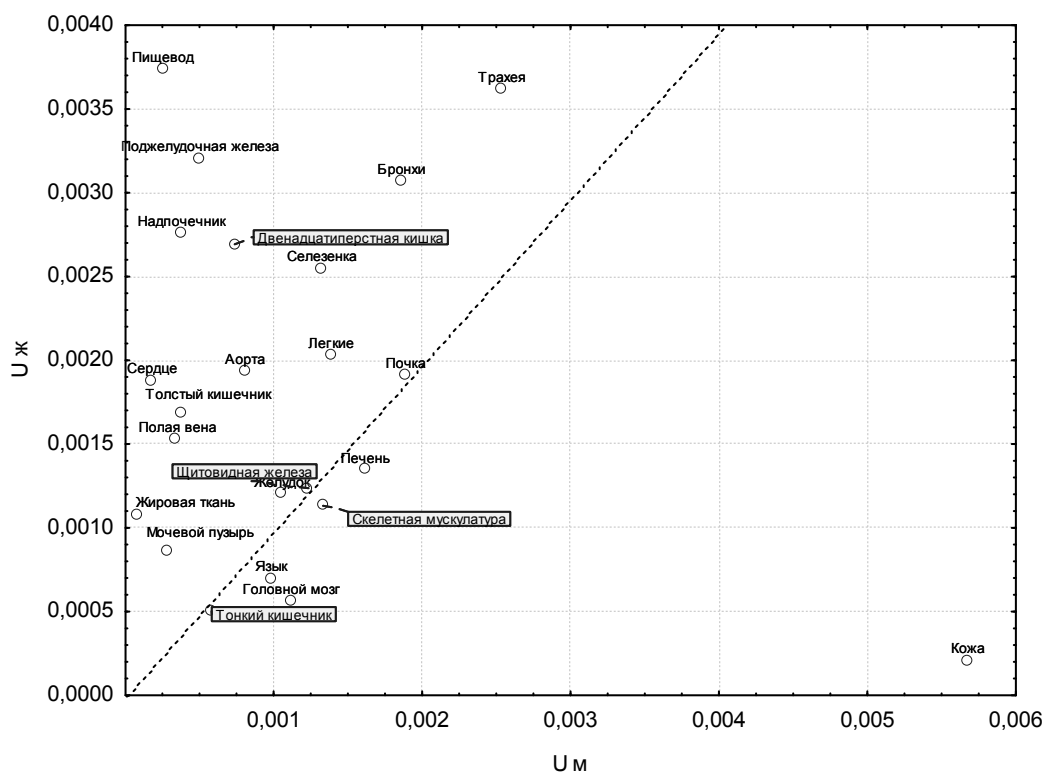


Рис. 2. Сравнение распределения урана в органах и тканях человека в зависимости от пола, мг/кг сырой массы

Все эти факторы могут оказывать влияние на непосредственное поступление элементов в организм человека. Более подробный анализ физиологических и биохимических процессов, протекающих в ОТЧ, возможно, позволит объяснить механизм такого влияния.

Достаточно низкое содержание урана (менее 0,001 мг/кг) отмечается в органах пищеварительной системы (тонкий кишечник, язык), головном мозге (барьерный орган) и мочевом пузыре. Однако, как видно из рис. 2, есть органы, в которых содержание элемента выше 0,001 мг/кг. К ним относятся печень, сердце, селезенка, легкие и почки, которые выполняют функции хранения и являются своеобразными биогеохимическими барьерами. Таким образом, эти органы являются органами-концентраторами урана, в отличие от вышеперечисленных.

Торий постоянно присутствует в тканях растений, животных и человека. Коэффициент накопления тория (отношение его концентрации в организме к концентрации в окружающей среде) в морском планктоне – 1250, в донных водорослях – 10, в мягких тканях беспозвоночных – 50–300, рыб – 100. В пресноводных моллюсках его концентрация колеблется от $3 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-5}\%$, в морских животных от $3 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-6}\%$. Экспериментально установлено, что в организме человека торий поглощается главным образом печенью и селезенкой, а также костным мозгом, лимфатическими железами и надпочечниками; плохо всасывается из желудочно-кишечного тракта. Так, E. Burkser [15] приводит содержание тория в золе раковых опухолей, составляющее $0,5 \cdot 10^{-3}\%$, а в пересчете на ЖВ $4,2 \cdot 10^{-5}\%$ [15]. При пересчете имеющихся данных [3. С. 86] с активности тория (мБк/г) в его весовые концентрации в

