

ВКЛАД МЕДИЦИНСКОГО РАДИОЛОГИЧЕСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА ИМ. А. Ф. ЦЫБА В СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ РАДИАЦИОННО-БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭЛЕМЕНТОЛОГИИ КАК РАЗДЕЛА РАДИОБИОЛОГИИ. ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2025 г. В. Е. Зайчик, Л. П. Жаворонков*

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск

*E-mail: leonid.petrovich@inbox.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 22.01.2025 г.

Принята к публикации 14.05.2025 г.

Приведена история развития и обосновывается перспективность применения радиационных ядерно-физических методов для определения содержания химических элементов при экологических и радиобиологических исследованиях, а также в диагностических и лечебных подходах радиационной медицины. На основе результатов многолетних экспериментальных и клинических исследований, проведенных в НИИМР АМН СССР (ныне МРНЦ им. А.Ф. Цыба), анализируются механизмы поступления и негативные эффекты от выбросов в окружающую среду различных (в том числе и радиоактивных) химических элементов при работе предприятий атомной отрасли и при радиационных авариях, намечены пути решения проблем.

Ключевые слова: химические элементы, биологически важные диапазоны концентраций, стабильные и радиоактивные изотопы, радиационные аварии, выброс изотопов в окружающую среду, защита здоровья населения, ядерно-физические методы элементного анализа

DOI: 10.31857/S0869803125020018, EDN: LOQFWK

На протяжении всей эволюции живой материи на планете Земля организмы подвергались воздействию ионизирующей радиации как всемирного (космическое излучение), так и земного (естественные радионуклиды) происхождения. Более того, радиационное воздействие было одним из движителей эволюционного процесса, непосредственно влияя на генетический аппарат. Однако о существовании такого явления как “ионизирующее излучение” человечество узнало лишь в конце XIX века в связи с открытием Вильгельмом Конрадом Рентгеном X-лучей (1895); открытием Анри Беккерелем естественной радиоактивности урана (1896) и открытием Марией Склодовской-Кюри и Пьером Кюри радиоактивных свойств полония и радия (1898). После этих открытий началось всестороннее изучение биологического действия сначала внешнего облучения (рентгеновское лучи и излучение радия), а в самом начале XX века и внутреннего облучения (введение в организм радионуклидов). Так, в 1904 г. российский ученый Е.С. Лондон

с помощью разработанного им способа автордиографии исследовал распределение по тканям радия, вводимого в организм животных.

В первой половине XX века радиобиология формируется как самостоятельное научное направление и предмет этой науки ограничивается одним пунктом — изучение воздействия радиации на организмы. В дальнейшем постепенно радиобиология превращается в мультидисциплинарную науку. Это превращение обуславливается быстрым развитием ядерной физики и, как следствие, широким проникновением ядерных технологий в различные сферы человеческой деятельности: ядерная медицина, атомная промышленность, атомные электростанции, атомные корабли, ледоколы и подводные лодки, использование источников радиации в неатомной промышленности, сельском хозяйстве и научных целях (атомные исследовательские реакторы и ускорители, радионуклиды). Воздействию антропогенной радиации подвергаются

значительные группы людей, вовлеченные в разработку и использование ядерных технологий, а также пациенты, проходящие диагностические и терапевтические радиологические процедуры. Взрывы атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки, последовавшие затем испытания ядерного оружия и аварии на атомных электростанциях и других ядерных объектах, привели к масштабному радиационному загрязнению биосферы. Вследствие этого воздействие антропогенной радиации коснулось не только людей, но и распространилось на все живое на планете. Кроме того, взаимодействие как ионизирующей, так и неионизирующей природной и антропогенной радиации с живой материей многогранно и не ограничивается негативным поражающим эффектом. Поэтому в определении предмета радиобиологии как научной дисциплины, помимо пункта “действие ионизирующих и неионизирующих излучений на биологические объекты” (биомолекулы, клетки, ткани, организмы, популяции) [1], появились и другие аспекты. Показана тесная взаимосвязь радиобиологии с рядом научных дисциплин, таких как генетика, цитология, иммунология, медицинская радиология, космическая медицина, охрана труда и промышленная гигиена, ветеринарная радиология, сельское хозяйство, экология и др. При этом дополнительные пункты артикулировались по-разному [2]. Мы предлагаем, на наш взгляд, универсальную формулировку предмета радиобиологии: *радиационная биология — это наука, изучающая механизмы и закономерности взаимодействия разного рода радиации со всеми биологическими объектами как по отдельности, так и в их совокупности, с целью использования полученных знаний на благо человечества и сохранения среды его обитания (биосферы).*

Не так просто обстоят дела с дефиницией биологической элементологии как научной дисциплины и определением во времени ее начала. Еще древние греки догадывались, что все в природе, включая живую материю, состоит из мельчайших атомов (в последующем эти химически неделимые частицы были названы элементами) и что атомный состав живой материи отражает ее состояние. Однако лишь спустя почти две тысячи лет попытки изучения элементного состава органов, тканей и жидкостей тела человека и животных, а также растений, были предприняты алхимиками. Название “Биологическая элементология” эта научная дисциплина приобретает лишь на стыке XX и XXI века, когда число публикаций на тему о роли химических элементов (ХЭ) в существовании живой материи, а также

о содержании ХЭ в объектах живой природы стало нарастать лавинообразно. Рост числа подобных исследований был связан с разработкой методов многоэлементного анализа и появлением приборов для их реализации, хотя важность роли ХЭ в жизнеобеспечении была осознана и научно обоснована ранее, в том числе и российскими учеными В.И. Вернадским и др. [3–7].

В начале нынешнего столетия сотрудником Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, автором этой статьи В.Е. Зайчиком была впервые предпринята попытка охарактеризовать “Биологическую элементологию” как новую научную дисциплину [8]. Прежде всего, был сформулирован предмет исследования, который включает четыре раздела:

- Изучение закономерностей содержания и распределения ХЭ в организмах растительного и животного происхождения, включая человека, на всех уровнях их организации в условиях их постоянного контакта и обмена со средой обитания.
- Определение роли и степени участия ХЭ в строительстве и нормальном функционировании жизненно важных систем организмов на всех уровнях их организации в периоды зарождения, формирования, зрелости и инволюции.
- Исследование адаптивных сдвигов в содержании ХЭ в организмах на всех уровнях их организации при изменении условий в среде обитания, экстремальных нагрузках и внешних воздействиях.
- Выявление роли ХЭ в этиологии и патогенезе различных заболеваний организмов, а также эффективности использования химических элементов при проведении профилактических, корригирующих и лечебных мероприятий.

Помимо этого, на основе накопленных фактов [3–8], можно сформулировать четыре основных постулата “Биологической элементологии”, которые во многом определяют методологические аспекты исследований в этой области:

1. Наличие химических элементов. В биосфере как среде обитания содержатся все природные ХЭ (к настоящему времени их 91). Все организмы извлекают из нее продукты, необходимые для поддержания жизни. При этом механизмы

абсолютной селекции продуктов, необходимых для жизнеобеспечения, отсутствуют. Отсюда следует, что в жидкостях, тканях и органах содержатся все ХЭ, имеющиеся в средах обитания. Число ХЭ, определяемых в биоматериалах, зависит только от чувствительности используемых аналитических технологий. С развитием методов анализа и повышением их чувствительности число доступных определению ХЭ увеличивается. К этому заключению впервые пришел В.И. Вернадский [3].

2. Гомеостаз содержания ХЭ во внутренней среде, тканях и клетках тела человека. Во всех организмах, включая человека, осуществляется дифференцированный гомеостаз ХЭ, т.е. содержание ХЭ поддерживается на всех уровнях организации организма, варьируя в определенных пределах с возрастом и под влиянием различных экзогенных и эндогенных факторов.

Представление о наличии механизмов гомеостаза уровней ХЭ в жидкостях, тканях и клетках организма человека было впервые сформулировано в Институте медицинской радиологии АМН СССР в конце 60-х годов прошлого столетия В.Е. Зайчиком. На протяжении более полувека это представление является рабочей гипотезой для разработки новых способов оценки состояния организма человека, в том числе и для диагностики злокачественных новообразований. К настоящему времени наличие соматического и клеточного гомеостаза ХЭ в организмах является общепризнанным, имеются многочисленные исследования, вскрывающие его механизмы.

3. Вовлеченность, полезность и вредность ХЭ в теле человека. Поскольку процессы филогенеза и онтогенеза происходят в постоянном контакте организмов со всеми ХЭ сред обитания, ни один из натуральных ХЭ не может рассматриваться как безучастный или чуждый для организма. Такие характеристики, как “полезность” или “бесполезность”, для того или иного ХЭ определяются лишь текущим уровнем информации о степени его вовлеченности в биохимические процессы. По мере расширения наших знаний в этой области круг биологически “полезных” ХЭ постоянно расширяется.

