

РАДИОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

Л.П. Рихванов, Ю.Л. Замятина, Т.А. Архангельская

Томский политехнический университет
E-mail: leorikh@b10.tpu.edu.ru

Рассматриваются возможности одного из радиографических методов – метода осколочной радиографии для оценки радиологического состояния территорий, которые характеризуются различными источниками техногенной и естественной радиационной нагрузки.

Мониторинговые исследования радиационной обстановки играют важную роль в контроле экологического состояния окружающей среды. Для её корректной оценки необходимо получение большого количества данных по содержанию радиоактивных элементов, формам их нахождения и ряда других параметров в различных объектах природной среды.

Для определения уровня накопления радионуклидов в объектах окружающей среды, характеризующихся как высокими, так и достаточно низкими концентрациями, необходимо применять высокоточные методы. Достаточно полную информацию о характере распределения радиоактивных элементов в исследуемых объектах дают методы радиографии. Среди известных радиографических методов особое место занимает метод осколочной радиографии (*f*-радиографии). Осколочная радиография является уникальным методом анализа делящихся радионуклидов в самых различных объектах. Метод позволяет с высокой точностью определять количественное содержание делящихся радионуклидов, пространственное их распределение, а также формы нахождения в исследуемом объекте [1]. Данный метод является инструментальным и позволяет выполнять анализ без химической подготовки и разрушения пробы.

В основу метода *f*-радиографии положена реакция деления ядер атомов некоторых элементов (урана, плутония и др.) под действием тепловых нейтронов и регистрация осколков деления на детекторе. При этом на детекторе, в качестве которого используется, например лавсановая пленка, фиксируются следы от осколков деления (треки), которые можно наблюдать в электронный микроскоп, а после соответствующей обработки и в оптический микроскоп. Количество треков пропорционально содержанию радионуклида в данной точке исследуемого образца [1].

Радиографические исследования в Томском политехническом университете (ТПУ) начали проводиться с 1972 г. на кафедре полезных ископаемых и геохимии редких элементов с использованием исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т НИИ Ядерной физики. На первых этапах метод *f*-радиографии использовался для решения геологических задач (изучение содержания и характера распределения урана и тория в минералах, рудах и горных

породах, выявление особенностей рассеивания и концентрирования урана в процессе развития рудно-магматических систем и др.) [2 и др.]. В 1991 г. в Томске, коллективом кафедры полезных ископаемых и геохимии редких элементов, проведено III Всесоюзное радиогеохимическое совещание «Радиографические методы исследования в радиогеохимии и смежных областях» [3]. В настоящее время метод *f*-радиографии находит применение и в решении экологических задач.

Использование метода *f*-радиографии для исследования таких природных объектов, как растительность, почва, торф и др. позволяет вести мониторинговые исследования радиологической обстановки на любой территории. При этом индикаторным показателем радиоактивного загрязнения окружающей среды будут являться делящиеся радионуклиды. Под ними подразумевается совокупность элементов, делящихся при воздействии тепловых нейтронов (это, прежде всего, ^{235}U и трансурановые радионуклиды – ^{239}Pu , ^{241}Am и др.). Эта группа радионуклидов привлекает внимание по ряду причин. Во-первых, уран и трансурановые элементы относятся к высокотоксичным радионуклидам, которые имеют очень длительный период полураспада, и, следовательно, их нахождение в окружающей среде представляет длительно действующую радиологическую опасность. Во-вторых, трансурановые радионуклиды относятся к числу наименее изученных искусственных радиоактивных веществ, которые поступают в окружающую среду, т.к. для их идентификации и количественного определения необходимы специфические и дорогостоящие методы. Между тем, эти радионуклиды присутствуют в составе практически всех выбросов и сбросов, которые произошли в результате активной деятельности человека по использованию атомной энергии.

Использование метода *f*-радиографии для изучения стратифицированных природных образований (годовых колец деревьев, донных отложений и др.) оказывается особенно перспективным для решения задач ретроспективного радиологического мониторинга [4]. Стратифицированные природные образования, образуясь последовательно во времени, консервируют в себе элементный состав текущего окружения и, поэтому, представляют огромный интерес в качестве объектов для ретроспективного

экологического мониторинга. Таким образом, применяя метод f -радиографии для исследования, например, элементного состава годичных колец деревьев, можно изучить уровень и характер накопления делящихся радионуклидов в различные промежутки времени, и тем самым восстановить динамику радиоэкологической ситуации на любой территории произрастания деревьев за длительный период.