ОТЧ усматривается следующий их ряд по величине накопления: от 0,000037 мг/кг (в молочной железе, красном костном мозге, щитовидной железе) до 0,0049 мг/кг (легкие) – 0,0059 мг/кг (кости). В костной ткани от 0,002 до 0,012 мг/кг [22. С. 197], общее содержание в костной золе – 30 мкг [10], по другим данным 0,006–0,019 мг/кг [11], а в крови 0,0005–0,002 мг/л [10], по другим данным 0,00016 мг/л [9], в легких 0,0001 мг/кг. [10]. У человека суточное поступление тория с продуктами питания и водой составляет 3 мкг [3], по другим данным – от 0,05 до 4 мкг [2]; выводится из организма с мочой и калом 0,1 и 2,9 мкг соответственно [3, 9], а по данным Дж. Эмсли [22. С. 197] поступление тория с пищей находится в пределах от 0,00005 до 0,003 мг. Торий малотоксичен, однако как природный радиоактивный элемент вносит свой вклад в естественный фон облучения организмов [3].

Результаты исследования – содержания тория в ОТЧ на примере жителей Томского района – приведены на рис. 3.

Минимальное содержание тория 0,000036 мг/кг зафиксировано в коже женщины и 0,000011 мг/кг в сердце мужчины, а максимальное – в жировой ткани женщины (0,006 мг/кг) и коже мужчины (0,015 мг/кг) (рис. 4).

Самые наименьшие содержания (менее 0,0001 мг/кг) сосредоточены в органах пищеварительной системы, кровотоке и лимфообращении, мочевой системе.

Справочные данные по торию весьма скудны [3, 9, 10, 22], и сопоставить полученные нами данные практически не с чем.

Распределение тория по организму весьма различается. Из рис. 3, 4 видно, что повышенное содержание

тория отмечается в органах мужчины на уровне от 0,001 до 0,01 мг/кг. Повышенное его содержание фикс-

сируется в органах женщины: жировая ткань, яичники, поджелудочная железа, надпочечники.

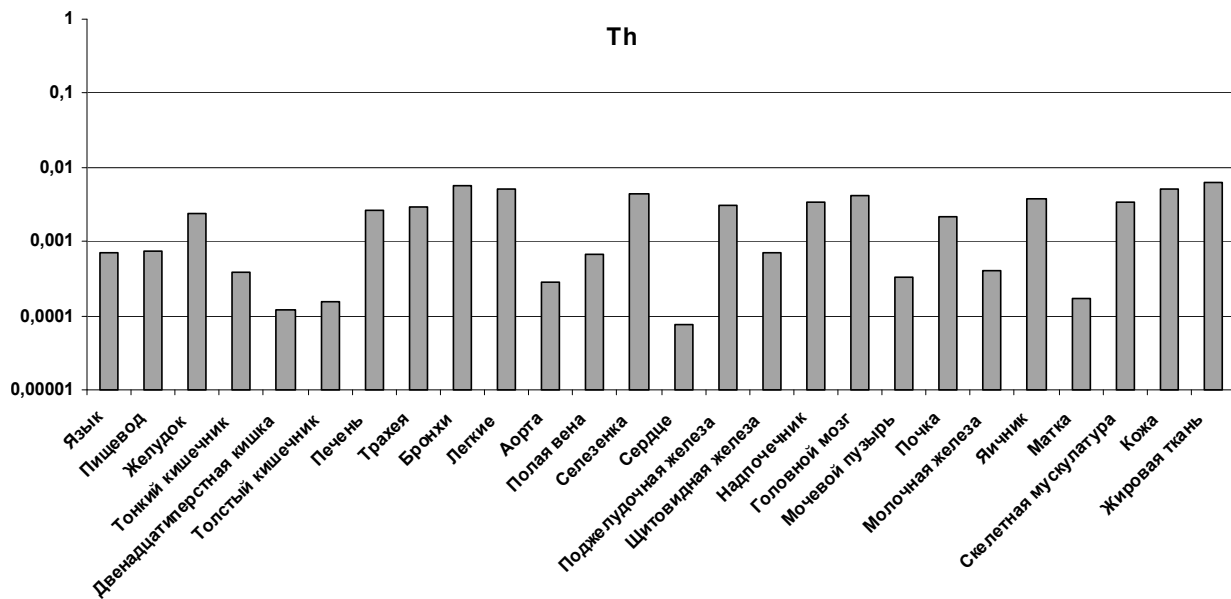


Рис. 3. Содержание тория в органах и тканях жителей Томского района, мг/кг сухой массы

