

УДК 574:539.1.04

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОСКОЛОЧНОЙ РАДИОГРАФИИ
ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ
НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ**

Ю.Л. Фетисова, Т.А. Архангельская,
В.В. Коваленко, Л.П. Рихванов*

В работе рассматривается использование ядерно-физического метода (f-радиографии) для решения задачи реконструкция радиационной обстановки на территории Красноярского края, которая представляется важной в связи с необходимостью оценки последствий техногенного радиационного воздействия на окружающую среду и здоровье населения. С использованием этой методики были получены первые данные для территории края по загрязнению делящимися радиоактивными элементами на основании результатов радиографии годичных колец различных пород деревьев.

На территории Красноярского края работают крупные предприятия Минатома России, а также имеются значительные площади с повышенной радиационной опасностью, которая обусловлена деятельностью этих предприятий.

Наиболее существенные радиоэкологические последствия связаны с деятельностью Горно-химического комбината (ГХК), расположенного в г. Железногорске. Деятельность комбината более 40 лет сопровождалась газо-аэрозольными выбросами и жидкими радиоактивными сбросами в реку Енисей. В настоящее время радиоактивное загрязнение прослеживается в пойме Енисея на протяжении 1500 км от точки сброса вниз по течению реки. Значительная часть материалов, характеризующих радиационную обстановку в зоне наблюдения ГХК в период, предшествовавший остановке проточных реакторов в 1992 г., либо засекречена, либо приведена в различных труднодоступных источниках.

* © Ю.Л. Фетисова, В.В. Коваленко; Красноярский госуниверситет; Т.А. Архангельская; Л.П. Рихванов; Томский политехнический университет, 2005.

Кроме того, существенный вклад в формирование радиационной обстановки на территории Красноярского края могут вносить участки, где в период с 1977 по 1982 гг. в интересах народного хозяйства было произведено девять подземных ядерных взрывов. Сведения о радиационной обстановке на участках подземных ядерных взрывов ограничены служебными данными десятилетней давности.

Поэтому в настоящее время актуальна проблема изучения истории радиоактивного загрязнения, что могло бы позволить реконструировать радиационную обстановку на территории Красноярского края. Интерес к реконструкции радиационной обстановки обусловлен необходимостью изучения уровня и последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды в результате многолетней деятельности ГХК, а также в связи с наличием полигонов подземных ядерных взрывов на территории края. Это позволит прогнозировать состояние здоровья населения, проживающего на территории Красноярского края, особенно в зоне наблюдения ГХК, которое, возможно, подвергалось высокому облучению в период активной эксплуатации основных производств комбината.

Одно из направлений по решению задачи реконструкции радиационной обстановки - использование природных объектов окружающей среды. Информация о величине и форме радиоактивного загрязнения окружающей среды накапливается в растениях. Для ретроспективной оценки радиоактивного загрязнения хорошим объектом служат древесные растения. Их специфические регистрирующие структуры - годовые кольца, позволяют проводить комплексные исследования природных и антропогенных процессов и явлений. Годовые кольца относятся к стратифицированным (последовательно образующимся во времени) природным образованиям, которые считаются достаточно надежными объектами мониторинговых исследований, раскрывающих динамику, интенсивность и специфичность техногенного воздействия на среду обитания человека [1]. Таким образом, годовые кольца деревьев, являющиеся интегральными биоиндикаторами состояния окружающей среды, несомненно, представляют огромный интерес для ретроспективного экологического мониторинга.

Для оценки изменения уровня накопления радиоактивных элементов в природных средах, характеризующихся как высокими, так и сравнительно низкими концентрациями, необходимо применять высокоточные методы. Достаточно полную информацию о характере распределения радиоактивных элементов в исследуемых объектах дают методы радиографии, которые применяются специалистами в различных областях (в геологии, биологии, экологии и медицине).

