

О применении "синей" и "зеленой" систем визуализации изображения в рентгенографии

Ю.Рюдигер, РНЦ РР МЗ РФ, Москва

Уже несколько десятилетий в "традиционной" (т.е. экранно-пленочной) рентгенографии сосуществуют две системы визуализации медицинского рентгеновского изображения, которые отличаются друг от друга цветом (или областью длин волны) светового потока, испускаемого усиливающими экранами под действием рентгеновского излучения и используемого для экспонирования радиографической пленки, – синим (ультрафиолетовым, фиолетовым) или зеленым.

В первом случае используется естественная способность галогенидов серебра к поглощению света¹. Благодаря возможности применения пленок без сенсibilизаторов, традиционной системой рентгенографии является "синяя". Однако лучшее качество изображения при более высокой эффективности гадолиниевых экранов с преимущественно зеленым свечением привело к переходу рентгенологии развитых стран на "зеленую" систему визуализации изображения. Для России до недавнего времени она была "экзотикой", поскольку гадолиниевые усиливающие экраны отечественная промышленность не выпускала, а импортные стоили (и стоят до сих пор) весьма дорого. Три года назад ситуация принципиально изменилась [1]: ЗАО "РЕНЕКС" (г. Новосибирск) освоило производство усиливающих экранов ЭУ-ГЗ, т.е. гадолиниевых экранов повышенного усиления. Зарубежные производители (например, фирма Kodak) прилагают большие усилия для внедрения "зеленой" системы в российскую медицинскую практику: сегодня уже целые регионы и немалое число медицинских учреждений перешли на работу с гадолиниевыми экранами, и их число постоянно растет.

Однако низкий уровень теоретической подготовки² подавляющего большинства рентгенолаборантов, которых никто не обучал даже элементарным представлениям о принципах формирования рентгеновского изображения, приводит к тому, что при переходе на "зеленую" систему возникают непредвиденные проблемы и трудности. Вспомним, к примеру, хотя бы широко используемую (при ручной обработке) практику переэкспонирования и недопроявления пленок, которая в случае современных рентгеновских пленок на плоских кристаллах становится принципиально неприменимой. Многие рентгенологи также имеют довольно приблизительные представления об этом предмете, поэтому они не в состоянии помочь лаборантам при решении возникших вопросов. Данная статья призвана оказать помощь и разъяснить основные трудности, связанные с внедрением "зеленой" системы.

1. Усиливающие экраны

Самыми распространенными усиливающими экранами в составе "синей" системы в течение почти 80 лет являлись вольфраматные, т.е. на основе относительно слабо светящегося люминофора из вольфрамата кальция $\{CaWO_4\}$. В 70-е и 80-е годы прошлого века велись интенсивные поиски новых, более эффективных люминофоров (см., например, [9]). Тогда был разработан целый ряд нашедших применение в медицинской практике редкоземельных рентгенолюминофоров с преимущественно фиолетовым или синим свечением: лантановый $\{LaOBr:Tb,Yb\}$, иттриевый $\{Y_2O_2S:Tb\}$, флюорохлоридный $\{BaFCl:Eu\}$, флюоробромидный $\{BaFBr:Eu\}$, танталатные $\{YTaO_4:Nb\}$ и $\{YTaO_4:Tm\}$, и др. В СССР был освоен выпуск лантанового, флюорохлоридного и иттриевого люминофоров; последний находит применение до сих пор. На территории бывшего Советского Союза именно "синяя" система являлась до недавнего времени доминирующей, если не исключительной.

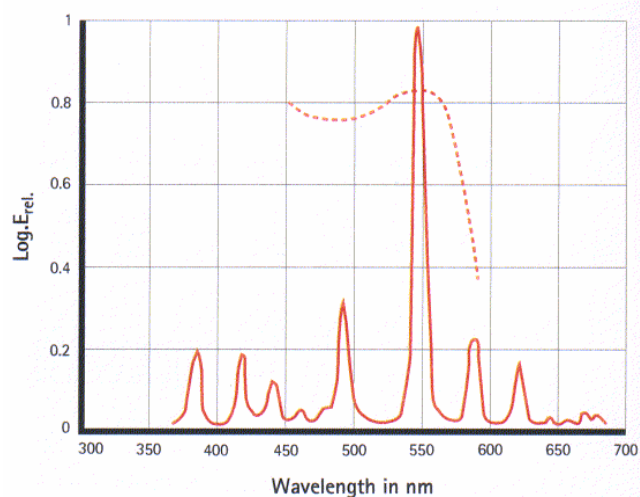


Рис.1 Спектр излучения люминофора $Gd_2O_2S:Tb$.

По оси абсцисс – длина волны, нм; по оси ординат – относительная интенсивность.

В начале 70-х годов прошлого века на западе был предложен рентгенолюминофор на основе оксисульфида гадолиния $\{Gd_2O_2S:Tb\}$ с широким линейчатым спектром свечения (рис.1) – от фиолетового до красного – и самой

¹ К примеру, бромид серебра $\{AgBr\}$, использующийся в качестве светочувствительного вещества в медицинских рентгеновских пленках, не чувствителен к свету с длиной более 500 нм [10].

² Как известно, для обучения рентгенолаборанта, т.е. переподготовки младшего медицинского персонала, российским государством отводится максимально 3 месяца. На Западе обучение рентгенотехника (принятое, например, в Германии наименование этой профессии) занимает, как правило, 3 ГОДА.

