

2.6 Компьютерная обработка авторадиограмм

Компьютерную обработку АРГ, представленную в виде двумерного численного массива, обычно начинают с улучшения качества изображения (контрастности, яркости и т.п.). На **Рис. 7.** приведён пример увеличения контраста авторадиограмм (срез облучённой ускоренными электронами кабельной изоляции, насыщенной парами бензола, меченого ^{14}C (β -излучатель)). Увеличение контраста и выделение деталей «рельефа» проводили путем двумерного дифференцирования изображения с последующим подавлением шумов. Видно, что искусственное создание «косого освещения» позволяет выявлять детали картины, плохо различимые на исходной АРГ.

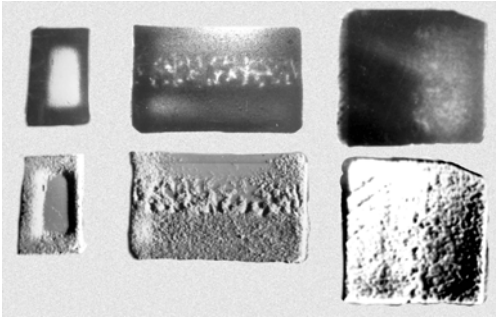


Рис.7. Использование ЭВМ для обработки авторадиограмм: *Вверху* – исходные авторадиограммы; *внизу* – авторадиограммы после обработки. а – облученный с одной стороны ускоренными электронами блок полиэтилена (направление облучения по стрелке) Продольный срез после диффузии меченого бензола; б – то же, что а, сорбция меченого ^{14}C бензола на продольном срезе; в – фторированный с одной стороны (по стрелке) блок полиэтилена. Продольный срез после диффузии меченого бензола.

Компьютерную обработку используют также для удаления грубых сбоев (непроявленных зёрен, пятен проявителя, вуали и т.п.) и выделения сигнала над шумом. Иногда интересные для анализа зоны АРГ декорируют цветом. Затем строят изолинии, проходящие через участки с одинаковой плотностью потемнения (**Рис. 6**).

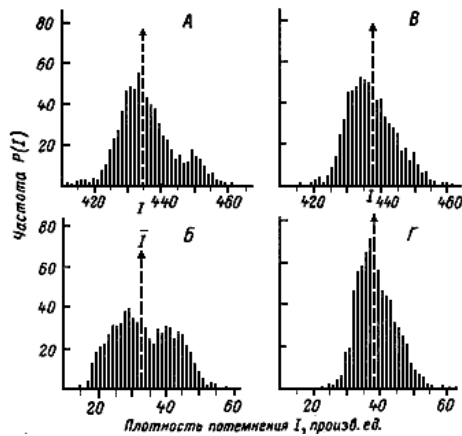


Рис. 8. Дифференциальные функции распределения плотности распределения (обработка двумерных дозовых полей **Рис. 6**).

Из полученных результатов строится некоторая выборка, которую можно затем подвергнуть статистической обработке. В качестве примера рассмотрим топологические карты распределения радона по четырём плёнкам полипропилена различной сферолитной структуры. Из данных макроавторадиографии (использовался тонкий фотослой), построенных в виде изолиний, видно, что дозовое поле, создаваемое радоном и продуктами его распада, находящимися в объёме полимера, имеет неоднородный характер. Проводить сравнение степени пространственной однородности дозовых полей удобно по выборкам – графикам зависимости частоты появления данной величины плотности потемнения от самой этой величины потемнения. Подобные выборки представлены на **Рис. 8**, как результат обработки двумерных массивов, представленных изолиниями на **Рис. 6**. Видно, что плотности распределений почернений фотопластинки далеки от нормального распределения, ассиметричны (распределены в сторону больших плотностей потемнения), а в некоторых случаях имеют бимодальный характер. Подобные распределения обычно обрабатывают, рассчитывая начальные, центральные и основные моменты распределений (главными из которых является математическое ожидание, дисперсия, асимметрия и эксцесс).

