

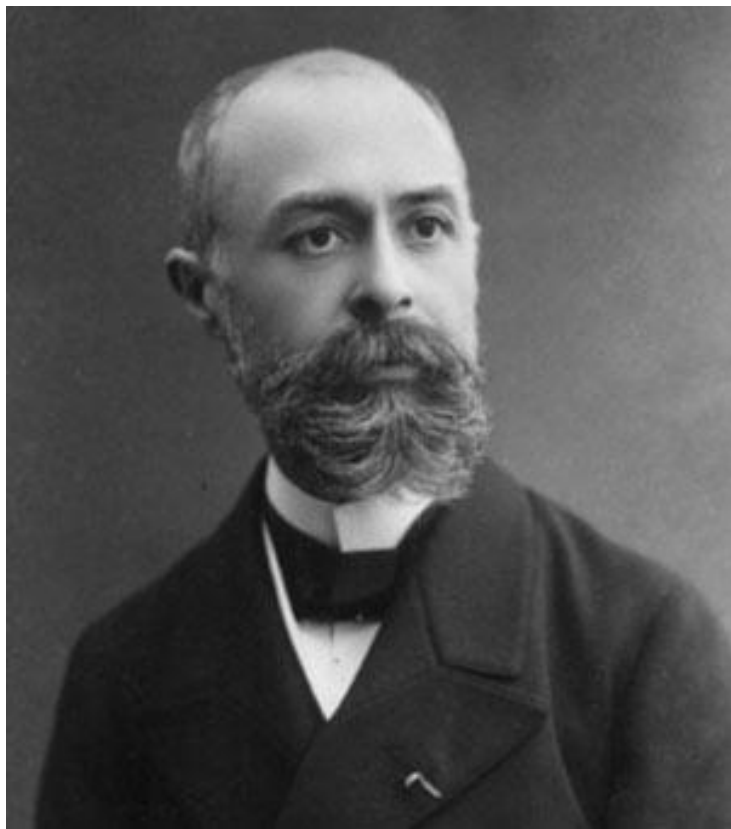


Лекция

Радиографические методы

- Методы анализа, позволяющие определять пространственное распределение элементов, называют радиографическими.
- Термин **«радиография»** дословно означает «запись излучения» (*radio* (лат.) – излучаю, *grafo* (греч.) – пишу). Вначале этот термин применялся при описании действия радиоактивных или рентгеновских излучателей на чувствительный слой фотографической пластинки или эмульсии.

Беккерель, Антуан Анри (15 декабря 1852 - 25 августа 1908)
Antoine Henri Becquerel
Выдающийся ученый-физик, Место рождения - Париж.



Лауреат Нобелевской премии по физике (1903 г.). «В знак признания его выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиоактивности».



Изображение фотопластинки Беккереля, засвеченной излучением солей урана (1896 г.). Видна тень металлического мальтийского креста, помещённого между пластинкой и солью урана.

Ключевые этапы и открытия

- Л.В. Мысовский, в 1919 г. разработал метод выявления следов заряженных частиц в толстослойных эмульсиях.
- С. Гудмэн, Д. Пиктон, Г. Томпсон – **1941-1943 гг.**, первые исследования по нейтронно-активационной автордиографии
- Р.Л. Флейшер, П.Б.Прайс, Р.М.Уокер – **1959 г., 1962 г.** обнаружение следов осколков спонтанного деления урана в слюде и эффекта химического травления треков.
- **Прогресс в развитии радиографических методов связан с именами П. Кюри, И. Складовская-Кюри, Г. Хевеши, Ф. Панета, С.З. Рогинского, В.Г. Хлопина, а также Игода, С. Бовье, В.И. Баранова, Ю.А. Шуколюкова, С.Р. Пелка, В.И. Коробкова, Б.И. Брука, Э.Роджерса, Г.Н. Флерова, И.Г. Берзиной, Ю.Ф. Бабиковой, Ф. Поттса, А.Г. Миронова, Л.П. Рихванова, Е. С. Флициян и других.**

Радиографические методы выявления пространственного распределения элементов при одновременном определении их локальных и общих концентраций позволяют решать в комплексе с другими методами конкретные геологические, геохимические, минералогические, **геоэкологические задачи**. В частности, радиографические методы позволяют изучать:

- **поведение различных элементов в гидротермальных, инфильтрационных, магматических, метаморфических и осадочных процессах** (результаты исследований могут быть использованы для определения критериев поиска рудопроявлений, изучения генезиса месторождений и создания теории рудообразования);
- **процессы переотложения элементов**, которые могут фиксироваться как в виде самостоятельных минералов, выделяющихся по зонам роста или трещинам минералов, так и в виде равномерно распределенной примеси по всему объему вмещающего минерала;
- **явление сорбции минералами различных элементов**, что важно для решения генетических и технологических задач;
- **закономерности процессов перераспределения элементов** и их миграции за время существования минералов, горных пород и руд;

- потенциальные источники оруденения в экзогенно-эпигенетических месторождениях;
- особенности распределения и нахождения элементов в бедных рудах с целью увеличения эффективности технологических процессов;
- ореолы окolorудных изменений;
- пространственное и временное смещение равновесия в минералах между материнским и дочерним элементами в рядах радиоактивных распадов;
- соотношения измененных и неизмененных пород с одновременным выявлением в них наложенных процессов;
- перераспределение элементов в метасоматических процессах при образовании одних минералов по другим;
- закономерности, связанные с тепловой историей горных пород, с выявлением времени термометаморфизма;
- **пространственное распределение в биологических объектах (древесине, костях, биолитах, крови, волосах и т.д.).**

Классификация радиографических методов

(Флеров Г.Н., Берзина И.Г., 1979)

1. Радиография, основанная на регистрации многозарядных ионов и заряженных частиц (электроны, протоны и α -частицы).
 - а. Радиография, основанная на регистрации осколков **спонтанного (α -авторадиография) и вынужденного (f-радиография)** деления тяжелых элементов.
 - б. Радиография, основанная на регистрации α -частиц, образовавшихся в результате ядерных реакции.
 - в. Радиография, основанная на регистрации природного α -излучения (α -авторадиография).
 - г. Радиография, основанная на регистрации протонов и электронов.

2. Рентгенорадиография и γ -радиография.

а. Рентгенорадиография.

б. γ -радиография

в. Локальный рентгеноспектральный метод

3. Активационная радиография

4. Нейтронная радиография.

а. Просвечивающая нейтронная радиография

б. Нейтронно-спектральная радиография

Радиографические методы применяющиеся на кафедре ГЭГХ

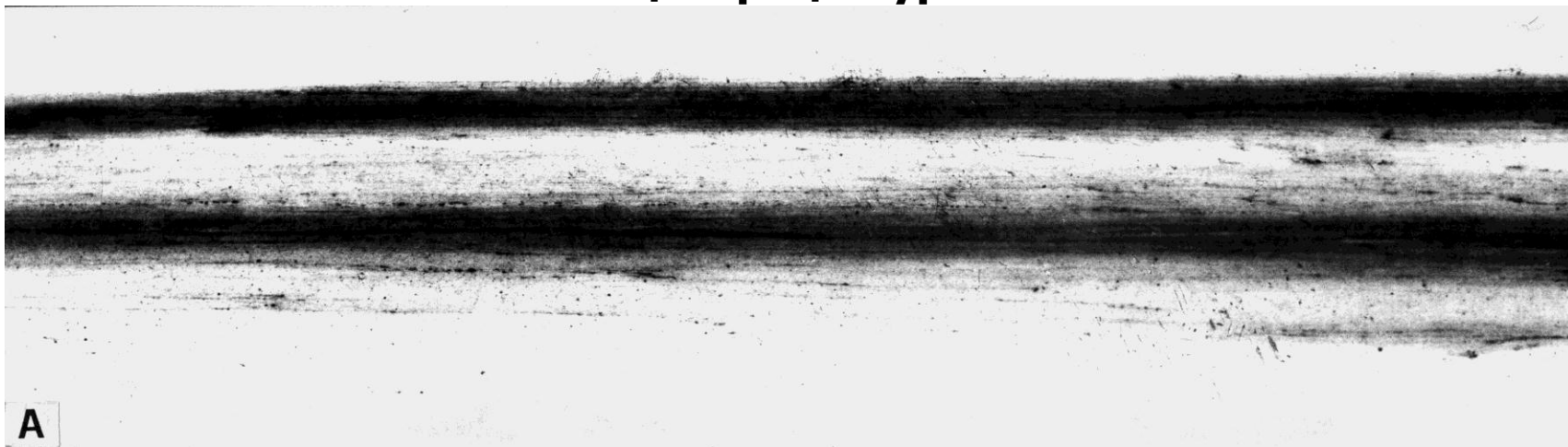
- Макрорадиография
- Микрорадиография
- Осколочная радиография (f-радиография)

Макрорадиография

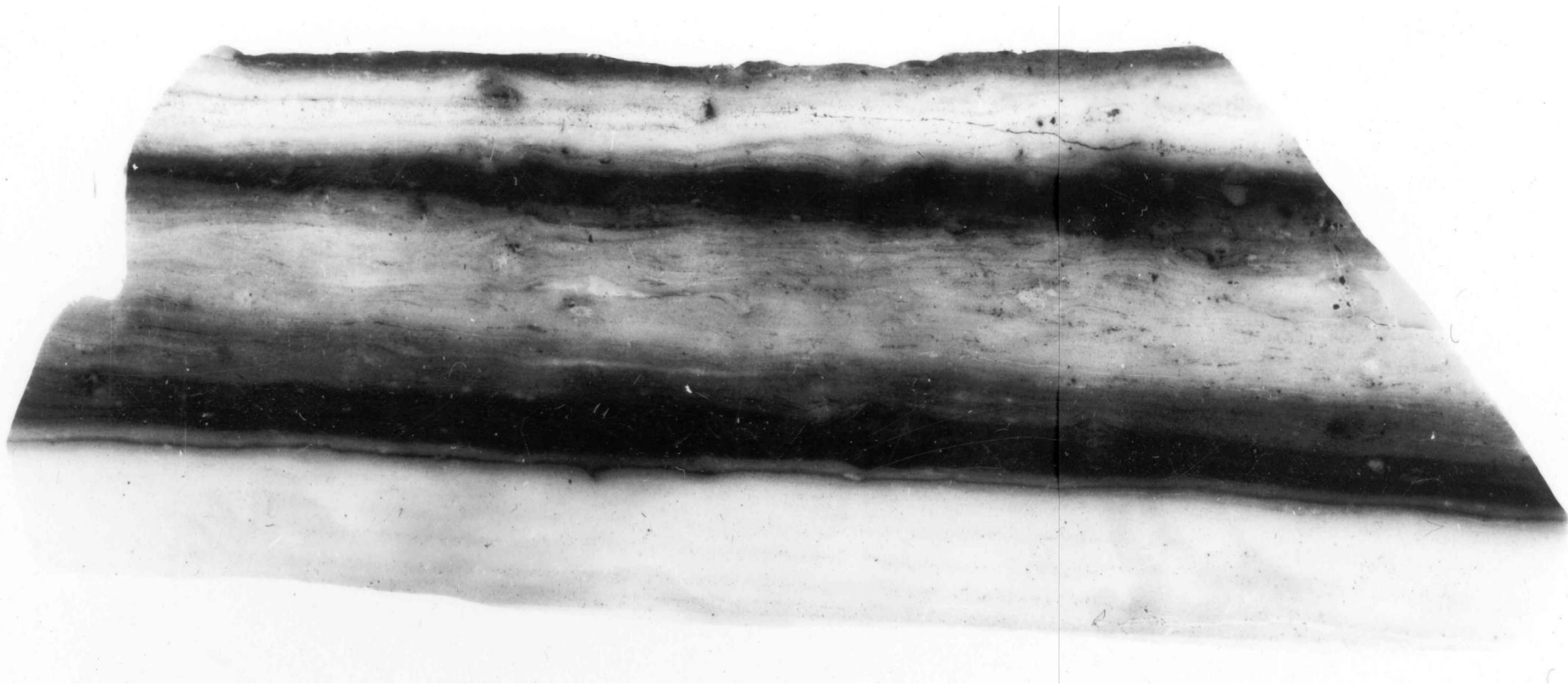
- Макрорадиография является одним из широко распространенных методов изучения характера распределения и формы выделения радиоактивных минералов в исследуемых образцах горных пород и руд.
- Он основан на способности радиоактивных веществ оказывать влияние на эмульсионный слой фотографической пластинки, фотопленки или рентгеновской пленки.
- Это выражается в почернении после проявления тех участков негатива, которые контактировали с радиоактивным минералом.

