

экологии. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 1997. – 384 с.

- б. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения. / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Ю.И. Сухих и др. ; под ред. А.Г.

Бакирова. – Томск : Курсив, 2006. – 216 с.

7. Green R.E. Long-term decline in thickness of eggshells of thrushes // *Turdus spp., in Britain. Proceeding of the Royal Society of London. Series B.* – 1998. – [Vol.] 265. – P. 679–684.

## ТЕНДЕНЦИИ НАКОПЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АКТИНИДОВ В ЖИВОМ ВЕЩЕСТВЕ

Н.В. Барановская

Томский политехнический университет, Томск, Россия, nata@tpu.ru

## TRENDS OF ACTINID CONCENTRATIONS IN LIVING SYSTEMS

N.V. Baranovskaya

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, nata@tpu.ru

В статье представлены данные о накоплении некоторых актинидов в живых организмах. На примере результатов, полученных автором, а так же данных литературных источников, обсуждаются тенденции накопления радиоактивных элементов в биосфере. Показано влияние факторов на их накопление. Приведены результаты анализа отношения тория к урану в живых организмах территории Томской области и других регионов.

The article introduces the data of actinide (Th, U) accumulation in a living substance. By the example of the authors investigation results as well as the data introduced by other researches, the trends in element accumulation in biosphere have been considered. The influence of element chemical origin as well as a number of other factors is shown. The results of analysis for thorium – uranium ratio in different biologic environment are presented by the example of Tomsk and other regions.

Актиниды – это 14 элементов от тория до лоуренсия, следующих в Периодической системе за актинием [13]. Основная масса этих элементов получена искусственным путем, в природе встречаются только три из них – торий, уран и протактиний. Все элементы данной группы радиоактивны и периоды их полураспада таковы, что лишь  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{244}\text{Pu}$  могли сохраниться на Земле за время прошедшее после образования Солнечной системы [13]. Однако лишь торий и уран встречаются в природе в количествах, представляющих практический интерес. Причем. Эти два элемента не редки: содержание тория составляет  $8,1 \cdot 10^{-4}\%$ , урана –  $2,3 \cdot 10^{-4}\%$ .

Промышленными источниками тория служат пески, которые в отдельных случаях могут содержать до 20%  $\text{ThO}_2$ . Для урана картина несколько иная, типичные руды содержат лишь около 0,1% этого элемента. При этом, если не считать применения небольших количеств урана для окрашивания стекла, керамики, этот элемент используется только в качестве ядерного топлива.

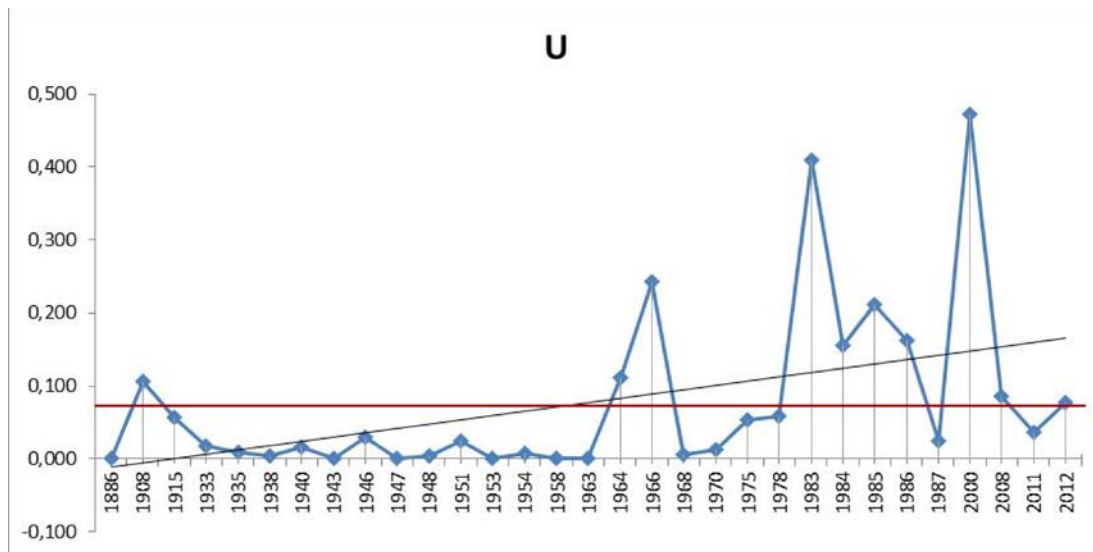
Таким образом, практически все элементы группы актинидов появляются в природных средах в результате деятельности человека. Так, например, к настоящему времени во всем мире произведено около 1200 т плутония, из которых три четверти получены в реакторах гражданского назначения.