интенсивной линией при 545 нм, т.е. в зеленой области спектра. Свойства этого вещества оказались весьма подходящими для медицинской рентгенологии³. Из них следует в первую очередь отметить следующие:

- высокая эффективность поглощения люминофором рентгеновского излучения в диагностическом диапазоне энергий;
- высокая энергетическая эффективность (перевода рентгеновского излучения в световое), близкая к теоретическому пределу (до 19%);
- высокая яркость свечения при небольшом размере зерен люминофора;
- низкая зернистость изображения и др.

Сравнительные характеристики некоторых широко применявшихся или применяемых до сих пор в медицине рентгенолюминофоров приведены в табл. 1, в которой использованы данные работ [6,7,10].

Таблица 1

Сравнительные характеристики рентгенолюминофоров для усиливающих экранов

Характеристика	CaWO ₄	LaOBr:Tb,Yb	BaFCl:Eu	Y ₂ O ₂ S:Tb	Gd ₂ O ₂ S:Tb
Эффективный атомный номер	62	49	50	35	60
Гигроскопичность	нет	сильная	небольшая	нет (?)	нет
Химическая стабильность	неогранич.	огранич.	огранич.	неогранич. (?)	неогранич.
Плотность, г/см ³	6,1	6,3	4,5	4,9	7,3
Энергетическая эффективность, %	4-6	(13)	12	11	19
Максимум свечения λ_{\max} , нм	425	417/437	385	385/418	545
Форма зерен	регулярная	слоистая	слоистая	регулярная	регулярная
Зернистость изготовляемых экранов	средняя	небольшая	очень большая	повышенная	низкая

Перечисленные свойства гадолиниевого люминофора позволяют изготавливать высокоэффективные усиливающие экраны с лучшими структурно-резкостными свойствами, чем у многих экранов "синей" системы. Так, например, у стандартных вольфраматных экранов типа РЕНЕКС ЭУ-В2 разрешающая способность⁴ 6 пл/мм (пар линий на мм), у гадолиниевых экранов высокого усиления (класса 400 по международной шкале) фирм Kodak и Agfa она составляет около 7 пл/мм при эффективности до 2,5-3-х раз выше экранов ЭУ-В2. У экранов же РЕНЕКС ЭУ-Г3 разрешающая способность – порядка 8 пл/мм.

В начале 60-х и в 70-х годах прошлого века в СССР были предприняты попытки создания "своей" "зеленой" системы, которые не увенчались успехом по ряду причин. Во-первых, в качестве "зеленочувствительной" пленки предлагалась не ортохроматическая, а панхроматическая пленка РМ-6, которую надо было обрабатывать в полной темноте, аналогично пленкам РФ-3 и РФ-У. Причиной являлось отсутствие в стране эффективного сенсibilизатора для ортохроматических пленок. Во-вторых, в качестве усиливающих экранов предлагались сульфидные, изготовленные на основе цинк-кадмий-сульфидного люминофора, активированного серебром {(Zn,Cd)S:Ag}. Гранулометрические свойства этого вещества не позволяют получить экраны с необходимым разрешением, достаточно высокой резкостью и низкой зернистостью изображения. Попытки промышленного изготовления современного гадолиниевого люминофора {Gd₂O₂S:Tb} в СССР начались существенно позже, с большим отставанием от развитых стран.

Одним из важных для практического применения свойств гадолиниевых экранов является отличный от других, широко применяемых традиционно в России экранов "ход с жесткостью", т.е. зависимость эффективности от энергии рентгеновского излучения, которая определяется составом используемого в экране люминофора. В то время как универсальность применения вольфраматных экранов отчасти обусловлена их относительно ровным (т.е. нерезким) "ходом с жесткостью", эффективность редкоземельных (иттриевых и гадолиниевых) экранов в большей степени зависит от анодного напряжения. Экраны из оксисульфида иттрия, в основу которого входят только легкие элементы, высокоэффективны при относительно низких и теряют свои преимущества при высоких анодных напряжениях, а гадолиниевые экраны, наоборот, благодаря своему составу особенно эффективны при

³ Пожалуй, единственным отрицательным "свойством" этого люминофора является его дороговизна.

⁴ В данной работе все значения разрешающей способности приведены для фокуса 2×2 мм.

анодных напряжениях выше 60-70 кВ. Именно по этой причине иттриевые экраны рекомендуются для применения преимущественно в детской рентгенологии [9], а гадолиниевые экраны – для работы с большей жесткостью излучения, т.е. при более высоких напряжениях [1]. Недавно ЗАО "РЕНЕКС" (г. Новосибирск) была предложена "смешанная" комбинация экрана ЭУ-ИЗ (в положении переднего) с экраном ЭУ-ГЗ (в положении заднего), призванная стать альтернативой комплекту вольфраматных экранов при большей эффективности, которая не должна обладать режимом "ходом с жесткостью".

