

Н. И. Ли

ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПОЛИМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ ОТ ЭКСПОЗИЦИИ РЕНТГЕНОВСКИМ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ключевые слова: радиографические фотоматериалы, микрокристаллы галогенида серебра, чувствительность, градиент, оптическая плотность, кроющая способность, экспозиция, образование скрытого изображения.

Изменение зависимости оптической плотности изображения от экспозиции связано с энергией ионизирующего излучения и средним размером микрокристаллов AgHal. Максимальные значения чувствительности и градиента наблюдаются при экспонировании рентгеновским излучением. Распределение скрытого изображения в микрокристаллах AgHal зависит от природы источника излучения и определяется его энергией. Показано, что с увеличением энергии ионизирующего излучения уменьшается глубинная чувствительность и возрастает поверхностная.

Keywords: x-ray films, microcrystal silver halides, speed, gradient, optical density, covering power, exposition, latent image formation.

Changing the optical density of images on the exposure associated with the energy of ionizing radiation and the average size of microcrystals AgHal. Maximum values of sensitivity and gradient are observed at X-ray radiation exposure. The distribution of the latent image in microscopic AgHal depends on the nature of the radiation source and is determined by its energy. It is shown that with increasing energy ionizing radiation reduces the depth of sensitivity and increases the surface.

Из литературных источников [1] известно, что при действии электронов наблюдается пропорциональность оптической плотности изображения и экспозиции при малых экспозициях. При действии ионизирующего излучения большой вклад в построение изображения, особенно при больших энергиях излучения, может вноситься потоком электронов, эмиттированных с усиливающего экрана.

Учитывая, что в промышленной радиографии необходимо применять различные по своим характеристикам радиографические фотоматериалы, представлялось необходимым исследовать, какие факторы, прежде всего, определяют отклонение от линейной зависимости оптической плотности от экспозиции. Следовало ожидать, что в формировании этой зависимости главную роль играют следующие свойства эмульсионного слоя и микрокристаллов AgHal:

- поглощение ионизирующего излучения эмульсионным слоем и экраном;
- нанос серебра;
- средний размер микрокристаллов AgHal в эмульсионном слое;
- соотношение количества желатина и металлического серебра (ρ) и толщина слоя.

Изготавливали образцы пленок с эмульсионными слоями, имеющими различный средний размер микрокристаллов AgHal. Эмульсии изготавливали с одинаковым отношением желатин/серебро ($\rho=1,1$) и поливали на полиэтилентерефталатную подложку с наносом серебра, равным $16,0 \pm 0,1 \text{ г/м}^2$.

Исследуемые образцы облучали рентгеновским излучением при напряжении на трубке 80 кВ (энергия квантов 40 кэВ), радиоактивными источниками кобальт-60 и иридий-192. Первый источник дает моноэнергетический спектр гамма-излучения с пиками 1,17 МэВ и 1,33 МэВ. Иридий-192 имеет широкий спектр излучения с пиками в интервале от 0,20 до 1,06 МэВ. Каждому образцу сообщался ряд последовательных экспозиций, изменяющихся в геометрической прогрессии с модулем $\sqrt{2}$, вследствие чего каждое поле получило различную дозу облучения.

Экспонирование рентгеновским излучением осуществляли без применения усиливающих экранов, а экспонирование излучением радиоактивных изотопов осуществляли с усиливающими экранами из свинцовой фольги толщиной 0,05 мм (передний экран) и 0,10 мм (задний экран). Экспонированные таким образом сенситограммы проявляли в трех различных проявителях: «Рентген-2», поверхностном и глубинном проявителях и строили кривые зависимости оптической плотности изображения от экспозиции.

На рисунке 1 приведены кривые зависимости $D=f(H)$ для образцов эмульсионных слоев, экспонированных излучением радиоактивного изотопа иридий-192. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют различным средним размерам микрокристаллов AgHal в радиографических материалах.