Создание человечеством ядерного оружия и его испытание, а так же развитие ядерной энергетики, начиная с 1945 г., изменило геохимию всех природных сред. Во всех геосферных оболочках планеты появились совершенно новые, ранее неизвестные в природе радиоактивные элементы и их изотопы, включая представителей группы актинидов, а так же ряд изотопов других

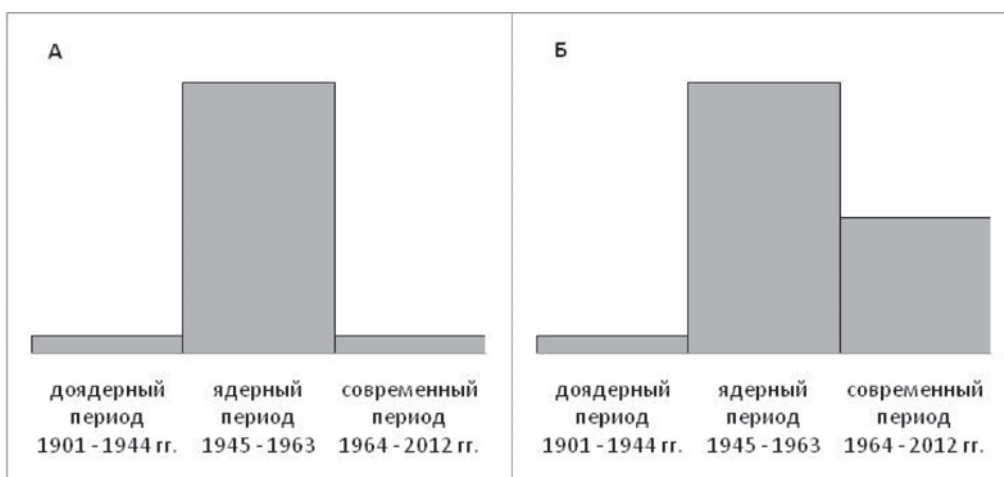
химических элементов (технеций, прометий, плутоний, америций, Sr-90, Cs-137 и другие) [26]. До этого времени они могли бы быть обнаружены на планете только в некоторых локальных точках, где около 2 млрд лет. назад функционировали природные ядерные реакторы [34]. Появление этих специфических элементов – индикаторов процесса ядерного техногенеза фиксируется учеными разных стран в виде их концентрирования в депонирующих средах, таких как льды, торф, донные отложения, кольца деревьев и другие [12, 18, 20, 27, 35].

Наши последние исследования показывают, что происходит интенсивное концентрирование радиоактивных элементов в растениях. Так, по данным аналитических исследований материала гербарных и современных сборов растений с 1812 г. [7, 31], на территории юга Сибири происходит накопление урана от ранних этапов к современному (рис. 1).

О глобальном изменении биосферы в результате техногенеза, можно судить по изменению уровня накопления абсолютно чуждого биосфере элемента – плутония. Так, до 1945 г. этого элемента в живых организмах не обнаруживали вообще. В 1953 г. он обнаруживался в количествах 0,0007 Бк/г, в 1954 г. количество возрастает до 0,013 Бк/г, а к 1958 г. активность этого элемента в легочной ткани человека достигает 0,25 Бк/г [22]. Нами установлено [30] интенсивное поглощение данного элемента растительностью в районах функционирования предприятий ЯТЦ. Кроме того, наблюдается динамика увеличения концентрации плутония со временем от периода "доядерного" – до 1945 г. к периоду интенсивных испытаний ядерного оружия (рис. 2) со специфическим снижением до минимальных значений в районах с отсут-