2. Радиографические пленки

Для максимально возможного использования света, испускаемого гадолиниевыми экранами, желательно обеспечить чувствительность пленок к зеленому свету линии 545 нм. С этой целью в 80-х годах прошлого века во многих странах начался выпуск ортохроматических ("зеленочувствительных") рентгеновских пленок для медицины. Чувствительность пленок к зеленому свету обеспечивается добавлением в эмульсию органических красителей с высокой (близкой к 100%) эффективностью поглощения зеленого света. Ортохроматические пленки того времени обладали относительно высокой чувствительностью как в синей, так и в зеленой области спектра. Однако сильный рост стоимости серебра в середине 80-х годов повлек за собой необходимость снижения наноса серебра во всех фотоматериалах, но особенно в медицинских рентгеновских пленках⁵. В результате была разработана технология плоских кристаллов, позволившая снизить нанос серебра в 2 раза и более. Необходимым условием для применения этой технологии является присутствие в эмульсии сенсibilизатора, обеспечивающего чувствительность пленки, поскольку толщина кристаллов галогенида серебра слишком мала, чтобы самостоятельно поглощать достаточное количество световой энергии. Присутствие сенсibilизаторов в ортохроматических пленках было тем условием, благодаря которому можно изготавливать пленки на плоских кристаллах. Сегодня все ортохроматические медицинские радиографические пленки выпускаются основными производителями по плоскокристаллической технологии. Эти пленки имеют ряд немаловажных для практического применения особенностей, к которым относятся: отличия в кинетике проявления, простота в обработке, слабая зависимость сенситометрических показателей от условий обработки и типа химреактивов и т.п.⁶

Рентгеносенситометрические показатели (особенно контрастность) традиционных синечувствительных радиографических пленок, эмульсии которых содержат объемные микрокристаллы бромида серебра без добавления сенсibilизаторов, обычно существенно зависят от условий обработки. Общеизвестно, что многие из таких пленок при ручной обработке в традиционных для нашей страны проявителях ("Рентген-2", "Ренмед-В-Ф", "Формат" и др.) обладают недостаточной контрастностью [5,11]. В то же время при использовании современных по составу проявителей ("Формат+", "Ренмед-Плюс", "Ренмед-Супер", "Ренмед-К", "ТРМ-110ПМ"), а также при автоматической обработке эти пленки удовлетворяют значениями среднего градиента, требуемыми для отечественных пленок по Техническим условиям завода "Тасма": не менее 2,4 при выпуске (не менее 2,0 в конце срока годности) для пленки РМ-1.

В этой связи необходимо напомнить авторам работ [1] и [3] о том, что конкретные нормы по рентгеносенситометрическим показателям, заложенные в отечественные заводские стандарты, связаны с определенным методом экспонирования, а именно, по ОСТ 6-17-54-80. Они могут не согласоваться со значениями, определенными при экспонировании другими методами, как, например, при световой сенситометрии (даже двухсторонней, с сенситометром типа 394 фирмы X-RITE), рентгеносенситометрии по стандарту ИСО 9236-1, клиновой сенситометрии и т.п. Тот факт, что все зарубежные радиографические пленки общего назначения, представленные в России, при автоматической обработке⁷ удовлетворяют требованиям Технических условий российского производителя, убедительно подтверждает разумность применения этих норм при испытаниях для регистрации или сертификации. Не исключено, что показателей действительно слишком мало (см. [3]), но если для конкретной пленки не выполняется требование по среднему градиенту (0,25-2,0), дополнительные показатели не могут играть существенной роли. Следует также помнить о том, что форма характеристической кривой для "традиционных" пленок на объемных кристаллах обычно существенно зависит от типа проявителя. В России не разработаны нормированные значения ни для "нижнего" среднего градиента, ни для "верхнего" среднего градиента и т.д., а выработка дополнительных требований связано с проведением широкомасштабных медико-технических исследований⁸, для которых в современной России нет возможностей (т.е. средств). Методика определения "основного" среднего градиента по характеристической кривой "узаконена" стандартом

⁵ Содержание серебра в рентгеновских пленках существенно выше, чем, например, в любительских фотопленках.

⁶ Следует отметить, что преимущества пленок на плоских кристаллах используются сегодня также для производства синечувствительных пленок, с применением сенсibilизаторов для ультрафиолетовой, фиолетовой или синей области спектра. Примерами являются пленка типа Super RX (Fuji) и пленка типа Supix RP1 (Agfa). Все, что сказано в данной работе об особенностях обработки современных ортохроматических пленок, распространяется также на эти пленки.

⁷ Современные зарубежные пленки разрабатывались и разрабатываются исключительно для автоматической фотообработки. Для получения примерно тех же сенситометрических показателей при ручной обработке иногда требуется применение специальных проявителей, хотя есть и примеры абсолютной невозможности ручной обработки по норме среднего градиента (пленка типа AX фирмы Konica).

⁸ Ведущие фирмы-производители медицинских рентгеновских пленок при разработке новых пленок учитывают большое число дополнительных параметров. Однако каждая фирма пользуется, к сожалению, своим набором

показателей (например, средними градиентами между разными точками характеристической кривой), и неясно, нормы какого производителя можно было бы применить в России. Однако это тема для отдельной работы.

ИСО 9236-1, тот же метод используется в России: средний градиент определен как тангенс угла наклона прямой, соединяющей точки $0,25+D_{\min}$ и $2,0+D_{\min}$ на характеристической кривой. Эта величина в какой-то степени отражает совокупность таких показателей, как максимальная плотность, нижний и верхний градиенты, коэффициент контрастности, хотя, конечно, заменить их не может.

Рентгеносенситометрические показатели современных ортохроматических пленок (на плоских кристаллах) относительно слабо зависят от условий обработки. Это видно из данных табл. 2, в которой приведены значения чувствительности (в комбинации с контрольным образцом комплекта экранов типа ЭУ-ГЗ) и среднего градиента, определенные по ОСТ 6-17-54-80, для двух пленок при ручной и автоматической фотообработке. В этой таблице использованы следующие обозначения: $S_{0,85}$ – чувствительность в P^{-1} , $\langle g \rangle$ – средний градиент (0,25-2,0).

