1. Введение Настоящая работа посвящена исследованию влияния величины дозы предварительного облуче ния на спектральнокинетические параметры ура нового зеленого свечения в диапазоне 2,6...2,1 эВ при 300 К в кристаллах LiF. Актуальность исследо ваний определяется широким использованием ак тивированных ураном кристаллов LiF в качестве детекторов ионизирующих излучений, оптических сред для записи и хранения информации, в каче стве рабочих сред для термоэкзоэмиссионных де текторов и т. д. [1]. Несмотря на то, что свечение урана исследуется уже более 150 лет, до сих пор не ясна ни природа урановых излучательных комплексов (УИК), ни механизм возбуждения свечения урана, ни роль кислорода в процессе его возбуждения. УИК по [2–4] представляют собой молекулу (UO5F)0 , высокая эффективность создания которой обусловлена ее зарядовой нейтральностью, а дис кретная структура спектра свечения обусловлена излучательными переходами различной спиновой мультипольности на общую систему колебатель ных уровней основного состояния УИК. Альтернативная точка зрения, например [5–7], заключается в предположении о присутствии в спектрах свечения излучательных переходов на УИК, различающихся количеством ионов кисло рода, заместивших ионы F в экваториальной пло скости линейного уранильного комплекса, пред ставляющего собой молекулярный центр (UO2)2+. В настоящей работе исследовалось влияние ко личества и типа примесных ионов на спектрально кинетические характеристики уранового свечения в кристаллах LiF, в которых УИК формировались как в процессе выращивания при введении в ших ту различного количества кислородной примеси, так и в процессе облучения выращенных кристал лов ионизирующей радиацией. 2. Объект и методы исследований Урансодержащие кристаллы LiF были выраще ны в Институте физики НАН Киргизстана на воз духе методом Киропулоса. Примесь кислорода вво дилась в виде LiОН, а уран – в виде азотнокислого уранила. Во всех кристаллах содержание урана бы ло одинаковым и по шихте равным 0,01 моль. %. Толщина кристаллов не превышала 0,3 мм. Исследовалась импульсная фотолюминесцен ция (ИФЛ) кристаллов с временным разрешением 30 нс в спектральном диапазоне 2,6...2,1 эВ и вре менном интервале 3·10–8...10–1 с после окончания действия импульса возбуждения при 300 К. ИФЛ возбуждалась азотным лазером, излучение которого (3,68 эВ) попадает в полосу активаторного погло щения на 4 эВ, присутствующую в спектре урансо держащих кристаллов [8, 9]. Энергетическая осве щенность в плоскости образца была неизменна во всех экспериментах и составляла 0,3 МВт/см2 . Дли тельность импульса возбуждения 20 нс. ИФЛ возбуждалась как в необлученных кри сталлах, так и кристаллах, предварительно облу ченных серией импульсов электронов средней энергией 250...300 кэВ при 300 К в диапазоне по глощенных доз 102 ...106 Гр. Исходная дефектность кристаллов контролиро валась по спектрам оптического поглощения в ди апазоне 6,0...0,25 эВ, характерный вид которых приведен на рис. 1. (Для сравнения здесь же приве ден спектр поглощения кристалла LiF–OH). Представленные спектры свидетельствуют о том, что в УФ области спектра исследованных кри сталлов LiF(U) присутствуют (рис. 1) полосы на 5, 4 и 3 эВ, как и в [8, 9]. По характерным особенностям спектров погло щения в ИК области исследованные кристаллы LiF(U) были разделены на два типа. В спектрах необлученных кристаллов типа I при сутствуют группы узких полос в области 0,46...0,43 и 0,36...0,35 эВ. Такой же спектр наблюдается и в не ак тивированных ураном кристаллах LiF–OH (рис. 1), где по [10–12] группа полос в области 0,46 эВ обусло влена ионами ОН и комплексами Ме–ОН– , где Ме – неконтролируемая катионная примесь. Природа поглощения в области 0,36...0,35 эВ не ясна. По сов падению спектров активированных ураном кристал лов и кристаллов, не содержащих уран, очевидно от сутствие в спектре LiF(U) типа I полос, обусловлен ных комплексами урангидроксил. Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 2 66 УДК 535.372 СПЕКТРАЛЬНО=КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ УРАНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В КРИСТАЛЛАХ LiF Л.А. Лисицына\*, С.Н. Путинцева, В.И. Олешко, В.М. Лисицын \*Томский государственный архитектурно‑строительный университет Томский политехнический университет E‑mail: lisitsyn@tpu.ru Представлены результаты исследований с наносекундным временным разрешением спектрально‑кинетических параметров им‑ пульсной фотолюминесценции при 300 К кристаллов LiF, содержащих уран‑гидроксильные комплексы. Показано, что облуче‑ ние кристалла электронами приводит к разрушению этих комплексов, к изменению вероятности излучательных переходов и со‑ отношения интенсивностей полос в спектре свечения урана в диапазоне 2,6...2,1 эВ. Рис. 1. Спектры поглощения при 300 К необлученных кри‑ сталлов LiF(U) (а‑в) и LiF–OH (г) с различным содер‑ жанием примеси LiOH по шихте: 4 (а), 2 (б), 0,2 (в) и 0,5 мол. % (г). На вставке: зависимость коэффици‑ ента поглощения в полосах на 4,0 (д) и 0,41 эВ (е) в спектрах кристаллов LiF(U) от количества вводимой при выращивании примеси LiОН В ИК спектре поглощения кристаллов LiF(U) типа II присутствует дополнительно широкая по лоса на 0,41 эВ (рис. 1). Спектр поглощения кри сталлов этого типа совпадает с приведенным в ра боте [7], где полоса на 0,41 эВ приписывается уран гидроксильным комплексам. Нами обнаружена линейная корреляция между количеством вводимой при выращивании кристал ла примеси ОН (рис. 1, вставка) и поглощением в полосах на 4,0 и 0,41 эВ в спектре необлученных кристаллов LiF(U) типа II. Интерполяция данной зависимости в область значений коэффициента поглощения на 4,0 эВ в спектрах кристаллов LiF(U) типа I позволила определить, что количе ство примеси ОН в кристаллах этого типа не пре вышает 0,3 мол. % по шихте. Поскольку в ИК спек трах кристаллов типа I нет полосы на 0,41 эВ, об условленной урангидроксильными комплексами, то образование этих комплексов начинается выше некоторого порогового значения концентрации примеси OH при данной концентрации урана в кристалле. 3. Результаты исследований На партии кристаллов LiF(U), выращенных в одних условиях и отличающихся количеством вво димой в шихту примеси LiOH и, соответственно, величиной поглощения в максимуме полосы на 0,41 эВ, установлено следующее. 1. Спектр ИФЛ кристалла с наибольшим содер жанием LiОН, равным 4 мол. % по шихте, состоит из широкой полосы на 2,55 эВ и слабого бесструк турного свечения в области 2,4...2,1 эВ (рис. 2, кри вая а). Спектр ИФЛ кристаллов с содержанием при меси LiОН ~0,2 мол. % (кристаллы LiF(U) тип I) со стоит из хорошо разрешенных полос на 2,28, 2,38 и 2,46 эВ и слабого бесструктурного свечения в обла сти 2,6 и 2,1 эВ (рис. 2, кривая г). В кристаллах с со держанием примеси LiОН в пределах 0,3...4 мол. %, как следует из рис. 2, спектры ИФЛ отличаются от двух вышеописанных