Для изучения уровня накопления и особенностей распределения радионуклидов в годовых кольцах деревьев используется метод осколочной так называемой f-радиографии. Этот метод позволяет устанавливать содержание и характер распределения урана и других делящихся элементов в различных объектах. Метод обладает высокой степенью чувствительности и разрешающей способности. Теоретические основы и практическое использование метода описаны в работах Г.Н. Флерова [2], И.Г. Берзиной и др.[3].

Метод f-радиографии позволяет изучать хронологию накопления и особенность распределения делящихся элементов (^{235}U , Am, Pu, Np и других трансурановых элементов) в годовых кольцах деревьев. Таким образом, данная методика может применяться для оценки динамики радиационной обстановки за длительный промежуток времени.

В настоящей работе приведены результаты исследований по применению метода f-радиографии для изучения дендрохронологии загрязнения тяжелыми радиоактивными элементами отдельных территорий Красноярского края.

Для определения делящихся элементов в годовых кольцах деревьев методом f-радиографии используются образцы, которые представляют собой спилы деревьев толщиной 5...7 см, из них по двум радиальным направлениям выпиливают две пластины, толщиной 1...2 см. Лучшими образцами для исследований, имеющими четко выраженные кольцевые структуры, являются спилы сосны, лиственницы и некоторых других лиственных пород деревьев.

Подготовленные образцы облучаются потоком тепловых нейтронов. В качестве детекторов используются лавсановые пленки. После облучения в детекторе образуются дефекты структуры радиационного происхождения - следы от осколков деления (треки). После соответствующей обработки детектора треки можно наблюдать в оптическом микроскопе. По количеству треков и характеру их распределения судят о содержании урана (по изотопу ^{235}U) и других делящихся элементах. Кроме количественной характеристики содержания радионуклидов также можно визуально наблюдать характер их распределения и судить о степени равномерности их распределения в изучаемом образце.

Для исследований использовали спилы различных пород, отобранные на территории зоны наблюдения ГХК и в контрольном пункте (табл.1).

Экспериментальные исследования проводились на кафедре геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета (ТПУ), где данная методика успешно внедрена специалистами в практику.

Перед облучением спилы деревьев полировали. На полированную поверхность подготовленных образцов в двух местах наносили эталон с известным содержанием ^{235}U . После высыхания клеевого эталона лавсановую пленку приклеивали к образцу с двух сторон. Затем препараты покрывали еще трехкратным слоем

лавсана для исключения загрязнения от алюминиевой фольги, а также каждого из препаратов друг от друга. Столбик таких препаратов помещали в специальный контейнер для облучения в канале реактора.

Таблица 1

Характеристика образцов древесины, используемых для исследований методом f-радиографии

Место отбора образца (спила дерева)	Порода дерева
пгт. Козулька (контрольный пункт)	ель
остров Березовый	ива
остров Березовый	береза
с. Кононово	береза
с. Кононово	сосна

Исследуемые в работе образцы подвергали облучению потоком тепловых нейтронов на исследовательском ядерном реакторе НИИ Ядерной физики при ТПУ. После спада наведенной активности выполняли операции по травлению детекторов. Для этого лавсан снимали с образца и протравливали в 40 %-м растворе КОН при температуре 50 °С в течение одного часа. После травления лавсановые пленки промывали в холодной воде и высушивали при комнатной температуре [4]. На сухую лавсановую пленку выносили контуры годовичных колец. В качестве реперов использовались контуры клеевого эталона. Детектор изучали в проходящем свете с использованием микроскопа при увеличении в 250 раз.

Для получения статистически достоверных результатов треки подсчитывали по 15 случайно выбранным элементарным площадкам в каждой зоне годовичного кольца в каждом срезе. Затем производили пересчет количества треков на 1 мм² с введением поправки на неоднородности потока нейтронов в канале реактора, о чем судили по плотности треков над эталоном. Относительная ошибка подсчета треков составила от 7 до 12 %.

В качестве уранового эталона использовали силикатный клей, в который было добавлено известное количество водного раствора нитрат уранила. Валовое содержание урана в сухом клее определялось лазерно-люминесцентным методом. В используемом клеевом эталоне оно составляло 12,16 мг/кг, а отношение изотопов ²³⁵U к ²³⁸U по данным масс-спектрометрического анализа равнялось 0,00432. Таким образом, с учетом нарушенного соотношения изотопов, содержание урана в эталоне оценено как 7,2 мг/кг [5].