Вредное (токсическое) действие ХЭ определяется лишь уровнем его содержания в организме. В состоянии организма в зависимости от содержания в нем ХЭ можно выделить четыре зоны: дефицит (гипоэлементозы), норма (зона комфорта), избыток (гиперэлементозы) и сверхиз-

быток (токсикозы) [9]. Кривая этой зависимости имеет максимум в диапазоне концентраций ХЭ, при котором организм чувствует себя комфортно (норма). Чем шире этот диапазон, тем меньше вероятность случайного выхода за его пределы вследствие внешнего естественного воздействия. Отсюда понятно выделение ряда ХЭ как “токсические”. К ним причисляют элементы с узким диапазоном нормы и гиперэлементоза, когда переход от комфортного состояния к токсикозу происходит даже при незначительном избыточном поступлении ХЭ извне.

Много сил и времени было потрачено на выявление “эссенциальных” (абсолютно необходимых) ХЭ, которые содержатся в организме человека в малых количествах (микроэлементы – МЭ). При этом использовались дорогостоящие методики (например, создание корма для животных, полностью лишенного исследуемого ХЭ) и грубые способы оценки “эссенциальности” МЭ (контроль роста и развития при отсутствии МЭ в диете). В итоге к середине XX века была доказана “эссенциальность” около десяти МЭ. Однако очевидно, что полностью исключить содержание какого-либо ХЭ из пищи в земных условиях не представляется возможным, и, кроме того, ХЭ в микроколичествах попадают в организм не только с пищей, но и другими путями. Поэтому для МЭ такой подход не являлся корректным. В процессе трансформации критериев “эссенциальности” и совершенствования методов оценки влияния МЭ на организм число “эссенциальных” МЭ увеличивается [8–11], а деление МЭ на “эссенциальные”, “условно эссенциальные” и “токсичные” постоянно пересматривается. Так, к началу XXI века число “эссенциальных” и “условно эссенциальных” МЭ, по разным оценкам, приблизилось к 30 [12, 13]. Поскольку число элементов, вовлеченных в нормальное функционирование организма, увеличивается, в конце 1960-х годов В.Е. Зайчиком было предложено считать, что присутствие всех ХЭ в определенных количествах и соотношениях в жидкостях, тканях и клетках организма, по меньшей мере, не безразлично для его существования. Из этого следует вывод о необходимости определения всех доступных анализу ХЭ в образцах биоматериалов.

4. Комбинаторность (сочетанность) влияния ХЭ на организмы. Помимо абсолютных количеств ХЭ в организме, их рекомбинации имеют большое значение для жизнедеятельности. Это обусловлено синергизмом и антагонизмом взаимоотношений многих ХЭ, например, Cu и Zn, Cu

и Fe, Se и I, Cr и Cu, Cr и Fe, Zn и Cd. Однако круг межэлементных взаимодействий значительно шире, многообразней и сложнее. При этом взаимосвязи между ХЭ могут быть выявлены только при одновременном определении уровней содержания большого числа ХЭ в биообъекте. Это важное заключение следует из исследований, проведенных под руководством автора данной статьи.

Определение предмета исследования и сформулированные постулаты позволяют оценить масштабность целей и задач биологической элементологии. Для их решения нужен весь арсенал аналитической химии, однако особый интерес представляют инструментальные технологии, из них в особую группу выделены радиационные ядерно-физические методы (РЯФМ), т.е. методы, использующие для анализа ХЭ радиацию (нейтронно-активационный анализ — НАА, энерго-дисперсионный рентген-флуоресцентный — EDXRF, и др.). Этот раздел может быть выделен как *радиационная биологическая элементология*.

ЭЛЕМЕНТОЛОГИЯ, РАДИОБИОЛОГИЯ, МЕДИЦИНА

Очевидно, что цели и задачи биологической элементологии неразрывно связаны со многими разделами биологии, в частности, с радиобиологией, так как при воздействии ионизирующей радиации на живую материю в ней возбуждается и вторичное излучение, регистрация его позволяет определять содержание многих ХЭ в облучаемом биообъекте. Это лежит в основе радиационных аналитических методов. Рассмотрим подробнее некоторые общие вопросы радиационной биологической элементологии и радиобиологии, а также наиболее перспективные цели и задачи этого раздела науки.

Использование ХЭ, а также их радиоактивных и стабильных изотопов в радиобиологии и медицинской радиологии

В природе ХЭ состоят обычно из одного или смеси нескольких стабильных изотопов, отличающихся числом нейтронов в ядре атома. Радиоактивные химические элементы — это элементы, все изотопы которых радиоактивны. К ним относятся Tc, Pm, все элементы от Po до Ac, а также актиниды. Некоторые ХЭ в природе, помимо стабильных, содержат и радиоактивные изотопы.

Хотя такие радиоактивные элементы, как Th и U, были известны давно, впервые радиоак-

тивность была обнаружена в 1896 г. Антуаном Анри Беккерелем у урана, а затем у радия и полония — элементов, открытых Пьером и Марией Кюри в 1898 г. Практически сразу же после этого открытия Пьер и Мария Кюри предположили, что радиоактивность элементов может быть использована для терапевтических целей так же, как X-лучи, открытые Рентгеном тремя годами ранее. Однако широкое использование радиоактивных изотопов (радионуклидов) началось несколькими десятилетиями позже, когда было обнаружено, что, воздействуя на стабильные ХЭ различного вида радиацией, можно получать радионуклиды с различными характеристиками, и были разработаны чувствительные детекторы радиоактивности. В современной медицине при диагностических и лечебных процедурах, в том числе и в составе радиофармпрепаратов, применяются более 60 ХЭ (табл. 1). Помимо них, известно более 30 фотонных и около 80 позитронных излучателей, потенциально интересных для методик лучевой диагностики.

В клинической практике и экспериментальной медицине используют и стабильные изотопы ХЭ. Например, в нейтрон-захватной терапии (НЗТ) используются соединения, содержащие стабильные изотопы с высоким сечением захвата тепловых нейтронов, такие как ^{10}B , ^6Li , или ^{152}Gd . Иногда с целью исключения лучевой нагрузки при обследовании пациентов радиоактивную метку заменяют стабильным аналогом. Например, для определения заражения желудочно-кишечного тракта *Helicobacter* вместо долгоживущего радионуклида ^{14}C используют стабильный изотоп ^{13}C . В магниторезонансной томографии применяют препараты, содержащие стабильные изотопы ^{205}Tl , ^{83}Kr или ^{129}Xe . В фармацевтических исследованиях в качестве стабильной метки часто используется ^2H .

Замена радионуклида на стабильную метку интересна еще и тем, что при этом есть возможность ретроспективной оценки изменений в организме, когда измерение радионуклида в момент проведения обследования невозможно или затруднительно, например, в условиях космического полета [14].

Хотя химические свойства стабильных и радиоактивных изотопов одного элемента близки, использование в медицине препаратов, содержащих радионуклиды или стабильные изотопы ХЭ, требует тщательного изучения их фармакокинетики с помощью камерных моделей и математических функций. Поскольку фармакокинетика

Таблица 1. Радионуклиды, которые использовались, используются и проходят испытания в медицинских и радиобиологических исследованиях**Table 1.** Radionuclides that have been, are being used and are being tested in medical and radiobiological research

Применение	Радионуклид
Диагностика	^{109m}Ag , ^{72}As , ^{195m}Au , ^{198}Au , ^{75}Br , ^{76}Br , ^{82}Br , ^{11}C , ^{14}C , ^{45}Ca , ^{47}Ca , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{49}Cr , ^{51}Cr , ^{61}Cu , ^{62}Cu , ^{18}F , ^{52}Fe , ^{59}Fe , ^{67}Ga , ^{68}Ga , ^3H , ^{203}Hg , ^{123}I , ^{132}I , ^{110}In , ^{111}In , ^{113m}In , ^{191m}Ir , ^{38}K , ^{40}K , ^{77}Kr , ^{81m}Kr , ^{13}N , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{15}O , ^{30}P , ^{82}Rb , ^{35}S , ^{44}Sc , ^{75}Se , ^{178}Ta , ^{92}Tc , ^{93}Tc , ^{99m}Tc , ^{199}Tl , ^{201}Tl , ^{204}Tl , ^{127}Xe , ^{133}Xe , ^{86}Y , ^{63}Zn , ^{87}Zr , ^{89}Zr
Диагностика и радиотерапия	^{74}As , ^{76}As , ^{64}Cu , ^{153}Gd , ^{68}Ge , ^{131}I , ^{115m}In , ^{177}Lu , ^{32}P , ^{38}S , ^{47}Sc
Радиотерапия	^{225}Ac , ^{110m}Ag , ^{211}At , ^{212}Bi , ^{213}Bi , ^{60}Co , ^{131}Cs , ^{67}Cu , ^{165}Dy , ^{169}Er , ^{166}Ho , ^{125}I , ^{192}Ir , ^{194}Ir , ^{103}Pd , ^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{186}Re , ^{188}Re , ^{105}Rh , ^{153}Sm , ^{117m}Sn , ^{89}Sr , ^{90}Y , ^{169}Yb , ^{175}Yb

радионуклидов на начальных этапах изучается на лабораторных животных, эти исследования непосредственно относятся к радиобиологии. Следует отметить, что для диагностических целей чаще применяют однократное введение короткоживущих радионуклидов, из-за чего в организме не успевает наступить равновесное состояние с адекватным их распределением. Например, для определения функционального состояния щитовидной железы используется ^{131}I с периодом полураспада ($T_{1/2}$) около 8 дней, а биологический период полуобмена йода в щитовидной железе человека составляет около 100 дней [15]. Так как йод-накопительная функция отражает лишь первый этап синтеза тиреоидных гормонов и их метаболизма в организме, для полного понимания нарушений обмена йода необходимо определение содержания нативного йода в щитовидной железе и других путях йода в организме (например, уровни тиреоидных гормонов в крови) [16].