При использовании метода f -радиографии для изучения различных природных объектов требуется применение специальных оригинальных методик. На кафедре геоэкологии и геохимии ТПУ разработаны уникальные методики пробоподготовки древесины, почвы, торфа и других природных сред для проведения радиографических исследований. Например, подготовка образцов древесины для последующего радиографического анализа включает выполнение следующих процедур:

- из спилов деревьев, по двум радиальным направлениям, выпиливаются две пластины, имеющие ровные приполированные поверхности;
- определяется календарное время формирования каждого годичного кольца;
- на поверхность полученных образцов, в двух местах наносится клеевой эталон с известным содержанием урана и его изотопной характеристикой;
- после высыхания клеевого эталона на каждый образец помещается детектор, например, лавсановая пленка, которая находится далее в плотном контакте с поверхностью образца;
- препараты покрываются еще трехкратным слоем лавсана с целью экранирования каждого препарата от внешнего загрязнения;
- группа подготовленных препаратов помещается в специальный контейнер из фольги.

В обобщенном виде схема проведения работ по радиографии годичных колец представлена на рис. 1.

В качестве уранового эталона, способ подготовки которого, предложен сотрудниками кафедры, используется силикатный клей, в который добавлено известное количество водного раствора нитрат уранила. Валовое содержание урана в сухом клее определялось лазерно-люминесцентным ме-

тодом. В используемом клеевом эталоне оно составляет 12,16 мг/кг, а отношение изотопов ^{235}U к ^{238}U по данным масс-спектрометрического анализа равняется 0,00432. Учитывая нарушенное соотношение изотопов, содержание урана в эталоне оценено как 7,2 мг/кг [5].

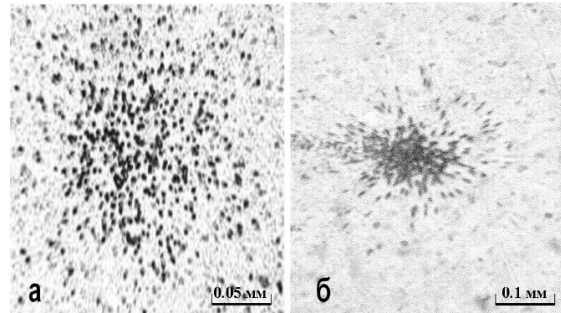


Рис. 2. Распределение треков на лавсановом детекторе, скопление: а) с высокой плотностью, б) в виде «звезды»

Подготовленные образцы облучаются потоком тепловых нейтронов на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т НИИ Ядерной физики ТПУ. После облучения и спада наведенной активности с образцов снимается детектор, и выполняются операции по химическому травлению детектора (лавсановой пленки) по стандартной методике. После процедуры травления, треки от осколков деления, зафиксированные на детекторе, доступны для наблюдения в оптическом микроскопе.

Для получения статистически достоверных результатов треки подсчитываются не менее чем, по 30 случайно выбранным элементарным площадкам в зоне каждого годичного кольца в каждом образце. После статистической обработки результатов по каждому кольцу с определением ошибки измерения, проводится построение кривых распределения делящихся элементов по временным периодам, фиксируются формы нахождения делящихся радионуклидов в изучаемом образце (молекулярно-рассеянные, микровключения), рис. 2.

Изучение форм нахождения делящихся радионуклидов позволяет выявить наличие «горячих частиц» — высокоактивных микровключений, которые представляют серьезную радиологическую опасность.

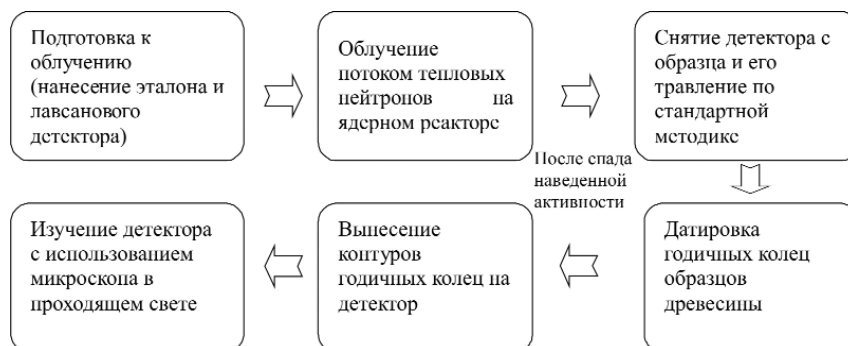


Рис. 1. Схема проведения работ при радиографических исследованиях образцов древесины



Рис. 3. Плотность треков от осколков деления в годичных кольцах лиственницы, р. П. Тунгуска, болото «Бублик»

С применением запатентованной нами технологии оценки радиоэкологического загрязнения окружающей среды на основе радиографического анализа годичных колец древесных растений [6], были проведены исследования по изучению многолетней динамики поступления в окружающую среду делящихся радионуклидов на территориях, которые характеризуются различными источниками техногенной и естественной радиационной нагрузки в Сибирском регионе, Алтайском крае, Центральной Европе и др. [7–9].