Таблица 2

Тип пленки	Производитель	Ручная обработка при 20°C (6 мин)			Автоматическая обработка в режиме RP		
		Тип проявителя	$S_{0,85}$	$\langle g \rangle$	Тип проявителя	$S_{0,85}$	$\langle g \rangle$
MXG	Kodak	Рентген-2	1800	2,6	X-Omat EXII (Kodak)	2100	2,6
		Ренмед-К	1800	2,6	G139 (Agfa)	2100	2,5
Ortho CP-G Plus	Agfa	Рентген-2	1900	2,6	X-Omat EXII (Kodak)	1900	2,4
		Ренмед-К	1600	2,4	G139 (Agfa)	1900	2,3

Как видно, даже при обработке в устаревшем проявителе "Рентген-2" эти пленки обладают контрастностью не ниже, чем при автоматической обработке. В связи со слабой зависимостью показателей ортохроматических пленок от условий обработки возможны, кроме того, меньшие требования по степени регенерации. Данные по этому параметру, рекомендуемые фирмой Kodak для автоматической обработки традиционных синечувствительных пленок на объемных кристаллах (например MXB) и ортохроматических пленок класса T-MAT, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Тип пленки	Рекомендуемая степень регенерации в мл/м ² пленки	
	проявителя типа RP X-Omat EX	фиксажа типа RP X-Omat LO
MXB (синечувствительная)	400	550
T-MAT (ортохроматическая)	300	400

Таким образом, в слабой зависимости от условий обработки состоит важное преимущество пленок на плоских кристаллах перед традиционными пленками. Другое, не менее значимое, отличие наблюдается в кинетике ручного проявления: если пленкам на объемных кристаллах для достаточного проявления требуется при комнатной температуре несколько (не менее 3-х) минут, то пленки на плоских кристаллах проявляются за несколько десятков секунд. Для демонстрации этого обстоятельства воспользуемся методикой представления данных, предложенной Ф.Г.Горелик [5]. На рис. 2 (а и б) приведена кинетика проявления в проявителе "Ренмед-В-Ф" пленки Retina XBM (традиционной пленки на объемных кристаллах) и ортохроматической пленки MXG (Kodak), соответственно, в интервале от 10 сек до 8 минут. На рис. 2а хорошо виден медленный рост средней плотности (D_5 , т.е. по 5-му полю сенситограммы), чувствительности, а также среднего, нижнего и верхнего градиентов. Из данных вытекает, что оптимальное время проявления в этом случае – около 3-х минут, что согласуется с выводами работы [5]. При более продолжительном проявлении чувствительность продолжает расти, однако средний и верхний градиенты падают. Другое дело – кинетика проявления пленки MXG (рис. 2б). Изображение формируется практически полностью в интервале от 30 до 60 секунд после погружения пленки в проявитель, и после 1,5-2 минут проявления наблюдается лишь медленный рост средней плотности и чувствительности. Другие показатели, такие как средние градиенты, коэффициент контрастности и плотность вуали вплоть до 8 минут проявления, остаются практически неизменными. "Оптимальным" можно в этом случае назвать время проявления от 2 до 6 минут (или даже больше). Представленная на рис. 2в кинетика проявления пленки типа CP-BU new фирмы Agfa свидетельствует о том, что эта пленка занимает промежуточное положение между объемно- и плоскокристаллическими. Это подтверждается высказываниями представителей фирмы о "уплощенности" микрокристаллов бромида серебра в эмульсии пленки CP-BU new. Оптимальное время проявления этой пленки в "Ренмед-В-Ф" – около 2-3 минут. Отличие от приведенного в [5] значения для этого показателя (5 минут), вероятно, связано с тем, что в этой работе для определения градиентов была привлечена свето-вая сенситометрия.

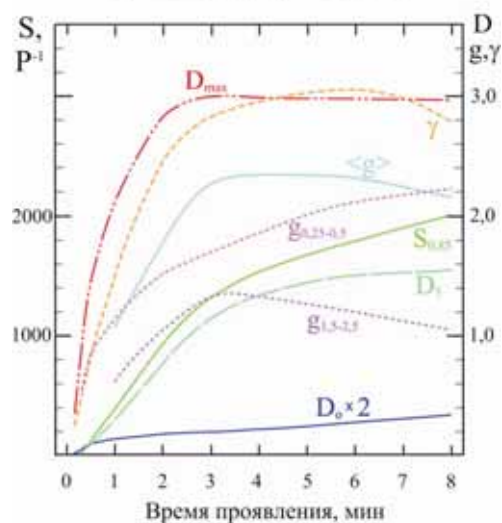
Вспомним теперь о распространенном "грехе" в работе рентгенолаборантов – о переэкспонировании и недопроявлении рентгенограмм. "Контроль готовности" изображения в этом случае проводится, как известно, перед неактивным фонарем, путем периодического извлечения пленки из проявителя и возвращения ее

обратно. К чему приводит такая практика (кроме существенно завышенной дозы на пациента) на традиционных пленках, всем хорошо известно: изображение имеет низкий контраст, на нем – серый ("вялый") рисунок без визуализации мелких малоконтрастных деталей. Если ту же процедуру проделать с ортохроматической пленкой (например, MXG), получится снимок, на котором в местах больших плотностей почернения (например, вокруг объекта исследования) образуется сильнейший муаровый рисунок, существенно затрудняющий диагностику. Дело в том, что любая пленка проявляется не абсолютно равномерно по площади: есть области, где этот процесс происходит немного быстрее, чем в других местах. Поскольку контраст на "плоскокристаллических" пленках образуется почти мгновенно (см. рис. 2б), разница в скорости проявления, присутствующая также на традиционных пленках, существенно усиливается и становится отчетливо видной. По этой причине ортохроматические пленки не позволяют работать "дедовским" методом, а требуют от лаборанта грамотного экспонирования⁹, вследствие чего при переходе на "зеленую" систему часто автоматически наблюдается снижение дозы (даже без учета других факторов).