Поскольку при трансформации фармпрепарата в организме возможно отщепление радионуклида или стабильного изотопа от молекулы носителя, необходимо исследовать не только поведение самого фармпрепарата, но и входящих в его состав радиоактивных или стабильных изотопов ХЭ, к которому эти изотопы относятся. Это полностью совпадает с общими задачами радиационной биологической элементологии и радиобиологии.

Поглощенная доза ионизирующего излучения от радиоактивных ХЭ зависит от их содержания в тканях и периода распада. Разумеется, в основном доза формируется взаимодействием излучения с макроэлементами, такими как Н, С, N и О, в меньшей степени – с основными электролитами Na, Cl, K, а для костной ткани еще и с Са и Р. Принято считать, что при γ -терапии различия в поглощенной дозе между здоровой тканью и опухолью обусловлены, главным обра-

зом, разницей в концентрации так называемых активных форм кислорода, а многие быстро растущие опухоли гипоксичны. До сих пор не изучены изменения концентраций Н, С, и N при злокачественной трансформации тканей и органов, хотя радиационные ядерно-физические методы позволяют сделать это.

При некоторых видах радиотерапии опухолей важную роль в формировании поглощенной дозы в нормальной и опухолевой ткани играют радионуклиды МЭ, например, радионуклид ^{131}I в лечении рака и метастазов щитовидной железы или ^{10}B в нейтрон-захватной терапии опухолей мозга, а также при брахитерапии с использованием низкоэнергетических радионуклидов ^{125}I и ^{103}Pd .

В настоящее время в РФ около 50 тыс. пациентов ежегодно нуждаются в радионуклидной диагностике и терапии. Ясно, что необходимо детальное изучение метаболизма используемых радионуклидов и соответствующих ХЭ в организме, чтобы предотвратить нежелательные последствия радиационных процедур, как, например, в печальной истории с двуоксидом тория ThO_2 (“Торотраст”), который использовался как рентгенконтрастное вещество в 30–50-х годах 20-го века в Европе и США [17]. МРНЦ им. А.Ф. Цыба как ведущим медицинским учреждением радиологического профиля широко применяется радиоизотопная диагностика, дистанционная и тканевая лучевая терапия, до последних лет в специализированном клиническом подразделении лечения открытыми радионуклидами ежегодно получали помощь более половины нуждающихся в этом пациентов по стране. В МРНЦ продолжается разработка, доклинические (на животных) и клинические испытания новых радиофармпрепаратов. Важным элементом в таких работах является контроль за динамикой содержания химических элементов.

Предприятия атомной энергетики и загрязнение радионуклидами

Российская Федерация обладает полным циклом атомных технологий от добычи и переработки урановых руд до производства атомной энергии и ядерного оружия. В этой отрасли (более 330 тыс. работников) осуществляется проектирование, строительство и контроль за эксплуатацией атомных электростанций (АЭС), как внутри страны (11 АЭС), так и за рубежом, ведется переработка и утилизация отработанного ядерного топлива. Кроме того, строятся и эксплуатируются атомные надводные корабли и подводные лодки.

Предприятия отрасли являются источником радиоактивного загрязнения как производственных, так и прилежащих территорий. Даже при штатной эксплуатации АЭС в воздух выбрасываются радиоактивные благородные газы, радионуклиды йода, тритий, газообразные продукты активации (^{14}C , ^{16}Na , ^{41}Ar , ^{35}S и др.), а также аэрозольные частицы, содержащие нелетучие радионуклиды [18]. В ТВЭЛах реакторов накапливаются продукты ядерного деления (ПЯД) и трансурановые элементы (ТУЭ). На радиохимических заводах невозможно полностью исключить попадание в организм образовавшихся в топливе долгоживущих радионуклидов.

В организм работников отрасли могут хронически попадать сразу несколько радионуклидов, возможен и контакт с другими потенциально опасными ХЭ. Например, при добыче урановой руды в организм вместе с пылью попадают не только радионуклиды U, Ra, Th, но и ХЭ, встречающиеся в биосфере в очень низких концентрациях. При изготовлении ТВЭЛов и атомных реакторов используются В, Bi, Cd, Pb, Zr и другие потенциально опасные ХЭ. Вероятность внутреннего загрязнения ими и радионуклидами стимулировало интерес к изучению метаболизма и биоэффектов широкого спектра ХЭ. В этих исследованиях, проводимых как в радиобиологических экспериментах на лабораторных животных, так и с привлечением добровольцев, методы радиоиндикации сочетаются с методами аналитической химии [19].

Методические подходы и проблемы анализа доз, полученных работниками отрасли и участниками ликвидации последствий радиационных аварий

Во многих отраслях производства и энергетики периодически возникают нештатные и аварийные ситуации, однако аварии в ядерной отрасли должны быть выделены в отдельную ка-

тегорию, так как негативные, а иногда катастрофические последствия для здоровья персонала, получившего большую поглощенную дозу радиации, часто сочетаются с выбросами радиоактивных элементов и соединений во внешнюю среду с выраженными негативными эффектами для биоценозов, включая население, проживающее в зоне аварии. Так, только за период с 1944 по 1988 г. в мире (без учета СССР) произошло 300 аварий [18]. Большая часть из них (более 200) произошла на АЭС, несколько из них привели к радиационным загрязнениям разного масштаба. В СССР за 50 лет с начала развития атомной промышленности и энергетики произошло 175 радиационных инцидентов и аварий, из них три крупномасштабных: загрязнение р. Теча сбросами радиоактивных отходов ПО “Маяк”, взрыв емкости с высокоактивными отходами ПО “Маяк” и авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Последствия аварии на ЧАЭС носили планетарный характер и коснулись не только территорий Европейской части СССР, на которых проживало 17 млн человек, включая 2,5 млн детей, но и других стран. В ликвидации последствий аварии на ЧАЭС с 1986 по 2000 г. принимали участие 860 тыс. человек (“ликвидаторы”), из которых за эти годы погибло более 55 тыс. и десятки тысяч стали инвалидами [20, 21].

В результате взрыва на одном из энергоблоков ЧАЭС, вызванного вышедшей из-под контроля ядерной цепной реакцией деления, в значительной части объема активной зоны топлива разогрелось до температур более 10000°C , и основная его часть, а также часть конструкционных материалов, были выброшена в атмосферу. Шахту взорвавшегося реактора с горящим графитом в течение нескольких недель засыпали с вертолетов 11 тыс. тонн смеси карбида бора (B_4C), и доломита ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) с добавкой свинца (Pb) [20]. Из-за высокой температуры в разрушенной зоне (более 2000°C) большая часть Pb быстро испарялась в атмосферу. В итоге произошел выброс (с заражением больших площадей) радиоактивных веществ, в том числе изотопов U и целого спектра продуктов его деления, Pu, ^{131}I ($T_{1/2} = 8$ дней), ^{134}Cs ($T_{1/2} = 2$ года), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ лет), и ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28$ лет), а также потенциально токсичных ХЭ – Cd и Pb.

Важная для принятия решений оценка поглощенных доз γ -нейтронного облучения, полученных персоналом ЧАЭС и пожарными, была затруднена, поскольку персональные дозиметры конденсаторного типа “зашкалили”. В подобных случаях оценка поглощенной дозы может быть

сделана по уровню наведенного γ -излучения от ^{24}Na ($T_{1/2} = 15$ ч), образующегося в теле человека под воздействием нейтронов по реакции $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$. Измерение γ -излучения от ^{24}Na во всем теле с помощью СИЧ (счетчик излучения человека) позволяет оценить поток нейтронов, а через него — поглощенную дозу. Существуют и другие подходы к оценке поглощенной дозы с помощью РЯФМ анализа содержания ХЭ в биожидкостях тела человека [22–24].

Профильными министерствами были организованы работы по тушению пожара, строительству так называемого укрытия над блоком ЧАЭС, а также по лечению сотрудников и пожарных, получивших клинически значимые дозы радиации. Радиоэкологами были определены территории, зараженные из-за выброса в атмосферу радиоактивных и токсичных веществ. Однако при изучении последствий аварии на здоровье ликвидаторов и населения учитывалась только доза от внешнего γ -излучения, определяемая по повышению уровня хромосомных aberrаций в долгоживущей популяции лимфоцитов крови, а также по наличию явных патологий системы крови и щитовидной железы, избирательно накапливающей иод, в том числе и радиоактивные его изотопы. Влияние других негативных факторов, например, возможности попадания в организм α -излучателей (топливного U и продуктов его деления) и некоторых микроэлементов (В, Cd, Pb, Zr и др.) в потенциально опасных количествах, а также синергизм радиации и химико-токсических эффектов, не принималось во внимание. Это привело к расхождению между частотой и выраженностью расчетных и фактических последствий аварии для здоровья. Следующий ниже пример подтверждает это заключение.