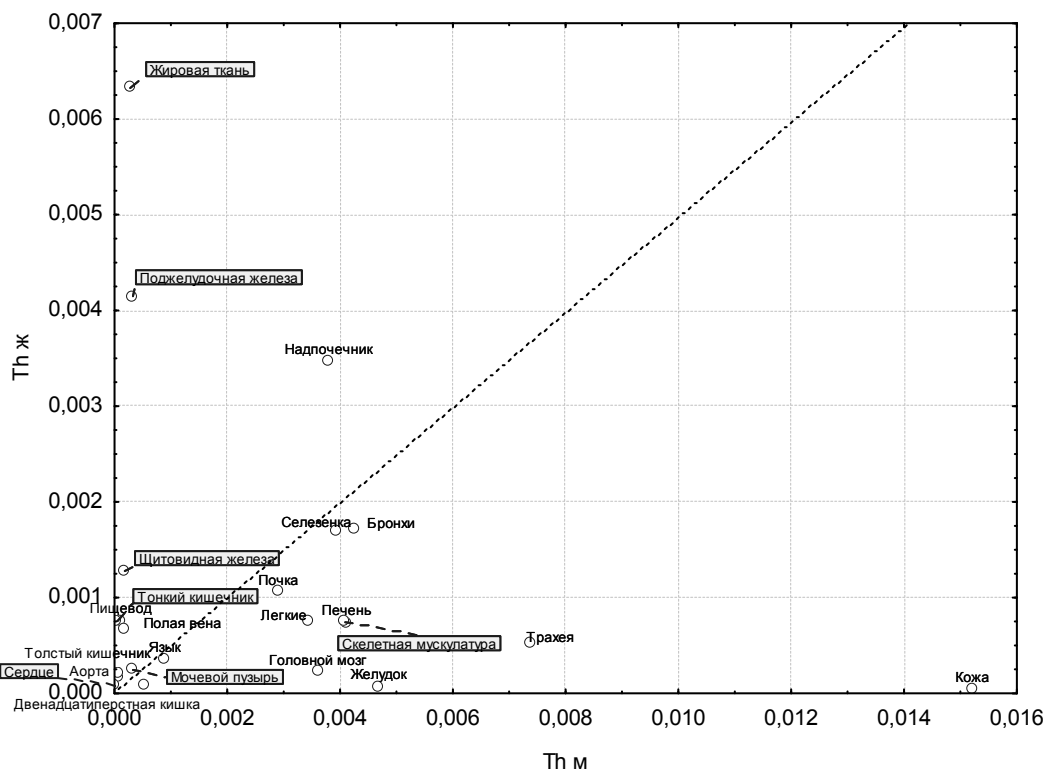


Рис. 4. Сравнение распределения тория в органах и тканях человека в зависимости от пола, мг/кг сухой массы

Анализируя полученные данные (рис. 4) по содержанию тория в ОТЧ, можно говорить о таких тенденциях, как, например, более высокое содержание тория в мужских органах: желудке, печени, селезенке, бронхах, легких, почках, головном мозге, скелетной мускулатуре по сравнению с женскими. Тогда как в женских аналогичных органах его концентрации значительно ниже – от 0,0001 до 0,001 мг/кг. Можно отметить только женскую поджелудочную железу, содержание тория в

которой составляет 0,00415 мг/кг, а в мужской – 0,00033 мг/кг.