Далее переходят к математической обработке результатов, с целью выявления зон с неравномерным распределением дозового поля, расчёта геометрических параметров этих зон и нахождения пространственного распределения источников излучения.

Интерпретация авторадиограмм сводится к одному из следующих вариантов сопоставления:

- 1) авторадиограммы с микроструктурой того же участка образца;
- 2) экспериментальное изображение с набором расчётных изображений, полученных в предположении определённого распределения изотопа в микроструктуре;
- 3) микроструктуры с восстановленным на авторадиограмме путём решения обратной авторадиографической задачи распределением.

Поставленные задачи можно решить путём создания математического и программного обеспечения техники авторадиографии. Коротко остановимся на компьютерных методах обработки авторадиограмм.

Рассматривая сопоставление авторадиограммы с микроструктурой образца ограничимся двумя примерами. На **Рис.** приведено сравнение фотографий структуры полиэтилена в поляризованном свете и АРГ тех же участков полимера, насыщенных красителем, меченым тритием. Хорошо видно как меченое вещество декорирует сферолиты, причем различные типы сферолитов декорируются по-разному. Измерив локальную плотность потемнения можно оценить степень дефектности различных участков сферолитов.

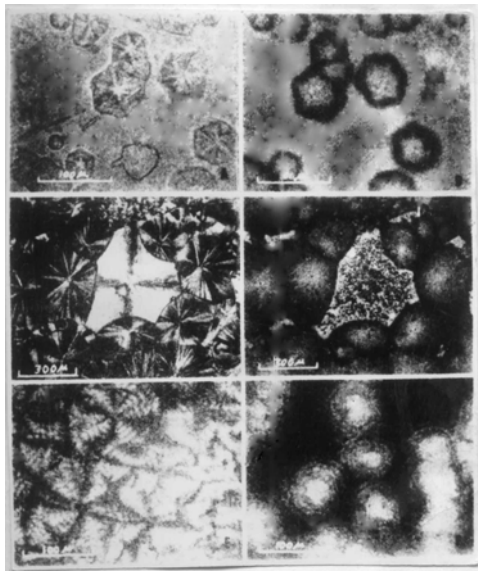


Рис. 9. Распределение меченного тритием красителя в полиэтилене: Слева - фотографии структуры полимера, снятые в поляризованном свете (отчетливо видны сферолиты), справа - авторадииограммы, снятые с тех же участков образцов.

Перейдём теперь ко второму варианту сопоставления.

Если источником излучения является тело простой геометрической формы, например – сфера) то можно рассчитать набор плотностей потемнения для сфер различного диаметра, с различной удельной активностью и различной глубиной залегания, после чего, сопоставив по каким-либо критериям экспериментальную картину потемнения с теоретическими, найти основные параметры источников. Аналогичную процедуру можно проделать и с набором источников сферической формы, находящихся на разных глубинах.

На **Рис. 10а** приведены кривые распределения плотности потемнения АРГ при движении от центра объекта (диск, полая сфера, шар) к периферии. На **Рис.10б** те же кривые пронормированы на плотность потемнения в центре изображения. Видно, что хотя кривые для различных источников и различаются, но различие это не слишком велико и при решении обратных задач методом подгонки к заданной геометрии можно ожидать существенных трудностей, особенно если форма источника и характер распределения в нем радионуклида заранее неизвестны.

Рассмотренный выше метод трудоемок и, главное, не гарантирует нахождения истинной модели распределения зонда по объему материала. Он эффективен только тогда, когда заранее известна модель строения среды и проблема заключается в подборе ее параметров. В ряде случаев построение достаточно определенной модели затруднительно: наоборот, она сама является предметом изучения.