Известно, что костная ткань радиорезистентна. Поэтому при обследовании ликвидаторов ее состояние не контролировалось. Первое исследование метаболизма Ca у ликвидаторов было проведено в ИМРАМН СССР (ныне МРНЦ, Обнинск), в клинике которого был создан центр для их обследования и лечения, лишь в 1992 г., т.е. спустя 6 лет. Результаты оценки гормонального статуса и содержания основных электролитов (включая Ca) в крови, слюне и волосах группы ликвидаторов выявили заметные сдвиги в метаболизме Ca, свидетельствующие о потерях минеральной компоненты костной ткани [25]. В 1997 г. была отобрана группа из 162 мужчин-ликвидаторов в возрасте от 30 до 50 лет для измерения минеральной плотности костной ткани (BMD)

на костном денситометре LUNAR DPX-L. Официально уровни поглощенных доз от внешнего облучения у них не превышали 23 сЗв. У каждого обследуемого определяли минеральную плотность шейки бедра (правой и левой) и поясничных позвонков. Когорта сравнения включала 188 здоровых 20–50-летних мужчин [26]. Остеопения была выявлена почти у половины (47.5%) обследованных ликвидаторов, а остеопороз — у 5.6% [27]. Интересно, что частота остеопений и остеопороза не различалась в подгруппах лиц, облученных в дозе до 10 сЗв и от 11 до 23 сЗв. В то же время у ликвидаторов, работавших в Чернобыле в 1986 г., частота случаев остеопений почти в 2, а остеопороза в 3 раза была выше, чем у работавших в 1987–1991 годах. Это указывало на наличие в Чернобыле в первые месяцы после аварии этиологических факторов, влияние которых в последующий период было ослаблено или полностью исчезло. Одним из таких факторов было облучение сравнительно короткоживущими радионуклидами йода. Инкорпорированные щитовидной железой радионуклиды йода облучали преимущественно тиреоидную паренхиму и расположенные рядом паращитовидные железы. В итоге мог возникать дисбаланс продукции тиреоидных гормонов, кальцитонина и паратгормона, вовлеченных в регуляторные процессы метаболизма кальция и фосфора в организме человека.

Следовало принять во внимание и интоксикацию ликвидаторов свинцом, сброшенным в активную зону в 1986 г., а также кадмием и другими “специфическими” ХЭ, входящими в состав конструкционных материалов ядерного реактора. Известно, что Cd и Pb могут оказывать как прямое, так и опосредованное (через нарушение функции почек, эндокринных органов и кишечника) угнетающее воздействие на активность остеобластов, усиливая тем самым резорбцию костной ткани.

Кроме того, известно, что хронический психоэмоциональный стресс может приводить к стойким изменениям метаболизма основных минералов костной ткани (Ca, P, Mg), нарушению водно-электролитного обмена, истощению иммунной системы, запасов витаминов и микроэлементов.

Существующие на тот период методы позволяли провести исследования эндокринного и иммунного статуса, а также с помощью РЯФМ определить состояние водно-электролитного, минерального и микроэлементного метаболизма

и ретроспективно оценить уровни интоксикации Cd и Pb. К сожалению, финансирования этих исследований не было.

Загрязнение радионуклидами и здоровье населения

Известно, что при поступлении в организм достаточного количества стабильного йода на длительное время блокируется избирательное поступление его изотопа (^{131}I , $T_{1/2} = 8$ дней) в щитовидную железу. Защитный эффект приема стабильного йода при ингаляционном поступлении радиоiodа может выражаться в 100- и 10-кратном снижении дозы, если прием был за 6 ч до ингаляции или во время нее. Однако йодная профилактика проводилась лишь в зоне аварии на ЧАЭС, и с большим опозданием (от 2 до 5 недель) при этом кратность снижения поглощенной железой дозы не превышала 1.2. В конечном итоге, йодной профилактикой было охвачено 5 млн человек, в том числе 1.6 млн детей. Кстати, в МРНЦ в радиобиологических экспериментах, проведенных еще в начале 1970-х годов на животных и добровольцах, было показано, что даже через несколько часов после введения в организм ^{131}I относительно кратковременное гипертермическое воздействие на железу позволяет примерно вдвое уменьшить поглощенную дозу [28, 29].

Очевидно, что поздние сроки йодной профилактики предопределили ее нулевую эффективность. Более того, избыточное поступление йода в организм детей после облучения щитовидной железы ^{131}I повышало риск возникновения в ней злокачественных опухолей. Это следовало из результатов совместных исследований, проведенных МРНЦ и Институтом биофизики (Москва) [30, 31], и было подтверждено непредсказуемо высоким ростом частоты рака щитовидной железы у детей, проживающих на загрязненных территориях, который невозможно было объяснить зависимостью “доза–эффект” [32].

Гигиеническая регламентация содержания радионуклидов в пищевой цепи также крайне важна для радиационной защиты населения после аварии на ЧАЭС. Санитарный аварийный контроль молока стал осуществляться уже через несколько дней после аварии. Но из-за задержек с разработкой нормативных документов для контроля загрязнения пищевых продуктов долгоживущими радионуклидами (^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239, 240}\text{Pu}$), установления типового рациона питания жителей загрязненных регионов; определения набора пищевых продуктов, подлежащих радиометрическому контролю, а также технических вопросов выполнения измерений, са-

нитарный контроль пищевых продуктов свелся лишь к регистрации гамма-излучения ^{137}Cs [33]. При этом была возможность наладить контроль $^{239, 240}\text{Pu}$ — излучателей, наиболее опасных при внутреннем облучении α -частицами, используя наработки МРНЦ в области РЯФМ. Так, еще в самом начале 1970-х годов в МРНЦ был разработан способ регистрации α -частиц с помощью твердого следового детектора — нитроцеллюлозной пленки [34], а также создан простой прибор для экспрессной оценки числа треков от α -частиц [35]. Кроме того, с помощью РЯФМ было изучено содержание многих ХЭ в суточной диете жителей одного из населенных пунктов на загрязненных территориях, а также в основных пищевых продуктах [36]. Было очевидно, что рацион питания жителей на загрязненных территориях должен быть насыщен К, Са и остеотропными микроэлементами, поскольку высокое содержание К во многом предотвращает поступление ^{137}Cs , а Са и остеотропных микроэлементов — ^{90}Sr и $^{239, 240}\text{Pu}$. МРНЦ было предложено провести широкомасштабный контроль ХЭ в диетах жителей на загрязненных территориях, однако финансово это предложение не было поддержано.

Выше говорилось, что даже штатно работающие предприятия атомной промышленности являются источниками загрязнения окружающей среды ХЭ и их радиоактивными изотопами. Например, к таким источникам относятся отходы, образующиеся при добыче урановой руды, а также шахтные, рудные воды, отвалы и рудничный воздух. Рудные воды только одной шахты выносятся в окружающую среду более 1 кг U и 0.2 мг Ra. Рудные отвалы (содержание U около 0.01%) вследствие вымывания и ветровой эрозии загрязняют окружающую среду так же, как и поступающий в атмосферу при вентилировании шахт радон и его дочерние продукты. Только с отходами одного гидрометаллургического завода в окружающую среду в сутки может поступать около 100 кг урана, 111 ГБк дочерних радиоактивных элементов [21].

Другой пример — бронебойные снаряды с тяжелым сердечником из обедненного урана, превращающегося при ударе в облако мелкодисперсных частиц. Хотя активность такого урана низкая (в 2 раза ниже, чем у урановой руды), увеличение концентрации U в зонах военных конфликтов привело к значительному росту онкологических заболеваний как у населения, так и у солдат. Исследование, проведенное в МРНЦ с использованием РЯФМ, показало, в частности, что достоверное увеличение частоты рака предстательной

железы у этих солдат, вероятно, обусловлено синергизмом радиационной и химической компонент воздействия U, который аккумулируется в ткани железы [37].

Методические подходы к мониторингу содержания ХЭ в окружающей среде

Взрывы атомных зарядов при разработке оружия, а также в “мирных” целях — развитие атомной добывающей отрасли, “штатные” и аварийные утечки радиоизотопов, использование радионуклидов в медицине и в научных исследованиях — чреватые как локальным, так и глобальным загрязнением биосферы не только радионуклидами, но и многими стабильными ХЭ, которые в высоких концентрациях опасны. При этом важна информация о содержании ряда ХЭ в объектах биосферы. Поскольку в подобных исследованиях удобно использовать радионуклиды, еще Н.В. Тимофеев-Ресовский назвал это направление “радиационной биогеоценологией”, которой занимался наряду с радиационной генетикой. Метод, который он называл “метод меченых атомов”, удобен из-за простоты регистрации γ -излучения. Однако таким методом определяется лишь динамика процесса и относительные коэффициенты накопления. Для количественного анализа содержания ХЭ в отдельных объектах биогеоценозов и звеньях трофических цепей в МРНЦ был разработан комплекс РЯФМ, который в сочетании с методом “меченых атомов” уже использовался в контроле антропогенного воздействия на экосистему оз. Байкал [38–40].