Особенности такого распределения тория в ОТЧ, вероятно, можно объяснить с точки зрения химических процессов, протекающих в организме. Распределение данного радионуклида в организме непосредственно зависит и от пути его поступления [9]. Значительное увеличение содержания тория в организме мужчины также может свидетельствовать о том, что он, по-

видимому, имел контакт с источниками поступления этого элемента. К сожалению, точных сведений для подтверждения данного предположения у нас не имеется. Весьма широкий разброс в содержании тория в желудке у мужчины и женщины свидетельствует о биохимических особенностях организма человека, в котором происходит реакция гидролиза. Соли тория гидролизуются в кислой среде. Соли тория переходят в нерастворимые гидроокиси при pH, равном 3,5 [5. С. 21]. Растворимость гидроокисей тория весьма мала. Подтверждение данному факту мы видим на рис. 2 для желудка. Содержание Th в данном органе у мужчины на 2 порядка выше, чем у женщины. В экспериментах на животных показано [9], что при пероральном введении растворимых соединений радионуклида до 75% его количества находилось в костной ткани, в то время как в других органах оно не превышало 2%. Это, по-видимому, связано именно с высокой гидролизуемостью солей тория в кислой среде желудка и низкой всасываемостью их из ЖКТ. В итоге реакции гидролиза торий находится в биосредах в виде радиоколлоида и свободных катионов.

Радиоколлоиды, образующиеся в биосредах, подвергаются фагоцитозу. Вследствие этого происходит накопление тория в органах, богатых ретикуло-эндотелиальными клетками (селезенка и печень) [5. С. 25]. Повышенное содержание тория в селезенке и печени отмечается также именно у мужчины (см. рис. 4). В организме мужчины наблюдается повышенное содержание тория в ряду органов, в том числе и органах системы дыхания (легких), что может служить подтверждением литератур-

ных данных [9]. Нерастворимые соединения тория могут длительное время задерживаться в легких. В организме срабатывает защитная функция, которую выполняют органы ретикуло-эндотелиальной системы, где в итоге задерживается и накапливается торий.

Свободные радиоактивные катионы могут вступать в реакцию химического взаимодействия с белками. Торий дает с белком прочные трудно диссоциирующие соединения; таким образом, можно с точностью утверждать, что данный элемент в обменные реакции организма не может вступать из-за плохой растворимости соединения, он осаждается на органах [5. С. 23]. Таким образом, благодаря реакции соединения свободного радиоактивного катиона тория с белком, он сохраняется и аккумулируется преимущественно в скелете человека, а также, исходя из наших исследований, можно предположить, что повышенное содержание тория в жировой ткани женщины свидетельствует о биохимической реакции взаимодействия с липидами.

Результаты наших исследований косвенно могут свидетельствовать о том, что в организм мужчины данный элемент поступал в большей степени с вдыхаемым воздухом, в то время как для женщины более вероятно его поступление только через ЖКТ. Высокие концентрации в жировой ткани подтверждают наше предположение о преимущественном поступлении тория через ЖКТ с дальнейшим связыванием в прочные комплексы с органическими структурами.

Торий-урановое отношение в ОТЧ колеблется от 0,03 в сердце до 5,85 в жировой ткани, что достаточно хорошо видно на рис. 5–6.