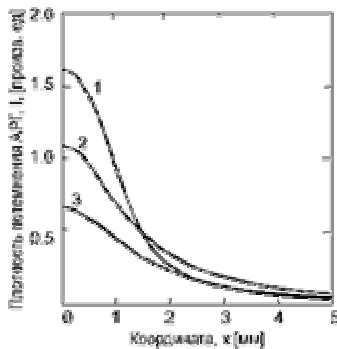
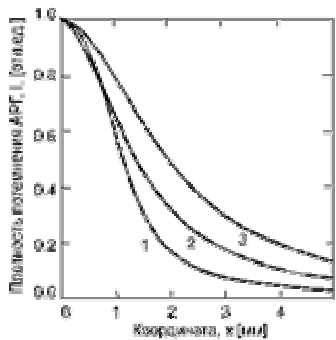


Рис. 10. Кривые распределения плотности потемнения авторадииограммы для источников излучения различной формы. Кривая 1 - диск, кривая 2 - полая сфера, кривая 3 – шар а) Одинаковая удельная активность источников; б) Нормировка на плотность потемнения авторадииограммы в центре изображения.



Обратная задача радиометрии – это задача определения формы возмущающего тела, активность которого отлична от активности окружающей среды, по аномалии радиационного поля, создаваемого им на поверхности исследуемого образца. Имеет место нелинейное уравнение

$$\int_a^b \ln \frac{(x - \xi)^2 + H^2}{(x - \xi)^2 + [H - z(\xi)]^2} d\xi = u(x) = \frac{2\pi}{a_2 - a_1} \Delta g(x), \quad (4)$$

где $\Delta g(x) = -\frac{\partial I}{\partial z} \Big|_{z=0}$ - измеренная на поверхности образца аномалия

интенсивности радиационного поля; x, ξ - координаты вдоль поверхности образца ($z=0$); среда считается состоящей из двух частей с удельными активностями a_1 и a_2 , разделённых границей $\hat{z}(x) = -H$ всюду, кроме промежутка $a \leq x \leq b$, где $\hat{z}(x) = -H + z(x)$, что и создаёт аномалию напряжения силы тяжести, т.е. зависимость u от x ; I – интенсивность излучения от активности $a_2 - a_1$; $z(\xi)$ – искомая граница, разделяющая две части среды.

При хаотическом характере аномалий значительно эффективнее третий вариант сопоставления - метод аналитического продолжения радиационных полей. Суть его состоит в том, чтобы исходя только из основных закономерностей, управляющих поведением радиационного поля (или какого-то другого линейно связанного с ним поля, например, поля двумерной плотности потемнения АРГ), провести такую трансформацию исходных экспериментальных данных, основываясь на которой можно было бы вынести определенные суждения о строении исследуемой среды. Метод позволяет из измерений в части пространства (на поверхности образца) воссоздать поле в более широкой области (в объеме образца). Геометрия поля в этой расширенной области лучше отразит особенности распределения источника радиоактивного излучения, а, следовательно, и особенности строения среды.

Метод пригоден для общей задачи расчёта функции рассеяния для произвольных и сколь угодно сложных функций объекта.

Основной подход предусматривает расчёт функции рассеяния в данной точке эмульсионного слоя путём интегрирования доз, создаваемых элементарными объёмами источника. Громоздкий результат подлежит численному расчёту на ЭВМ; иногда его с приемлемой точностью удаётся свести к специальным функциям.

Задача распадается на несколько последовательных стадий: монотонное концентрационное поле, нарушаемое отдельными скоплениями зонда → дозовое поле с возмущениями → плотность потемнения АРГ с аномалиями, подлежащими интерпретации с целью определения пространственного расположения радионуклида - источника излучения.

С математической точки зрения задача восстановления поля источников излучения (γ - или жесткое β -излучение, поглощением которых в среде можно пренебречь, сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода.

$$I(x, y) = I_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\ell} C(x, y, z) K(x, y, z) dx dy dz \quad (5)$$

Замечание. К некорректным задачам, требующим решения многомерных вариантов уравнения Фредгольма относятся такие проблемы: как редукция наблюдений микрообъектов на аппаратную функцию системы (т.е. учет размытия изображения за счет рассеяния излучения и др. процессов), восстановление пространственной структуры объекта по его двумерным проекциям, обратная задача томографии, т.е. - задача анализа аномалий в плотности потемнения АРГ с целью определения формы возмущающего тела, свойства которого отличны от свойств окружающей среды и др.