РЯФМ могут быть полезны и в радиобиологии почв, куда попадают из атмосферы ХЭ и их радионуклиды. В связи с высокой мощностью и емкостью поглощения почва является их депо. После аварии на ЧАЭС для снижения перехода ^{90}Sr и ^{137}Cs из почвы в с/х растения было рекомендовано известкование почвы и внесение в нее калийных удобрений. Дело в схожести свойств Cs и K, а также Sr и Ca. Высокие концентрации Ca и K в почве за счет простой конкуренции препятствуют поступлению радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в растения. Разработанный в МРНЦ комплекс РЯФМ позволил определять содержание в образцах почвы не только Ca и K, но и других важных для растений ХЭ (более 30), и для каждого поля вносить оптимальные количества удобрений [41–44].

И в настоящее время метод меченых атомов — один из широко используемых методов почвенных и агрохимических исследований, позволяющий проследить за движением и превращением

исследуемого ХЭ в почве и растениях [45]. Тем не менее при разработке удобрений, содержащих многие микроэлементы, и для определения оптимальных параметров их концентраций и усвояемости с/х растениями, наряду с привычным для радиобиологии методом меченых атомов было бы целесообразно использовать и РЯФМ. В полной мере это касается и разработки новых пищевых добавок с микроэлементами для с/х животных.

Пищевая промышленность и пищевые добавки

За последние десятилетия изменились технологии пищевой промышленности, что повлияло на уровни содержания ХЭ в рационе человека. Расширилось и число жизненно необходимыми МЭ, недостаток или отсутствие которых в рационе питания ведет к развитию негативных эффектов и заболеваний. В погоне за обеспечением “рационального” питания пищевая индустрия и фармацевтика стали производить модифицированные продукты и “биологические активные добавки” (БАД). Выборочные проверки показали, что, во-первых, концентрации эссенциальных ХЭ часто не соответствуют указанным значениям на этикетках, а, во-вторых, зачастую в этой продукции, помимо обозначенных, содержатся и другие, мало изученные и поэтому потенциально опасные ХЭ [46, 47]. Уже упоминалось, что до сих пор не разработаны простые универсальные тесты определения допустимого уровня насыщения организма тем или иным ХЭ [48]. Использование для этого разовых анализов крови и мочи, отражающих лишь уровни поступления и выведения ХЭ на данный момент, неэффективно. Использование с этой целью образцов волос и ногтей вообще не имеет никакого научного обоснования [49, 50], хотя в РФ оно практикуется. Таким образом, еще предстоит исследование интимных механизмов метаболизма многих ХЭ в организме человека и их вовлеченности в жизнеобеспечение. Тогда станет возможно определить истинную потребность организма в том или ином ХЭ. Мы полагаем, что в этих исследованиях будет невозможно обойтись без сочетания методов меченых атомов и РЯФМ.

Косметология

В активно используемых средствах для косметики и парфюмерии могут содержаться потенциально опасные для здоровья микроэлементы. В последние годы появляются публикации о негативных эффектах многих косметических средств вплоть до стимуляции онкогенеза. Распределение микроэлементов и их проникновение через кожу мало изучено, поэтому

оценка хронического воздействия косметических средств и средств личной гигиены на здоровье актуальна [51–54]. В них комбинация метода меченых атомов и РЯФМ может оказаться весьма продуктивной. При исследовании распределения в толще кожи нанесенных на ее поверхность ХЭ может быть использован метод с радиоактивной меткой, разработанный ранее в МРНЦ автором этой статьи [55, 56].

Возможности и преимущества методов РЯФМ для радиобиологии

Существующие РЯФМ-методы, такие как, например, EDXRF с использованием излучения рентгеновской трубки (радионуклидных источников, синхротрона и др. ускорителей) или NAA на нейтронах ядерного реактора, позволяют без разрушения исследуемого образца определять в нем содержание около 30 ХЭ, совмещая РЯФМ с другими методами исследования. Другим преимуществом неdestructивных РЯФМ является их экспрессность и точность, поскольку не нужна пробоподготовка (основной источник ошибок). Если разрушение (утилизации) биообразца допустимо, аналитические возможности ЯФМ расширяются. Так, в настоящее время самым мощным ядерным методом анализа является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). В МРНЦ было показано, что сочетанное использование EDXRF, NAA и ICP-MS позволяет определять в биообразцах содержание более 70 ХЭ [57, 58]. Помимо этого, РЯФМ обладают совершенно уникальной возможностью *in vivo* определения содержания ХЭ в теле и органах лабораторных животных [59]. Важно, что используемые в этих методах гамма-спектрометры широко используются радиобиологами для идентификации источников радиации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже отмечалось выше, все организмы, включая человека, живут в непрерывном контакте со средой обитания и поэтому зависят от ее состояния. Долгое время среда их обитания не претерпевала существенных изменений и поступление различных ХЭ в растения, животных и человека было достаточно стабильным. Механизмы гомеостаза ХЭ на всех уровнях организации каждого вида организмов приспособились к этим потокам, обеспечивая комфортное их состояние. Исключения составляли лишь некоторые регионы, в которых в силу геохимических особенностей содержания определенных ХЭ резко отклонялось в сторону дефицита или избытка. В России эти регионы в первой поло-

вине XX столетия были выявлены и охарактеризованы как неблагоприятные биогеохимические провинции [7]. Однако на среду обитания примерно с середины XIX века начал оказывать сильное глобальное влияние антропогенный фактор, связанный с промышленной революцией [3–5]. Особо заметные изменения стали происходить с середины 20-го столетия, когда бурными темпами стало нарастать промышленное (добыча и переработка руд, черная и цветная металлургия, машиностроение) и химическое (добыча и глубокая переработка нефти и газа, получение удобрений и синтетических материалов) производство. В невиданных ранее количествах стали использоваться минеральные и органические удобрения, а также ядохимикаты. Появились новые промышленные (атомное оружие и энергетика, лазерные устройства, электроника, полупроводники, различные детали для компьютеров, мобильных телефонов и т.д.) и агрономические (например, форсификация почв микроэлементами) технологии. Существенные изменения произошли и в технологиях получения, хранения и переработки пищевых продуктов, в результате чего натуральное содержание в них ХЭ сильно искажается. Более того, получило распространение практически бесконтрольное наполнение пищевых продуктов ХЭ в виде различных красителей, стабилизаторов, консервантов и “эссенциальных микроэлементных добавок”. В медицине также произошла интенсификация применения фармакопейных средств, содержащих МЭ, при этом их список существенно пополнился. Помимо фармакопейных средств, содержащих микроэлементы, в аптеках без рецепта врача продается большое количество разного вида БАДов, что приводит к бесконтрольному поступлению в организм микроэлементов в невиданных ранее дозах. Более того, широкое применение получили имплантаты из нержавеющей стали и других сплавов, содержащих такие микроэлементы, как, например, Сг и Ni, канцерогенность которых убедительно доказана. Известно, что за последние полвека частота возникновения некоторых заболеваний, например, респираторных, эндокринных и онкологических, увеличилась многократно. Очевидно, что не последнюю роль в этом играют происходящие изменения в окружающей среде, в том числе и по содержанию ХЭ [60].

Выявление дефицита или избытка в содержании ХЭ в различных биообъектах (почвы, фрукты, овощи, продукты питания животного происхождения и др.) по сравнению с референтными значениями, характерными для нормы, важны

для оценки пригодности их к использованию человеком. На текущий момент, в Интернете имеется масса публикаций, прямо или косвенно относящихся к теме “содержание ХЭ в биообъектах”. Несмотря на это, до сих пор нет официальных общепризнанных референтных значений даже для уровней содержания ХЭ в жидкостях и тканях лабораторных животных, широко используемых в радиобиологической практике (мыши, крысы, хомячки, морские свинки, кролики и собаки). В РФ нет данных подробного картирования пахотных земель на содержание ХЭ, хотя во многих развитых странах это давно уже сделано. Существующие таблицы по содержанию ХЭ в пищевых продуктах носят лишь ориентировочный характер и не учитывают широкие вариации в элементном составе, связанные с их происхождением. Более того, многочисленные исследования МАГАТЭ показали, что плохая сходимость данных при исследовании в различных аналитических лабораториях одного и того же биологического образца обусловлена, в основном, недостатками в контроле точности получаемых результатов [8, 10–13]. Это заключение стимулировало разработку международных стандартных материалов сравнения и ряд нормативных рекомендаций по контролю качества измерений. Однако, несмотря на предпринятые меры, только исследование биоматериала комплексом аналитических методов позволяет получить достоверные результаты для использования их в качестве референтных значений [57, 58].