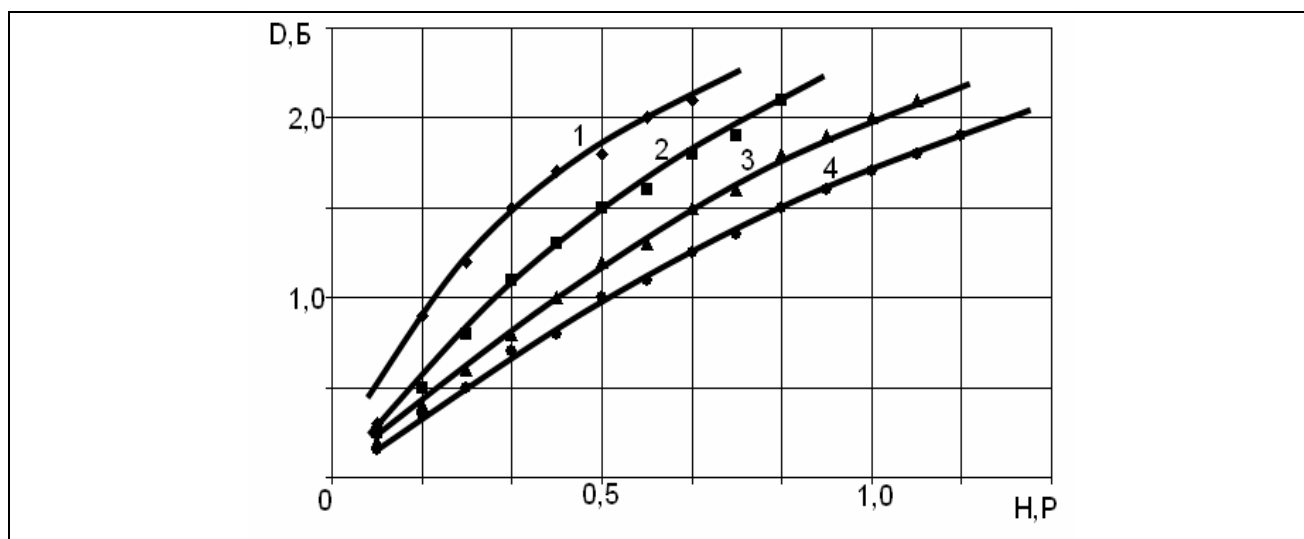


Рис. 1 – Зависимость оптической плотности изображения от экспозиции для радиографических фотоматериалов с различным средним размером микрокристаллов AgHal при экспонировании излучением радиоактивного изотопа иридий-192: 1 – 1,76 мкм; 2 – 1,49 мкм; 3 – 0,71 мкм; 4 – 0,65 мкм

На рисунках 2 и 3 приведены аналогичные зависимости, полученные при экспонировании излучением радиоактивного изотопа кобальт-60 и рентгеновским излучением.

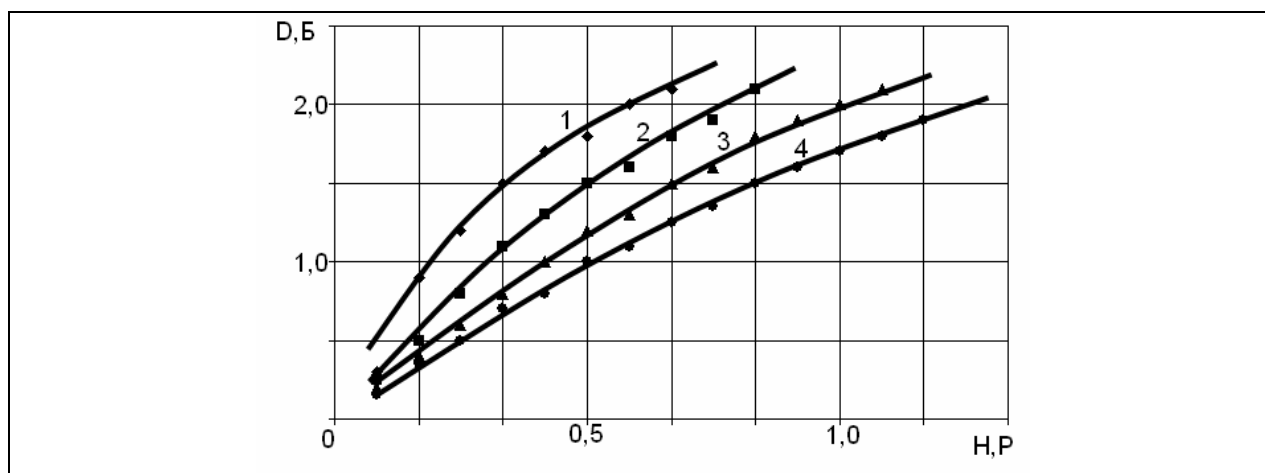


Рис. 2 – Зависимость оптической плотности изображения от экспозиции для радиографических фотоматериалов с различным средним размером микрокристаллов AgHal при экспонировании излучением радиоактивного изотопа кобальт-60: 1 – 1,76 мкм; 2 – 1,49 мкм; 3 – 0,71 мкм; 4 – 0,54 мкм