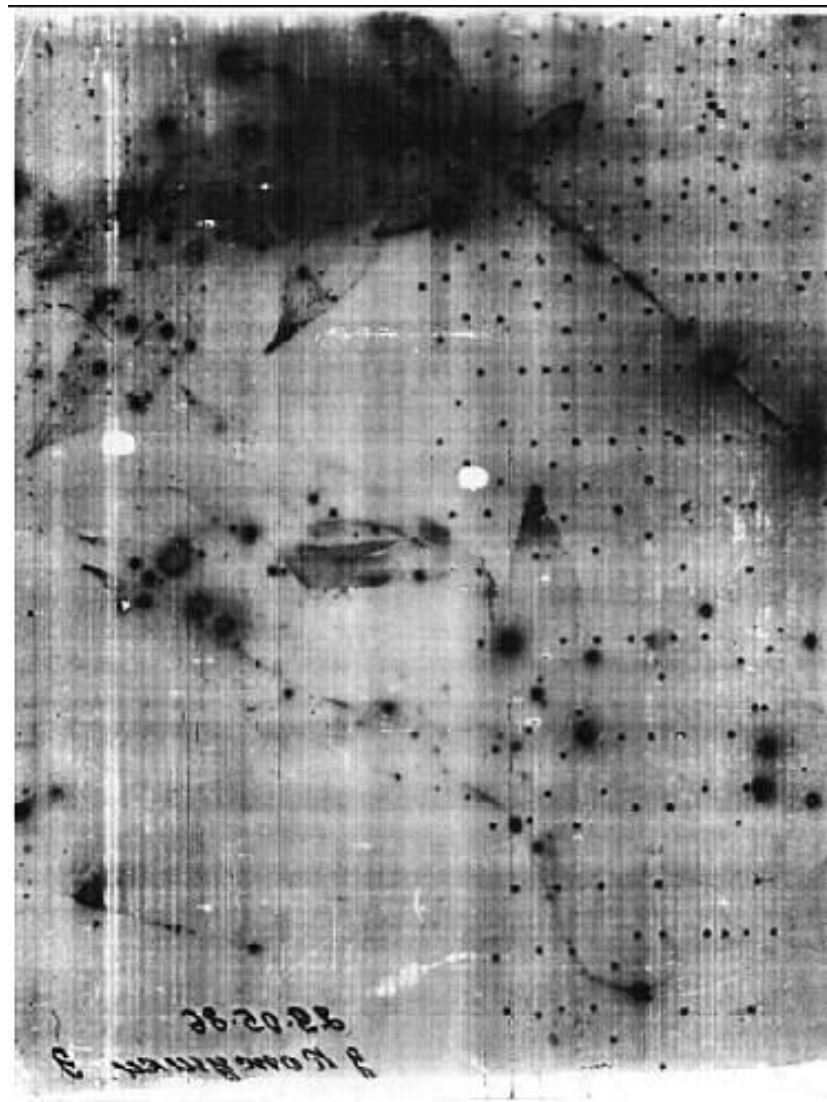
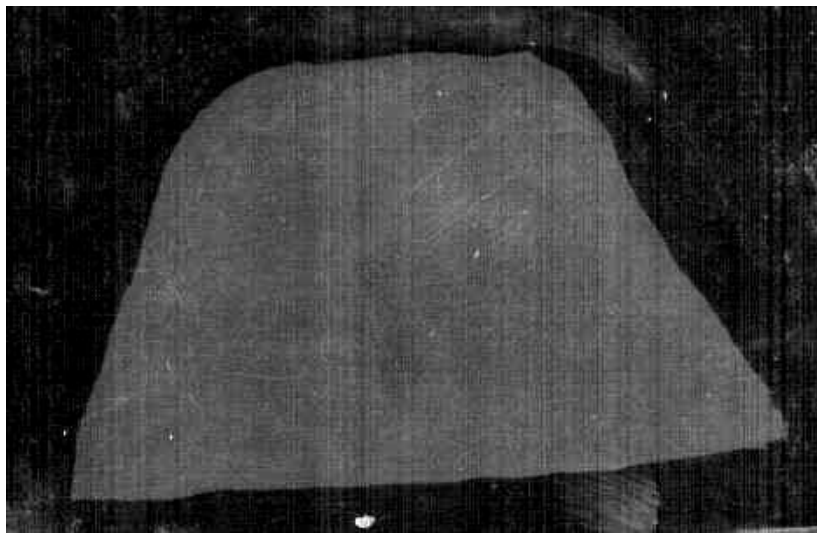
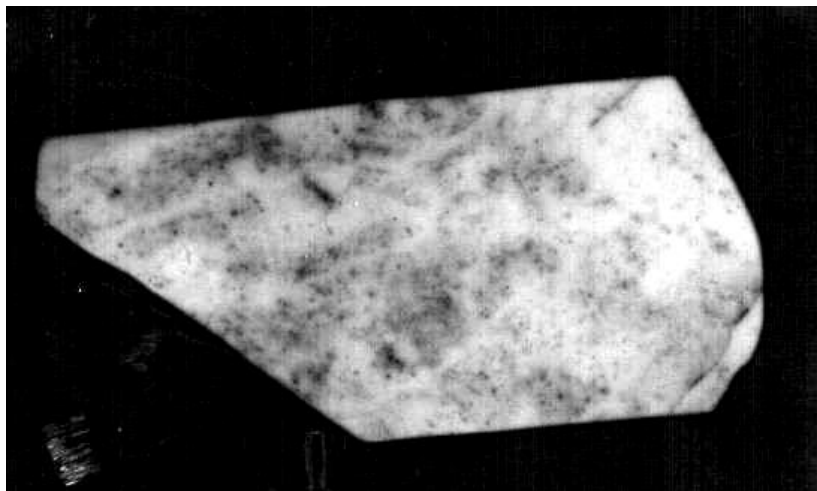
- Для макрорадиографических исследований используются фотографические пластинки и некоторые сорта фотобумаги, выпускаемые промышленностью для обычной фотографии.
- Основным критерием, определяющим пригодность фотоматериалов для целей радиографии, являются высокая разрешающая способность эмульсий, их мелкозернистость и малая вуалирующая способность.
- Наиболее удачным материалом для получения радиографических снимков могут быть рентген-безэкранная пленка, рентген-пленки «Agfa», «Codak» и др.

Контрастные альфа-авторадиограммы ураноносных черных сланцев В.Саяна. Максимальная плотность почернения, соответствует тах концентрации урана.



Контрастная бета-авторадиограмма ураноносного черного сланца В.Саяна. Максимальная плотность почернения, соответствует \max концентрации урана



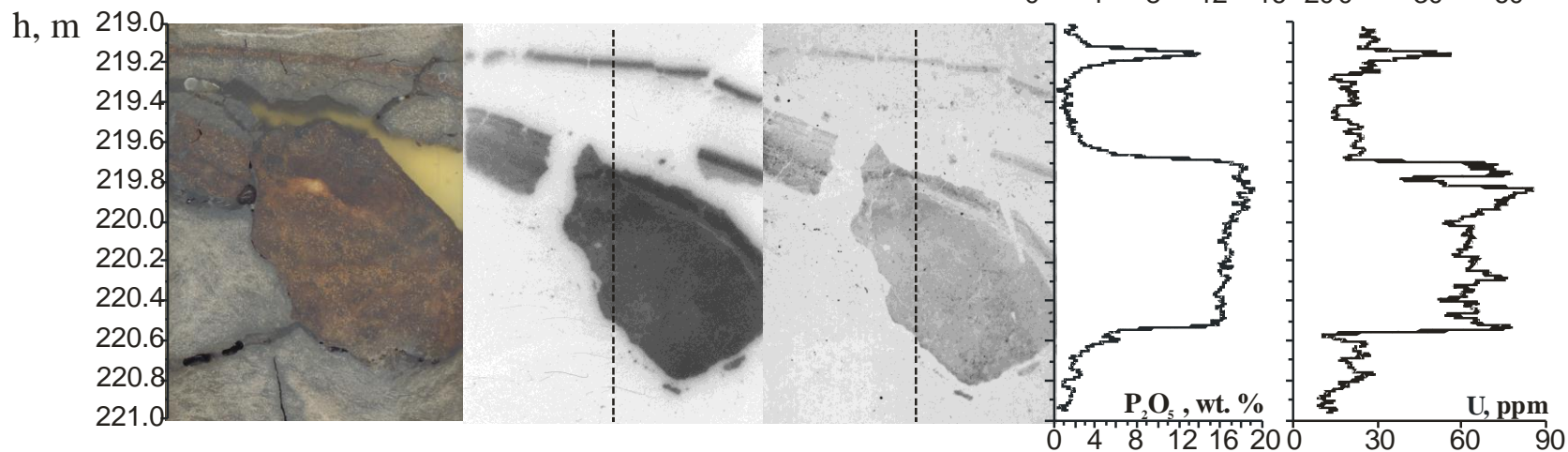
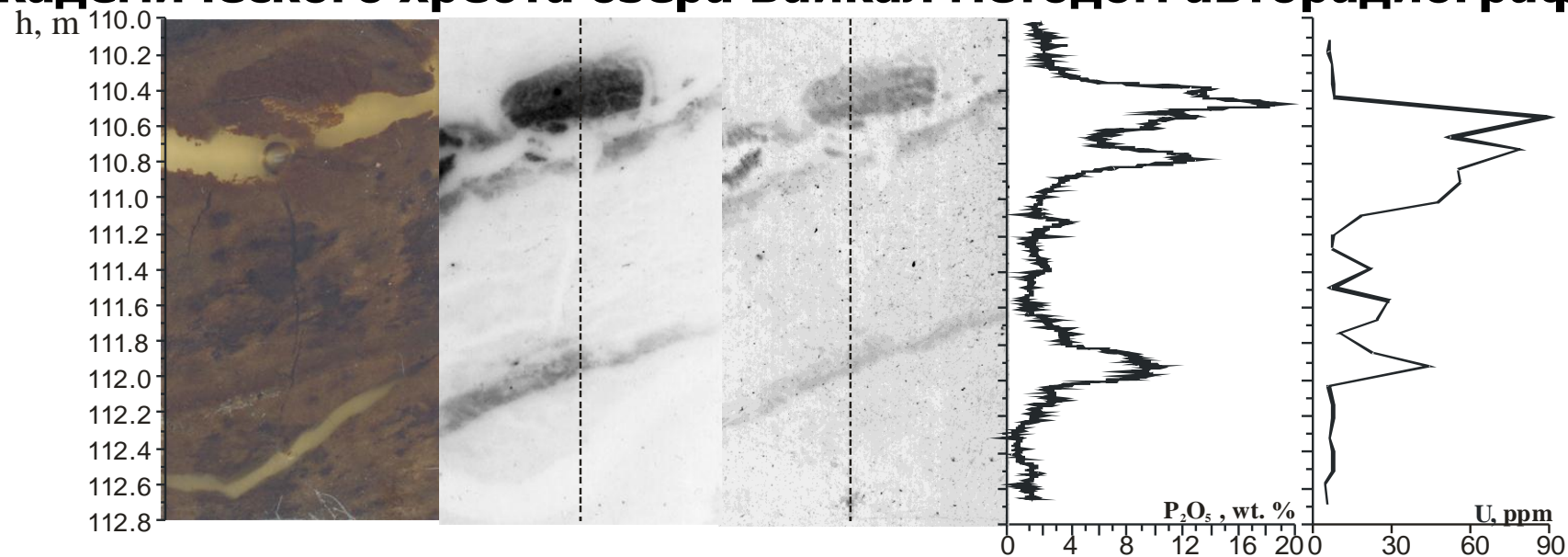


Методика макрорадиографических исследований достаточно проста и заключается в следующем:

- В полной темноте лист рентгеновской пленки кладется на совершенно гладкую поверхность.
- На нее накладываются шлифы и пришлифовки так, чтобы их полированные стороны плотно прилегали к пленке.
- После того как все предназначенные для работы объекты уложены на лист рентгеновской пленки, необходимо отметить на пленке номера шлифов и обвести их контур для последующего сопоставления радиографии и шлифов, с которых они получены.
- Лучше всего это сделать методом «засвечивания».

- После «засвечивания» пленку с наложенными шлифами убирают в светонепроницаемый ящик для экспозиции. **Время экспозиции** зависит от радиоактивности минералов.
- Оно колеблется **от нескольких часов до нескольких суток**. По истечении этого срока шлифы аккуратно снимают с пленки, которую затем (в полной темноте) проявляют и фиксируют обычным порядком

Результаты изучения колонок донных отложений с Академического хребта озера Байкал методом авторадиографии



a – образец; b – (n, β) -авторадиограмма; c – (n, f) -авторадиограмма; d – распределение фосфора, e – распределение урана.

- У некоторых животных и растений, обитающих на территориях с высокой природной радиоактивностью, в различных их органах происходит накопление естественных радионуклидов.