иными соотношениями ин тенсивностей полос. С увеличением содержания примеси LiOH наблюдается следующая закономер ность: относительный вклад длинноволновых полос в спектре свечения УИК падает. Изменения поло жения полос с введением примеси не наблюдается. Рис. 2. Спектры ИФЛ (а–г) и дисперсия времени затухания (д–з) при 300 К в необлученных кристаллах LiF(U) с различным содержанием примеси LiOH по шихте: 4 (а, д), 2 (б, е), 0,5 (в, ж) и 0,2 мол. % (г, з). Спек‑ тры измерены через 1 мкс после окончания действия импульса возбуждения и нормированы по макси‑ мальной полосе в спектрах Подобное перераспределение интенсивностей полос в спектре фотолюминесценции урана на блюдалось в [13] с увеличением концентрации ура на в кристаллах LiF, выращенных методом Киропу лоса на воздухе. 2. При исследовании кинетики затухания ура нового свечения было установлено, что закон зату хания в спектральном диапазоне 2,6...2,1 эВ носит моноэкспоненциальный характер независимо от содержания примеси ОН. Нами исследована зависимость времени затуха ния от длины волны излучаемой энергии в спектре ИФЛ в каждом из кристаллов (рис. 2, кривые д–з). 0 1 2,7 2,5 2,3 2,1 ȿ, ɷȼ I, ɨɬɧ. ɟɞ. 0 200 400 W, ɦɤɫ ɚ ɛ ɝ ɜ ɞ ɟ ɠ ɡ ɜ ɛ ɝ 0 2 4 6 0,50 0,45 0,40 0,35 ȿ, ɷȼ ɤ, ɫɦ -1 ɛ ɚ ɜ ɝ ɝ 0 20 40 60 5,5 5 4,5 4 3,5 3 2,5 2 ȿ, ɷȼ ɤ, ɫɦ -1 ɜ ɚ ɝ 0 20 40 0 2,5 5 ɋ, ɦɨɥ.% ɤ, ɫɦ-1 0 2,5 5 ɤ, ɫɦ-1 ɞ ɟ Математика и механика. Физика 67 Из представленных результатов следует, что для каждого из наблюдаемых спектров уранового све чения время затухания зависит от энергии излуче ния и уменьшается с ее уменьшением. Следова тельно, с увеличением временного интервала меж ду окончанием импульса возбуждения и измерени ем спектра ИФЛ центр тяжести каждого из наблю даемых спектров смещается в коротковолновую область. Для примера на рис. 3 приведены спектры ИФЛ кристалла LiF(U)–3 мол. % LiОН, измерен ные с различной временной задержкой. Следова тельно, многообразие приводимых в печати спек тров свечения урановых комплексов может быть обусловлено различием временного разрешения измерительных трактов при стационарных измере ниях спектров в работах различных авторов. Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют также о том, что характер дисперсионной кривой времени затухания не зависит от содержания при меси ОН в кристалле. Однако, абсолютное значе ние характеристического времени затухания на лю бой длине волны излучения в диапазоне 2,6...2,1 эВ уменьшается с уменьшением в кристалле примеси LiОН. Например, в области 2,55 эВ время затухания свечения меняется в диапазоне 330...90 мкс при из менении количества добавляемой примеси LiOH в диапазоне 4...0,2 мол. % по шихте. Рис. 3. Спектры ИФЛ при 300 К необлученного кристалла LiF(U)–3 мол. % LiОН, измеренные через 1 (а), 50 (б), 100 (в) и 1000 мкс (г) после окончания действия им‑ пульса возбуждения. Спектры нормированы по по‑ лосе на 2,55 эВ 3. Нами обнаружено влияние предварительного облучения на спектр ИФЛ кристаллов LiF(U), в спектре поглощения которых до облучения присут ствует полоса на 0,41 эВ (рис. 1). Установлено, что увеличение дозы предвари тельного облучения кристалла, содержащего при месь ОН, приводит к перераспределению интен сивностей полос в спектре ИФЛ и смещению цен тра тяжести спектра в длинноволновую область (рис. 4). При этом наблюдается корреляция между спектральным положением максимальной полосы в спектре и дозой предварительного облучения