

04,16

Люминесцентные свойства твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$

© Д.А. Спасский^{1,2}, И.В. Никифоров³, А.Н. Васильев¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт физики Тартуского университета, Тарту, Эстония

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: spas@srd.sinp.msu.ru

Поступила в Редакцию 24 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2023 г.

Принята к публикации 5 декабря 2023 г.

Проведено исследование люминесцентных свойств ряда твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$, полученных методом твердофазного синтеза. Согласно данным рентгенофазового анализа полученные образцы являются однофазными; изменение параметров кристаллической решетки описывается законом Vegard. Определена природа центров свечения твердых растворов при возбуждении излучением УФ- и ВУФ-диапазонов. Показано, что все образцы характеризуются свечением в УФ-диапазоне, связанным с люминесценцией с переносом заряда ($x \neq 1$) или излучательной релаксацией экситонов ($x = 1$). Показана повышенная эффективность переноса энергии на центры свечения в твердых растворах, что связывается с ограничением расстояния разлета нетермализованных электронов и дырок. Данный эффект приводит к увеличению интенсивности УФ-люминесценции в твердых растворах и может представлять прикладной интерес для создания новых фосфоров с интенсивной люминесценцией в УФ-диапазоне.

Ключевые слова: перенос энергии, УФ-люминесценция, люминесценция с переносом заряда, твердые растворы, ScPO_4 , YbPO_4 .

DOI: 10.61011/FTT.2024.01.56939.262

1. Введение

Фосфоры, обладающие люминесценцией ультрафиолетового (УФ) диапазона, представляют интерес для использования в области физики высоких энергий, медицине, экологии, системах безопасности [1–4]. Сцинтилляционные детекторы, излучающие в УФ-диапазоне, позволяют использовать солнечно-слепые детекторы излучения и тем самым решить проблему с внешней засветкой [1]. УФ-излучение диапазона 200–260 нм обладает бактерицидными свойствами и может быть использовано для стерилизации поверхностей, системах очистки воды, хирургии [5,6]. Кроме того, УФ-фосфоры, в том числе с длительным послесвечением, могут применяться в солнечных панелях, а также в фотокатализе [7,8].

Ранее было показано, что широкозонные фосфаты со структурным типом монацит и ксенотим, легированные ионами редкоземельных элементов Ce^{3+} , Pr^{3+} и Yb^{3+} , а также ионами V^{3+} обладают яркой люминесценцией в УФ-диапазоне [9–12]. Кроме того, достоинством фосфатов является относительно низкая температура синтеза, химическая стабильность и радиационная стойкость [13–15]. Люминесцентные свойства твердых растворов на основе фосфатов также широко исследуются [16–21]. В ряде случаев было показано, что твердые растворы могут обладать повышенным квантовым выходом люминесценции по сравнению с соединения-

ми, составляющими такие растворы [18,21]. Улучшенные свойства связываются с возможностью создания в твердых растворах локальных областей (кластеров) нанометрового размера, в которых содержание одного типа замещаемых атомов превышает их статистическое распределение в растворе. Это приводит к уменьшению длины разлета электрон-дырочных пар при высокоэнергетическом возбуждении, росту вероятности переноса энергии на центры свечения, а также улучшению локализации возбуждений на центрах свечения [18,22,23].

Насколько нам известно, исследований люминесцентных свойств твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ ранее не проводилось. Конечные составы ScPO_4 и YbPO_4 , обладают люминесценцией в УФ-диапазоне, однако природа центров свечения этих соединений разная. Так, ScPO_4 характеризуется полосой свечения с максимумом при 210 нм. Данная полоса связана с излучательной релаксацией автолокализованных экситонов с локализацией электронной компоненты на состояниях $3d\text{ Sc}$ [18,24]. Исследования фосфатов, легированных ионами Yb^{3+} , показали, что наряду с ИК-свечением, характерным для внутрицентровых переходов ${}^7\text{F}_{5/2} - {}^7\text{F}_{7/2}$ в Yb^{3+} , также наблюдаются две широкие полосы с УФ и синей спектральных областях, представляющей собой люминесценцию с переносом заряда (ЛПЗ) [10,25,26]. ЛПЗ является процессом обратным поглощению с переносом заряда [27,28]. При поглощении с переносом заряда

электрон от лигандов переходит на редкоземельный ион, образуя возбужденное состояние с переносом заряда, состоящее из иона Yb^{2+} и дырки, делокализованной на окружающих ион лигандах. Люминесценция с переносом заряда представляет собой излучательную релаксацию этого состояния. При этом обычно наблюдается две полосы, разделенные на 10000 cm^{-1} , что соответствует энергетическому зазору между уровнями ${}^7\text{F}_{7/2}$ – ${}^7\text{F}_{5/2}$ в Yb^{3+} . Также характерной особенностью ЛПЗ являются короткие времена затухания $\sim 10^{-9}$ – 10^{-7} с под воздействием высокоэнергетического излучения, что позволяет рассматривать этот тип люминесценции для применения в сцинтилляционных детекторах [29,30].