Количество треков пересчитывали на содержание урана по формулам, учитывающим плотность исследуемого вещества и эталона [6].

В качестве примера использования метода f-радиографии для определения содержания делящихся элементов в древесине рассмотрим результаты по изучению годовичных колец березы, произраставшей на острове Березовый.

Этот остров расположен в 30-километровой зоне ГХК в 6 км от ГХК по розе ветров и относится к территориям, которые подверглись наибольшему загрязнению за счет газоаэрозольных выбросов комбината.

Возраст дерева, с которого взят спил для исследования, позволяет изучать распределение зафиксированных радионуклидов в образце с 1941 г.

Проследить содержание урана в природной среде в доядерный период, то есть в период до 1945 г., когда в окружающей среде еще не присутствовали техногенные долгоживущие элементы (они впервые появились после взрывов ядерных бомб в 1945 г.), возможно по данным, полученным учеными Томского политехнического университета для лиственницы, произраставшей в районе падения Тунгусского метеорита вблизи с. Ванавара (Эвенкийский автономный округ) (рис.1).

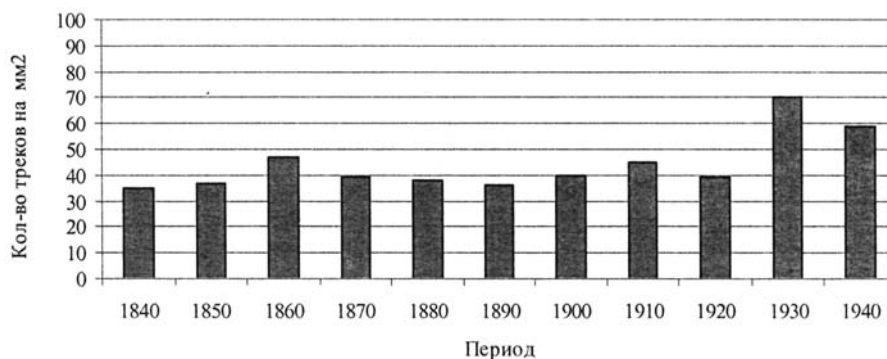


Рис.1. Характер распределения треков от осколков деления в годовых кольцах лиственницы (с.Ванавара, Эвенкийский АО)

До 1945 г. в природе делящиеся элементы были представлены только ^{235}U . Динамика распределения треков от осколков деления показывает, что содержание урана до начала 30-х годов было постоянным - на уровне 40 треков на мм^2 , что соответствует содержанию урана 0,06 мг/кг. Далее отмечается увеличение плотности треков в годовичных кольцах 30-40-х годов, что свидетельствует об увеличении делящихся элементов в природе еще до начала атомной эпохи. Причиной этого является интенсивная индустриализация территории Сибири. Бурное строительство Транссибирской железной дороги, введение в эксплуатацию производственных мощностей Кузбасса были связаны с активным сжиганием угля. При сжигании угля в атмосферу выбрасывается значительное количество урана с зольной пылью и шлаками [7].

Таким образом, на основании этих данных можно определить фоновый (доядерный) уровень содержания радиоактивных элементов в природной среде, который составляет 0,06 мг/кг.

Рассмотрим результаты по распределению делящихся элементов в срезе березы с о-ва Берёзовый за период с 1941 по 2000 гг. Плотность и характер распределения треков для данного образца показаны на рис. 2.