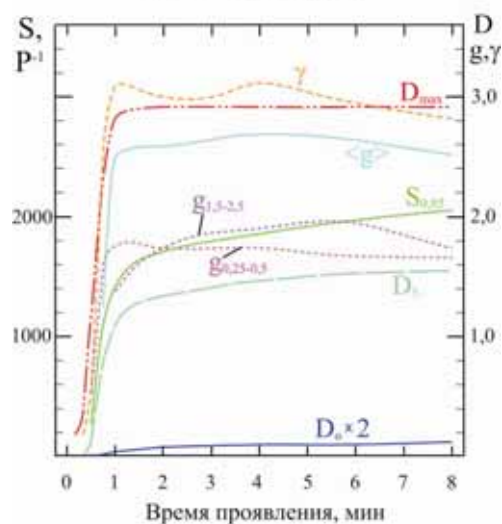
3. Система экран/пленка

Для наилучшего использования светового потока, испускаемого усиливающими экранами под действием рентгеновского излучения, необходимо, чтобы коэффициент спектрального соответствия был как можно больше. Само собой разумеется, что следует применять экраны синего (ультрафиолетового, фиолетового) свечения с синечувствительными пленками ("синяя" система), а гадолиниевые экраны преимущественно зеленого свечения – с ортохроматическими пленками ("зеленая" система). Однако этим вопрос возможных комбинаций экранов и пленок не исчерпан. Радиографическая пленка является расходным материалом, и никто не застрахован от случая, когда какой-нибудь "снабженец" предложит перейти на новую пленку, ничего другого не меняя. Если же эта новая пленка оказывается ортохроматической, встает вопрос о применимости сочетания ее с теми экранами, которыми на месте пользуются уже много лет. Выше было отмечено, что в первые годы после своего появления ортохроматические пленки обладали достаточной чувствительностью, как в зеленой, так и в синей (фиолетовой) области спектра – естественная способность бромида серебра к поглощению света этих длин волн при добавлении сенсibilизатора в эмульсию не исчезает. Для выяснения возможности сочетания современных ортохроматических пленок с экранами фиолетового или синего свечения в лабо-ратории приемников рентгеновского излучения РНЦ РР были определены значения чувствительности различных комбинаций экран/пленка. Результаты этого исследования¹⁰, полученные с помощью рентгеносенситометрической установки при автоматической фотообработке пленок в реактивах Roentoroll CRE/Superfix MRP немецкой фирмы Tetenal, приведены в табл. 4.

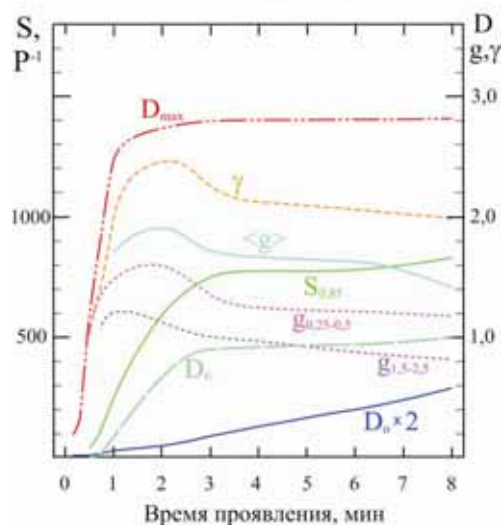
Retina XBM/Ренмед-В-Ф при 20°C



MXG/Ренмед-В-Ф при 20°C



CP-BU new/Ренмед-В-Ф при 20°C



⁹ Это обстоятельство уже было отмечено в работе [1].

¹⁰ Эти данные впервые были представлены на стендовом докладе авторов С.И.Головковой, В.П.Кавторовой, М.Г.Мягковой, Ю.Рюдигера и В.Н.Шевченко на I Евразийском конгрессе (V Национальной конференции) по медицинской физике и инженерии "Медицинская физика-2001", Москва, 18-22 июня 2001 г.

Рис. 2 Кинетика проявления медицинских радиографических пленок с разной формой микрокристаллов бромида серебра при обработке в проявителе "Ренмед-В-Ф" при 20⁰С

Таблица 4

Чувствительность ($S_{0,85}, P^{-1}$) различных комбинаций экран/пленка

Тип пленки (производитель)	Тип экрана		
	ЭУ-В2А	ЭУ-И3	ЭУ-Г3
X-Omat K (Kodak)	1150	1850	1850
CP-BU new (Agfa)	800	1300	1500
Retina XBM (FCW)	1100	1800	1750
AX (Konica)	750	1250	1200
MXG (Kodak)	300	700	1900
ORTHO CP-G Plus (Agfa)	360	800	1900