Объектом исследования являлись хвойные деревья (сосна и лиственница). Спилов древесины были отобраны в зонах влияния радиационно-опасных объектов (Томская область, Красноярский край, Иркутская область); на территориях, где выпали радиоактивные осадки после Чернобыльской аварии (Украина, Центральная Европа); на участках проведения подземных ядерных взрывов (Красноярский край, Иркутская область); на урановых месторождениях (Красноярский край и Чехия); в условно фоновых районах и др.

Рассмотрим результаты изучения годичных колец дерева, отобранного в районе, который принят как условно фоновый для Сибири (район падения Тунгусского метеорита). Плотность и характер распределения треков от осколков деления радионуклидов по годичным кольцам дерева из района падения Тунгусского метеорита (река Подкаменная Тунгуска, болото «Бублик») показаны на рис. 3. Согласно полученным результатам наблюдается устойчивая тенденция увеличения уровня накопления делящихся радионуклидов с конца XIX в., достигающая максимума в 80-х гг. XX в. Для определения фонового уровня делящихся радионуклидов в «доядерный» период (до 1945 г.) было выделено несколько временных интервалов, в пределах которых были подсчитаны средние содержания урана (до 1945 г. делящиеся радионуклиды в природе были представлены только ^{235}U).

Установлено, что в период с 1840 по 1899 гг. среднее содержание делящихся радионуклидов, в дан-

ном случае урана ^{235}U , в древесине составляло 0,06 мг/кг. В период с 1900 по 1945 гг. содержание увеличилось до 0,09 мг/кг, с 1946 по 1960 гг. — до 0,1 мг/кг, с 1961 по 1980 гг. — до 0,2 мг/кг. Таким образом, за фоновое — «доядерное» содержание урана ^{235}U в районе падения Тунгусского метеорита можно принять уровень, равный 0,06...0,09 мг/кг, что соответствует плотности треков 45 – 60 треков/мм².

При изучении образцов древесины, отобранных на территории Красноярского края, в районе проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) «Метеорит-3» (проведен в 1977 г.) и «Кимберлит-3» (проведен в 1979 г.) был получен длительный ряд наблюдений по накоплению делящихся радионуклидов в годичных кольцах с 1936 по 2003 гг., который охватывает «доядерный» период (до 1945 г.), период испытания ядерного оружия и современную историю поступления в природную среду делящихся радионуклидов. На рис. 4 представлены результаты изучения одного из деревьев, которое произрастало на участке расположения скважин ПЯВ.

При анализе характера распределения треков от осколков деления по годичным кольцам, отмечается повышенная плотность треков в периоды испытания ядерного оружия в атмосфере: 1949–1950, 1953–1956, 1959–1960, 1964, 1979. Максимальное поступление делящихся радионуклидов в дерево, было зафиксировано (с небольшим смещением по кольцам на 2–4 года) в известные периоды наиболее активных испытаний ядерного оружия в атмосфере на полигоне Новая Земля (до 193 ± 38 и 161 ± 32 треков/мм² в годичных кольцах 1963 и 1965 гг. соответственно), что превышает фоновый уровень для данной территории в 3...4 раза.

Эти результаты показывают, что применение метода f -радиографии достоверно позволяет зафиксировать повышение уровня содержания делящихся радионуклидов, связанное с их дополнительным привнесом в окружающую среду. Далее, в годичных кольцах, относящихся к периоду времени, когда не проводились испытания ядерного оружия в атмо-

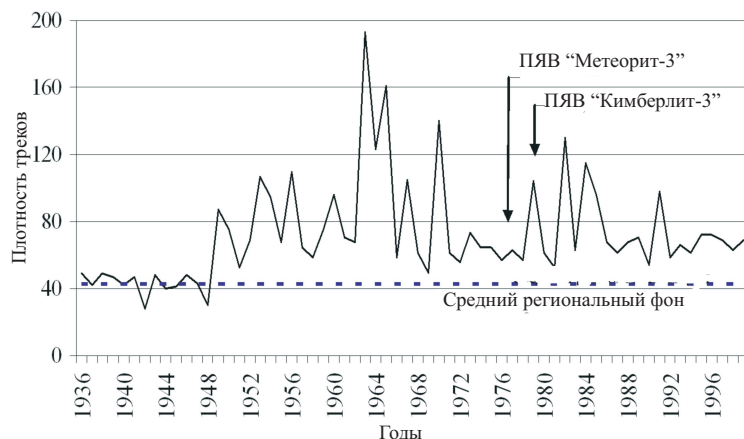


Рис. 4. Распределение треков от осколков деления в годовых кольцах лиственницы, участок проведения ПЯВ «Метеорит-3» и «Кимберлит-3», п. Тура, Красноярский край