**Рис. 1.** Динамика содержания урана в чернике обыкновенной (*Vaccinium myrtillus*) на территории юга Сибири



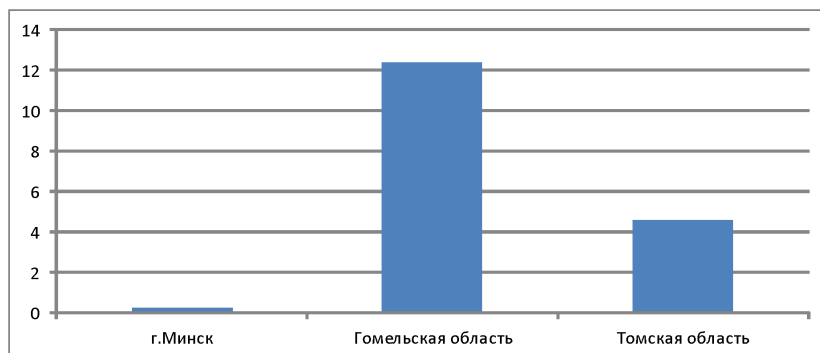
**Рис. 2.** Обобщенная сравнительная диаграмма поступления плутония в растительность в районах с отсутствием ядерных производств (Алтайский регион) (а) и в районе с предприятием ядерно-топливного цикла (Томская область) (б) [30]

ствием техногенного источника и незначительным уменьшением в зоне влияния предприятия (в данном конкретном случае – Сибирского химического комбината).

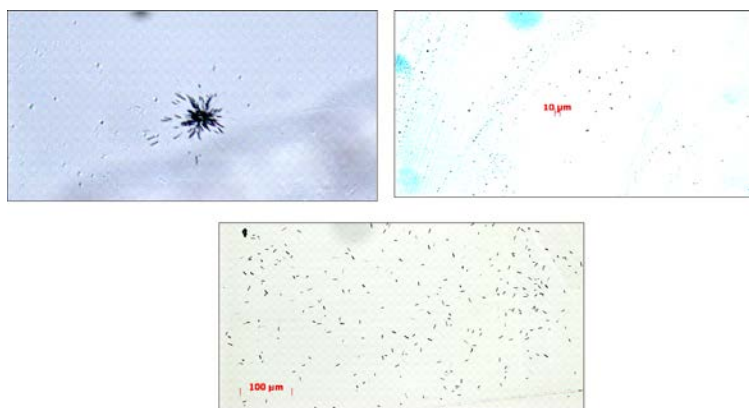
Факты накопления плутония в живых организмах подтверждает тот факт, что радиозоологическая обстановка на территориях, прилегающих к предприятиям ядерной энергетики и полигонам испытания ядерного оружия, определяется и будет определяться в будущем уровнем накопления альфа-излучающих долгоживущих радионуклидов, прежде всего Pu и Am [25, 26]. Реальное положение дел с загрязнением природной среды этими компонентами еще слабо изучено [3]. По нашим данным на таких территориях происходит концентрирование плутония в волосах детей (рис. 3), а так же фик-

сируется присутствие  $\alpha$ -излучающих радионуклидов в крови жителей (рис. 4).

Микровклучение (наноминерал) делящегося радионуклида ( $^{235}\text{U}$ , Pu, Am и др.) наблюдается в крови жителя г. Северска [5]. На общем фоне специфичных равномерно распределенных треков (следов в слюде от осколков деления делящихся элементов) ярко выражена многолучевая звезда. Источник ее формирования – наноминерал ("горячая" частица) с высокой концентрацией радионуклида, делящегося под воздействием тепловых нейтронов. Ранее наличие "горячих" частиц в зоне влияния СХК, фиксирующихся в виде "звезд" при радиографических исследованиях, было отмечено И.Г. Берзиной и др. [9] на чешуе рыбы из протоки Черныльщикова, а так же в почвах [2]. В таких почвах под электронным



**Рис. 3.** Уровни накопления  $^{239}\text{Pu}$  (Бк/кг) в волосах детей г. Минска и Гомельской области (по [17]) по сравнению с проживающими в Томской области [19]



**Рис. 4.** Распределение треков на слюдяном детекторе от делирующих элементов в крови жителей г. Северска (верхний слева), г. Стрежевого (верхний справа) в сравнении с распределением треков от урана-235 в контрольном образце (нижний). Увеличение указано линейкой на рисунках

микроскопом Е.Г. Языковым и другими было выявлено присутствие оксида урана ( $\text{UO}_2$ ) [3].