В ряде случаев, если известно ядро уравнения (5), K , уравнение Фредгольма можно решить аналитически и по двумерной функции плотности потемнения $I(x, y)$ найти трёхмерную функцию распределения концентрации радионуклида – источника излучения – по объёму образца, $C(x, y, z)$. В сложных случаях решение уравнения (5) проводят численными методами.

В практике использования метода автордиографии для материаловедческих целей часто встречаются концентрационные (и, следовательно, дозовые поля и поля потемнений АРГ) сложной структуры. Эти поля представляют собой непрерывное наложение и взаимный переход друг в друга множества аномалий. Для выявления аномалий, вызванных интересующими нас объектами, целесообразно преобразовать экспериментальную информацию. Это преобразование может быть осуществлено математическим продолжением картины аномалий, наблюдаемой на поверхности образца, в верхнее полупространство, на "высоту птичьего полета", с которой можно лучше увидеть общие закономерности поля, отделить от фона детали, или в нижнее полупространство вплоть до источников аномалий, что позволяет, например, определить глубины залеганий скоплений зонда.

Существуют ряд способов трансформации некоторого физического поля путем его осреднения, простого и весового, вычисления производных наблюдаемой величины, частотного анализа и других приемов. Цель трансформации радиационного поля состоит в возможно более полном разделении аномалий, которые вызываются источниками различной физической природы, залегающими на разных глубинах. Трансформация поля есть шаг на пути его интерпретации, во многом облегчающий качественное решение поставленной задачи. Однако ни в одном из методов трансформации практически невозможно достичь полного выделения чистых аномалий от монотонно изменяющихся источников.

Ни одним из методов трансформации невозможно выделить в аномальной картине какие-либо особенности, не содержащиеся в исходных данных хотя бы в неявном виде. Трансформация поля лишь подчеркивает, выделяет те или иные его детали, например, зоны больших градиентов поля, слабые вторичные максимумы и др. Должны быть выбраны такие приемы трансформации поля, которые выделили бы и подчеркнули интересующие нас особенности поля и тем самым облегчили их дальнейшую интерпретацию.

Наиболее обоснованным с физической точки зрения методом трансформации поля (например, поля плотностей потемнения АРГ) во внешнее пространство является аналитическое его продолжение. Если известно распределение радиационного поля на поверхности образца, то можно вычислить его распределение во внешнем пространстве, свободном от возмущающих сил на некоторой высоте z_0 . Такое вычисление дозового поля для некоторого высотного уровня осуществляется путем так называемого аналитического продолжения аномалий.

Аналитическое продолжение в верхнее полупространство сводится к решению уравнения () типа свёртки с Пуассоновским ядром и является корректно поставленной задачей. При таком продолжении радиационное поле усредняется, аномалии размываются и исчезают, в то время как региональные аномалии трансформируются не столь значительно.

Замечание. Экстраполяция по Пуассону в сущности является способом осреднения наблюдаемых величин. Она используется для сглаживания экспериментальных данных и для решения обратной задачи спектроскопии.

Аналитическое продолжение концентрационных аномалий сводится к их весовому осреднению. Физический смысл аналитического продолжения поля сводится поэтому к "размыванию" концентрационных аномалий, к обобщению характера концентрационного поля. Чем выше уровень, для которого вычисляется

аналитическое продолжение поля, тем шире область осреднения и тем больше размазывание аномалий. Локальные аномалии при пересчете на высоту расплываются и исчезают, в то время как региональные аномалии деформируются не столь значительно.

Поле аномалий плотности потемнения АРГ можно аналитически продолжать и в нижнее полупространство (в объем образца).

Продолжение поле в нижнее полупространство представляет собой более сложную задачу, поскольку возникает необходимость в решении интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Можно доказать теорему об аналитичности и, следовательно, корректности такой операции. Однако, при наличии статистических ошибок решение интегрального уравнения является некорректно поставленной задачей, т.к. флуктуации в исходных данных могут привести к каким угодно отклонениям в решении. Указанные трудности можно преодолеть путем использования метода регуляризации А.Н.Тихонова.