Данные, приведенные в этой таблице, казались поначалу неожиданными: ортохроматические пленки в комбинации с экранами синего свечения обладают настолько низкой чувствительностью, что применение такой комбинации на практике привело бы к существенно увеличенным дозам облучения пациентов. Объяснение этому факту можно найти, если вспомнить форму микрокристаллов бромида серебра в эмульсии ортохроматических пленок. Малая толщина кристаллов не позволяет им поглотить сколько-нибудь значительную световую энергию самостоятельно, в основном поглощается (и вызывает эффект экспонирования) зеленый свет в полосе чувствительности сенситизатора. С другой стороны, и это было также неожиданностью, синечувствительные пленки прекрасно экспонируются светом от гадолиниевых экранов, обладая в этой комбинации чувствительностью на уровне "родных" экранов ЭУ-И3. Дело в том, что реальный гадолиниевый люминофор имеет несколько полос фиолетового, синего и голубого свечения, которые обычно не рассматриваются. Измерения реального спектра свечения экранов ЭУ-Г3 (Ренекс), Lanex Regular (Kodak) и CP-G 400 (Agfa), проведенные в лаборатории приемников рентгеновского излучения РНЦ РР¹¹, показали, что суммарная интенсивность трех групп линий (при 383 нм, 417 нм и 438 нм) в свечении этих экранов находится на уровне 60-70% от интенсивности линии 545 нм. Благодаря этому и синечувствительные пленки в комбинации с гадолиниевыми экранами также обладают высокой чувствительностью. Учитывая лучшее качество изображения, получаемое с экранами ЭУ-Г3 по сравнению с ЭУ-В2, ЭУ-И3 или ЭУ-И4, напрашивается вывод, что гадолиниевые экраны можно применять в качестве универсальных для ВСЕХ радиографических пленок общего назначения, независимо от спектра их чувствительности. Есть, однако, исключения. К примеру, экраны типа Lanex Medium (Kodak) содержат в эмульсии большое количество желтого красителя, который сильно подавляет синие компоненты свечения. По этой причине экраны Lanex Medium можно использовать только в комбинации с ортохроматическими пленками.

Применение гадолиниевых усиливающих экранов требует учета еще одного важного свойства – так называемого "хода с жесткостью", т.е. зависимости эффективности от энергии рентгеновского излучения. Гадолиниевые экраны имеют "ход с жесткостью", аналогичный флюорохлоридным экранам, ранее выпускавшимся в СССР, и отличаются по этому показателю от вольфраматных и иттриевых экранов [8,9]. С целью получения количественной оценки этих отличий для реально выпускаемых сегодня усиливающих экранов нами при помощи рентгено-сенситометрической установки РНЦ РР была определена чувствительность четырех систем экран/пленка при значениях слоя половинного ослабления (СПО) от 1,6 до 9,1 мм Al:

- система (1): экраны ЭУ-В2 с пленкой типа Retina XBM;
- система (2): экраны ЭУ-И3 с пленкой типа CP-BU new (Agfa);
- система (3): экраны ЭУ-Г3 с пленкой типа MXG (Kodak);
- система (4): система экранов ЭУ-И3\ЭУ-Г3 с пленкой Ortho CP-G Plus (Agfa).

¹¹ Измерения спектров свечения люминофоров проведены С.И.Головковой.

Фотообработка пленок проводилась вручную (при температуре 20°C и длительности проявления 4 минуты) в недавно прошедших приемочные испытания концентратах "Ренмед-К" (производство фирмы "ВИПС-МЕД", г. Фрязино). Результаты представлены на рис. 3. Как и ожидалось, самый незначительный (ровный) "ход с жесткостью" наблюдается у вольфраматных экранов типа ЭУ-В2. Иттриевые экраны ЭУ-ИЗ имеют максимум эффективности при СПО порядка 5 мм Al (эффективная энергия 40-45 кэВ) с незначительным падением к большим энергиям. У комплекта гадолиниевых экранов ЭУ-Г3 эффективность растет примерно в 2,5 раза в исследованном интервале значений СПО. Их преимущество особенно проявляется при энергиях выше 45 кэВ (см. также [1]). "Смешанная" система ЭУ-ИЗ\ЭУ-Г3, предложенная недавно фирмой РЕНЕКС в качестве альтернативой вольфраматным экранам, обладает одинаковым с экранами ЭУ-В2 "ходом с жесткостью" до примерно 45 кэВ. При дальнейшем увеличении энергии ее эффективность продолжает расти, но не в той же мере, как у комплекта ЭУ-Г3. Наши экспериментальные данные еще раз подтверждают уже известный факт, что при внедрении гадолиниевых экранов необходимо перейти к большим анодным напряжениям.

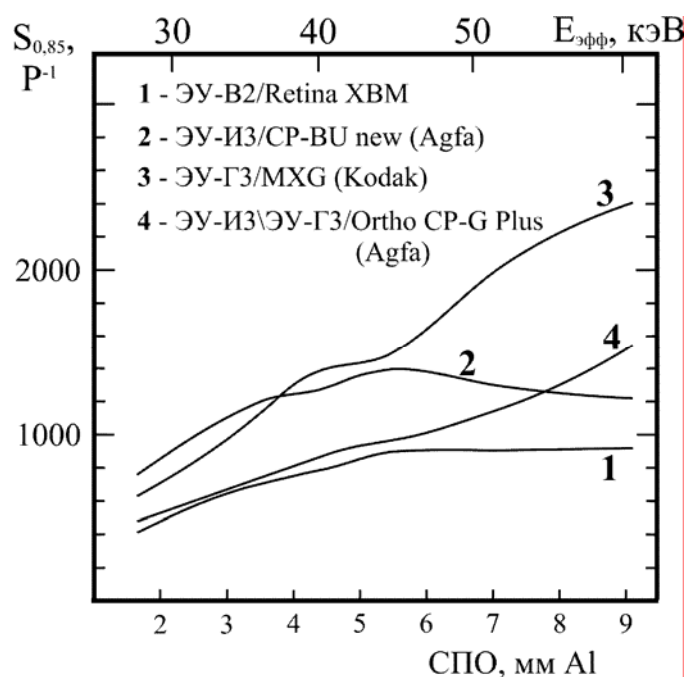


Рис.3. "Ход с жесткостью" для четырех комбинаций экран/пленка при ручной обработке в реактивах "Ренмед-К" (время проявления 4 мин. при 20°C).