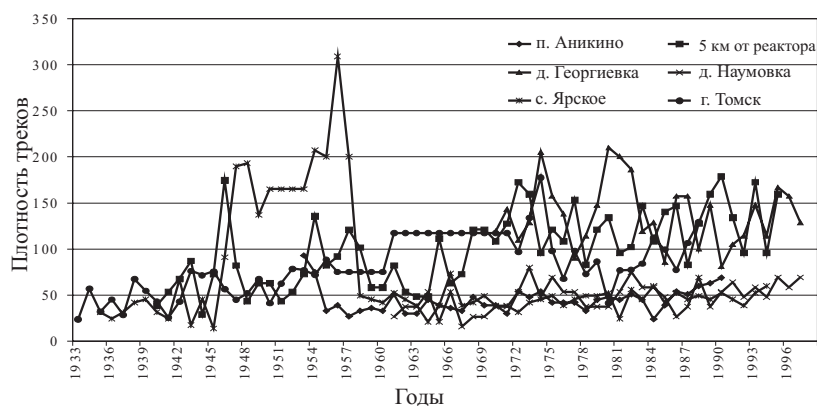


Рис. 5. Плотность треков от осколков деления в годовых кольцах сосен из разных секторов влияния Сибирского химического комбината, Томская область

сфере (прекращены во всех странах мира с 1981 г.) наблюдается повышенная, относительно фоновому уровню, плотность треков в 1982, 1984, 1985, 1991 гг., что свидетельствует о дополнительном поступлении радионуклидов в окружающую среду, которое, вполне вероятно, связано с проведенными в 1977 и 1979 гг. ПЯВ «Метеорит-3» и «Кимберлит-3».

Особенности распределения треков от осколков деления радионуклидов в годовых кольцах деревьев, расположенных в зоне влияния одного из предприятий ядерно-топливного цикла — Сибирского химического комбината (СХК), г. Северск показаны на рис. 5.

Как видно из графиков, характер накопления делящихся элементов в годовых кольцах деревьев, расположенных в разных секторах воздействия СХК крайне неоднородный. Отмечается устойчивая тенденция увеличения плотности треков в период с 1963 и до 1997 гг., что свидетельствует о постоянном поступлении делящихся радионуклидов в окружающую среду и принципиально отличает динамику их накопления по сравнению с фоновыми районами. В одном из фоновых районов (с. Ярское) весьма четко фиксируются выпадения делящихся радионуклидов в период испытания ядерного оружия в атмосфере — 1945–1958 гг.

Согласно полученным данным, до 1960 г. практически не устанавливаются различия в характере накопления делящихся элементов в годовых кольцах деревьев и, более того, в интервале времени 1948–1960 гг. уровень их накопления, за счет глобальных выпадений от испытаний ядерного оружия в атмосфере, в секторе вне зоны влияния СХК (д. Георгиевка, д. Наумовка и др.) более высокий. Начиная с 1960–1963 гг. картина принципиально изменяется. Уровень накопления делящихся радионуклидов в годовых срезах деревьев вне сектора влияния СХК остается на среднем глобальном уровне, тогда как в секторе постоянного влияния СХК, концентрация делящихся радионуклидов, судя по плотности треков от осколков деления, увеличилась более чем в 2 раза. Это, на наш взгляд, объясняется тем, что, начиная с 1961 г., на СХК начинают работать на полную мощность все пять промышленных реакторов по производству плутония, а также все другие производства ядерно-топливного цикла, что приводит к хроническому поступлению делящихся радионуклидов в природную среду в тех или иных количествах.