При аналитическом продолжении поля внутрь образца происходит концентрация аномалий, стягивание их к возмущающим источникам излучения. Это обстоятельство может быть использовано для нахождения глубин залегания источников аномалий, т.к. в источнике функции терпят разрыв. Глубина, на которой произошел разрыв, и представляет собой глубину залегания скопления зонда. Обычно экстраполяцию удается провести только до встречи с ближайшим к поверхности скоплением радионуклида (которое может оказаться весьма незначительным и не представлять интереса для целей интерпретации). Формулы остаются те же, но задача осложняется тем, что искомая величина теперь попадает под знак интеграла и может быть найдена путем решения соответствующего интегрального уравнения (двумерное уравнение Фредгольма 1-го рода). Полезным приемом аналитического продолжения дозовых (концентрационных) полей во внутреннее полупространство является использование теоремы Гаусса о значении гармонической функции в центре сферы, равном среднему значению функции на поверхности сферы.

При вычислении аналитического продолжения поля в объем образца происходит концентрация аномалий, стягивание их к возмущающим источникам. Операция аналитического продолжения во внутреннее пространство законна лишь для пространства, где нет аномальных концентраций. Поэтому при аналитическом продолжении в нижнее полупространство с целью определения глубины залегания тех или иных объектов необходимо предварительно сгладить наблюдаемую картину аномалий путем осреднения второстепенных деталей аномального поля, вызванных скоплениями, залегающими заведомо мельче, чем искомые, или обязанных своим происхождением ошибкам измерений. Одним из признаков того, что аналитическое продолжение поля попадает в область скоплений зонда или ведется ниже этой области, является незакономерное, хаотическое поведение аномалий, теряющих всякие черты упорядоченности. Такая хаотичность картины является следствием сильного сближения изолиний на уровне скоплений, представляющих предел, допустимый исходя из точности и разрешающей способности метода регистрации.

Продолжение дозовых полей во внутреннее пространство дает более уверенное решение обратной задачи для тел такой формы, которая приводит к концентрации силовых линий в особых точках этих тел. Примерами таких источников могут служить однородный шар с особой точкой в его центре, параллелепипед с его ребрами и вершинами, вертикальный слой или вертикальный цилиндр. В то же время плоские горизонтальные слои выявляются аналитическим продолжением вниз только в зонах разрывов и уступов, где также имеет место концентрация силовых линий дозового поля.

Проиллюстрируем особенности использования рассмотренного подхода на нескольких модельных примерах.

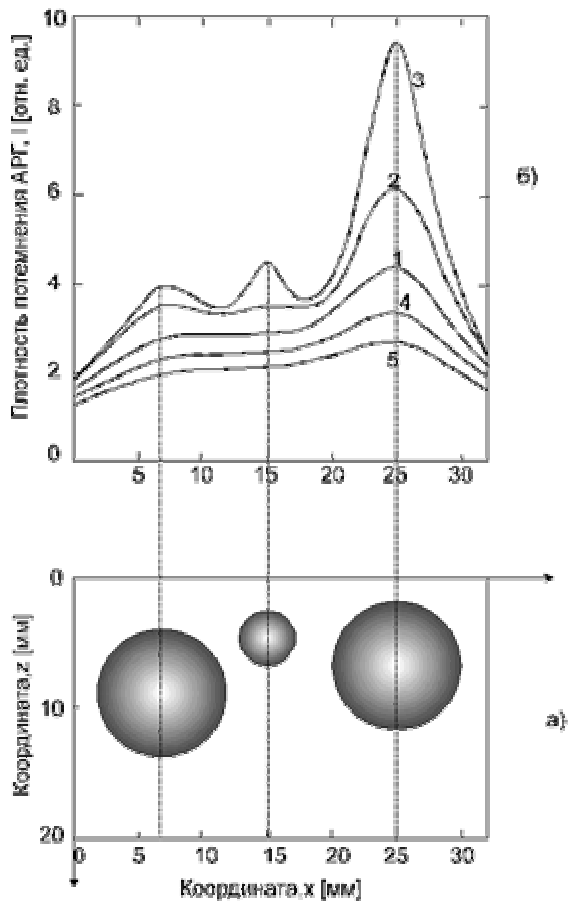
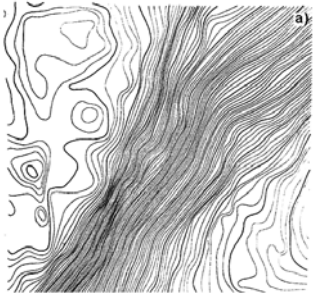
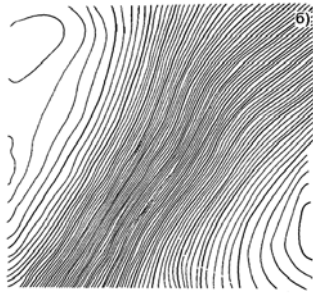