4. Практические рекомендации

Из только что сказанного вытекает одно жесткое правило, которым следовало бы руководствоваться на практике при переходе с "синих" экранов на гадолиниевые: при подборе условий экспонирования ни в коем случае нельзя уменьшать анодное напряжение! Роль здесь играют два обстоятельства: высокие контрастность изображения и эффективность экранов. С одной стороны, ортохроматические пленки в среднем обладают более высокой контрастностью, нежели синечувствительные, и получаемый на них контраст изображения часто непривычно высок для рентгенологов (снимки "жесткие"). Поскольку контрастность пленок практически не удается изменить условиями обработки (т.е. выбором режима или реактивов, см. табл. 2), то для получения более привычного контраста остается *увеличить* анодное напряжение при экспонировании, уменьшая таким путем контраст объекта¹². Одновременно растет светоотдача экранов и уменьшается дозовая нагрузка на пациента. С другой стороны, многие лаборанты привыкли регулировать экспозицию (например, от худого к полному пациенту или наоборот) с помощью анодного напряжения вместо произведения мАс. Это само по себе неверно, так как при этом изменяется контраст объекта, и снимки разных пациентов получаются с различной контрастностью, из-за чего их трудно сравнивать друг с другом. При переходе на более эффективные гадолиниевые экраны такой подход приводит к уменьшению анодного напряжения и к дополнительному увеличению контраста объекта.

Следовательно, в нарушение стереотипа, при переходе на гадолиниевые экраны необходимо *увеличивать* анодное напряжение и одновременно существенно *уменьшать* анодный ток (или мАс), что, кроме всего прочего, приводит к снижению дозовой нагрузки на пациента и к более щадящему режиму работы рентгеновского аппарата. Как следствие – увеличивается ресурс аппаратуры.

Для справки приведем два примера. Рассмотрим сначала боковую проекцию стопы (пяточной кости). Привычные условия при номинальной чувствительности приемника около 1200 P⁻¹: фокусное расстояние 1 м, анодное напряжение 47 кВ, экспозиция 5-10 мАс. С экранами ЭУ-Г3 и пленкой MXG (Kodak) хороший снимок получается при 57 кВ, 0,7-1,5 мАс (параметры зависят от аппарата, исходной системы визуализации, способу и условий обработки пленки). Другой пример – обзорный снимок грудной клетки худого пожилого пациента. Примерно одинаковые результаты получаются с применением гадолиниевых экранов типа Lanex Regular (Kodak) при ручной обработке пленок в проявителе G150 (Agfa), 3-4 минуты при 20°C:

¹² Для достижения той же цели можно также установить в первичном пучке дополнительный фильтр – слой меди или алюминия – с целью поглощения "мягких" энергий. Одновременно уменьшается интенсивность пучка, что особенно желательно для старых аппаратов, на которых с гадолиниевыми экранами приходится работать на нижнем пределе возможных экспозиций.

- без применения рентгеновского раstra: 57 кВ, 12 мАс (Retina XBM) или 5 мАс (MXG);
- с применением раstra: 83 кВ, 2,4 мАс (Retina XBM) или 1,2 мАс (MXG).

Еще одно замечание по поводу выбора режимов экспонирования. Литература по этому вопросу довольно обширна (например, [2,4]), однако также и довольно разноречива по своим рекомендациям. Если прибегнуть к стандарту ИСО 9236-1 (см. также табл. 1 в [5]) в качестве "справочника", то получается такая картина: конечности следует снимать при анодном напряжении порядка 50 кВ, голову – при 70 кВ, позвоночник и кишечник – при 90 кВ, а грудную клетку - при 120 кВ. Разумеется, это довольно приблизительная картина, но можно уверенно исходить из нее, так как в рамках этого международного стандарта условия экспонирования для определения показателей системы экран/пленка были выбраны в соответствии с современными западными методиками, что означает – для гадолиниевых экранов в комбинации с ортохроматическими пленками.

5. Часто задаваемые вопросы

- Можно ли обрабатывать ортохроматические пленки в проявочных автоматах?

Ответ: Да, можно, все эти пленки предназначены для автоматической обработки. Пленки, в названии которых встречаются буквы "RA" ("Rapid Access"), можно обработать в скоростных циклах (60 сек и менее) при температуре не ниже 38°C.

- Можно ли обрабатывать ортохроматические пленки фирмы Kodak в реактивах фирмы Agfa (или наоборот)?

Ответ: Да, можно, эти пленки можно также обрабатывать практически в любых отечественных реактивах, так как они относительно слабо зависят от конкретного типа проявителя. Единственное, чего нельзя с ними проделать – это существенное переэкспонирование с недопроявлением.

- Можно ли ортохроматические пленки применять в комбинации с привычными для России усиливающими экранами (синего свечения)?

Ответ: Нет, ни в коем случае! Приличное по оптической плотности изображение нельзя получить даже при 5-8-кратной дозе. Ортохроматические пленки можно применять исключительно в комбинации с гадолиниевыми усиливающими экранами.