- Так, доктор Войс на совещании в г. Гомель (1990 г.) сообщал, что от крыс и растений района Пасус-де-Кальдос (Бразилия), получают контрастные радиографические отпечатки на фоточувствительных материалах.



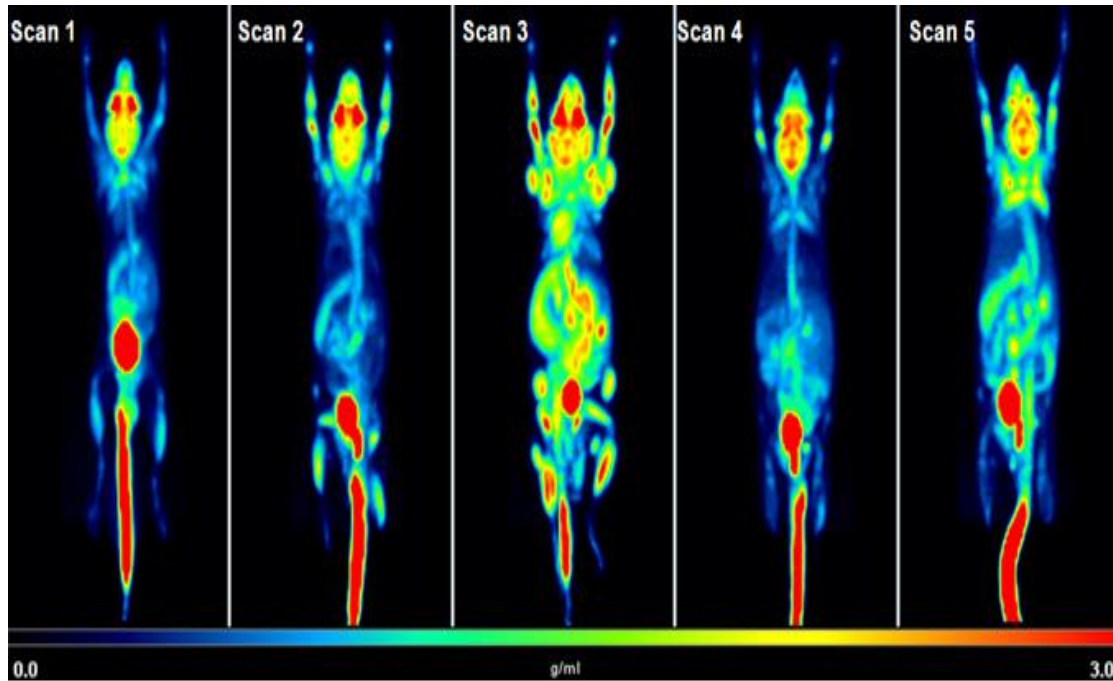
Авторадиография растения *Adiantum* из района Паус-де-Кальдос, штат Минас-Жейрас (Бразилия).



Авторадиография мышцы

Рентгеновская плёнка. Негатив. Светлое - места концентрации радионуклида

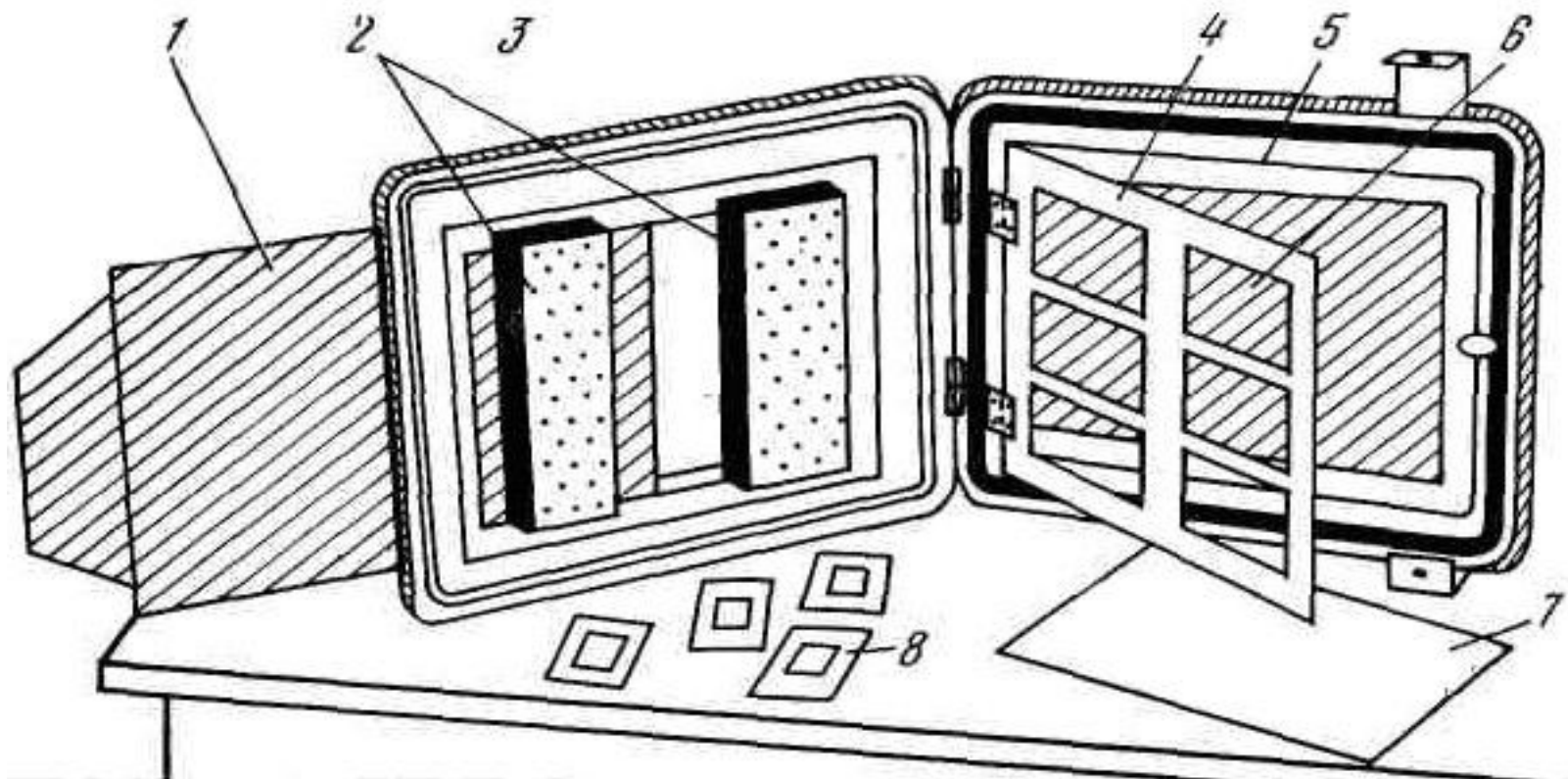
- **Цифровая автордиография** (информацию о качественном распределении радиации в различных образцах)



Микрорадиография

- Микрорадиографии аншлифов и непокрытых шлифов выполняются на специальных толстослойных пластинках (или пленках) с мелкозернистой эмульсией светочувствительного слоя. Они позволяют воспроизводить мельчайшие детали размещения рудного вещества. Толстослойные фотоматериалы бывают разных видов, чувствительные как к α -, так и к β -излучениям.
- Метод микрорадиографий с помощью толстослойных пластинок с высокой чувствительностью к α -частицам позволяет: **выявить количественную сторону радиоактивности путем подсчета α -треков на единицу площади в единицу времени излучения;** установить источник и природу радиоактивного излучения на основе разницы между максимальными длинами пробегов α -частиц для элементов ряда урана – актиния и тория.

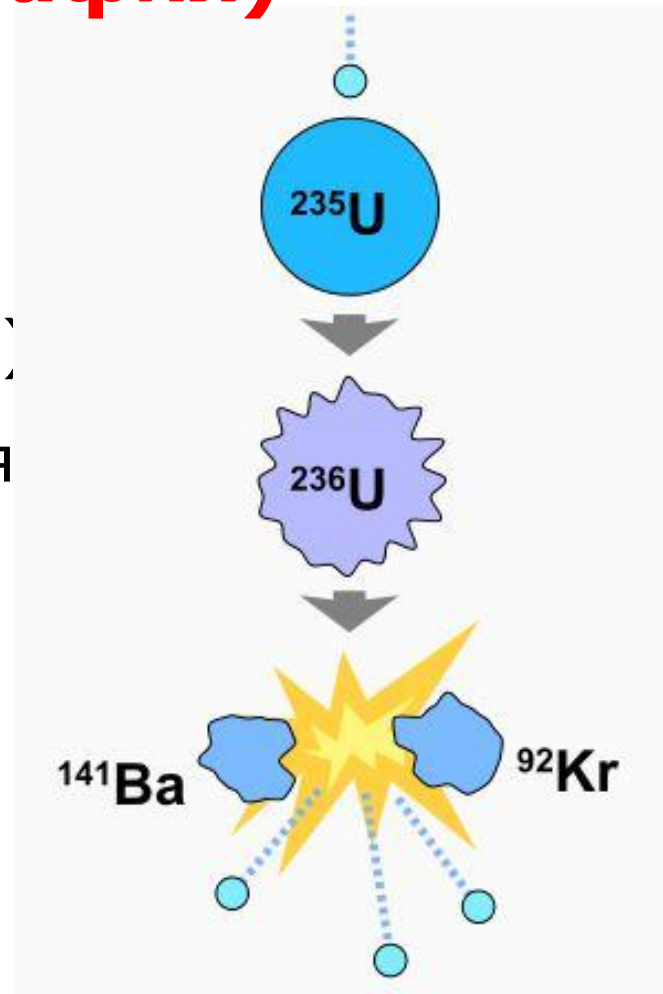
- Для получения микрорадиографий используются обычные (толщиной 0,03 мм) непокрытые шлифы. Они размещаются на чувствительной к α -лучам толстослойной пластинке размером, 9x12.
- Удобны в работе специальные кассеты, в которых обеспечивается плотное, равномерное прилегание шлифа к фотоэмульсионному слою и исключается возможность скольжения шлифа по эмульсии во время экспонирования. С помощью открывающейся шторки этой кассеты можно высветить номер шлифа для последующей идентификации с радиографией.



*Кассета для экспонирования микрорадиографий шлифов:
 1 – шторка, позволяющая высвечивать номера шлифов на фотопластинке; 2 –
 полоски пористой резины, равномерно прижимающие экспонирующую часть шлифа;
 3 – крышка кассеты; 4 – рамка; 5 – основание кассеты с углублением для
 фотопластинки; 6 – окна для шлифов; 7 – фотопластинка; 8 – шлифы*

Осколочная радиография (f- радиография)

Метод осколочной радиографии (f-радиография) основан на процессе деления ядер урана и тория под воздействием тепловых нейтронов в ядерном реакторе.



- Метод f-радиографии позволяет с высокой чувствительностью и точностью выявлять пространственное распределение урана и тория при одновременном определении локальных и общих концентрациях.
- **Метод обладает повышенной чувствительностью (порог чувствительности порядка $n \cdot 10^{-10}$ г/г) и** применяется как для качественных, так и для количественных определений радиоактивных элементов в образцах пород и минералов с кларковыми и закларковыми их содержаниями

- Принципиальная возможность определения содержаний урана в различных материалах основана на том, что **осколки спонтанного или вынужденного деления ядер тяжелых элементов оставляют в окружающей среде дефектные области (треки)**, которые могут быть обнаружены под микроскопом после химического травления исследуемой поверхности.
- **Для образования осколков от вынужденного деления ядер урана необходимо исследуемый образец облучить потоком тепловых нейтронов** (интегральный поток порядок 10^{12} – 10^{16} част./см² в зависимости от содержания урана в образце). Вынужденное деление при этом испытывают только **ядра атомов урана-235**, относительное число актов деления других элементов весьма незначительно.