Рис. 11. Схема экстраполяции кривой сканирования авторадиограммы. а) Расположение источников; б) Распределение дозового поля по АРГ (Кривая измерения распределения плотности потемнения авторадиограммы). Кривая 1 – «экспериментальная» кривая; Кривая 2 - экстраполяция поля вниз на глубину z_0 ; Кривая 3 - экстраполяция поля вниз на глубину $2z_0$; Кривая 4 - экстраполяция поля вверх на высоту z_0 ; Кривая 5 - экстраполяция поля вверх на высоту $2z_0$.

NN	R	X0	H	H-z0	H-2z0	H+z0	H+2z0
1	5	7	9	8	7	10	11
2	5	25	7	6	5.05	8	9
3	2	15	4.5	3.5	2.5	5.5	6.5

Пусть в нашем распоряжении имеется пластина, в которой на различной глубине находятся сферические включения различных размеров и характеризующихся различными значениями констант растворимости газа. Включения расположены в одной плоскости (**Рис. 11а**). Пластину выдержали в атмосфере радиоактивного газа в результате чего все компоненты исследуемого гетерогенного материала насытились радиоактивным газом в пропорциях, задаваемых отношением значений локальных констант растворимости. Примем для простоты, что ослабление излучения происходит по $1/r^2$ закону. Поглощением излучения в веществе пренебрегаем, т.е. ограничиваемся гамма- и жесткими бета-излучателями. Меченый образец привели в контакт с ядерной фотоэмульсией и экспонировали в течение заданного времени. После экспонирования фотопластинку проявили и просканировали по прямой, проходящей через центры скоплений. Полученная "экспериментальная" кривая зависимости плотности потемнения АРГ от расстояния



приведена на **Рис.11б** (кривая 1). Кривая 1 демонстрирует как локальные аномалии дозового поля накладываются на региональные. С помощью рассмотренного выше алгоритма провели аналитические продолжения поля заданного кривой 1 в верхнее полупространство на различные высоты. Физически это означает "утапливание" скоплений на все большую глубину. Как следует из **Рис. 11б** (увеличение глубин залегания источников, кривые 2-4) по мере увеличения расстояния от скоплений до фотопластинки локальные возмущения убираются и проявляются существенные особенности в распределении зонда. Аналитическое продолжение поля вниз (уменьшение глубин залегания источников, кривые 2*-4*), наоборот, приводит к выделению локальных аномалий, зон больших градиентов поля, выявлению слабых вторичных максимумов и т.п.

Рис. 12. Аналитическое продолжение радиационного поля (модельный пример). а) Исходное поле; б) Аналитическое продолжение поля «вверх»; в) Экстраполяция поля «вниз».

Перейдем теперь к более сложному случаю - трехмерному расположению источников простой геометрической формы. Схема расположения образца, источников и фотопластинки приведена на **Рис. 11а**. Цель интерпретации АРГ - определение глубины залегания, формы и удельной активности двух крупных тел сферической формы. Помехами выступают три других более мелко локализованных тела, центры которых расположены на больших глубинах, чем центры основных скоплений. Результаты сканирования площади АРГ в виде изолиний одинаковой плотности потемнения представлены на **Рис. 11б**. На том же рисунке даны результаты пересчета дозового поля в верхнее полупространство, а на **Рис. 11в** - исходное поле и результаты его пересчета в нижнее полупространство. Результаты наглядно показывают возможность как выявления региональных аномалий на фоне локальных возмущений, так и выявления локальных аномалий на фоне региональных. Одновременно решается задача определения глубин залегания отдельных излучающих тел.