Пионерские исследования в области радиационной генетики и радиационной биогеоценологии были начаты Н.В. Тимофеевым-Ресовским еще в 20–30-е годы двадцатого века и продолжены в МРНЦ (с 1964 г). Модельные исследования в области влияния различных погодных факторов на динамику перехода ХЭ из почвы в растения он проводил совместно со своим учеником А.Н. Тюрюкановым [61], активно используя метод меченых атомов. В начале 1970-х годов в ИМР АМН СССР (ныне МРНЦ МЗ РФ) была создана группа “Нейтронно-активационного и рентгено-флуоресцентного анализа”, в которой на протяжении более полувека проводятся систематические исследования в области радиационной медицинской и биологической элементологии. При этом успешно сочетались метод меченых атомов и РЯФМ. Работы проводились не только совместно с различными подразделениями МРНЦ, но и в кооперации с многими научно-исследовательскими институтами. Исследования в области радиационно-ядерной биологической элементологии продолжаются

в МРНЦ и в настоящее время. Последовательное развитие атомных и ядерных технологий и их внедрение в радиобиологию постоянно расширяют рамки возможностей радиационной биологической элементологии. Прогресс этого направления, безусловно, внесет весомый вклад в будущие успехи радиобиологии.

ВЫВОДЫ

1. Только при значительных поглощенных дозах, когда возникают детерминированные эффекты облучения, радиационный фактор является доминирующим и может рассматриваться в отрыве от других негативных факторов воздействия ионизирующих излучений на организм. При малых поглощенных дозах, в зоне стохастических эффектов облучения, для которых не существует дозового порога, конечный биоэффект на флору и фауну (в том числе и на человека) определяется комплексом факторов, включая неадекватное поступление ХЭ в организм. Этот вывод в полной мере относится ко всем представителям флоры и фауны.

2. Знания относительно оптимальных потоков поступления ХЭ из среды обитания в растения и животных, а также их метаболизма в объектах живой природы крайне ограничены. Об этом свидетельствует хотя бы отсутствие референтных значений нормального (оптимального) содержания ХЭ в овощах, фруктах, пищевых продуктах животного происхождения, в органах и тканях лабораторных животных.

3. Радиационные ядерно-физические методы существенно дополняют арсенал радиобиологических методов исследования, их использование позволит решить многие насущные задачи радиобиологии. С учетом расширения сфер применения источников ионизирующей радиации в промышленности, энергетике, биологии и медицине, а также рисков радиоактивного загрязнения биосферы при аварийных ситуациях, продолжение научных исследований в данном направлении остается высоко актуальным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование не имело спонсорской поддержки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальная радиобиология: Курс лекций / Л.А. Ильин, Л.М. Рождественский, А.Н. Котеров, Н.М. Борисов. М.: Изд. дом МЭИ, 2015. 240 с. (Высшая школа физики). [Aktual'naya radiobiologiya: kurs lektzii / L.A. Il'in, L.M. Rozhdestvenskii, A.N. Kotarov, N.M. Borisov. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2015. 240 p. (Vysshaya shkola fiziki). (In Russ.)]. ISBN 978-5-383-00932-1
2. Александров Ю.А. Сельскохозяйственная радиобиология: Учебное пособие. Йошкар-Ола: Марийск. гос. ун-т, 2005. 131 с. [Aleksandrov Yu.A. Sel'skokhoziaistvennaya radiobiologiya: Uchebnoe posobie. Ioshkar-Ola: Mariy. gos. un-t, 2005. 131 p. (In Russ.)]. ISBN 5-94808-160-5
3. Вернадский В.И. Живое вещество. М.: Наука, 1978. 358 с. [Vernadskii V.I. Zhivoe veshchestvo. M.: Nauka, 1978. 358 p. (In Russ.)].
4. Vernadsky V.I. Scientific thought as a planetary phenomenon. M.: Nongovernmental Ecological Vernadsky V.I. Foundation, 1997. 265 p.
5. Виноградов А.П. Труды Биогеохимической лаборатории АН СССР, 1935, № 3. [Vinogradov A.P. Trudy Biogeokhimicheskoi laboratorii AN SSSR, 1935, № 3. (In Russ.)].
6. Войнар А.И. Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека. М.: Высшая школа, 1960. 544 с. [Voinar A.I. Biologicheskaya rol' mikroelementov v organizme zhivotnykh i cheloveka. M.: Vysshaya shkola, 1960. 544 p. (In Russ.)].
7. Ковальский В.В. Геохимическая экология. Очерки. М.: Наука, 1974. 300 с. [Koval'skii V.V. Geokhimicheskaya ehkologiya. Ocherki. M.: Nauka, 1974. 300 p. (In Russ.)].
8. Zaichick V., Naginiene R. Medical and biological elementology as a new scientific discipline. In: Metals in the Environment. Proceedings of the 3rd International Conference. Vilnius: Lithuania, 2007. P. 116–124.
9. Авцин А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 496 с. [Avtsin A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S. Mikroehlementozy cheloveka. M.: Meditsina, 1991. 496 p. (In Russ.)].
10. Zaichick V. Medical elementology as a new scientific discipline. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2006; 269: 303–309.
11. Зайчик В., Агаджанян Н.А. Некоторые методологические вопросы медицинской элементологии. *Вестник восстановительной медицины.* 2004;3(9):19–23. [Zaichick V., Agadzhanian N.A. Nekotorye metodologicheskie voprosy meditsinskoi ehlementologii. *Bulletin of Rehabilitation Medicine.* 2004;3(9):19–23. (In Russ.)].
12. Zaichick V., Ermidou-Pollet S., Pollet S. Bio- and medical elementology as a new scientific discipline. 1. Fundamental postulates. In: Proceedings of 5th International Symposium on Trace Elements in Human: New Perspectives (13–15 October 2005, Athens, Greece). Athens University, Athens, Greece 2005, p. 24–30.
13. Zaichick V., Ermidou-Pollet S., Pollet S. Medical elementology: a new scientific discipline. *Trace Elements and Electrolytes.* 2007;24(2): 69–74.
14. Zaichick V. X-ray fluorescence analysis of bromine for the estimation of extracellular water. *Appl. Radiat. Isot.* 1998; 49(12):1165–1169.
15. Зайчик В.Е., Павлов Б.Д., Ткачев А.В. Влияние гипертермии на скорость выведения ^{131}I из щитовидной железы и организма. *Бюлл. эксперим. биол. мед.* 1974;78(10):51–55. [Zaichick V.E., Pavlov B.D., Tkachev A.V. Vliyanie gipertermii na skorost' vyvedeniya ^{131}I iz shchitovidnoi zhelezy i organizma. *Byull. Ehksperim. Biol. Med.* 1974; 78(10): 51–55. (In Russ.)].
16. Чуреева Л.Н., Будагов Р.С., Зайчик В.Е. Гипофункция щитовидной железы при изолированных и комбинированных радиационно-термических поражениях. *Радиобиология.* 1984;24(3):390–393. [Chureeva L.N., Budagov R.S., Zaichick V.E. Gipofunktsiya shchitovidnoi zhelezy pri izolirovannykh i kombinirovannykh radiatsionno-termicheskikh porazheniyakh. *Radiobiologiya.* 1984;24(3):390–393. (In Russ.)].
17. Horta J.S., Abbatt J.D., Motta L.C., Tavares M.H. Leukaemia, malignancies and other late effects following administration of Thorotrast. *Zeitschrift für Krebsforschung und Klinische Onkologie.* 1972;77(3):202–216. <https://doi.org/10.1007/BF02570686>
18. Василенко О. И. Радиационная экология. М.: Медицина, 2004. 216 с. [Vasilenko O. I. Radiatsionnaya ehkologiya. M.: Meditsina, 2004. 216 p. (In Russ.)].
19. Москалев Ю.И. Минеральный обмен. М.: Медицина, 1985. 288 с. [Moskalev Yu.I. Mineral'nyi obmen. M.: Meditsina, 1985. 288 p. (In Russian)].
20. World health Organization (WHO). Health consequences of the Chernobyl accident. Results of the IP-HECA pilot projects and related national programs. Scientific report. Geneva: WHO, 1996. 520 p. ISBN 5-88429-010-1.
21. Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С., Шуралев Э.А., Мукминов М.Н. Радиоактивность экосистем: Учебное пособие. Казань: Казан. ун-т, 2017. 201 с. [Badrutdinov O.R., Tyumenev R.S., Shuralev E.A., Mukminov M.N. Radioaktivnost' ehkosistem: uchebnoe posobie. Kazan': Kazan. univ., 2017. 201 p. (In Russ.)].
22. Зайчик В.Е., Цыб А.Ф., Свиридова Т.В., Дунчик В.Н. Способ биологической дозиметрии: А. с. № 997536 СССР; МПК5 G01T1/161 / Зайчик В.Е., Цыб А.Ф., Свиридова Т.В., Дунчик В.Н.; заявитель Научно-исследовательский институт ме-