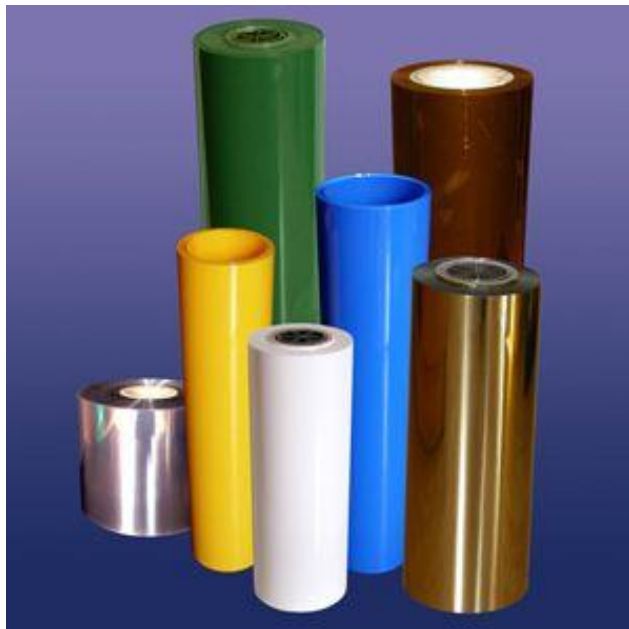


Свечение Вавилова-Черенкова



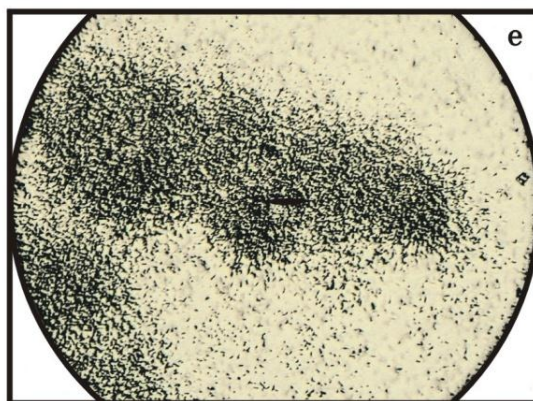
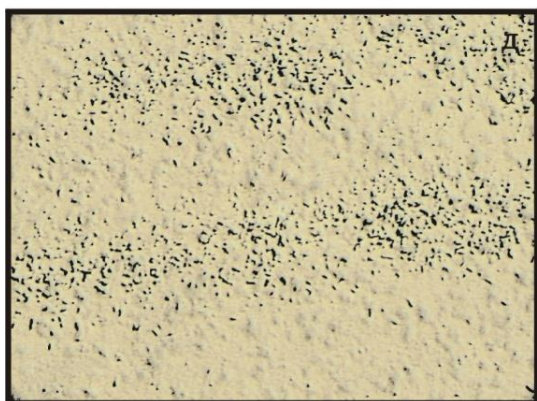
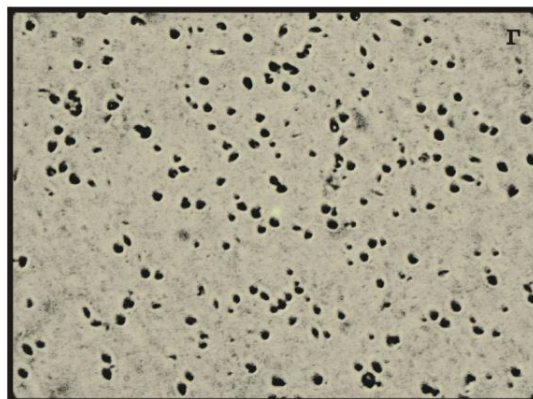
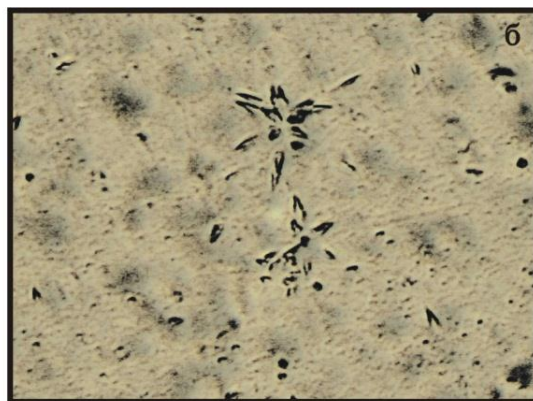
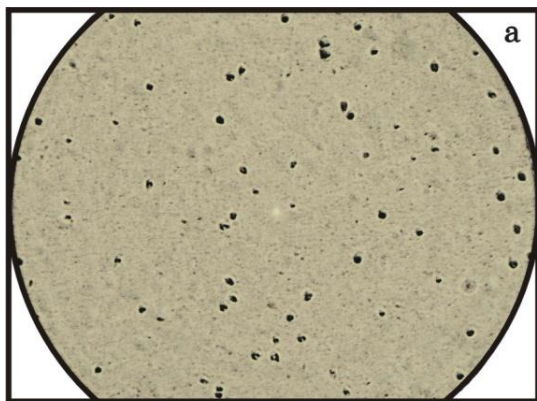
**Общий вид исследовательского
ядерного реактора ТПУ**

- Регистрация следов от осколков вынужденного деления урана осуществляется с помощью соответствующих детекторов.
- При содержании урана не меньше 10^{-10} г/г в качестве детектора **применяется лавсановая пленка толщиной 15–40 мкм, при более низких содержаниях – синтетическая слюда**, содержание урана в которой меньше, чем в исследуемом образце или стекло.
- **Плотность следов, полученная на лавсане, пропорциональна содержанию урана в образце,** величине нейтронного потока и некоторым постоянным, характеризующим детектор и образец.



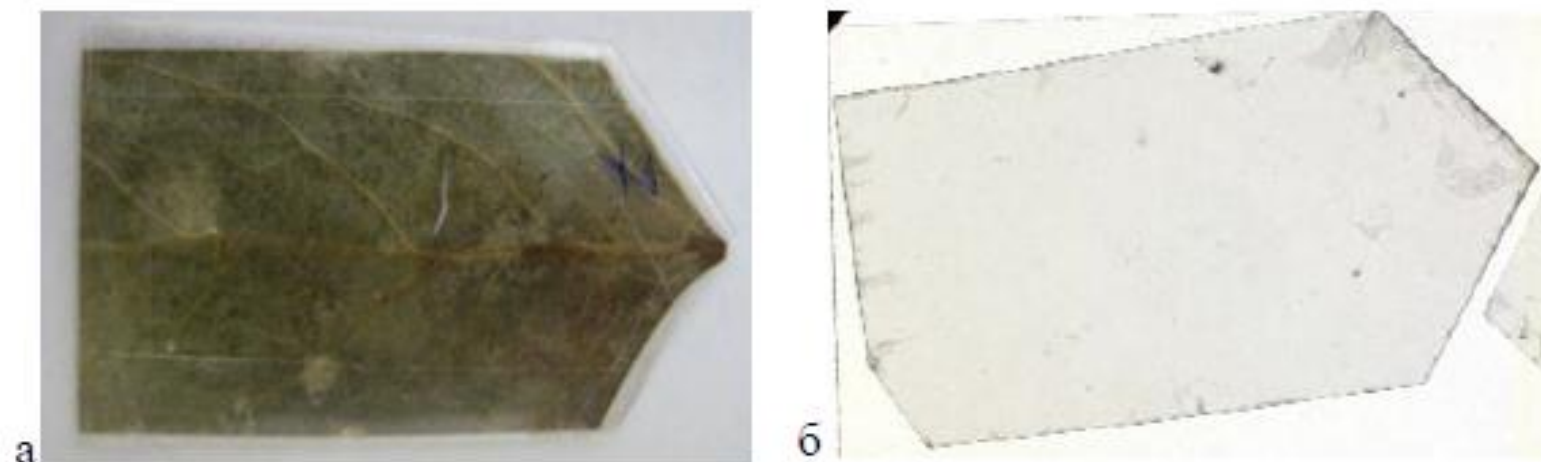
Лавсан

Синтетическая слюда



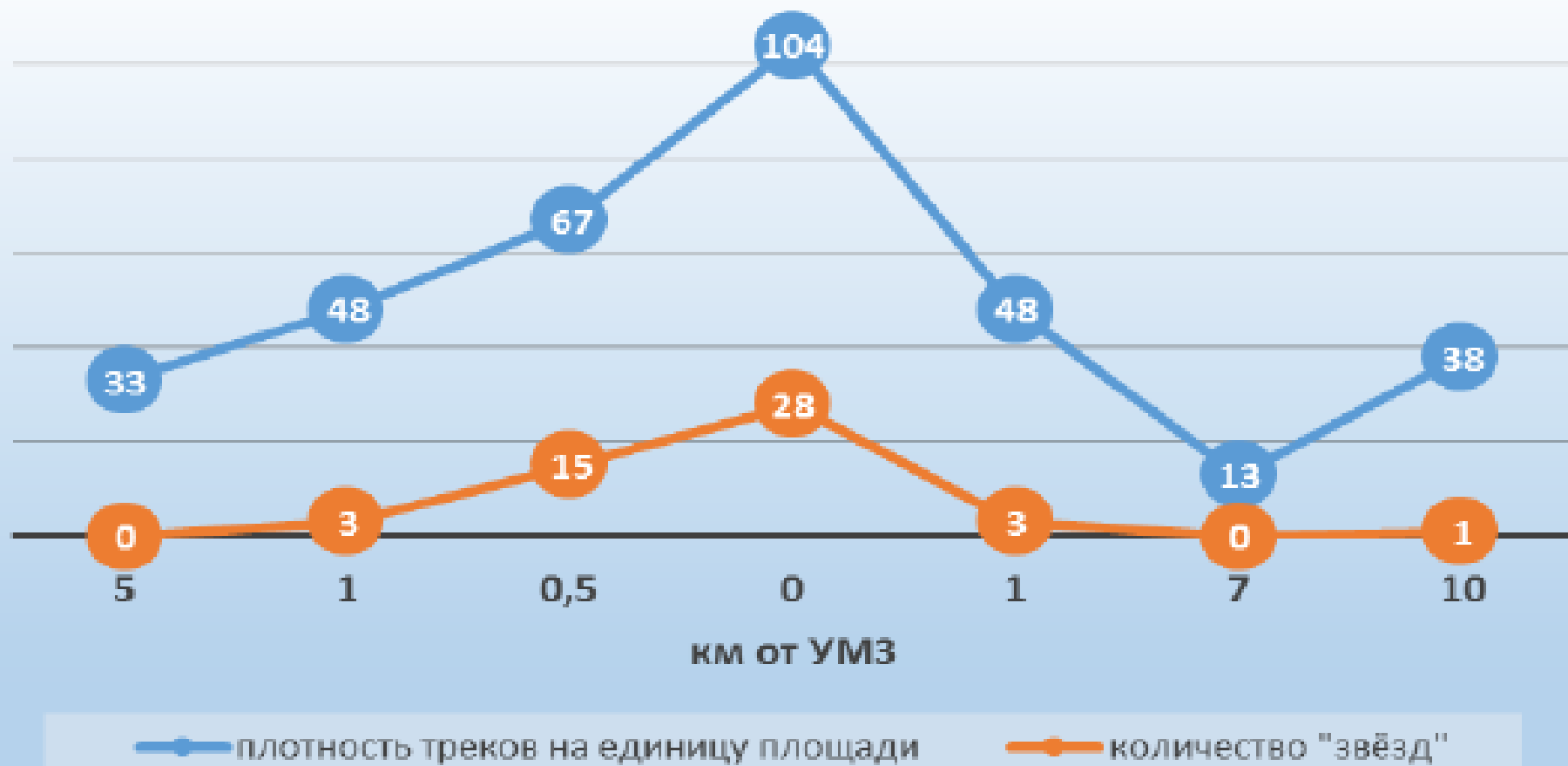
*Характер распределения урана в углях по данным f-радиографии.
Лавсановый детектор:
а – Равномерное распределение.
Увеличение 150Х.; б – Включения урансодержащих акцессориев ("звезды").
Увеличение 300Х.; в – Включения урансодержащих акцессориев ("звезды") с зоной обогащения ураном. Увеличение 300Х.; г – Сетчатое распределение урана. Увеличение 250Х.; д – Линейные зоны обогащения ураном. Увеличение 100Х.; е – Скопление треков субизометричной формы. Увеличение 100Х*

F-радиография растений



(Ялалтдинова А.Р., 2015)

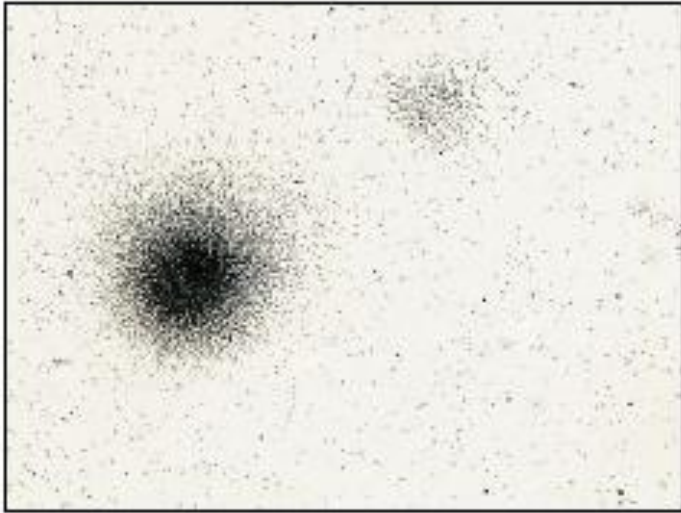
Подготовка пробы к f-радиографии: а – прямоугольный участок **листа тополя** с закрепленными детекторами; б – детектор после облучения и травления