Третий модельный пример касается проблем интерпретации сложного поля, вызванного распределением источников излучения в объеме материала неизвестной формы. На **Рис. 12а** представлено исходное поле, на **Рис. 12б** – результат экстраполяции поля «вверх» (уменьшение влияния локальных возмущений и выявление региональных аномалий), на **Рис. 12в** – результат экстраполяции поля «вниз» (усиление локальных возмущений).

Функции дозы от источников мягкого β -излучения обычно рассчитывают, исходя из справедливости закона Бэра и заменяя спектр β -излучения моноэнергетическими электронами со средней энергией спектра. Решение обратной автордиографической задачи сводится к решению двумерного интегрального уравнения Фредгольма типа свёртки, левая часть которого представляет аналитическое выражение функции рассеяния для функции объекта f , а правая – экспериментальные данные по локализации проявленных кристаллов в изображении:

$$U_{x,y} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_{x-s,y-t} f_{s,t} ds dt, \quad (6)$$

где $K_{x-s,y-t} = \left(\frac{1,27 \mu k \bar{E} \rho}{A} \right) \int_{z_2}^a \int_{z_1}^b \frac{\exp(-\mu R)}{R^2} dz_1 dz_2$; μ - линейный коэффициент поглощения, $k=100$; E - средняя энергия спектра излучения; ρ - плотность излучения; A - критическая энергия,