Несомненным является тот факт, что в условиях глобальных процессов техногенной трансформации компонентов биосферы организм человека реагирует изменением своего состава, что очень ярко проявляется на локальных территориях. Выполненные нами в последние годы исследования по химическому составу биосубстратов, органов и тканей человека, а также зольного остатка человека [4–6, 19, 24] позволяют утверждать, что химический состав человека отражает ландшафтно-геохимические и металлогенические особенности районов его проживания, а также факторы образа жизни, например курение и особенности техногенеза природной среды на тех или иных урбанизированных территориях.

При этом не только уровни накопления радиоактивных элементов в природных образованиях представляют интерес для исследователей. Прежде всего, в прикладном и теоретическом аспекте важным показателем являются отношения валовых содержаний урана к торию ( $\text{Th}/\text{U}$ ). Этот показатель, как свидетельствуют исследования ряда авторов [23, 26, 28, 33] является чрезвычайно важным индикатором. Это отношение, начиная от Солнечной системы в целом ( $\text{Th}/\text{U}=3,72$ ), до ее планет и Луны ( $\text{Th}/\text{U}=3,55$ ), метеоритов ( $\text{Th}/\text{U}=2,5–8,6$ ), магматических образований различного типа находится в чрезвычайно узком интервале величин (2,5–5 при преобладании 3,5–4,5) [2, 26], что заставляет предполагать существование общей закономерности в распространении тория и урана, определяющейся законами мироз-

дания [21]. Эта система отношений выдерживается во многих горных породах за исключением химических и биогенных образований, продуктов метаморфизма и метасоматизма, т.е. достаточно динамичных природных систем с участием воды [26]. Отмечено, что в углистых породах и углях отсутствует прямая взаимосвязь радиоактивных элементов с органическим веществом, тогда как она выявляется с зольностью, с количеством редкоземельных и редких элементов [1].

Хемогенные и биогенные осадки, как правило, в значительной степени обогащены ураном, нежели торием. Поэтому, эти образования характеризуются низкими показателями торий-уранового отношения. В целом, это отражает основные отличительные черты геохимии урана и тория, в природе, обусловленные состоянием валентности тория (только 4-валентное состояние) и урана (4- и 6-валентное состояние), с образованием специфических соединений. Например, нахождение 6-валентного урана в форме уранил-иона  $[\text{UO}_2]^{+2}$ . Все это, в конечном итоге обуславливает различную их растворимость. Так, растворимость  $\text{Th}^{+4}$  и  $\text{U}^{+6}$  в воде различается на три порядка [14, 26].

Именно этот фактор и некоторые другие обуславливают разделение геохимической судьбы U и Th в гидротермальных, экзогенных, биогенных и техногенных процессах. Содержание урана резко преобладает над торием в морской и пресной воде, плазме крови и в живом веществе. Как отмечал В.И. Вернадский [11], живое вещество выступает концентратором урана. И только в зольной его составляющей, например растениях,

Th/U отношение бывает выше 1. Следует отметить, что концентрации данных элементов в биоте определяется не только естественными факторами, но и техногенными [4, 6, 8]. При этом, величина Th/U отношения становится весьма информативным показателем степени техногенной трансформации природной среды. Наши исследования, обобщающие материал по изучению специфики концентрирования тория и урана в волосах и крови жителей ряда регионов (Томской, Иркутской, Челябинской областей, городов Казахстана, Беларуси, Республик Тыва и Алтай), а так же листьев древесных растений ряда регионов, скорлупы яиц птиц (см. статью в данном сборнике), изучение зольного остатка органов и тканей животных и человека подтверждают эти положения. Так, содержание элементов во мхах и лишайниках [8, 18], а так же растительности (как по нашим данным, так и литературным источникам [15, 16, 29]) характеризуются ториевой спецификой, в то время как животные организмы склонны к большему концентрированию урана (рис. 5).