(Ялалтдинова А.Р., 2015)

Изменение формы нахождения урана (плотности треков, количества неоднородностей) по мере удаления от Ульбинского металлургического завода

а)



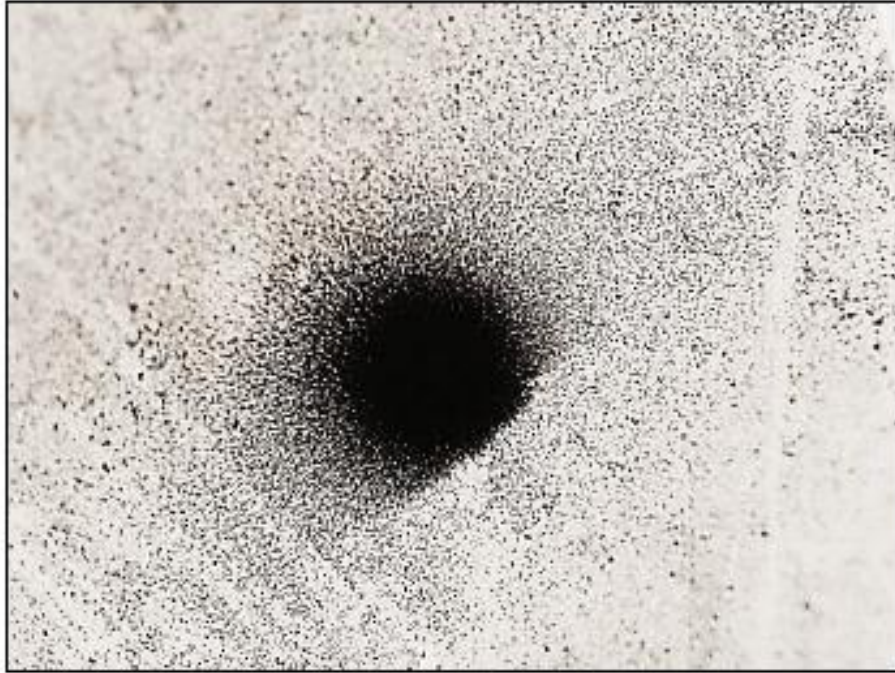
б)



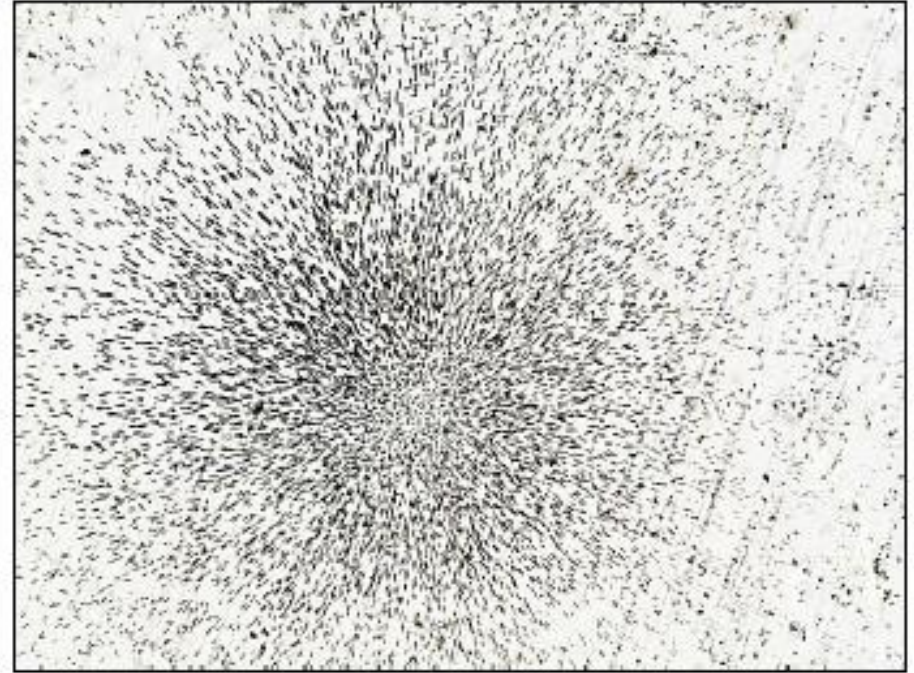
**Формы нахождения
делящихся радионуклидов
(U) в листе тополя,**
произраставшего вблизи
Ульбинского металлургического
завода по данным
f-радиографии : а –
микровключения собственных
минералов урана, увел. 50;
б – молекулярная форма
неструктурного рассеяния, увел.
200

(Ялалтдинова А.Р., 2015)

а)



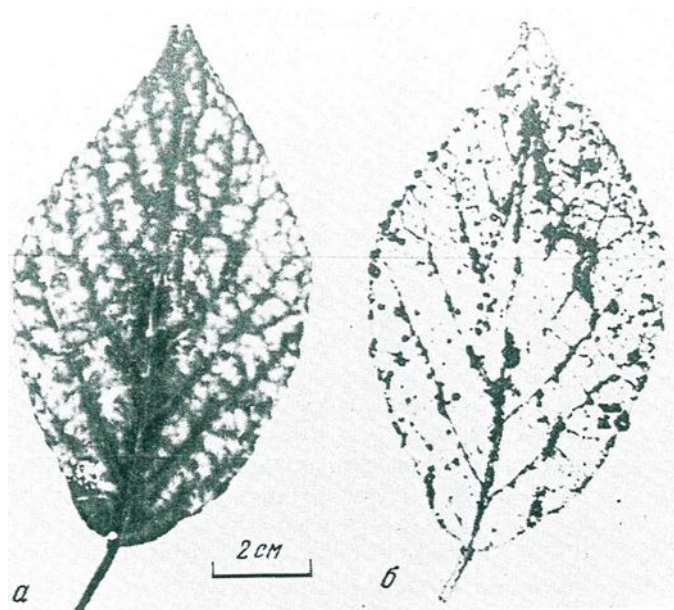
б)



(Ялалтдинова А.Р., 2015)

«Звезды», образовавшиеся при индуцированном делении радионуклидов (U), в пробе, отобранной на расстоянии 0,5 км от Ульбинского металлургического завода, а) увел. 50, б) увел.100

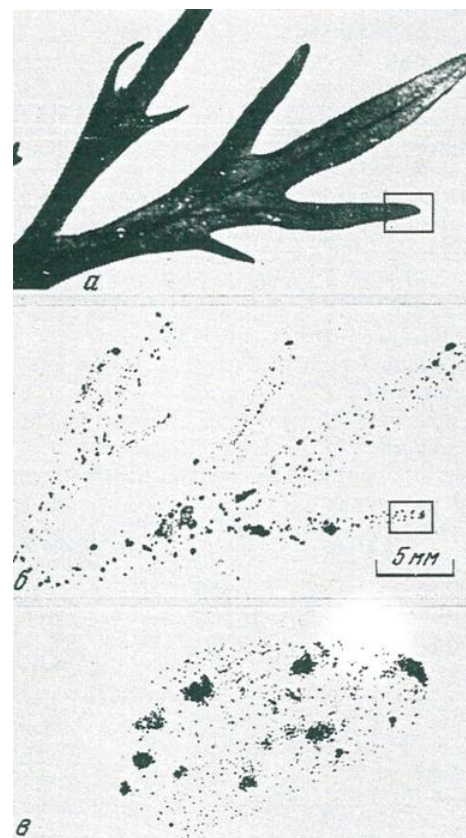
Биогеохимическая индикация природно-техногенных территорий методами радиографии (на примере Стрельцовского рудного района и района Чернобыльской АЭС)



Распределение урана в листе

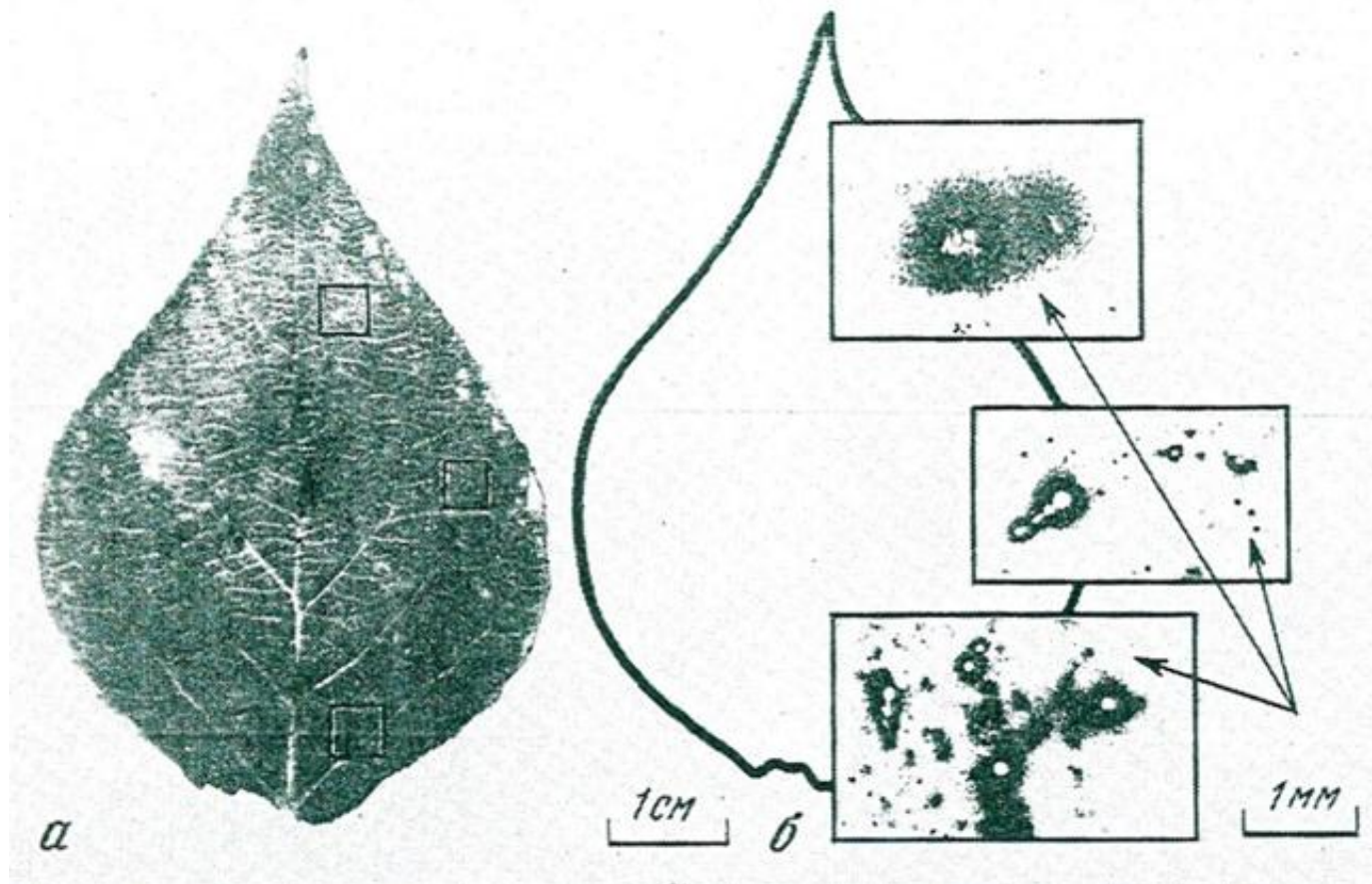
тополя, произрастающего вблизи отвалов уранового месторождения: а – лист тополя, б – детектор.