Для оценки поступления делящихся радионуклидов на территории, которые были подвержены влиянию радиоактивных выпадений в результате

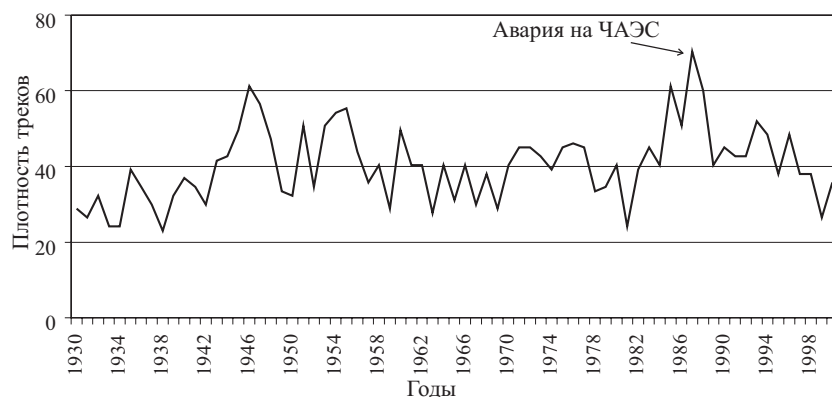


Рис. 6. Плотность треков от осколков деления в годичных кольцах сосны, Чехия

аварии на Чернобыльской АЭС изучены деревья, спилы которых были отобраны на территории Центральной Европы, в Чехии. Территория Центральной Европы характеризуется несколько иной историей радиоактивного загрязнения, чем ранее нами исследованные регионы.

Плотность и характер распределения треков от осколков деления в годичных кольцах одной из сосен, отобранной на территории Чехии, которая была подвержена чернобыльским выпадениям, показаны на рис. 6. Полученная динамика показывает, что, в целом, проявляется тенденция увеличения содержания делящихся элементов в периоды активного испытания ядерного оружия в атмосфере (при этом уровень накопления значительно ниже, чем для регионов России), а также в период с 1985 по 1988 гг., когда произошла авария на ЧАЭС. О выбросах чернобыльской катастрофы 1986 г. свидетельствует увеличение средней плотности треков в период с 1985 по 1988 гг. (до 65 ± 8 треков/мм²). Уровень накопления делящихся радионуклидов на территории Чехии в «доядерный» период (содержание элементов с 1930 до 1945 гг.) соответствует средней плотности 35 ± 6 треков/мм², а современный региональный уровень (с 1990 по 2000 гг.) —

40 ± 6 треков/мм²). Полученные данные хорошо согласуются с определенными ранее фоновыми значениями для регионов Сибири.

Таким образом, используя метод *f*-радиографии для изучения древесных растений, можно для любой территории выявить историю поступления делящихся радионуклидов в окружающую среду в определенные временные периоды, а также выделить периоды максимального поступления. В результате радиографии годичных колец получены данные, адекватно отражающие общий характер радиоактивного загрязнения делящимися радионуклидами, который обусловлен глобальными выпадениями от ядерных испытаний и локальным поступлением этих элементов в результате деятельности предприятий ядерно-топливного цикла. Такая реконструкция радиоактивных событий, произошедших на какой-либо территории всегда актуальна и, обусловлена необходимостью оценки уровня и последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды, произошедшего по разным причинам (деятельность предприятий Минатома, аварий и др.). Это позволит оценить возможные дозы облучения и прогнозировать состояние здоровья населения, проживающего на этих территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Флеров Г.Н., Берзина И.Г. Радиография минералов, горных пород и руд. — М.: Атомиздат, 1979. — 224 с.
- Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 536 с.
- Радиографические методы исследования в радиогеохимии и смежных областях: Тезисы докл. 3-го Всес. Совещ. — 11–15 июня 1991 г., Томск. — Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО АН СССР, 1991. — 124 с.
- Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Беляева А.М., Жорняк Л.В., Фетисова Ю.Л., Шатилов А.Ю. Ретроспективная оценка поступлений радиоактивных веществ в природную среду // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: Матер. Междунар. конф. — М., 2005. — С. 325–332.
- Сарнаев С.И., Рихванов Л.П. Опыт по созданию эталона для определения урана методом *f*-радиографии // Радиографические исследования в радиогеохимии и смежных областях. — Новосибирск, 1991. — С. 75–77.
- Пат. 2265869 РФ. Способ оценки радиоэкологического загрязнения окружающей среды / Л.П. Рихванов, Т.А. Архангельская. Заявлено 13.05.2004.
- Архангельская Т.А. Ретроспективная оценка радиоэкологической ситуации по результатам изучения годовых колец срезов деревьев: Автореф. дис. ... канд. г-м. наук. — Томск, 2004. — 21 с.
- Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Несветайло В.Д. Изучение уровня и динамики накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев // Геохимия. — 2002. — № 11. — С. 1238–1245.
- Фетисова Ю.Л., Архангельская Т.А., Коваленко В.В., Рихванов Л.П. Применение метода осколочной радиографии для реконструкции радиационной обстановки на территории Красноярского края // Вестник КрасГУ. Естественные науки. — 2005. — № 5. — С. 182–187.

Поступила 14.11.2006 г.