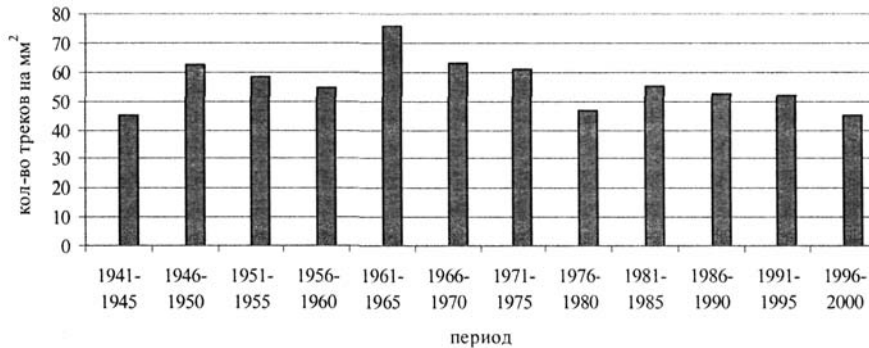


Рис.2. Характер распределения треков от осколков деления в годовых кольцах березы (о. Берёзовый, Красноярский край)

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Отмечается общая тенденция повсеместного (глобального) загрязнения природной среды радионуклидами, обусловленная испытаниями ядерного оружия в атмосфере. При ядерных взрывах происходит распыление значительных количеств неразделившихся урана и плутония, что ведет к дополнительному поступлению радиоактивных изотопов в атмосферу [7].

2. Установлено, что в период до первых испытаний ядерного оружия в 1945 г. первоначальный уровень накопления урана в данном районе составлял 0,06 мг/кг.

С 1946 по 1960 гг. наблюдается повышение уровня накопления делящихся элементов в годовичных кольцах дерева по сравнению с доядерным периодом. В это время активно проводились воздушные и наземные испытания ядерного оружия на Семипалатинском и Новоземельском полигонах. Среднее содержание делящихся элементов для этого временного интервала составляет 0,08 мг/кг.

Максимум накопления приходится на годовичные кольца с 1961 по 1965 гг., что, очевидно, связано с двумя причинами. В этот период были запущены второй и третий ядерные реакторы ГХК и началось производство плутония. Осенью 1961 г. и во второй половине 1962 г. на полигоне Новая Земля были проведены самые мощные взрывы ядерного оружия в атмосфере за всю историю испытаний [8], что также внесло свой вклад в накопление делящихся элементов в годовичных кольцах этого периода.

Сравнительно высоким накоплением радиоактивных элементов характеризуется период с 1966 г. до середины 70-х годов, когда, возможно, прослеживается роль испытаний оружия, которые проводились Китаем на полигоне Лоб Нор [8]. Средняя плотность треков в данном периоде составляет 62 трека на мм^2 .

3. С 1976 по 1980 гг. происходит заметное снижение концентрации радионуклидов. Возможным объяснением уменьшения содержания делящихся элементов во второй половине 70-х годов является улучшение системы очистки на производстве ГХК. В результате этого поступление загрязняющих элементов в природную среду значительно сократилось.

4. Некоторое повышение содержания радионуклидов отмечается в начале 80-х годов, после чего наблюдается постепенное снижение уровня накопления делящихся элементов. В настоящее время оно равно 46 треков на мм^2 , что соответствует содержанию урана 0,06 мг/кг.

Наблюдаемую динамику поступления урана возможно достоверно объяснить только с привлечением сведений о работе ГХК. Однако на сегодняшний день такие данные отсутствуют.

Тем не менее, следует отметить, что полученная динамика распределения делящихся радионуклидов, по нашему мнению, адекватно отражает основные вехи деятельности ГХК, и фиксирует не только глобальное, но и локальное загрязнение окружающей среды делящимися элементами, поступающими в результате эксплуатации реакторного и радиохимического производства ГХК.

Таким образом, полученные результаты позволяют оценить общий характер радиоактивного загрязнения изучаемой территории, обусловленный глобальным выпадением продуктов, образующихся при испытаниях ядерного оружия в атмосфере, а также локальными поступлениями делящихся элементов, связанных с деятельностью ГХК.

1. Выявляется общая тенденция увеличения содержания делящихся элементов в годичных кольцах деревьев, обусловленная глобальным загрязнением окружающей природной среды радиоактивными элементами от проведения ядерных испытаний в атмосфере.