кристалла. Так в спектре ИФЛ необлученного кри сталла LiF(U)–4 мол. % LiОН наибольшую интен сивность имеют переходы в области 2,55 эВ. Пере ход на 2,44 эВ становится преобладающим в спек тре ИФЛ этого же кристалла при дозе предвари тельного облучения, равной 2·104 Гр, а переход на 2,38 эВ – при дозе 3·105 Гр. Дальнейшее облучение кристалла не сопровождается смещением положе ния максимума. Таким образом, радиационное преобразование УИК в кристалле LiF(U) типа II заканчивается с появлением при лазерном возбуждении спектра ИФЛ, совпадающего со спектром, наблюдаемым в кристаллах, не содержащих урангидроксильные комплексы (кристаллы LiF(U) типа I). Ранее нами было установлено, что в диапазоне 102 ...106 Гр воз действие радиации на кристаллы LiF(U) типа I не приводит ни к изменению соотношений между по лосами в спектре ИФЛ [14], ни к изменению вре мени затухания уранового свечения, ни к измене нию спектра поглощения в ИК области. Значение дозы предварительного облучения, необходимой для полного преобразования спектра ИФЛ в кристаллах типа II, зависит от количества присутствующей в кристалле примеси ОН. Для кристалла LiF(U)–2 мол. % LiОН такое преобразо вание завершается при дозе ~8·103 Гр, что значи тельно меньше значения дозы, необходимой для достижения того же самого эффекта в процессе облучения кристалла LiF(U)–4 мол. % LiОН. Рис. 4. Спектры ИФЛ (а‑г) и дисперсия времени затухания (д‑ж) при 300 К в кристалле LiF(U)–4 мол. % LiОН при различных значениях поглощенной кристаллом дозы электронного облучения: необлученный кри‑ сталл (а, д), 2.104 (б, е), 1.105 (в) и 3.105 Гр (г, ж). Спек‑ тры измерены через 10 мкс после окончания действия импульса возбуждения и нормированы по макси‑ мальной полосе в спектрах. На вставке: зависимость коэффициента поглощения в полосе на 0,41 эВ в спектре этого же кристалла от дозы облучения Необходимо отметить, что в облученных кри сталлах LiF(U) азотным лазером возбуждается ИФЛ не только урановых комплексов, но и цен тров окраски. Свечение, в частности, F3 + центров окраски (полоса на 2,33 эВ с полушириной 0,3 эВ) приводит к искажению как ширины линий излуче ния урановых комплексов, так и кинетических 0 1 2,7 2,5 2,3 2,1 ȿ, ɷȼ I, ɨɬɧ. ɟɞ. 0 200 400 W, ɦɤɫ ɚ ɛ ɜ ɞ ɟ ɠ ɝ ɜ ɝ 0 2,5 5 024 ɤ, ɫɦ-1 D, 105 Ƚɪ 0 1 2,7 2,6 2,5 2,4 2,3 2,2 ȿ, ɷȼ I, ɨɬɧ. ɟɞ. ɚ ɛ ɜ ɝ Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 2 68 кривых затухания (появление наносекундного компонента затухания). Разница значений времен ных параметров затухания свечения УИК (мкс) и F3 +центров (нс) позволила разделить спектры ИФЛ активатора и F3 + центров во времени. Пред ставленные на рис. 4 спектры измерены через 10 мкс после окончания действия лазерного им пульса и не искажены наложением полосы свече ния F3 + центров. 4. Облучение кристаллов ионизирующей радиа цией приводит не только к перераспределению ин тенсивностей полос в спектре ИФЛ кристаллов LiF(U)–OH, но и одновременно к изменению вре мени затухания такого свечения (рис. 4). Как следу ет из представленных результатов, с ростом дозы предварительного облучения наблюдаются два про цесса. Вопервых, происходит смещение центра тя жести спектра уранового свечения в длинноволно вую область за счет увеличения интенсивности длинноволновых переходов и, вовторых, имеет ме сто увеличение вероятности всех излучательных пе реходов в спектральном диапазоне 2,6...2,1 эВ. Наименьшее время затухания уранового свече ния