- дицинской радиологии АМН СССР. № 3342318; заявл. 20.07.1981; зарегистр. 14.10.1982 [Zaichick V.E., Tsyb A.F., Sviridova T.V., Dunchik V.N. Spособ biologicheskoi dozimetrii. Author's certificate for invention USSR № SU997536, 14.10.1982; IPS 5 G01T1/161. (In Russian)].
23. Zaichick V., Zaichick S. Preliminary Study of Prostatic Fluid Levels of Zinc Concentration as the Biodosimeter of Males Exposure to Ionizing Radiation. *AS Med. Sci.* 2020;4(3):1–7.
 24. Будагов Р.С., Ашуров А.А., Зайчик В.Е. Микроэлементы крови как индикатор степени тяжести лучевых поражений. *Радиобиология.* 1994;34(1): 49–54. [Budagov R.S., Ashurov A.A., Zaichick V.E. Mikroelementy krovi kak indikator stepeni tiazhesti luchevykh porazhenii (Blood trace elements as an indicator of the degree of severity in radiation lesions). *Radiats. Biol. Radioecol.* 1994;34(1):49–54. (In Russ.). PMID: 8148979].
 25. Zaichick V.Ye., Lyasko L.I., Dubrovin A.P. The major electrolyte and trace element metabolism in the Chernobyl clean-up workers. Proc. 2nd Inter. Conf. on Radiobiological Hazard of Nuclear Accidents (Moscow, Oct 25–26, 1994). Part 2. Moscow, 1994. P. 311.
 26. Бурдыгина Н., Морозов А., Зайчик В., Родионова С., Шавладзе З. Минеральная плотность костной ткани здоровых жителей Москвы и Московской области по данным биэнергетической рентгеновской абсорбциометрии. Конф. с междунар. участием “Проблема остеопороза в травматологии и ортопедии”. М., 2000. С. 78–79 [Burdygina N., Morozov A., Zaichick V., Rodionova S., Shavlazde Z. Mineral'naya plotnost' kostnoi tkani zdorovykh zhitelei Moskvy i Moskovskoi oblasti po dannym biehergeticheskoi rentgenovskoi absorbtsiometrii. Konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem “Problema osteoporoza v travmatologii i ortopedii”. Moscow, 2000. P. 78–79. (In Russ.)].
 27. Зайчик В.Е., Шавладзе З.Н. DEXA исследование риска остеопороза у молодых мужчин, принимавших участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. В сб.: Новые методы диагностики и лечения лиц, подвергшихся радиационному воздействию. М., 2002. С. 112–115. [Zaichick V.E., Shavlazde Z.N. DEXA issledovanie riska osteoporoza u molodykh muzhchin, primavshikh uchastie v likvidatsii posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES. V sbornike: Noveye metody diagnostiki i lecheniya lits, podvergshikhsya radiatsionnomu vozdeistviyu. Moscow, 2002. P. 112–115. (In Russ.)].
 28. Ткачев А.В., Зайчик В.Е. Тиреоидный статус при кратковременной адаптации к изменениям температуры внешней среды. Мат. 5 Всесоюз. Симп. по биологическим проблемам Севера (Владивосток, апрель 1974 г.). Владивосток, 1974. С. 63–68. [Tkachev A.V., Zaichick V.E. Tireoidnyi status pri kratkovremennoi adaptatsii k izmeneniyam temperatury vneshnei sredy. Materialy 5 Vsesoyuznogo simpoziuma po biologicheskim problemam Severa (Vladivostok, april' 1974 g.). Vladivostok, 1974. P. 63–68. (In Russ.)]
 29. Зайчик В.Е., Павлов Б.Д., Ткачев А.В. Влияние гипертермии на скорость выведения ^{131}I из щитовидной железы и организма. *Бюлл. эксперим. биол. мед.* 1974;78(10):51–55. [Zaichick V.E., Pavlov B.D., Tkachev A.V. Vliyanie gipertermii na skorost' vyvedeniya ^{131}I iz shchitovidnoi zhelezy i organizma. *Byulleten' Eksperimental'noj Biologii i Mediciny.* 1974;78(10):51–55. (In Russian)].
 30. Zaichick V., Iljina T. Excessive iodine intake and thyroid tumours. In: Mengen-und Spurenelemente. 17 Arbeitstagung. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, 1997. P. 481–487.
 31. Zaichick V., Iljina T. Dietary iodine supplementation effect on the rat thyroid ^{131}I blastomogenic action. In: Die Bedeutung der Mengen- und Spurenelemente. 18. Arbeitstagung. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, 1998. P. 294–306.
 32. Шахтарин В.В., Цыб А.Ф., Лушников Е.Ф. и др. Заболеваемость раком щитовидной железы детей и подростков России после Чернобыльской катастрофы: отдаленный катамнез, верификация диагноза, эпидемиологическая оценка. *Проблемы эндокринологии.* 1999;45(2):10–17. [Shakhtarin V.V., Tsyb A.F., Lushnikov E.F. et al. The incidence of thyroid cancer in children and adolescents in Russia after the Chernobyl disaster: distant follow-up, verification of diagnosis, epidemiological assessment. *Problems of endocrinology.* 1999;45(2):10–17. (In Russ.)].
 33. Панов А.В., Комарова Л.Н., Ляпунова Е.Р., Мельникова А.А. Вклад содержащих радионуклиды пищевых продуктов в формирование доз внутреннего облучения населения юго-запада Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. *Радиация и риск.* 2023;32(3):28–37. [Panov A.V., Komarova L.N., Lyapunova E.R., Mel'nikova A.A. Contribution of foodstuffs contained radionuclides to formation of internal radiation doses received in areas Bryansk region affected by the Chernobyl accident. *Radiation and Risk.* 2023;32(3):28–37. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-3-26-37>
 34. Зайчик В.Е., Краснощеков Г.П., Летов В.Н., Рябухин Ю.С. Количественная автордиография ^6Li в метастазах карциносаркомы Уокера-256 в легкие. *Мед. радиол.* 1971;2:47–51. [Zaichick V.E., Krasnoshchekov G.P., Letov V.N., Ryabukhin Yu.S. Kolichestvennaya avtoradiografiya ^6Li v metastazakh kartsinosarkomy Uokera-256 v legkie. *Med. Radiol.* 1971;2:47–51. (In Russ.)].
 35. Зайчик В.Е. Прибор для подсчета треков на поверхности твердых следовых детекторов. *Приборы и техника эксперимента.* 1972;(6):48–50. [Zaichick V.E. Pribor dlya podscheta trekov na poverkhnosti tverdykh sledovykh detektorov. *Pribory i tekhnika ehksperimenta.* 1972;(6):48–50. (In Russ.)].
 36. Zaichick V. Instrumental neutron activation analysis of minor and trace elements in food in the Russian