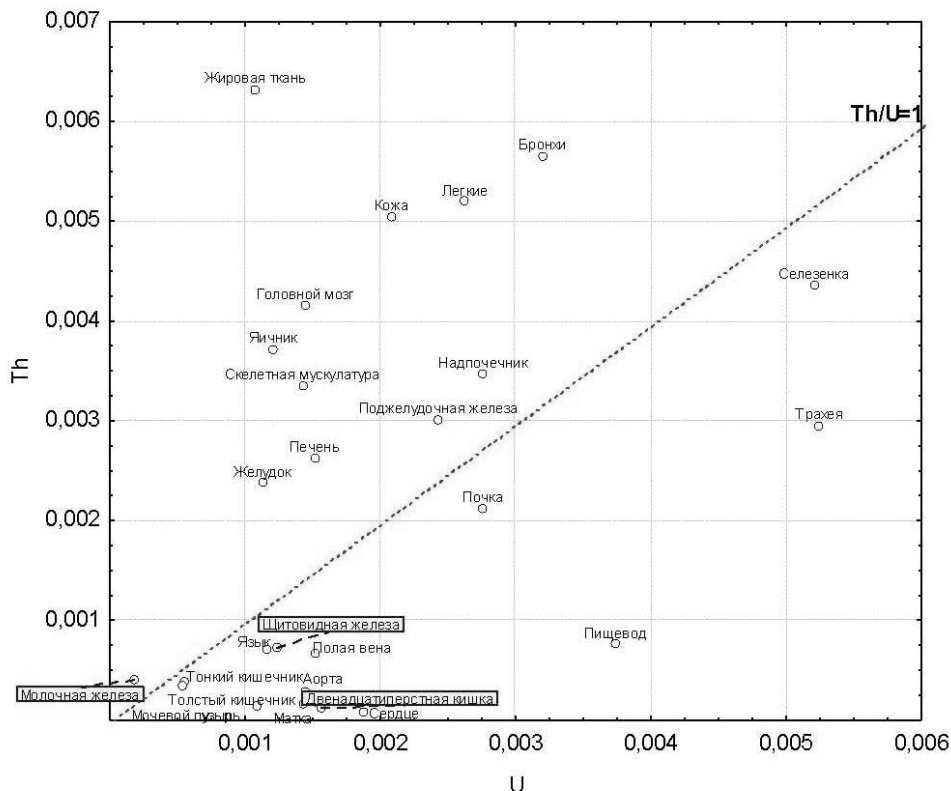


Рис. 5. Торий-урановое отношение в органах и тканях человека

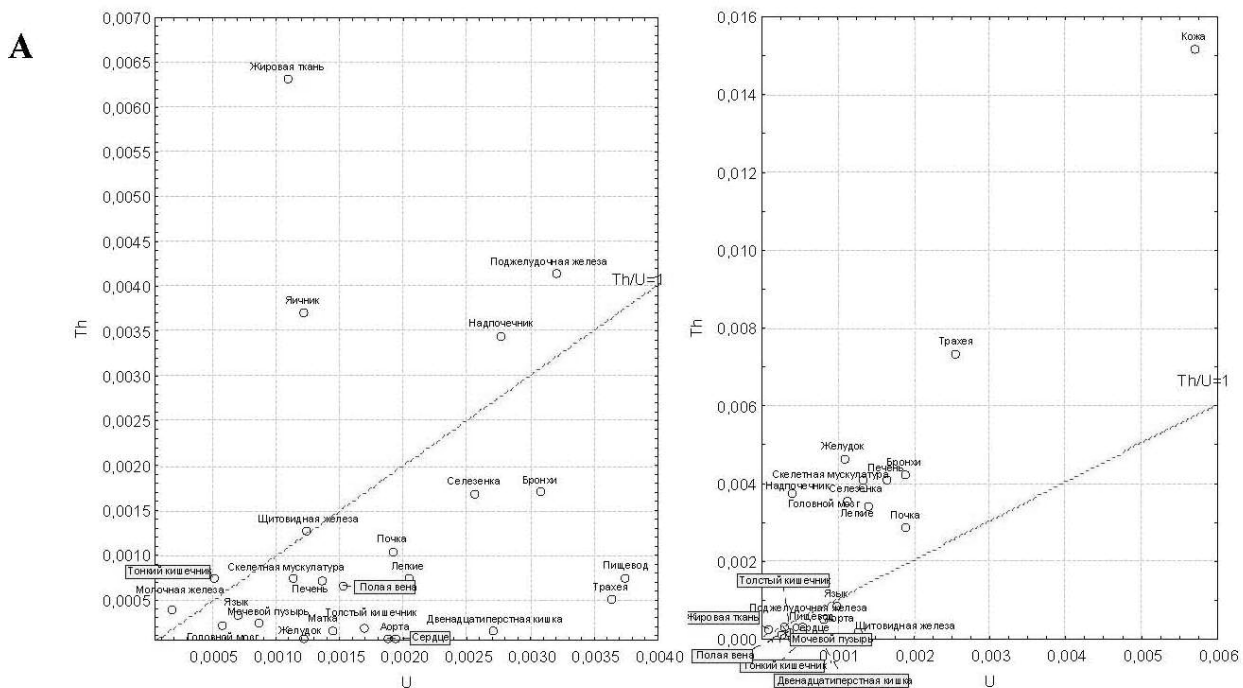


Рис. 6. Торий-урановое отношение в органах и тканях человека в зависимости от пола: *А* – женщины; *Б* – мужчины

Из анализа рис. 5–6 следует, что по величине Th/U отношения выделяются группы ОТЧ с преобладанием U и Th ($Th/U < 1$), самый наименьший коэффициент 0,039 рассчитан для сердца у женщины и 0,087 – у мужчины в тонком кишечнике. В целом для женского организма при анализе имеющихся органов и тканей можно говорить о торий-урановых отношениях ниже 1, тогда как у мужчины в основном эти отношения выше 1. Как у мужчины, так и у женщины смешанная природа торий-урановых отношений ($2,5 < Th/U < 5$) наблюдается в следующих органах: у мужчины – желудок, печень, селезенка, трахея, бронхи, легкие, головной мозг, скелетная мускулатура, кожа; у женщины – молочная железа, яичник. Группа ОТЧ с преобладанием тория над ураном: особенно ярким их представителем является жировая ткань женщины, $Th/U > 5$.