наблюдается при тех значениях поглощенной дозы, при которых закончилось радиационное пре образование УИК в кристалле типа II и спектры ИФЛ кристаллов типа II и I начинают совпадать. Как было показано выше, величина этой дозы за висит от исходной концентрации примеси ОН в кристалле. Таким образом, время затухания уранового све чения зависит в необлученных кристаллах LiF от концентрации присутствующей примеси ОН, а в облученных кристаллах, содержащих примесь ОН – от величины поглощенной дозы. Независимо от способа получения спектра ИФЛ (вариацией концентрации ОН или дозы предвари тельного облучения) обнаружено существование корреляции между типом спектра ИФЛ урана (т. е. положением его центра тяжести) и временем зату хания свечения. Возможна и обратная процедура: восстановление типа спектра, т. е. соотношения по лос в спектре ИФЛ, по величине времени затухания любого из переходов в диапазоне 2,6...2,1 эВ. 5. Описанные выше закономерности изменения в результате облучения заселенности излучательных состояний и вероятности излучательных переходов в спектре свечения урановых комплексов, очевидно, есть результат радиационного преобразования при меси ОН, входящей в состав уранового излучатель ного комплекса. Действительно, одновременно, с ростом дозы облучения падает поглощение в полосе на 0,41 эВ (рис. 4, вставка), свидетельствующее об уменьшении числа присутствующих в кристалле комплексов урангидроксил (или UO2–OH). Наводимые радиацией изменения в спектре ИФЛ обратимы: отжиг при 600 К восстанавливает и прежнее соотношение интенсивностей полос в спектре ИФЛ, и время затухания свечения, и спектр поглощения в ИК области. В соответствии с приведенной на рис. 1 (встав ка) закономерностью, наблюдаемой в необлучен ных кристаллах, корреляция между коэффициента ми поглощения в максимумах полос на 4,0 и 0,41 эВ и количеством присутствующей в кристалле приме си ОН должна соблюдаться и в облученных кри сталлах. Тогда следует полагать, что облучением разрушаются не только центры, ответственные за полосу на 0,41 эВ (рис. 4, вставка), но и центры, от ветственные за поглощение на 4,0 эВ. Однако про верить предположение не представляется возмож ным изза наложения в спектрах облученных кри сталлов двух полос – на 4,0 и 3,5 эВ. Последняя, по видимому, обусловлена центрами типа Vk, концен трация которых растет с ростом поглощенной дозы. 4. Обсуждение результатов Ранее нами было показано, что процесс разгорания ИФЛ в каждой из полос спектра зеленого свечения урана носит моноэкспоненциальный характер [14]: где τ=40 нс и одинаково во всей спектральной области 2,6...2,1 эВ. Величина характеристического времени разго рания свечения урановых комплексов не является структурночувствительной характеристикой УИК, т. к. не зависит ни от количества примеси ОН в кри сталле, ни от величины дозы предварительного облучения кристалла. По результатам настоящей работы структурно чувствительными характеристиками УИК являют ся соотношение интенсивностей полос в спектре ИФЛ в диапазоне 2,6...2,1 эВ и вероятность излуча тельных переходов (время затухания свечения ура новых комплексов). Присутствие в необлученных кристаллах примеси ОН приводит к полному или частичному изменению ближайшего окружения линейного уранильного комплекса и, как следствие – к изменению времени затухания и соотношения интенсивности полос в спектрах свечения (рис. 2). Величина стоксового сдвига, определяемого как разница между