энергия спектра излучения; ρ - плотность излучения; A - критическая энергия,

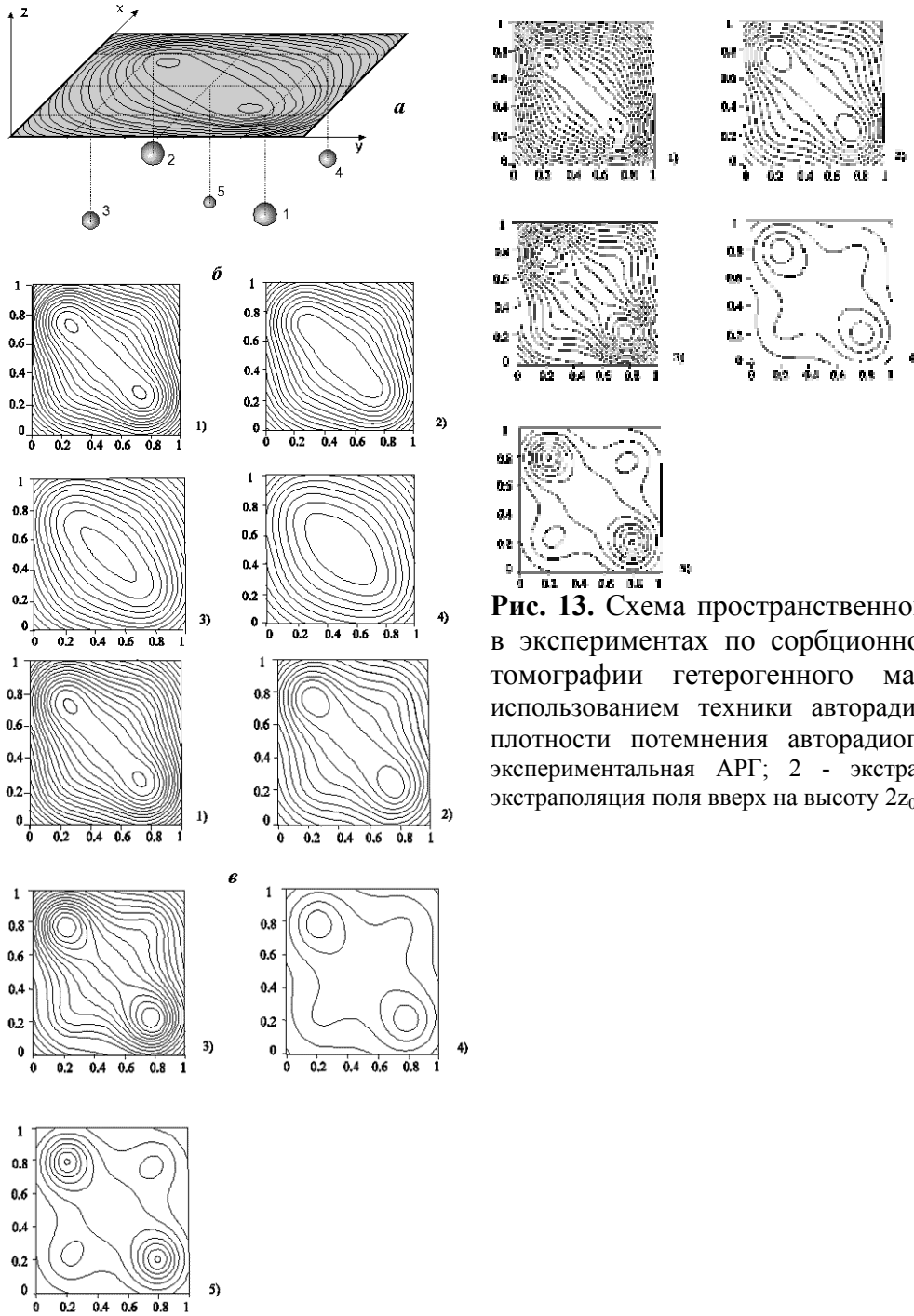


Рис. 13. Схема пространственной экстраполяции радиационного поля в экспериментах по сорбционному варианту диффузионно-зондовой томографии гетерогенного материала. а) Схема эксперимента с использованием техники авторадииографии. б) Экстраполяция двумерной плотности потемнения авторадииограммы во внешнее пространство. 1 - экспериментальная АРГ; 2 - экстраполяция поля вверх на высоту z_0 ; 2 - экстраполяция поля вверх на высоту $2z_0$; 3 - экстраполяция поля вверх на высоту $3z_0$.

№	R	X_0	Y_0	1	2	3	4
				H	$H+z_0$	$H+2z_0$	$H+3z_0$
1	16	20	80	34	38	42	46
2	16	80	20	34	38	42	46
3	6	20	80	36	40	46	48
4	6	80	20	36	40	46	48
5	4	50	50	40	44	48	52

в) Экстраполяция двумерной плотности потемнения авторадииограммы во внутреннее пространство. 1 - экспериментальная АРГ; 2 - экстраполяция поля вниз на глубину $-z_0$; 3 - экстраполяция поля вниз на глубину $-2z_0$; 4 - экстраполяция поля вниз на глубину $-3z_0$; 5 - экстраполяция поля вниз на глубину $-4z_0$.

№	R	X_0	Y_0	1	2	3	4	5
				H	$H-z_0$	$H-2z_0$	$H-3z_0$	$H-4z_0$
1	16	20	80	34	30	26	22	18
2	16	80	20	34	30	26	22	18
3	6	20	80	36	32	28	24	20
4	6	80	20	36	32	28	24	20
5	4	50	50	40	36	32	28	24

обеспечивающая кристаллы способность к проявлению; $R^2=(x-s)^2+(y-t)^2+(z_1+z_2+h)^2$; b, a и h – соответственно толщина образца, эмульсии и промежуточного слоя.

Задача является некорректной – её решение неустойчиво относительно малых возмущений правой части и может вообще не существовать для правой части, заданной с ошибкой. Для отыскания устойчивых приближённых решений используют метод регуляризации. Полученные с его помощью решения при приближении погрешностей определения левой и правой частей к нулю равномерно сходятся к точному решению.

Применение компьютерных способов обработки автордиограмм существенно расширило возможности метода автордиографии.