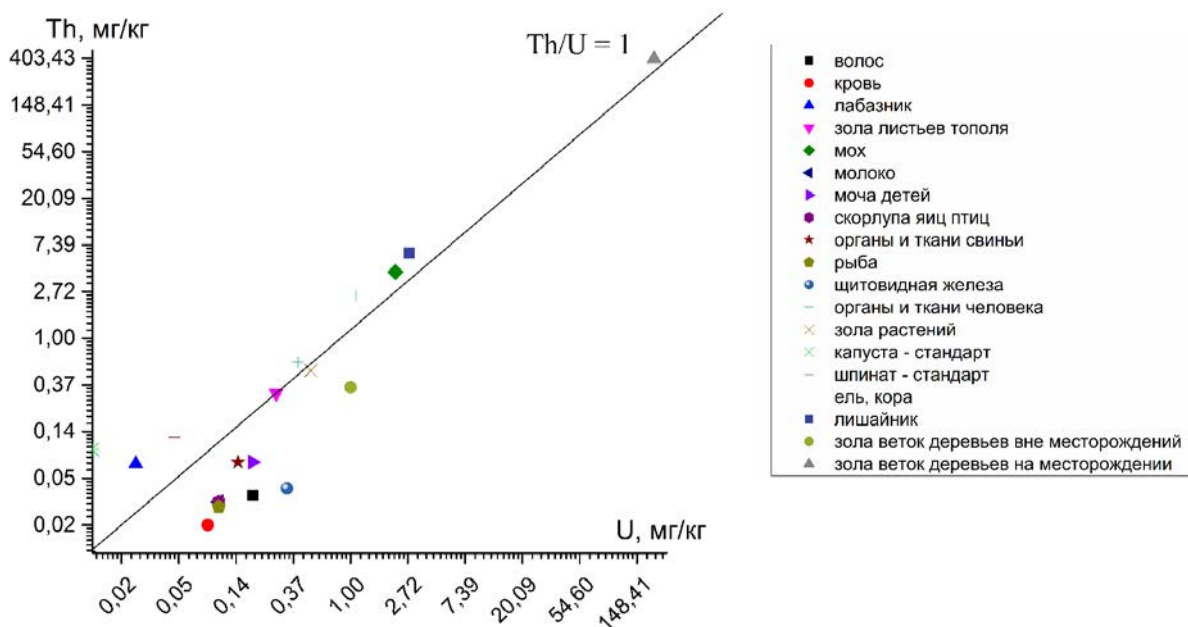
Следует отметить, что диапазон отношения Th/U колеблется незначительно для живых организмов, однако специфика в том, что показатели данного соотношения как правило составляют диапазон не от 2,5 до 5 как это отмечено для других природных сред, а в диапазоне от 0,1 до 1,5. Более высокими значениями отношения равным в среднем 2,4 могут характеризоваться растения, мхи и лишайники.

Для такой ткани, как волосы человека, характерен очень узкий диапазон колебаний – от 0,3 до 0,4 при значимом уменьшении значений в районах с наличием при-

родно – техногенных факторов. Так, для жителей г. Северска данное отношение уменьшается до 0,075, а в районе угольного месторождения Республики Хакасия – до 0,03. У жителей Иркутской области оно уменьшается до 0,064, а у проживающих в Р. Казахстан – до 0,056. В то же время, для отдельных локальных территорий характерна иногда весьма специфичная реакция на "сверхконцентрирование" тория в местах распространения циркон – ильменитовых песков. Так, в населенном пункте Морьяковка Томского района в волосах жителей концентрируется торий в количествах, приводящих к изменению отношения торий-уран до 48.

Это свойство живого – реагировать на изменение природной среды весьма чувствительным образом – давно отмечено исследователями, изучающими биогеохимию. Следует иметь в виду, что средние показатели отношений элементов являются своеобразными реперами, свидетельствующими о реакции организмов в целом. Так, среднее значение отношения тория к урану равное 0,3 характерно для крови человека, молока, мочи, органов и тканей человека и животных (с дифференцировкой, зависящей от их специфичных концентрационных характеристик), а также скорлупы яиц птиц и организма рыб и амфибий.

Для растений колебания данного показателя весьма широкое – от 0,05 в золе листьев тополя (г. Асино) до 8,4 в капусте (стандарт по [10]), что по – видимому в большей степени связано с их зольностью. Максимальные значения тория и урана характерны для мхов и лишайников как по нашим данным, так и по литературным источникам [36], что является известным фактом [16],



**Рис. 5.** Схема распределения живых организмов в зависимости от содержания урана и тория. В сночках: ель, кора (по [15]), шпинат (по), зола растений (по [29]), зола веток деревьев вне и на месторождении (показано максимальное зафиксированное значение для территорий урановой минерализации и ториеносных песков) (по [16]), мох [18], лишайник [8], остальное – авторские данные (см. [5])

а так же для деревьев, произрастающих в зоне ураноносной минерализации (максимальное накопление урана – до 140 мг/кг в золе при диапазоне от 0,05 до 140) и ториеносных песков (максимальное накопление – до 400 мг/кг в золе) [16]. Удивительно низкая концентрация тория и урана по сравнению с другими растениями зафиксирована нами в лекарственном растении лабазнике вязолистном (*Fillipendula ulmaria*). Кроме того, зольный остаток организма человека характеризуется накоплением элементов, сопоставимое с таковым для растений, что по – видимому так же связано с характером озонирования материала. Основные механизмы, благодаря которым происходит такое накопление и распределение элементов обсуждались нами ранее [4].