(Берзина И.Г., 1993)



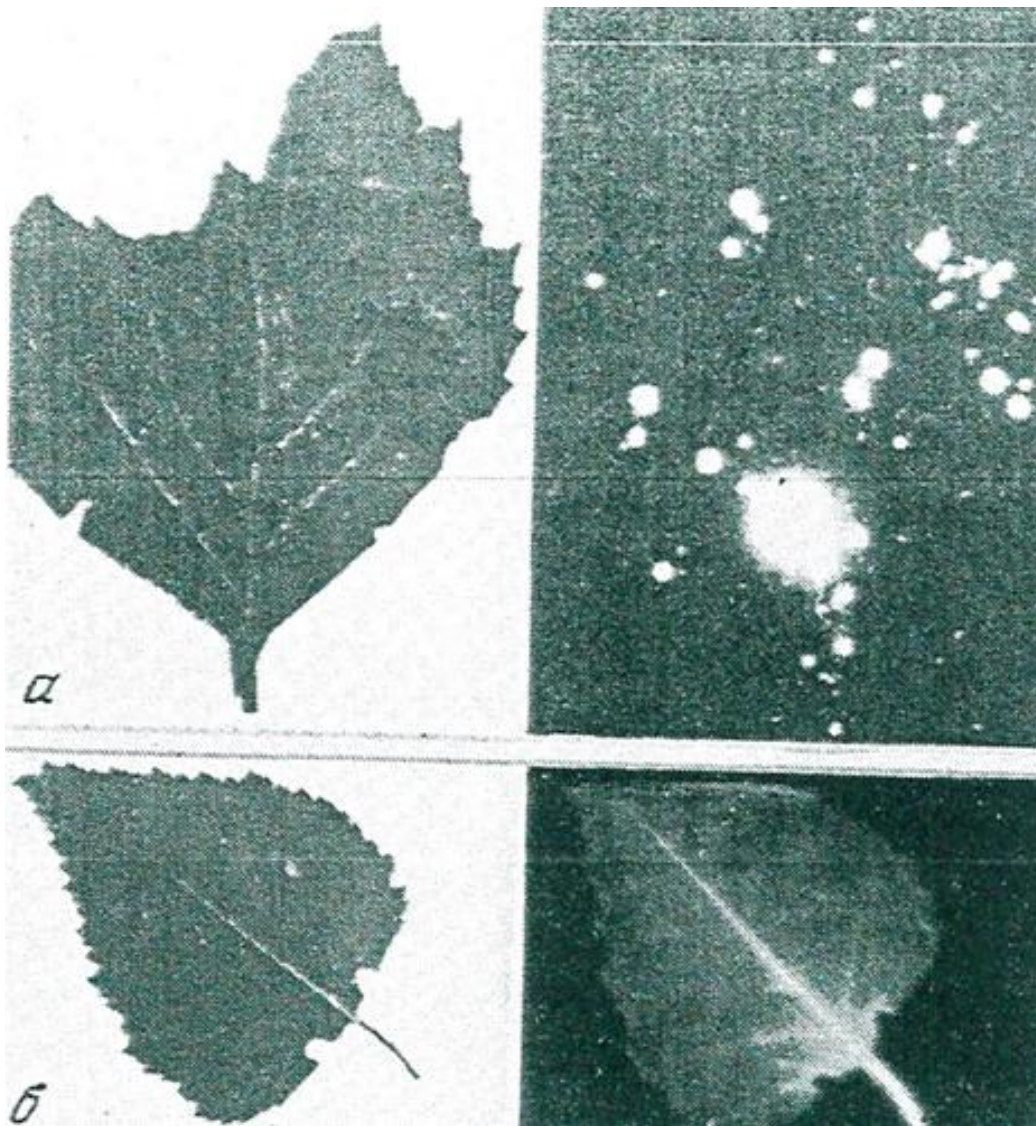
Распределение урана в листе

полыни, произрастающей вблизи уранового месторождения: а – лист полыни, б – общий вид детектора, в – часть детектора при большем увеличении.



Распределение урана в листе тополя, произрастающего в 20 км от уранового месторождения: а – лист тополя, б – детектор.

(Берзина И.Г., 1993)



**Распределение
гамма-излучателей
в листьях березы в
Чернобыльской
зоне:**

а – 1986 г.,
б – 1991 г.

(Берзина И.Г., 1993)

Проведенные И.Г. Берзиной (1993), Л.П. Рихвановым, Т.А., Архангельской (2002), А.Р. Ялалтдиновой (2015) геоэкологические исследования показали, что с помощью растений методами радиографии можно с высокой чувствительностью, точностью и наглядностью выявлять ореолы радиоактивного загрязнения окружающей среды, определять различные типы излучателей и выявлять пути поступления радиоактивных элементов в растения.

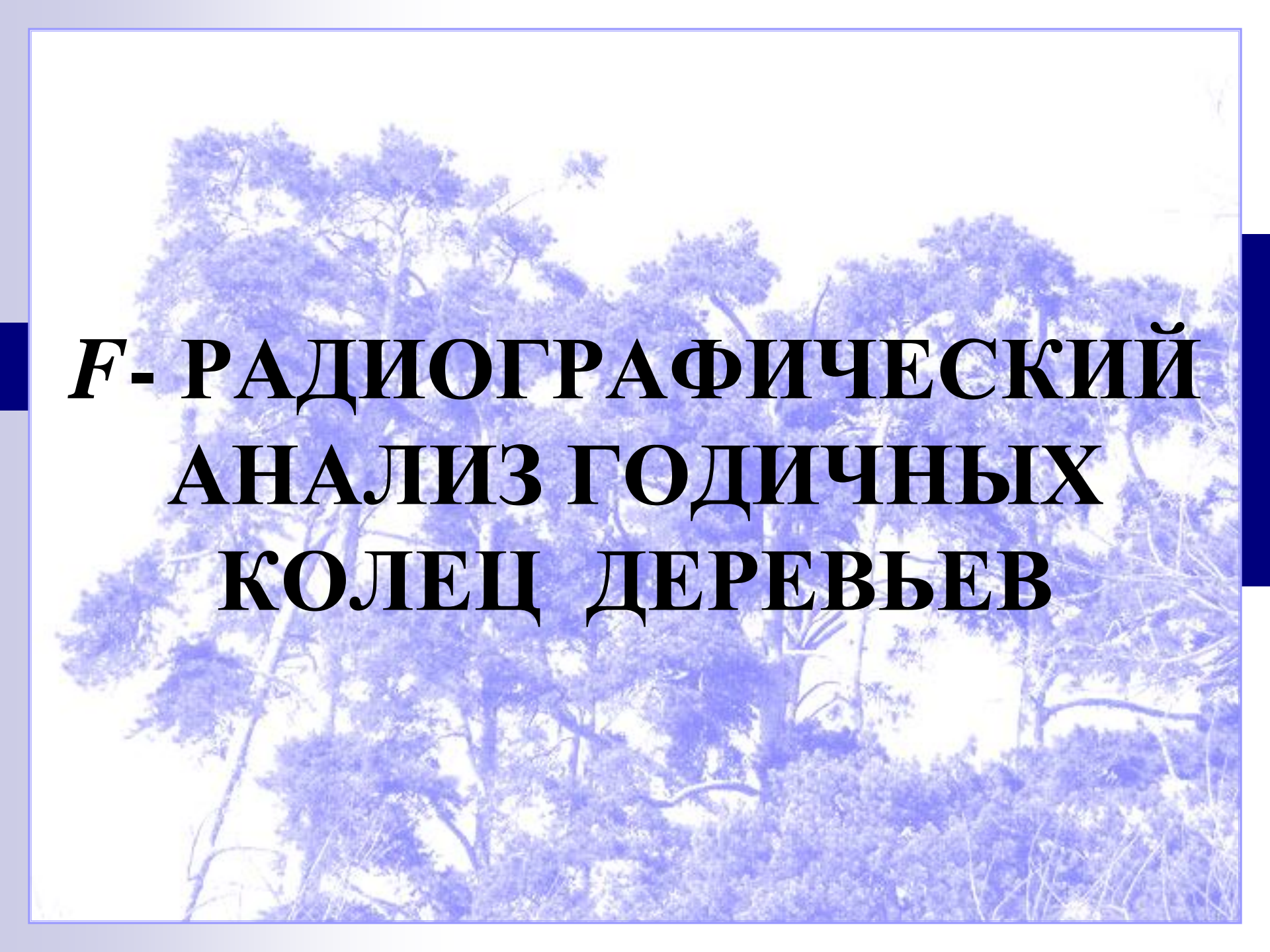
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берзина И.Г. Выявление радиоактивного загрязнения окружающей среды методом радиографии // Геохимия, 1993. - №3, с. 449-456.


Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Несветайло В.Д. Изучение уровня и динамики накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев // Геохимия, 2002. № 11.

Флеров Г.Н., Берзина И.Г. Радиография минералов, горных пород и руд. М.: Атомиздат, 1979. – 224 с.

Ялалтдинова А. Р. Элементный состав растительности как индикатор техногенного воздействия на территории Г. Усть-Каменогорска: дис. ... канд. геол-минерал. наук. – Томск, 2015. – 172 с.



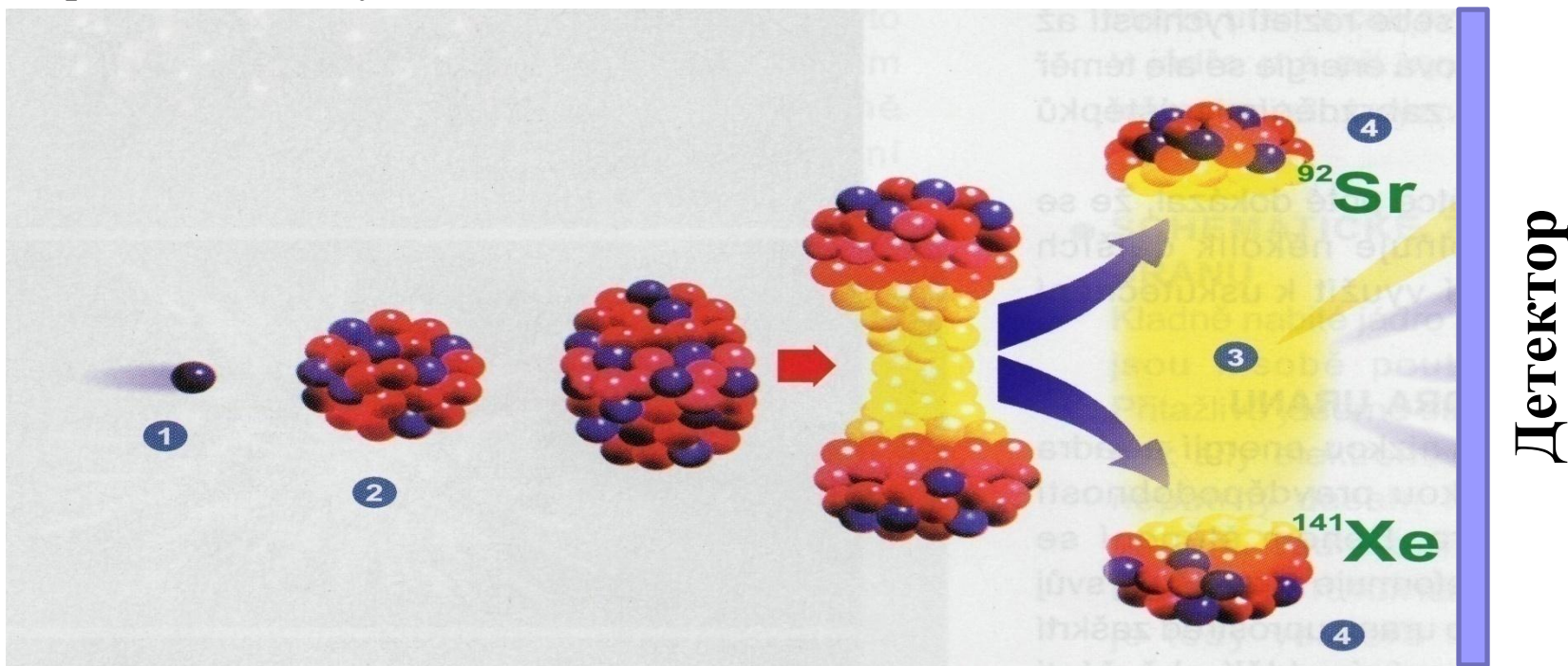
***F*- РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ
АНАЛИЗ ГОДИЧНЫХ
КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ**

A cross-section of a tree trunk showing distinct annual growth rings. The text is overlaid on the image.

Применение метода *f*-радиографии для исследования годовичных колец деревьев позволяет оценивать содержание *делящихся радионуклидов* ($^{233,235}\text{U}$, $^{239,241}\text{Pu}$, $^{241,242}\text{Am}$) накопленных в годовичных кольцах деревьев.

Сущность метода:

Метод f-радиографии (осколочной радиографии) - ядерно-физический метод анализа, позволяющий с высокой чувствительностью выявлять пространственное распределение делящихся радионуклидов и определять их локальные и общие концентрации в исследуемом объекте



1- нейтрон; 2 – ядро ^{235}U ($^{239,241}\text{Pu}$, $^{241,242}\text{Am}$); 3 – деление; 4 – осколки деления

Детектор – лавсановая пленка, регистрирует следы от осколков деления (треки). Количество треков, зафиксированных на детекторе, пропорционально содержанию делящихся радионуклидов в исследуемом объекте

1. Подготовка образцов древесины для f -радиографического анализа



Оптимизация отбора и подготовки образцов древесины для f -радиографического анализа

1.