$Th/U < 1$ у женщины приводят к выводу о том, что объяснить такие результаты, вероятно, можно, опираясь на данные по физиологическим особенностям человека и физико-химическим условиям биосред. У женщины не срабатывает, по всей вероятности, механизм, который осаждает торий в органах пищеварительной системы, а срабатывает механизм, который связывает его с жирами, белками, как мы отмечали выше, и элемент аккумулируется в жировой ткани.

Нами были рассчитаны коэффициенты корреляции тория и урана. Расчеты показали, что коэффициент корреляции между U и Th в органах и тканях у женщины составляет 0,18, а у мужчины 0,95. Следовательно, можно говорить о том, что у мужчины различий в распределении урана и тория нет, а у женщины такие различия существенны.

В результате проведенных исследований мы пришли к следующим выводам.

При попадании радиоактивных элементов в организм происходит ряд сложных процессов. Радиоактив-

ные элементы входят в состав комплексных соединений. Способность их к комплексообразованию, с одной стороны, имеет положительный эффект: в таком виде элемент быстрее выводится из организма, с другой – отрицательный, поскольку разнос по организму ведет к концентрированию в критических органах, где возможно замещение (например, в костях, где много фосфора и кальция). Так, например, уран в значительной степени связывается в организме с водородно-карбонатными комплексами [20]. То, что в легких, по нашим данным, отмечается повышенное содержание урана, можно объяснить еще и формой поступления, возможно, это труднорастворимая форма и на легочных тканях он просто осаждается. Содержания урана и тория в надпочечниках – основном гормональном органе человека – повышенные, что, по-видимому, объясняется гормональной реакцией самого организма. На поведение тория и урана в организме оказывает влияние форма соединения, в составе которого он может находиться. В связи с тем что физико-химические условия в различных биологических средах неодинаковы, формы соединения также могут быть различными. Кислая среда организма человека способствует увеличению концентрации тория.

Значительное количество органов, имеющих ториевое превосходство, объясняется тем, что он труднорастворим, а в живом организме условия для адсорбции и осаждения особенно благоприятны (большая поверхность молекул белка и других соединений). Способность микроколичеств радиоактивных элементов к адсорбции неодинакова и зависит от степени растворимости их соединений. Чем лучше растворимость, тем меньше склонность к адсорбции и наоборот [5]. Произведение растворимости $(Th(OH)_4) = 1,0 \cdot 10^{-50}$, растворимость $Th(OH)_4 = 9 \cdot 10^{-6}$ мг/л. Это значение достаточ-

но низкое, поэтому данное соединение считается труднорастворимым, что должно приводить, в сочетании со свойством солей тория гидролизироваться даже при кислом рН, к значительному насыщению тканей организма радиоколлоидными частицами. Эта закономерность позволяет понять, почему одни радиоактивные элементы быстро выводятся из организма, а другие надолго задерживаются в нем [5. С. 21].

Организм человека – это весьма сложная биогеохимическая структура, в которой существуют свои законы распространения и распределения, некоторые из которых совпадают с законами геохимии. Однако, несмотря на многообразие минералов в геологической науке, в организме существуют еще более сложные образования, и некоторым из них до сих пор не нашли объяснения. Так, например, не могут до конца объяснить вопрос, связанный с регуляцией гликолиза при поступлении радиоактивных элементов.