Следует отметить также, что живые организмы характеризуются весьма специфическими отношениями изотопов плутония, отличными от таковых для других сред [30].

Таким образом, следует сказать о значимо специфичном поведении актинидов в живых организмах и в биосфере в целом. Очевидно, что происходит концентрирование некоторых актинидов в живых организмах с течением времени. Вопрос об индикаторных показателях соотношений радиоактивных элементов и их изотопов в живом веществе планеты требует дальнейших исследований, однако очевидно, что отдельные организмы, ткани, среды, обладают устойчивой реакцией на концентрирование радионуклидов и характеризуются постоянством их отношений в определенных обстановках, что можно использовать в качестве индикатора для мониторинга и районирования территорий.

#### Литература

1. Редкометальный потенциал углей Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов и др. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2003. – 347 с.
2. Архангельский В.В., Рихванов Л.П. Уран, торий и редкоземельные элементы как индикаторы антропогенного воздействия на почвы юга Томской области // Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства. Гидрогеология и инженерная геология. Геоэкология и мониторинг геологической среды : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Томск : Изд-во ТПУ, 2001. – С. 124–127.
3. Атурова В.П., Коваленко В.В. Плутоний в почвах Сибири // Материалы Международной конференции "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека" – Томск, 2004. – С. 54–62.
4. Барановская Н.В. Об актинидовых в живом веществе // Материалы 3 Международной конференции "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека", г. Томск, 23–27 июня 2009 г. – Томск : STT, 2009. – С. 73–82.
5. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем : автореф. дис. ... докт. биол. наук. – Томск, 2011. – 46 с.
6. Очерки геохимии человека / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов и др. ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск : Дельтаплан, 2015. – 377 с.
7. Барановская Н.В., Черненькая Е.В. Особенности накопления химических элементов в чернике обыкновенной (*Vaccinium myrtillus*) на территории Западной Сибири // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–2. – С. 299–306.
8. Большунова Т.А., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы // Экология и промышленность России. – 2014. – № 11. – С. 26–31.
9. Радиоактивное загрязнение биологических объектов и природных сред в районе пос. Муслюмово (Челябинская область) / И.Г. Берзина, В.А. Четкин, М.В. Хотулева и др. // Радиоактивная биология. Радиоэкология. – 1993. – № 2. – С. 33.
10. Боуэн Г., Гиббонс Д. Радиоактивационный анализ. – М. : Атомиздат, 1968. – 360 с.
11. Вернадский В.И. Избранные сочинения : в 5 т. – М. : Изд-во АН СССР, 1954. – Т. 1. Очерки геохимии. – 624 с.
12. Гавшин В.М.  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в озерных отложениях степного Алтая как показатели динамики антропогенных изменений геохимического фона на протяжении XX века // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40, № 9. – С. 1331–1341.
13. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов : в 2 т. / пер. с англ. – М. : Бинум. Лаборатория знаний, 2008. – Т. 2. – 670 с.
14. Евсеева Л.С., Перельман А.И. Геохимия урана в зоне гипергенеза. – М. : Госатомиздат, 1962. – 239 с.
15. Кист А.А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. – Ташкент : ФАН, 1987. – 236 с.
16. Ковалевский А.Л., Ковалевская О.М. Биогеохимия урановых месторождений и методические основы их поисков. – Новосибирск : Гео, 2010. – 362 с.
17. Содержания плутония и некоторых микроэлементов в волосах жителей Беларуси, проживающих на территории, пострадавшей при аварии на Чернобыльской АЭС / А.Ф. Маленченко, Н.Н. Бажанова, Н.В. Канаши, И.В. Жук, Е.М. Булыга, С.Ф. Ломоносова // Гигиена и санитария. – 1997. – № 5 – С. 19–21.
18. Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2009.
19. Наркович Д.В. Элементный состав волос детей как индикатор природно-техногенной обстановки территории (на примере Томской области) : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2013. – 24 с.
20. Небел Б. Наука об окружающей среде: как устроен мир / пер. с англ. – М. : Мир, 1993. – Т. 1. – 424 с.
21. Озима М. Глобальная эволюция Земли – М. : Мир, 1990. – 165 с.
22. Плутоний в России. Экология, экономика, политика. – М. : СЭС, 1994.
23. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований. – Новосибирск : Гео, 2003. – 536 с.
24. Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Игнатова Т.Н. К геохимии живого вещества // Актуальные проблемы геохимической экологии : сборник докладов VI Международной научно-практической конференции. – Семипалатинск, 2006. – С. 19–40.

25. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учебное пособие. – Томск : STT, 2009. – 430 с.
26. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в геосферных оболочках // *Материалы II Межд. конф. "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека"*. – Томск : Тандем-Арт, 2004. – С. 498–505.
27. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиоэкологической ситуации. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015.
28. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л. : Недра, 1974. – 231 с.
29. Ткалич С.М. Фитогеохимический метод поисков месторождений полезных ископаемых. – Л. : Недра, 1970. – 175 с.
30. Черненькая Е.В., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Плутоний в некоторых типах травянистой и кустарничковой растительности юга Западной Сибири // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2, ч. 5. – С. 984–991.
31. Черненькая Е.В. Динамика изменения элементного состава природной среды по данным изучения материала гербарных и современных сборов растений юга Сибири : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2016. – 24 с.
32. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. – 264 с.
33. Allegre C.V., Dupre B., Lewin E. Torium/uranium ratio of the Earth // *Chem. Geol.* – 1986. – [Vol.] 56, No. 3–4. – P. 219–227.
34. Radioisotop contaminations from releases from the Tomsk-Seversk nuclear facility (Siberia, Russia) / F. Gautthier-Lafaye, L. Pourcelot, J. Eikenberg et. al. // *J. Environ. Radioactiv.* – 2007. – Vol. 98. – P. 301–314.
35. Plutonium from global fallout recorded in an ice core from the Belukha Glacier, Siberian Altai / S. Olivier, S. Bajo, L.K. Fifield et.al. // *Environ. Sci. Technol.* – 2004. – [Vol.] 38(24). – P. 6507–6512.
36. Reimann C., Caritat de P. *Chemical Elements in the Environment. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist*. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag. – 398 p.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

А.Е. Бахур

ФГБУ "ВИМС", Москва, Россия, bae@u238.ru

## SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF RADIOECOLOGICAL STUDIES OF GEOLOGICAL ENVIRONMENTS

A.E. Bakhur

FSBI "VIMS", Moscow, Russia

Разработаны научно-методические основы радиоэкологических исследований объектов геологической среды, система радиационного контроля природных вод. Создан комплекс аттестованных радиоизотопных и радиографических методик анализа природных и техногенных радионуклидов. Комплекс апробирован в зонах радиационных загрязнений и используется в практике работ сотен лабораторий на территории РФ и СНГ.

The article dwells on recent scientific and methodological developments in radioecological studies of geological objects as well as the system of radiation monitoring of natural water. The complex of certified radioisotopic and radiography methods of analysis of natural and technogenic radionuclides have been tested at the radioactive-polluted territories and are currently applied in hundreds of laboratories in Russia and the CIS.

Актуальность проблемы определяется постоянно возрастающей радиационной нагрузкой на природную среду, необходимостью обеспечения безопасных условий жизнедеятельности.

Спектры загрязняющих естественных (ЕРН) и техногенных (ТРН) радионуклидов и источники поступления множатся, проявляются новые формы их нахождения и новые закономерности миграционных процессов, увеличиваются объемы разведки и добычи уранового, редкометалльного и углеводородного сырья, реализуется программа развития атомной энергетики в России.

Важнейшим звеном в решении этой проблемы является создание научно-методических основ радиоэко-

логических исследований геологической среды, радиационного контроля и мониторинга природных объектов в зонах техногенного загрязнения, сертификации минерального сырья.

Вашему вниманию предлагаются некоторые основные результаты в этой сфере, полученные нами на протяжении 35 последних лет на основе исследования десятков тысяч проб почв, горных пород, руд, донных отложений, "горячих" частиц, природных вод, пластовых вод нефтяных месторождений, технологических сбросов, фито- и биопроб из зон радиоактивного загрязнения, на урановых объектах разных регионов.

Известные физико-химические и радиометрические