Из рисунков 1, 2, 3 видно, что оптическая плотность изображения изменяется в зависимости от среднего размера микрокристаллов AgHal и энергии ионизирующего излучения, причем длина прямолинейного участка кривой $D=f(H)$ возрастает при увеличении энергии ионизирующего излучения и уменьшении среднего размера микрокристаллов AgHal.

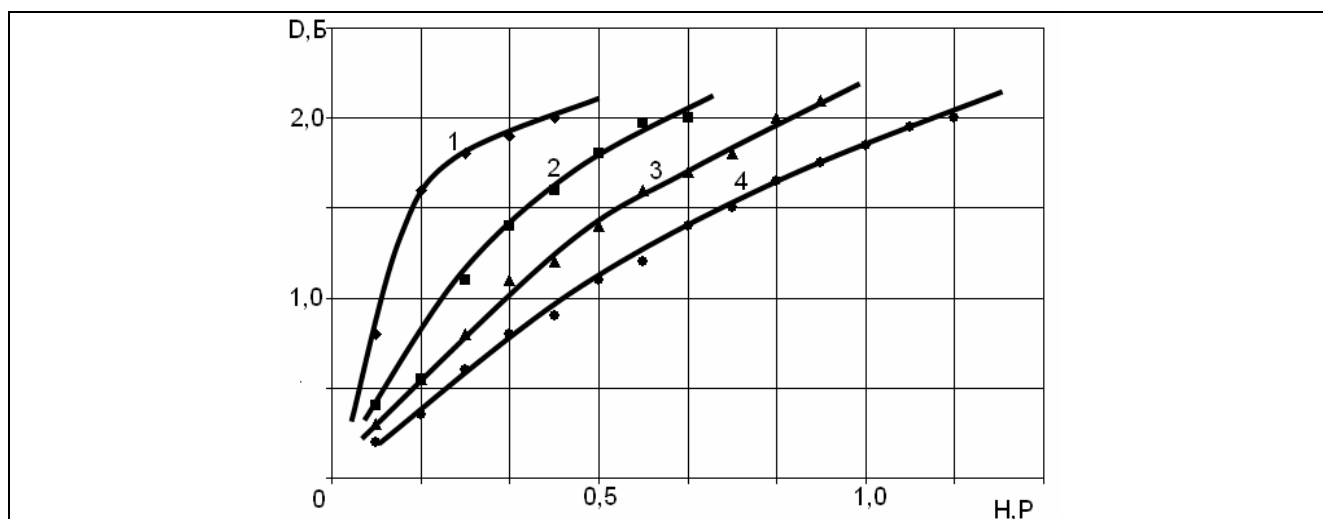


Рис. 3 – Зависимость оптической плотности изображения от экспозиции для радиографических фотоматериалов с различным средним размером микрокристаллов AgHal при экспонировании рентгеновским излучением: 1 – 1,76 мкм; 2 – 1,49 мкм; 3 – 0,71 мкм; 4 – 0,54 мкм

Для рентгеновского излучения линейная зависимость $D=f(H)$ объясняется тем, что каждый квант ионизирующего излучения делает проявленным один или несколько микрокристаллов AgHal, и эта зависимость становится нелинейной в том случае, когда часть квантов начинает поглощаться теми микрокристаллами, которые уже получили энергию от других квантов.

Это же объяснение вполне применимо и для гамма-излучения радиоактивных изотопов с той разницей, что электроны, оказывающие фотографическое действие, могут образовываться не только непосредственно в слое, но и эмитироваться с усиливающих экранов.