2. Среднее содержание делящихся элементов в годичных кольцах, соответствующих доядерному периоду, составляет 0,06 мг/кг. С началом испытаний ядерного оружия в 1945 г. концентрация радионуклидов в древесине увеличивается в среднем в 1,5 раза. Максимальные уровни накопления делящихся элементов приходится на середину 60-х - начало 70-х годов, что связано с выводом на производственную мощность основных производств ГХК, а также активным проведением ядерных испытаний на Семипалатинском и Новоземельском полигонах. Далее уровень накопления радионуклидов постепенно уменьшается и приближается к уровню регионального фона.

3. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с опубликованными данными по ядерным испытаниям в атмосфере [8], а также с известными данными по работе основных производств ГХК.

Вопрос о роли подземных ядерных испытаний, которые были проведены на территории Красноярского края, требует специального исследования. Считают, что выброса радиоактивных материалов на поверхность земли во время проведения этих взрывов не было. Однако радиоактивные нуклиды, образующиеся при подземном ядерном взрыве, обладают повышенной способностью к миграции, что обусловлено их присутствием в газоаэрозольном облаке с высокой температурой, пронизывающем окружающую толщу пород с высокой трещиноватостью, вызванной взрывом.

Также об этом свидетельствуют исследования спилов деревьев с территории, расположенной вблизи зоны проведения подземного ядерного взрыва "Рифт-3" (Иркутская область), которые показали, что в данном районе произошло истечение продуктов подземного ядерного взрыва в природную среду [9].

В настоящее время нами выполняется работа по изучению проб древесины, отобранных с территории подземного ядерного взрыва в Эвенкийском АО вблизи пос. Тура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах / А.И. Щеглов. - М.: Наука, 1999. - 268 с.
2. Флеров Г.Н. Радиография минералов, горных пород и руд / Г.Н. Флеров, И.Г. Берзина. - М.: Атомиздат, 1979. - 224 с.
3. Берзина И.Г. Выявление радиоактивного загрязнения окружающей среды методом радиографии / И.Г. Берзина, Г.П. Герцен, С.В. Столяров и др. // Геохимия. - 1993. - № 3. - С. 449-456.
4. Рихванов Л.П. Изучение уровня и динамики накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев / Л.П. Рихванов, Т.А. Архангельская, В.Д. Несветайло // Геохимия. - 2002. - № 11. - С. 1238-1245.
5. Сарнаев С.И. Опыт по созданию эталона для определения урана методом f-радиографии / С.И. Сарнаев, Л.П. Рихванов // Радиографические исследования в радиогеохимии и смежных областях. - Новосибирск, 1991. - С. 75-77.
6. Определение содержания урана в минералах и горных породах по следам от осколков деления. Инструкция по определению. - М.; 1974.
7. Апплби Л.Дж., Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля: Пер. с англ. / Л.Дж. Апплби, Ю.К. Девелл, Ю.К. Мишра и др. // Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. - М.: Мир, 1999. - 512 с.
8. Источники и эффекты ионизирующего излучения. Отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблее с научными приложениями. Т.1: Источники: Пер. с англ. / Под ред. ак. РАМН Л.А. Ильина и проф. С.П. Ярмоненко. - М.: РАДЭКОН, 2002.
9. Архангельская Т.А. Ретроспективная оценка радиоэкологической ситуации по результатам изучения годовых колец срезов деревьев: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / Т.А. Архангельская. - Томск, 2004.

**APPLICATION THE METHOD OF FISSION-FRAGMENT RADIOGRAPHY
FOR RECONSTRUCTION OF RADIATION ENVIRONMENT IN TERRITORY
OF KRASNOYARSK REGION**

J.L. Fetisova, T.A. Arkhangel'skaya,
V.V. Kovalenko, L.P. Rikhvanov

The paper presents using nuclear-physical method (f-radiography) to accomplish a task of reconstruction of radiation environment in territory of Krasnoyarsk Region, which is important because of necessity of an estimation of consequences man-caused radiating influence on an environment and health of the population. The first data about pollution of the environment of region territory were acquired on the basis of results of radiography of tree-rings of various breeds of trees.