- Можно ли синечувствительные пленки применять в комбинации с гадолиниевыми усиливающими экранами?

Ответ: Да, можно. Необходимая экспозиция не выше, чем при работе с экранами синего свечения, а качество изображения (разрешающая способность, зернистость) в этом случае даже лучше. Вопрос только в контрастности изображения, так как синечувствительные пленки на объемных кристаллах очень чувствительны к условиям обработки.

- Можно ли ортохроматические пленки обрабатывать при желто-зеленом фотолабораторном освещении?

Ответ: Нет, ни в коем случае! "Ортохроматический" означает "зеленочувствительный", т.е. свечение такого фонаря находится в области чувствительности этих пленок. Кстати, все без исключения маммографические пленки, применяемые в России, являются также ортохроматическими!

- Что важного нужно учесть при переходе с "синей" на "зеленую" системы рентгенографии?

Ответ: Три главных момента: Во-первых, работать можно только при стандартном (!) красном фотолабораторном освещении, лучше всего от светодиодных фонарей. Во-вторых, следует сначала поменять все усиливающие экраны на гадолиниевые (и заодно поменять старые, тяжелые кассеты на современные). В-третьих, при выработке новых режимов следует стремиться к более высоким анодным напряжениям и к снижению мАс. Контрастность изображения можно снизить увеличением анодного напряжения с одновременным снижением мАс, при этом уменьшается доза и продлевается ресурс аппарата.

- Что делать, если даже при минимальных мАс снимки получаются черными ("перебитыми")?

Ответ: Вариантов несколько. Можно увеличить фокусное расстояние, учитывая необходимость замены раstra [1]. При выборе типа усиливающих экранов лучше остановиться на экранах ЭУ-ГЗ, обладающих меньшей эффективностью, чем экраны высокого усиления (Lanex Regular – Kodak; CP-G 400 – Agfa). Можно установить на выходе из трубки дополнительный фильтр (например, из меди толщиной 0,1-0,2 мм или алюминия толщиной 3-5 мм), приводящий к снижению интенсивности, но и к большей жесткости излучения. Наконец, следует исключить из работы большой фокус 2×2 мм² [1].

- Можно ли ортохроматические пленки одной фирмы применять в комбинации с гадолиниевыми усиливающими экранами другой фирмы?

Ответ: Да, можно, хотя по маркетинговым соображениям это не приветствуется ни одной фирмой. Гарантийные обязательства (качество пленки, экранов, реактивов) признаются обычно только при "родной" комплектации.

Заключение

В России, наконец, наступила эра "зеленой" рентгенографии. Ей может помешать только переход на современные цифровые системы визуализации, внедрение которых, однако, связано с существенно большими затратами. Средства, необходимые для перехода на "зеленую" систему визуализации изображения, оправданны, поскольку рентгенологи получают реальную возможность работы с качественными изображениями,

изготовленными без переэкспонирования, при ручной или автоматической обработке, в отечественных или зарубежных реактивах. "Зеленая" система универсальна даже при низком уровне подготовки рентгенолаборантов. Их надо научить только одному: не бояться увеличения анодного напряжения и снижения мАс и при этом грамотно устанавливать экспозицию – но это, пожалуй, самый трудный момент при переходе на "зеленую" систему рентгенографии.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории приемников рентгеновского излучения РНЦ РР Головковой С.И., Кавторовой В.П., Мягковой М.Г., Соколовой Т.А. и Шевченко В.Н. за проведение некоторых исследований, результаты которых использованы в данной работе.

Юрген Рюдигер
Руководитель лаборатории приемников рентгеновского излучения РНЦ РР
Тел. 120-34-04

Литература

1. *Блинов Н.Н., Горелик Ф.Г., Резник К.А.* // Мед. техника. – 2002. - № 5. - С.13-15.
2. *Блинов Н.Н. (мл.)* Стандартизация технических условий выполнения рентгенологических исследований. В кн.: Медицинская рентгенология. Под ред. *Р.В.Ставицкого*. М., МНПИ. – 2003. – Гл. 1.2. - С.28-37.
3. *Бреслав Ю.А., Ларионов В.Н.* // Мед. техника. – 2002. - № 5. – С.40-45.
4. *Валеев А.С., Шалыгин В.И., Чиков В.А.* // Рекомендации к применению зеленочувствительных рентгеновских систем. Инструктивно-методическое письмо. Новосибирск, 2002 г.
5. *Горелик Ф.Г.* // Мед. техника. – 2003. - № 5. - С.39-42.
6. *Гурвич А.М.* Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М., Высшая школа. – 1982. - С.96.
7. *Гурвич А.М.* Рентгенолюминофоры и рентгеновские экраны. М., Атомиздат. – 1976. - С.63.
8. *Гурвич А.М.* Физические основы радиационного контроля и диагностики. М., Энергоатомиздат. – 1989. - С.35.
9. *Гурвич А.М., Катомина Р.В., Переслегин И.А.* // Вестник рентгенологии и радиологии. – 1976. - № 2. – С.66-71.
10. *Максимов С.А., Бреслав Ю.А., Китаев В.В.* Ортохроматические медицинские рентгенографические системы. Обзор компании "Медицинские Системы Изображения", 1998 г.
11. *Рюдигер Ю., Головкова С.И., Кавторова В.П., Мягкова М.Г., Шевченко В.Н.* // Вестник рентгенологии. – 2000. - № 3. – С.60-62.