Чувствительность отдельных микрокристаллов AgHal зависит от многих факторов. В значительной степени она определяется объемом кристаллов, так как количество поглощенной микрокристаллами AgHal энергии пропорционально их объему [2]. Вследствие большей чувствительности крупных микрокристаллов AgHal по сравнению с мелкими, увеличивается вероятность поглощения излучения не только экспонированными микрокристаллами, но и той частью микрокристаллов, которая уже получила энергию от других квантов. Поэтому радиографический фотоматериал с крупными размерами микрокристаллов AgHal имеет менее продолжительный участок пропорциональной зависимости оптической плотности от экспозиции.

Известно, что при действии ионизирующего излучения образуются высокоэнергетические вторичные электроны, пересекающие микрокристаллы за очень короткое время (менее 10^{-12} с) [1]. Поэтому в данном случае действие ионизирующего излучения идентично действию света при коротких выдержках, и скрытое изображение образуется в виде большого количества мелких центров, находящихся в глубине микрокристаллов AgHal [2].

Энергия ионизирующего излучения оказывает влияние не только на начальный участок характеристической кривой, но и на наклон прямолинейного участка.

Давно установлено [3], что если сопоставить две радиограммы одного объекта, например, ступенчатого клина, экспонированного двумя различными источниками, то наблюдается падение градиента при увеличении энергии излучения.

На рисунке 4 представлены характеристические кривые образцов высокочувствительной пленки высокого контраста со средним размером микрокристаллов AgHal 1,49 мкм, экспонированных рентгеновским излучением и излучениями иридий-192 и кобальт-60.

Видно, что чувствительность и средний градиент (приведены на рисунке 4) зависят от энергии излучения, и их максимальные значения наблюдаются при экспонировании рентгеновским излучением. Аналогичная зависимость наблюдалась и для радиографических фотоматериалов с другими размерами микрокристаллов AgHal. Это, вероятно, можно объяснить тем, что при облучении ионизирующим излучением источниками иридий-192 и кобальт-60 скрытое изображение образуется в виде большого количества мелких центров, часть которых не способна вызывать проявление экспонированного эмульсионного кристалла. Вполне вероятно, что это оказывает влияние на кроющую способность проявленного серебра, особенно в области больших экспозиций, где при высокой концентрации фотоэлектронов процесс их нейтрализации ионами серебра может не успевать за скоростью образования фотоэлектронов и закрепления их в центре чувствительности. То есть имеет место процесс, аналогичный происходящему при действии коротких выдержек света [1].

Кроме того, выход вторичных электронов при поглощении кванта ионизирующего излучения в значительной степени определяется массовым коэффициентом поглощения, зависящим от энергии излучения, что также может влиять на чувствительность радиографического фотоматериала.