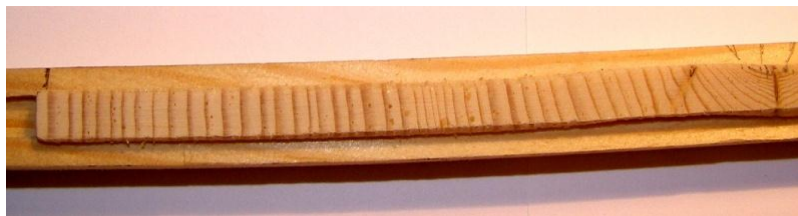
Керны древесины

2.



Керн древесины, наклеенный на деревянную основу

3.



Образец древесины с зачищенной поверхностью

4.



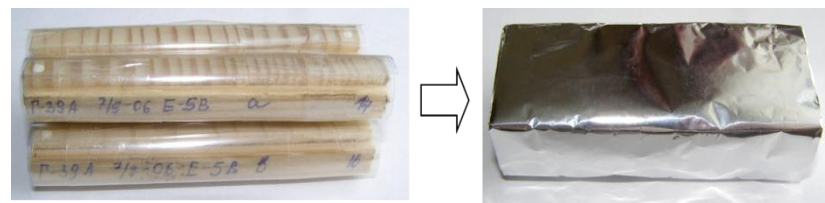
Образец, на поверхность которого нанесен урановый эталон и лавсановый детектор

5.



Образцы, покрытые трехкратным слоем лавсановой пленки

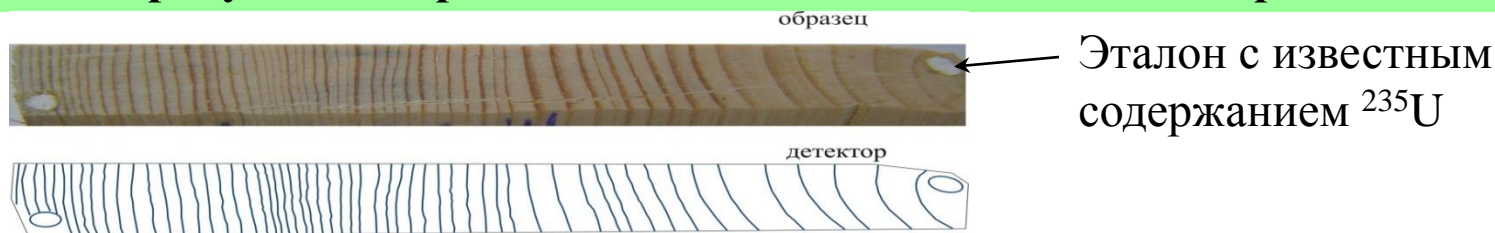
6.



Упаковка образцов для облучения в канале реактора

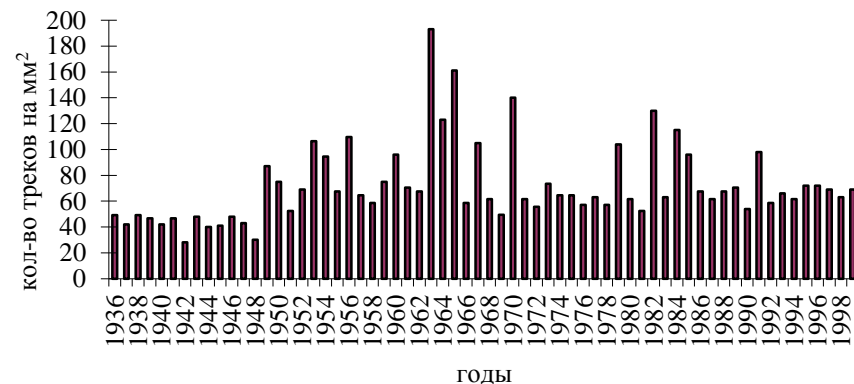
Определение уровня накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев

1. Облучение образцов потоком тепловых нейтронов на ядерном реакторе
2. Снятие детектора с образца и его травление по стандартной методике
3. Вынесение рисунка датированных годовых колец на детектор



4. Изучение детектора в проходящем свете с использованием микроскопа и подсчет треков от осколков деления на 30 элем. площадках в каждом годовом кольце

| | 1936 г | 1937 г | 1938 г | 1939 г | .... | .... | 1998 г | 1999 г |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|------|------|--------|--------|
| 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | .... | .... | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | .... | .... | 4 | 0 |
| 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | .... | .... | 3 | 2 |
| 4 | 4 | 2 | 0 | 2 | .... | .... | 3 | 1 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 29 | 1 | 0 | 1 | 2 | .... | .... | 3 | 3 |
| 30 | 2 | 3 | 2 | 2 | .... | .... | 2 | 3 |
| Среднее элем. пл. | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,7 | .... | .... | 1,5 | 1,4 |
| Среднее (мм ²) | 60 | 54 | 51 | 59 | .... | .... | 51 | 48 |



5. Пересчет плотности треков от осколков деления в соответствующее ей количественное содержание делящихся радионуклидов (по изотопу ^{235}U)

Статистическая обработка экспериментальных данных

1. Оценки числовых характеристик выборок плотности треков в годичных кольцах R1 и R2

| Радиус 1 (R1) | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | n | | s_x | s | Me | A | s_A | E | s_E |
| 1987 | 30 | 1,73 | 1,53 | 0,28 | 2,00 | 0,30 | 0,43 | -1,02 | 0,83 |
| 1988 | 30 | 1,57 | 1,17 | 0,21 | 2,00 | -0,03 | 0,43 | -0,92 | 0,83 |
| | | | | | | | | | |
| 2003 | 30 | 1,40 | 1,45 | 0,27 | 1,00 | 1,26 | 0,43 | 1,99 | 0,83 |

2. Показатели критериев сравнения (χ^2 -критерий, Колмогорова-Смирнова)

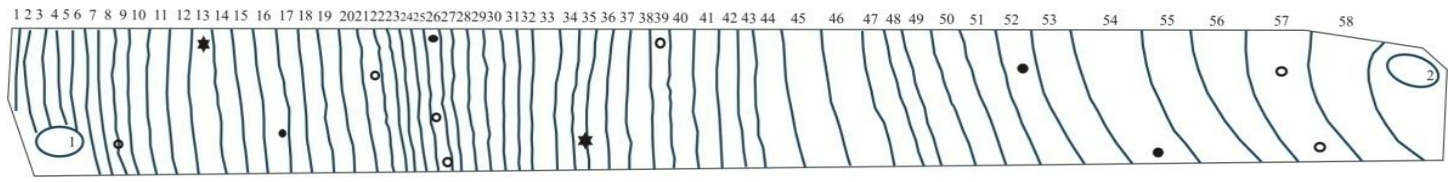
выборочного распределения треков в годичных кольцах R1 и R2 с нормальным законом

| | R1 | | | | R2 | | | |
|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | P_{χ^2} | P_{K-C} | t_1 | t_2 | P_{χ^2} | P_{K-C} | t_1 | t_2 |
| 1987 | 0,08 | 0,16 | 0,70 | -1,22 | 0,07 | 0,39 | 2,19 | 1,10 |
| 1988 | 0,02 | 0,04 | -0,08 | -1,10 | 0,002 | 0,04 | 3,08 | 1,33 |
| 1989 | 0,09 | 0,07 | 3,45 | 3,17 | 0,08 | 0,20 | 0,27 | -1,44 |
| 1990 | 0,07 | 0,12 | 0,73 | -0,04 | 0,06 | 0,12 | 1,23 | -1,18 |
| 1991 | 0,21 | 0,16 | 1,86 | 0,57 | 0,03 | 0,25 | 1,99 | 0,64 |
| 1992 | 0,002 | 0,07 | -0,44 | -1,28 | 0,10 | 0,12 | 3,65 | 3,39 |
| 1993 | 0,32 | 0,32 | 1,24 | -0,68 | 0,001 | 0,04 | 1,61 | -1,23 |
| 1994 | 0,37 | 0,47 | 0,44 | -1,26 | 0,06 | 0,05 | 1,54 | 0,18 |
| 1995 | 0,01 | 0,20 | 1,13 | 0,10 | 0,06 | 0,25 | 1,22 | -0,38 |
| 1996 | 0,01 | 0,01 | 3,16 | 2,85 | 0,02 | 0,16 | 2,13 | 0,69 |
| 1997 | 0,24 | 0,39 | 0,56 | -0,96 | 0,01 | 0,25 | 2,64 | 2,38 |
| 1998 | 0,001 | 0,12 | 0,23 | -1,05 | 0,06 | 0,32 | 3,37 | 3,80 |
| 1999 | 0,21 | 0,20 | 0,23 | -1,07 | 0,12 | 0,12 | 0,97 | -1,45 |
| 2000 | 0,11 | 0,25 | 3,04 | 2,24 | 0,08 | 0,12 | 2,85 | 1,84 |
| 2001 | 0,06 | 0,09 | 1,47 | -0,89 | 0,001 | 0,03 | 4,01 | 4,19 |
| 2002 | 0,14 | 0,09 | 0,69 | -1,50 | 0,09 | 0,07 | 1,55 | -0,89 |
| 2003 | 0,41 | 0,12 | 2,95 | 2,39 | 0,03 | 0,01 | 2,51 | 0,99 |

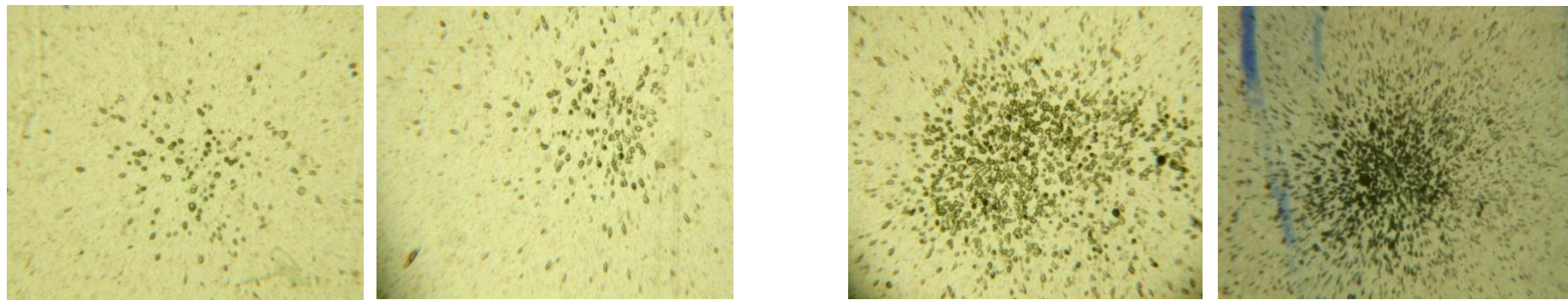
3. Показатели критериев сравнения (Стьюдента, Манна-Уитни, двухвыборочный Колмогорова-Смирнова) средних значений плотности треков в годичных кольцах R1 и R2

| | P_{t-} критерий | P_{F-} критерий | $P_{\text{Манна-Уитни}}$ | $P_{\text{Колмогорова-Смирнова}}$ |
|-------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1987 | 0,81 | 0,71 | | |
| 1988 | | | 0,19 | > 0,10 |
| 1989 | | | 0,34 | > 0,10 |
| 1990 | 0,49 | 0,19 | | |
| 1991 | | | 0,91 | > 0,10 |
| 1992 | | | 0,29 | > 0,10 |
| 1993 | | | 0,03 | > 0,10 |
| 1994 | 0,92 | 0,75 | | |
| 1995 | | | 0,59 | > 0,10 |
| 1996 | | | 0,79 | > 0,10 |
| 1997 | | | 0,52 | > 0,10 |
| 1998 | | | 0,61 | > 0,10 |
| 1999 | 0,14 | 0,96 | | |
| 2000 | 0,63 | 0,45 | | |
| 2001 | | | 0,79 | > 0,10 |
| 2002 | 1,00 | 0,92 | | |
| 2003 | | | 0,96 | > 0,10 |

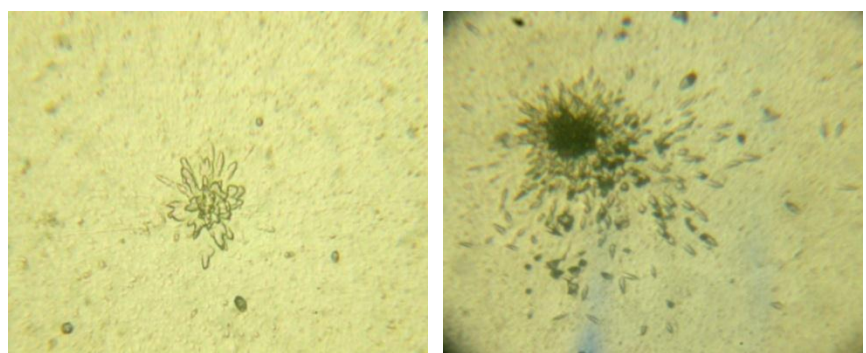
Оценка пространственного распределения делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев



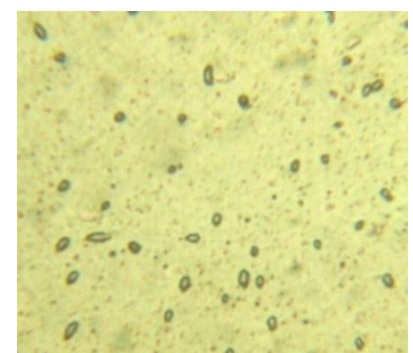
Карта-схема детектора: –скопление треков в виде «звезда», ○ – скопление треков с невысокой плотностью, ● – скопление треков с высокой плотностью



Скопление треков с различной плотностью на лавсановом детекторе, увеличение × 100

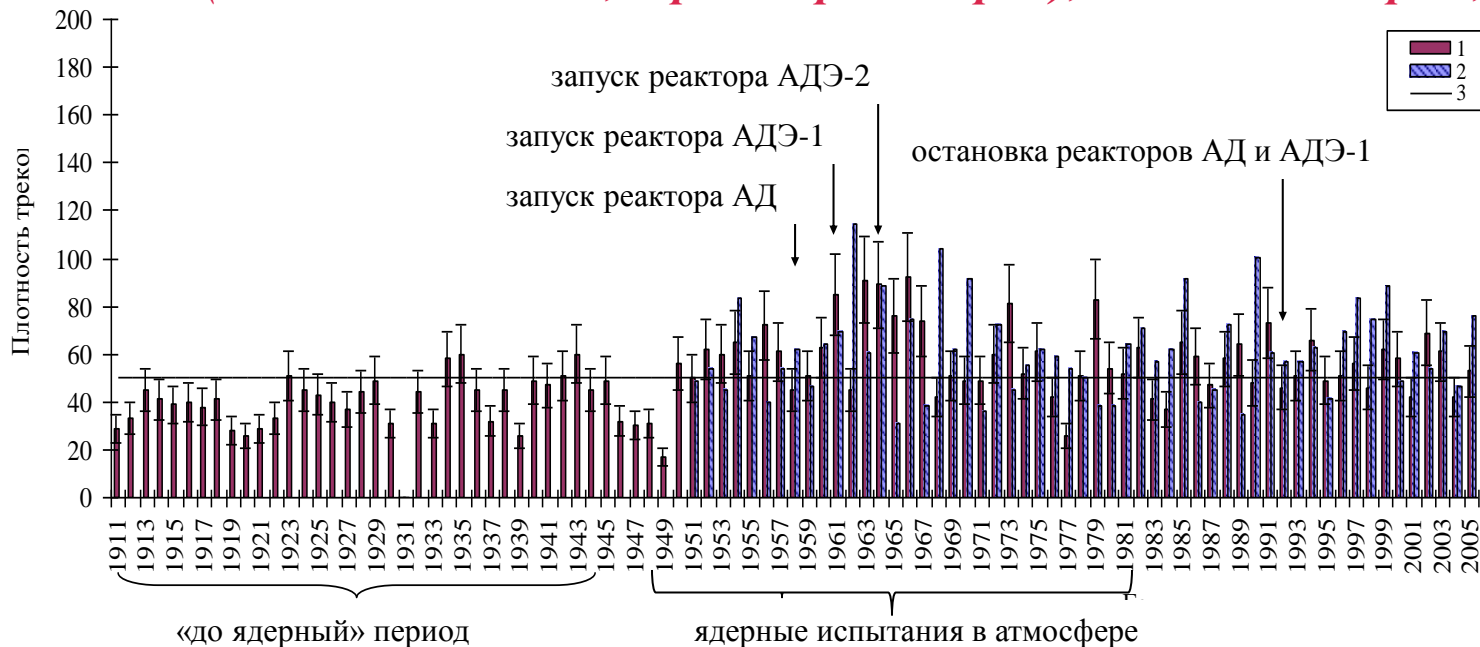


Скопление треков «звезда» на лавсановом детекторе, увеличение × 200



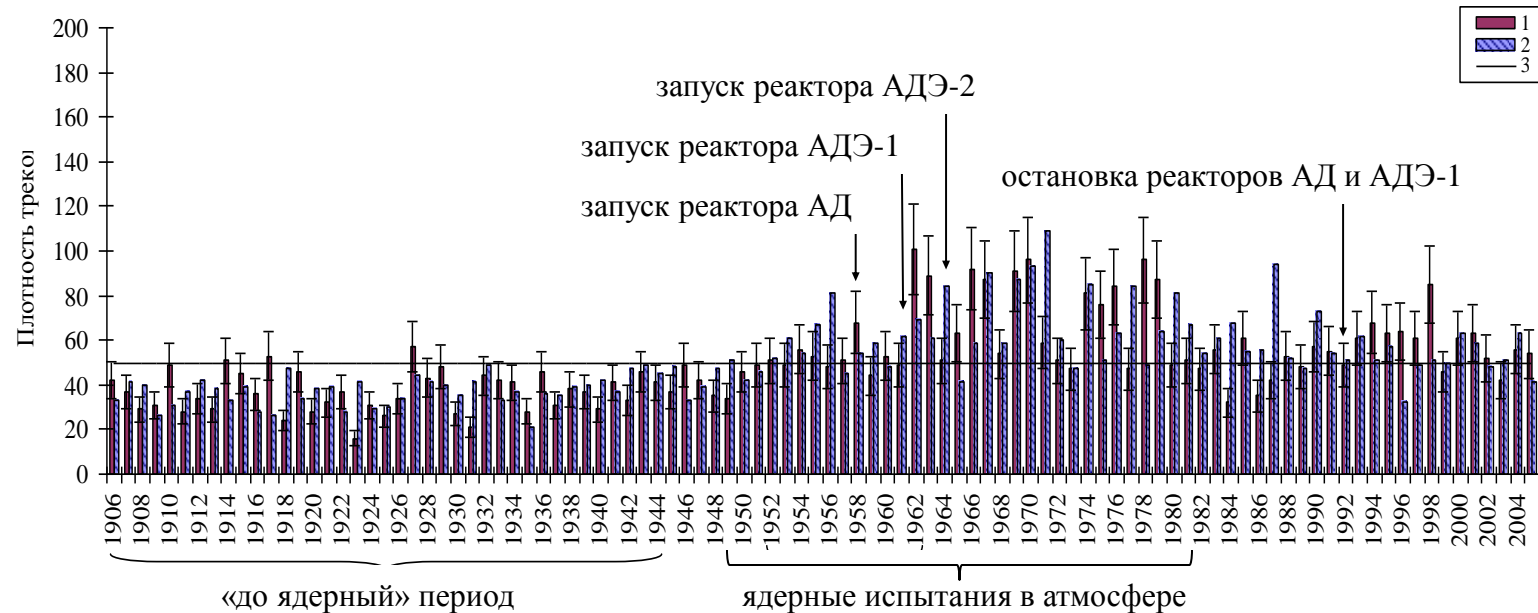
Равномерное распределение треков на лавсановом детекторе, увеличение × 200

Плотность треков от осколков деления в годовичных кольцах образцов древесины (зона влияния ГХК, Красноярский край); высота отбора 1,30...1,40 м



спил № 1Б-Б

1 – образец № 7;
2 – образец № 8;
3 – фон
(50 ± 7 треков/мм²)



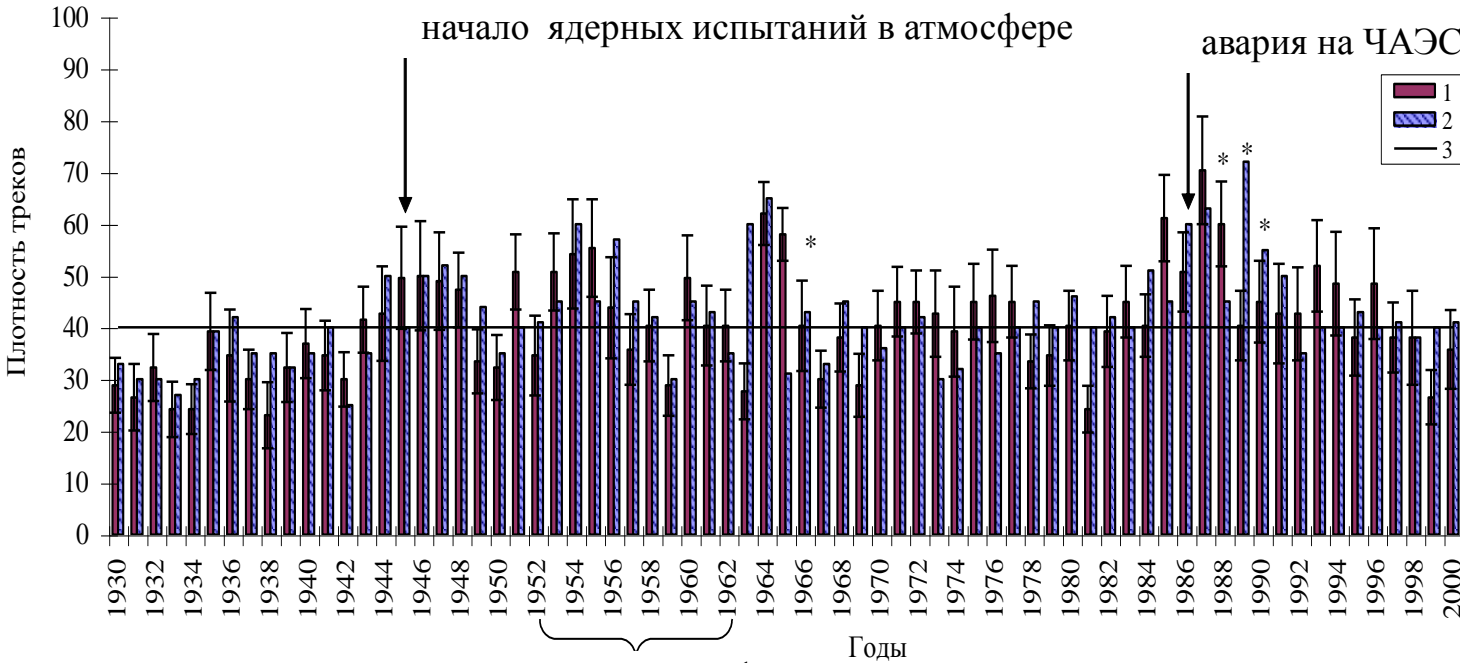
спил № 3Б-Б

в 20...25 м от
дерева № 1

1 – образец № 11;
2 – образец № 12;
3 – фон
(50 ± 7 треков/мм²)

Плотность треков от осколков деления в годовичных кольцах деревьев Чехии

территория воздействия аварии на Чернобыльской АЭС



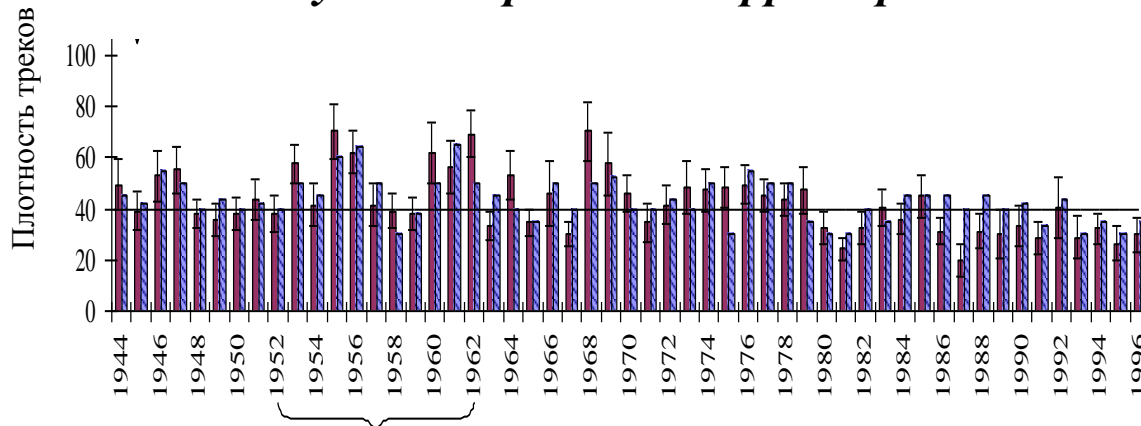
спил № 1Ч

г. Часлав

1 – образец № 21,
2 – образец № 22,
3 – фон
(40 ± 6 треков/мм²),
* – наличие в
годовичном кольце
скопления треков в
виде «звезда» .

интенсивные ядерные испытания в атмосфере

условно-фоновая территория



интенсивные ядерные испытания в атмосфере