- region that suffered from the Chernobyl disaster. *Food and Nutrition Bulletin*. 2002;23(3 Suppl.):191–194.
37. Zaichick V., Zaichick S. Global contamination from uranium: insights into problem based on the uranium content in the human prostate gland. *J. Environ. Health Sci.* 2015;1(4):1–5.
 38. Грошева Е.И., Кузнецова Н.А., Зайчик В.Е., Росляков Н.П. Комплекс ядерно-физических и радиоиндикаторных методов анализа в контроле современного состояния экосистемы озера Байкал. В сб.: Применение ядерно-физических методов в анализе объектов окружающей среды региона оз. Байкал. Байкальск, 1991. С. 4–5. [Grosheva E.I., Kuznetsova N.A., Zaichick V.E., Roslyakov N.P. Kompleks yaderno-fizicheskikh i radioindikatornykh metodov analiza v kontrole sovremennogo sostoyaniya ehkosistemy ozera Baikal. V sbornike: Primenenie yaderno-fizicheskikh metodov v analize ob"ektov okruzhayushchei sredy regiona oz. Baikal. Baikal'sk, 1991. P. 4–5. (In Russ.)].
 39. Грошева Е.И., Зайчик В.Е., Росляков Н.П. Нейтронно-активационный анализ в контроле антропогенного воздействия на экосистему озера Байкал. В сб.: Активационный анализ в охране окружающей среды. Дубна: ОИЯИ, 1993. С. 241–260. [Grosheva E.I., Zaichick V.E., Roslyakov N.P. Neitronno-aktivatsionnyi analiz v kontrole antropogennogo vozdeistviya na ehkosistemu ozera Baikal. V sbornike: Aktivatsionnyi analiz v okhrane okruzhayushchei sredy. Dubna: OIYAI, 1993. P. 241–260. (In Russ.)].
 40. Грошева Е.И., Воронская Г.Н., Зайчик В.Е. Применение современных методов анализа при оценке состояния экосистемы озера Байкал. В сб.: Всероссийская конференция “Химический анализ веществ и материалов” (Москва, апр. 16–21, 2000). М.: ОНТИ ГЕОХИ РАН, 2000. С. 323–324. [Grosheva E.I., Voronskaya G.N., Zaichick V.E. Primenenie sovremennykh metodov analiza pri otsenke sostoyaniya ehkosistemy ozera Baikal. V sbornike: Vserossiiskaya konferentsiya “Khimicheskii analiz veshchestv i materialov” (Moscow, apr. 16–21, 2000). М.: ONTI GEOKHI RAN, 2000. P. 323–324. (In Russ.)].
 41. Zaichick D., Schevchenko E.P., Lyapunov S., Zaichick V. Minor and trace element contents in the soil of Moscow's park. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Trace Elements in Human: New Perspectives (9–11 October 2003, Athens, Greece). Greece: Athens, 2003. Part II. P. 1026–1035.
 42. Zaichick D., Dogadkin N., Zaichick V. INAA applications in the assessment of minor and trace element contents in the soil of Moscow's park. In: Isotopic and Nuclear Analytical Techniques for Health and Environment (10–13 June 2003, Vienna, Austria). Conference and Symposium Papers. Vienna: IAEA, 2003. Session 4 (Nuclear Analytical Techniques for Environmental Monitoring), IAEA-CN-103/056, 16–25.
 43. Zaichick D., Dogadkin N., Zaichick V. Assessment of chemical element contents in the soil of Moscow's park by neutron activation analysis using long-lived radionuclides. In: Macro and Trace Elements. 22 Workshop. Jena: Friedrich Schiller University, 2004. V. 1. P. 237–247.
 44. Grosheva E., Zaichick D., Zaichick V. INAA application in the assessment of chemical element contents in soils of the Khamar-Daban mountain range. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2007;271(3):565–572.
 45. Самохина В.В., Гриусевич П.В., Соколик А.И., Демидчик В.В. Электрофизиологический и радиоизотопный анализ потоков ионов, индуцируемых солевым и окислительным стрессом, в клетках корня высших растений. *Экспериментальная биология и биотехнология*. 2022;3:14–25. [Samokhina V.V., Hryvusevich P.V., Sokolik A.I., Demidchik V.V. Electrophysiological and radioisotope analysis of ion fluxes induced by salt and oxidative stress in higher plant root cells. *Experimental Biology and Biotechnology*. 2022;3:14–25. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33581/2957-5060-2022-3-14-25>
 46. Augustsson A., Qvarforth A, Engström E., Paulukat C., Rodushkin I. Trace and major elements in food supplements of different origin: Implications for daily intake levels and health risks. *Toxicol. Rep.* 2021;8:1067–1080. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.04.012>
 47. Torović L., Vojvodić V., Lukić D., Branislava Srdenović Conić B., Bijelović S. Safety Assessment of Herbal Food Supplements: Elemental Profiling and Associated Risk. *Foods*. 2023;12(14):2746. <https://doi.org/10.3390/foods12142746>
 48. Delves H.T. Assessment of trace element status. *Clin. Endocrinol. Metab.* 1985;14(3):725–60. [https://doi.org/10.1016/s0300-595x\(85\)80014-1](https://doi.org/10.1016/s0300-595x(85)80014-1)
 49. Zaichick S., Zaichick V., Karandashev V., Ermi-dou-Pollet S., Pollet S. Is scalp hair valid indicator for the assessment of lithium content in human body? *Trace Elements and Electrolytes*. 2010;27(3):135–139.
 50. Zaichick S., Zaichick V. The scalp hair as a monitor for trace elements in biomonitoring of atmospheric pollution. *Int. J. Environ. Health*. 2011;5(1/2):106–124.
 51. Mansouri B., Davari B., Mahmodi M. Health risk assessment of the concentration of trace elements in cosmetic products in Sanandaj, Iran. *J. Adv. Environ. Health Res.* 2018;6:21–26. <https://doi.org/10.22102/jaehr.2018.108911.1057>
 52. Eneh O.C. Health effects of selected trace elements in hairdressing cosmetics on hairdressers in Enugu, Nigeria. *Sci. Rep.* 2021;11(1):20352. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00022-1>
 53. Saah S.A., Boadi N.O., Sakyi P.O. et al. Risk of Exposure to Trace Elements through the Application of Facial Makeup Powders. *J. Chem.* 2022;2022. Art. ID 9229134. <https://doi.org/10.1155/2022/9229134>
 54. Sanajou S., Şahin G., Baydar T. Aluminium in cosmetics and personal care products. *J. Appl. Toxicol.* 2021; 41(11):1704–1718. <https://doi.org/10.1002/jat.4228>

55. Зайчик В.Е., Ходырева М.А. Экспериментальное изучение процесса инфильтрации ^{89}Sr в неповрежденную кожу крыс. *Гигиена и санитария*. 1968;11:38–41. [Zaichick V.E., Khodyreva M.A. Eksperimental'noe izuchenie protsessa infil'tratsii ^{89}Sr v nepovrezhdennuyu kozhu krysh. *Hygiene and Sanitation*. 1968;11:38–41. (In Russ.)].
56. Зайчик В.Е. Формирование глубинных доз в коже при загрязнении ее бета-гамма-излучателями. *Радиобиология*. 1968; 8(2):286–292. [Zaichick V.E. Formirovanie glubinnykh doz v kozhe pri zagryaznenii ee beta-gamma-izluchatelyami. *Radiobiologiya*. 1968;8(2):286–292. (In Russ.)].
57. Zaichick V. Data for the Reference Man: skeleton content of chemical elements. *Radiat. Environ. Biophys.* 2013;52(1):65–85. <https://doi.org/10.1007/s00411-012-0448-3>
58. Zaichick V., Wynchank S. Reference man for radiological protection: 71 chemical elements' content of the prostate gland (normal and cancerous). *Radiat. Environ. Biophys.* 2021;60:165–178. <https://doi.org/10.1007/s00411-020-00884-5>
59. Зайчик В.Е., Калашников В.М. Прижизненный нейтронно-активационный анализ содержания водорода в теле лабораторных животных. ВИНТИ, 1975 (28 мая), № 1480-75. С. 1–30. [Zaichick V.E., Kalashnikov V.M. Prizhiznennyi neitronno-aktivatsionnyi analiz sodержaniya vodoroda v tele laboratornykh zhivotnykh. VINITI, 1975 (28 may), № 480-75. P. 1–30. (In Russ.)].
60. Boffetta P., Nyberg F. Contribution of environmental factors to cancer risk. *Br. Med. Bull.* 2003;68:71–94. <https://doi.org/10.1093/bmp/ldg023>
61. Тюрюканов А.Н., Снакин В.В. Об изучении скорости биогенного круговорота химических элементов в биогеоценозах. В сб.: Биосфера и почвы. М.: Наука, 1976. С. 5–20. [Tyuryukanov A.N., Snakin V.V. Ob izuchenii skorosti biogennogo krugovorota khimicheskikh ehlementov v biogeotsenozakh. V sbornike: Biosfera i pochvy. M.: Nauka, 1976. P. 5–20. (In Russ.)].
62. Морук Б.В., Зайчик В.Е., Иванов В.М., Орлов О.И. Применение дифосфонатов для коррекции нарушений обмена кальция и минерального состава костной ткани при 60-суточной гипокинезии у крыс. *Патол. физиология и эксперим. терапия*. 1987;31(2):75–77. [Morukov B.V., Zaichick V.E., Ivanov V.M., Orlov O.I. Primenenie difosfonatov dlya korrektsii narushenii obmena kal'tsiya i mineral'nogo sostava kostnoi tkani pri 60-sutochnoi gipokinezii u krysh. *Pathological Physiology and Experimental Therapy*. 1987; 31(2):75–77. (In Russ.)].
63. Таиров У.Т., Зайчик В.Е., Дубровин А.П. Оценка репаративной регенерации дефектов верхней челюсти по данным нейтронно-активационного анализа (экспериментальное исследование). *Стоматология*. 1990;69(1):25–27. [Tairov U.T., Zaichick V.E., Dubrovin A.P. Otsenka reparativnoi regeneratsii defektov verkhnei chelyusti po dannym neitronno-aktivatsionnogo analiza (ehksperimental'noe issledovanie). *Stomatologiya*. 1990;69(1):25–27. (In Russ.)].

Contribution of the A. Tsyb Medical Radiological Research Center to the Formation and Development of Radiation-Biological Elementology as a Section of Radiobiology. History, Status and Prospects

V. E. Zaichick, L. P. Zhavoronkov*

A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation, Obninsk, Russia

**E-mail: leonid.petrovich@inbox.ru*

The article provides an overview of the history of development and substantiates the prospects for using radiation nuclear-physical methods to determine the content of chemical elements in environmental and radiobiological studies, as well as in diagnostic and therapeutic approaches to radiation medicine. Based on the results of long-term experimental and clinical studies conducted at the Institute of Medical Radiology of the Academy of Medical Sciences of the USSR (now the A. Tsyb Medical Radiological Research Center), the mechanisms of entry and negative effects of emissions into the environment of various (including radioactive) chemical elements during the operation of nuclear industry enterprises and during radiation accidents are analyzed, and ways to solve the problems are outlined.

Keywords: chemical elements, biologically important concentration ranges, stable and radioactive isotopes, radiation accidents, isotope emissions into the environment, public health protection, nuclear-physical methods of elemental analysis

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жаворонков Леонид Петрович — д-р мед. наук, профессор Научно-образовательного отдела МРНЦ им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России.

Зайчик Владимир Ефимович — д-р биол. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отделения радионуклидной диагностики МРНЦ

им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России

ВКЛАД АВТОРОВ

Л.П. Жаворонков — участие в написании текста статьи, редактирование.

В.Е. Зайчик — идея статьи, написание основы текста, подбор литературы.