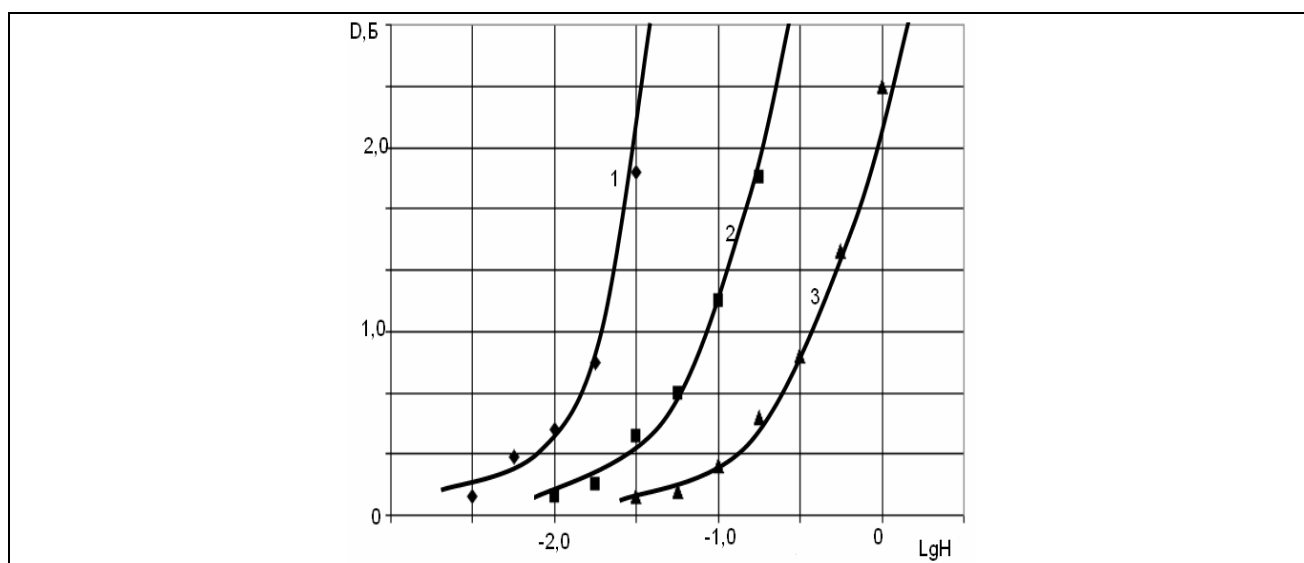


Рис. 4 – Характеристические кривые радиографического фотоматериала со средним размером микрокристаллов AgHal 1,49 мкм при экспонировании различными источниками ионизирующего излучения: 1 – экспонирование рентгеновским излучением; 2 – экспонирование гамма-излучением радиоактивного изотопа иридий-192; 3 – экспонирование гамма-излучением радиоактивного изотопа кобальт-60. Рентгеновское излучение: $S_{0,85}=10,5 \text{ Р}^{-1}$; $G=3,5$. Излучение иридия-192: $S_{0,85}=0,9 \text{ Р}^{-1}$; $G=2,8$. Излучение кобальта-60: $S_{0,85}=0,2 \text{ Р}^{-1}$; $G=2,3$

Известно [1], что эффективность центров скрытого изображения в активации процесса проявления определяется не только количеством и размером образовавшихся серебряных центров, но и их распределением в микрокристаллах AgHal.

На рисунке 5 представлены кривые зависимости внутренней и поверхностной чувствительности образца высокочувствительной пленки среднего контраста при облучении излучениями радиоактивных изотопов иридий-192 и кобальт-60.

Видно, что распределение скрытого изображения в микрокристаллах AgHal зависит от природы источника и определяется его энергией. С увеличением энергии излучения уменьшается глубинная чувствительность и возрастает поверхностная.

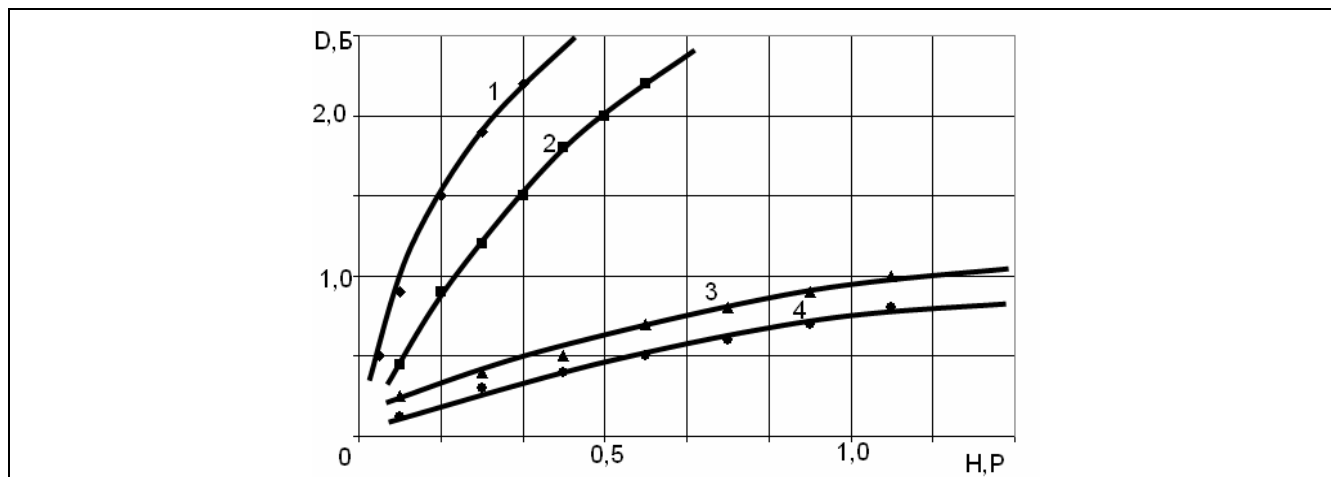


Рис. 5 – Зависимость оптической плотности изображения от экспозиции для радиографического фотоматериала со средним размером микрокристаллов AgHal 1,49 мкм: 1 – экспонирование излучением кобальт-60, проявление в поверхностном проявителе; 2 – экспонирование излучением иридий-192, проявление в поверхностном проявителе; 3- экспонирование излучением кобальт-60, проявление в глубинном проявителе; 4 – экспонирование излучением иридий-192, проявление в глубинном проявителе

На основе закономерностей взаимодействия заряженных частиц с атомами вещества [4] можно сделать вывод, что длина пробега электрона и удельная передача энергии галогениду серебра зависят от энергии ионизирующего излучения.