энергией возбуждения (3,68 эВ) и положением излучательного перехода максималь ной интенсивности, зависит от количества гидрок сильных ионов, вводимых в кристалл. Увеличение присутствующей в кристалле примеси приводит к уменьшению величины стоксового сдвига с 1,30 эВ в спектре кристалла LiF(U) типа I, не содержащего урангидроксильных комплексов, до 1,13 эВ – в спектре кристалла LiF(U)–4 мол. % LiOH. Результат воздействия радиации на кристалл, заключающийся в смещении центра тяжести спек тра ИФЛ в длинноволновую область с ростом дозы радиации (рис. 3), подобен изменениям, наблюда емым в спектре ИФЛ в необлученном кристалле с уменьшением содержания ОН (рис. 2 и 4). Обнару женный эффект является не только прямым дока зательством присутствия примеси ОН в окружении линейного уранильного комплекса, но и свиде max It I t ( ) (1 exp( / )), = −− τ Математика и механика. Физика 69 тельствует о радиационном методе выведения при меси ОН из состава УИК. О разрушении под действием радиации уран гидроксильных комплексов говорит также умень шение поглощения в полосе на 0,41 эВ с ростом до зы предварительного облучения кристаллов LiF(U) типа II (рис. 4, вставка). Отсутствие влияния радиации в широком ин тервале доз 102 ...106 Гр [14] на вид спектра ИФЛ кристаллов LiF(U) типа I свидетельствует о высо кой радиационной стойкости УИК, не содержащих в качестве ближайшего окружения ионы ОН– . Как свидетельствуют результаты настоящей ра боты, величина характеристического времени зату хания свечения УИК зависит от следующих пара метров: величины поглощенной кристаллом дозы, количества присутствующей в кристалле примеси ОН и от энергии излучательного перехода. Увели чение энергии излучательного перехода сопровож дается увеличением времени жизни центра в соот ветствующем излучательном состоянии для УИК с различным количеством примеси в составе УИК. Присутствие примеси ОН в кристалле приводит к формированию некоторых промежуточных струк тур, отличающихся количеством ионов ОН– в со ставе УИК. Увеличение числа ионов ОН– в составе излучательного уранового комплекса сопровожда ется увеличением характеристического времени за тухания во всем спектральном интервале 2,6...2,1 эВ. Облучение кристалла, содержащего в составе УИК ионы ОН , вызывает радиационную модифи кацию урановых комплексов, видимо, включа ющую разрушение ионов ОН– и, как следствие, уменьшение их числа в составе УИК. Это в свою очередь приводит к уменьшению числа уранги дроксильных комплексов, проявляющихся в спек трах поглощения в ИК области. (Радиационное разрушение ионов ОН– в кристаллах LiF–OH дока зано в [11, 12]). Наименьшее значение времени затухания све чения (90 мкс в области 2,55 эВ) есть характеристи ка уранового излучательного комплекса, не содер жащего в своем составе ионы ОН– . Спектр свече ния такого комплекса не меняется с ростом дозы облучения, что говорит в пользу отсутствия в со ставе УИК радиационнонестойких ионов ОН– . Повидимому, уранильной линейной группе (UO2)2+, в экваториальной плоскости которой нахо дятся ионы F– , принадлежит спектр ИФЛ, обла дающий следующим набором характеристик: мак симальная интенсивность излучения в области 2,38 эВ; соотношение интенсивностей полос на 2,28, 2,38 и 2,46 эВ, как 1:5:1; диапазон значений времени затухания 90...50 мкс в зависимости от энергии перехода в области 2,6...2,1 эВ (рис. 2, кри вые г, з). Теоретические оценки [15–17] говорят в пользу возможности такой интерпретации зеленой люминесценции УИК в ЩГК. Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 2 70 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 1. Слесарев А.И., Жамангулов А.А., Кидибаев М.М., Кортов В.С., Шульгин Б.В. Термостимулированная экзоэлектронная эмис сия кристаллов фторидов лития и натрия, активированных ура ном // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 9. – С. 60–64. 2. Феофилов П.П. О природе элементарных осцилляторов иона урана // Оптика и спектроскопия. – 1960. – Т. 8. – Вып. 6. – С. 824–827. 3. Рarrot R., Naud C., Delbecq C.J., Yuster P.H. Optical and ESR studies of U5+ luminescent molecular centers in x and γirradiated LiFU4O8 crystals // Physical Review B. – 1977. – V. 15. – № 1. – Р. 137–145. 4. Dalvi A.G.I., Sastry M.D., Joshi B.D. Trap level spectroscopy of ac tinidedoped phosphors: I. LiF:UO2 2+ and LiF:241Am // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1984. – V. 17. – Р. 5851–5863. 5. Lupei A., Lupei V., Ursu L. Impurities effects on the U6+ lumines cence in LiF // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1985. – V. 18. – P. 6099–6107. 6. Алешкевич Н.И., Красилов Ю.И., Сытько В.В. Спектрально люминесцентные свойства и природа центров свечения в кри сталлах LiFU(VI) // Журнал прикладной спектроскопии. – 1982. – Т. 37. – № 4. – С. 585–591. 7. Lupei A., Lupei V. On the nature of U5+ centers in LiF // Phys. Stat. Sol. (b). – 1979. – V. 94. – № 301. – Р. 301–307. 8. Алешкевич Н.И., Титков У.Ф., Комяк А.И., Шолох В.Г. Спек тры поглощения монокристалла LiF, активированного шести валентным ураном // Журнал прикладной спектроскопии. – 1980. – T. 33. – Вып. 6. – С. 1060–1064. 9. Bagai R.K., Warrier A.V. Optical absorption spectrum of UO2 2+ do ped LiF // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1977. – V. 10. – Р. L 437–L 439. 10. Архангельская В.А., Гусева Е.В., Зингер Г.М., Королев Н.Е., Рейтеров В.М. Термостойкость F2 – центров в радиационно окра шенных кристаллах LiF с кислородсодержащими примесями // Оптика и спектроскопия. – 1986. – Т. 61. – № 3. – С. 542–549. 11. Akhvlediani Z.G., Berg K.Y., Berg G. Formation and annealing of hydrogen centers in OH containing Xirradiated LiF crystals // Crystal Lattice Defects. – 1980. – V. 8. – № 4. – P. 167–175. 12. Ахвледиани З.Г. Uцентры в гаммаоблученных кристаллах LiF:OH– // Журнал прикладной спектроскопии. – 1989. – Т. 50. – Вып. 3. – С. 498–500. 13. Беляев Л.М., Перекалина З.Б., Варфоломеева В.Н., Пано ва В.П., Добржанский Г.Ф. Люминесцентные свойства фтори да лития, активированного ураном // Кристаллография. – 1960. – Т. 5. – № 5. – С. 757–760. 14. Лисицына Л.А., Олешко В.И., Лисицын В.М., Путинцева С.Н. Кинетические параметры уранового свечения в кристаллах LiF // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 69–74. 15. МсGlynn S.P., Smith L.K. The electronic structure, spectra and magnetic properties of actinyl ions. Part I. The uranil ion // Journal of molecular spectroscopy. – 1961. – V. 6. – P. 164–187. 16. Дяткина М.Е., Марков В.П., Цапкина И.В., Михайлов Ю.Н. Элек тронное строение группы UO2 в соединениях уранила // Журнал неорганической химии. – 1961. – Т. 6. – Вып. 3. – С. 575–580. 17. Онопко Д.Е., Пашнина Е.П., Старостин Н.В. О природе лю минесценции ионов шестивалентного урана в различных кри сталлических основах // Оптика и спектроскопия. – 1977. – Т. 43. – Вып. 5. – С. 901–905. Поступила 25.01.2008 г.