В целом наличие в организме буферных систем, минеральных депо и других приспособлений обеспечивает при регулирующей роли нервных механизмов постоянство физико-химических условий внутренней среды. Физико-химические показатели биосреды – рН, минеральный состав, осмотическое давление – являются в организме жизненными константами, резкое изменение которых нарушает нормальный ход физиологических процессов. Ранее было отмечено, что основными радиочувствительными органами считаются печень, сердце, селезенка и почки. Как было показано нами в работе, именно в печени и селезенке у мужчины концентрируется торий, и ретикуло-эндотелиальная система сохраняет его. Так как судьба радиоактивных элементов (урана, тория) зависит от биохимических особенностей, физико-химических условий в биосредах, то при относительном постоянстве этих условий сохраняется и постоянство поведения радиоактивных элементов в организме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Об условиях проявления жизни на Земле // Избранное собрание сочинений. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 5. С. 147–159.
2. Человек. Медико-биологические данные. Доклад рабочей группы комитета II МКРЗ по условному человеку. М.: Медицина, 1977. 496 с.
3. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.
4. Балабуха В.С., Разбитная Л.М., Разумовский Н.О., Тихонова Л.И. Проблема выведения из организма долгоживущих радиоактивных изотопов. М.: Госатомиздат, 1962. 168с.
5. Балабуха В.С., Фрадкин Г.Е. Накопление радиоактивных элементов в организме и их выведение. М.: Изд-во МГУературы – Медгиз, 1958. 184 с.
6. Спицын В.И., Мартыненко Л.И. Неорганическая химия: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1991. Ч. 1. 480 с.
7. Евсеева Л.С., Перельман А.И. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М.: Госатомиздат, 1962. 239 с.
8. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиозологии. Томск: Изд-во ТПУ, 1997. 384 с.
9. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд. / Под ред. В.А. Филова и др. Л.: Химия, 1990. 464 с.
10. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн. / Под ред. Э.К. Бурнекова. М.: Экология, 1997. Кн. 6: Редкие f-элементы. 607 с.
11. Радиоактивность и пища человека / Под общ. ред. Рассела; Пер. с англ.; Под ред. В.М. Клечковского. М.: Атомиздат, 1971. 376 с.
12. Хазанов А.Т., Чалисов И.А. Введение в секционный курс. Л.: Медицина, 1969. 190 с.
13. Сравнение результатов определения микрокомпонентов в золе биологических материалов методами ИНАА и ИСП-МС / Н.Н. Пахомова, А.Ф. Судыко, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская и др. // Аналитика Сибири и Дальнего Востока: Материалы VIII науч. конф. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. С. 194–195.
14. Виноградов А.П. Геохимия живого вещества. М.: АН СССР, 1932. 65 с.
15. Burker E., Kondoguri W., Miglenska W., Bronstein K. Versuche einer Bestimmung von Radiumelementen in Pflanzen III // Biochemische Zeitschrift. Bd. 233. Berlin, Springer – Verl., 1931. S. 58–61.
16. Hoffman J. Urankonzentration der in Beziehung stehenden Organe: Hirnanhang, Schilddrüse, Keimdrüsen, Nebenniere und Bauchspeicheldrüse // Biochemische Zeitschrift. Bd. 315. 1–2 Hef. Berlin, Springer – Verl., 1943. S. 26–30.
17. Hoffman J. Bioelement Uran im Pflanzen – und Tierreich sowie im menschlichen Organismus // Biochemische Zeitschrift. Bd. 313. 5–6 Hef. Berlin: Springer – Verl., 1943. S. 377–387.
18. Hoffman J. U in human thyreoid gland and dog testicule and pancreas // Naturwissenschaften. 1942. 30. P. 279–280.
19. Василенко О.Н. Радиационная экология. М.: Медицина, 2004. 216 с.
20. Штреффер К. Радиационная биохимия / Пер. с нем.; Под ред. Е.Ф. Романцева. М.: Атомиздат, 1972. 200 с.
21. Новиков Ю.В. Гигиенические вопросы изучения содержания урана во внешней среде и его влияния на организм. М.: Медицина, 1974.
22. Эсли Дж. Элементы / Пер. с англ. Е.А. Краснушкиной. М.: Мир, 1993. 256 с.
23. Кист А.А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент: Изд-во ФАН, 1987. 235 с.
24. George A. Welford, Ruth Baird. Uranium levels in human diet and biological materials // Health Phys. 1967. Vol. 13. P. 1321–1324.
25. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных. М.: Высш. шк., 2004. 549 с.
26. External doses of residents near Semipalatinsk nuclear test site / Jun Takada, Manaharu Hoshi, Tsuneto Nagatomo et al. // Radiat. Res. 1999. № 40. P. 337–444.
27. Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Игнатова Т.Н. и др. Элементный состав органов и тканей человека по данным инструментального нейтронно-активационного анализа // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Семипалатинск, 2008. С. 26–36.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 24 сентября 2010 г.