В том случае, когда поглощается ионизирующее излучение низкой энергии, например рентгеновское, образующиеся электроны имеют относительно низкую энергию. Вероятно, такие электроны при пересечении микрокристаллов AgHal могут отдавать свою энергию фотоэлектронам, которые преимущественно закрепляются на глубинных центрах чувствительности.

В том случае, когда радиографический фотоматериал экспонируется ионизирующим излучением высокой энергии, образующиеся при поглощении электроны, несут энергию достаточную, чтобы при пересечении микрокристаллов AgHal освободить электроны, часть которых способна (вследствие того, что получила достаточную энергию) выйти за пределы микрокристаллов AgHal, и поглощенная энергия будет использована неэффективно [5]. Это, вероятно, является одной из причин снижения чувствительности при повышении энергии излучения и преимущественного формирования поверхностного скрытого изображения.

Если эти предположения справедливы, то следовало ожидать, что в тех случаях, когда энергия ионизирующего излучения используется эффективно, при равной дозе поглощенной энергии ионизирующего излучения должна увеличиваться вероятность повторной экспозиции микрокристаллов AgHal, которые уже приобрели способность к проявлению. То есть протяженность участка линейной зависимости оптической плотности от экспозиции должна уменьшаться. Это мы и получили в проведенных экспериментах, что видно из сравнения рисунков 1, 2 и 3.

Результаты экспериментов по исследованию зависимости оптической плотности изображения от экспозиции рентгеновским и гамма-излучением позволяют сделать следующие *выводы*:

1. Установлено, что изменение зависимости оптической плотности изображения от экспозиции связано с энергией ионизирующего излучения и средним размером микрокристаллов AgHal. При увеличении энергии ионизирующего излучения от 40 кэВ до 1,33 МэВ протяженность прямолинейного участка этой зависимости для крупнозернистого радиографического фотоматериала со средним размером микрокристаллов 1,76 мкм возрастает с 0,15 до 0,20 Р, а для мелкозернистого фотоматериала –

с 1,2 до 2,2 Р. Выдвинуто предположение, что это связано с увеличением эффективного пробега электронов при увеличении энергии излучения.

2. Установлено, что максимальные значения чувствительности и градиента наблюдаются при экспонировании рентгеновским излучением. Для радиографического фотоматериала со средним размером микрокристаллов AgHal 1,49 мкм при увеличении энергии ионизирующего излучения от 40 кэВ до 1,33 МэВ чувствительность уменьшается в 23 раза, а средний градиент – в 1,5 раза.

3. Распределение скрытого изображения в микрокристаллах AgHal зависит от природы источника излучения и определяется его энергией. Показано, что с увеличением энергии ионизирующего излучения уменьшается глубинная чувствительность и возрастает поверхностная.

Литература

1. Джеймс, Т. Теория фотографического процесса / Т. Джеймс. – Л.: Химия, 1980. – 671 с.
2. Чибисов, К.В. Химия фотографических эмульсий / К.В. Чибисов. – М.: Книга, 1975. – 344 с.
3. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля / под ред. С.В. Румянцева. – М.: Энергоиздат, 1982.- 267 с.
4. Гурвич, А.М. Физические основы радиационного контроля и диагностики / А.М. Гурвич. – М.: Энергоиздат, 1989. – 167 с.
5. Ли, Н.И. Особенности формирования радиографических изображений в полимер-желатиновой матрице галогенидосеребряных фотоматериалов / Н.И. Ли, А.С. Хабибуллин // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2010. - №10 – С. 237-244.

© **Н. И. Ли** – канд. техн. наук, доц. каф. технологии полиграфических процессов и кинофотоматериалов КГТУ, ninel@kstu.ru.