В настоящей работе проведены исследования люминесцентных свойств твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$. Основное внимание уделено зависимости структурных и люминесцентных свойств от состава твердого раствора, а также конкуренции между центрами УФ-свечения различной природы.

2. Техника эксперимента

Синтез ряда твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ ($x = 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1$) был проведен стандартным твердофазным методом из стехиометрических количеств Yb_2O_3 (99.99%), Sc_2O_3 (99.99%) и $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (99.99%). Исходные навески гомогенизировались в агатовой ступке. Полученную смесь медленно нагревали до 1490°C в течение 10 h, а затем отжигали в течение 50 h на воздухе в алуновом тигле.

Рентгенограммы были получены для порошкообразных образцов на дифрактометре Thermo ARL X'TRA под воздействием $\text{CuK}\alpha$ -излучения, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ в геометрии Брэгга–Брентано. Регистрация производилась с использованием ПЗС-детектора с охлаждением Пельтье. Рентгенограммы были измерены при комнатной температуре в диапазоне углов 2θ от 15° до 70° с шагом 0.02° . Для определения параметров элементарной ячейки применялся метод Ле Бэйля с использованием программного обеспечения JANA2006. Анализ рентгенограмм синтезированных образцов проводили с использованием базы данных ICDD PDF-4.

Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции в ультрафиолетовом (УФ) и вакуумно-ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах были измерены с использованием специализированной установки по люминесцентной спектроскопии твердого тела. Дейтериевая лампа Hamamatsu L11798 с окном из MgF_2 использовалась в качестве источника возбуждения. Длина волны возбуждения выбиралась с использованием вакуумного монохроматора McPherson 234/302 с дисперсией 4 nm/mm . Образцы помещались в вакуумный криостат ARS, позволяющий проводить измерения в диапазоне температур 5 – 350 K , однако в данной работе все измерения проводились при комнатной температуре $T = 300 \text{ K}$. Сигнал люминесценции регистрировали с использованием монохроматора Shamrock 303i,

оснащенного счетной головкой Hamamatsu H8259-02, а также CCD детектором Newton DU970P-BVF. Спектры люминесценции исправлены на функцию спектральной чувствительности системы регистрации.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Рентгенофазовый анализ твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$

Рентгенограммы синтезированных образцов представлены на рис. 1. Положения и количество рефлексов на рентгенограммах смешанных фосфатов скандия и иттербия, соотносятся с чистыми ScPO_4 (PDF Card № 00-048-0477) и YbPO_4 (PDF Card № 00-045-0530) из базы данных ICDD PDF-4. Отсутствие примесных рефлексов указывает на формирование непрерывной серии твердых растворов. Рентгенограммы твердых растворов фосфатов демонстрируют постепенное смещение рефлексов в сторону больших углов по мере замещения иттербия скандием. Смещение в область больших значений 2θ наблюдается для всех рефлексов, в качестве примера на рис. 2 показана зависимость рефлекса $(0\ 2\ 0)$ от состава твердого раствора. Расчет параметров элементарной ячейки (рис. 3) показывает их постепенное уменьшение с ростом значения x , которое может быть описано линейной функцией. Полученная зависимость связана с замещением ионов Yb^{3+} с большим радиусом ($r_{\text{VII}} = 0.98 \text{ \AA}$) на меньшие ионы Sc^{3+} ($r_{\text{VII}} = 0.87 \text{ \AA}$) [31]. Наблюдаемое линейное изменение параметров ячейки показывает, что для данных твердых растворов соблюдается закон Вегарда [32], а полученная серия твердых растворов образует непрерывный ряд.

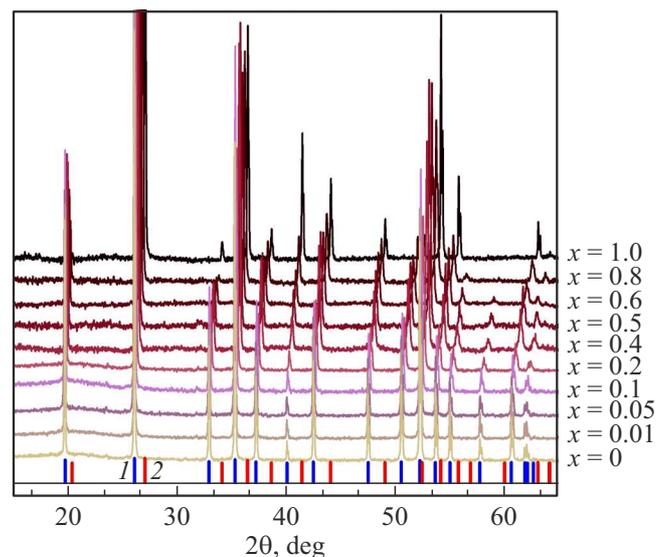


Рис. 1. Рентгенограммы серии твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ ($x = 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1$), а также положение Брэгговских рефлексов для YbPO_4 (ICDD PDF-4 No. 00-045-0530) (1) и ScPO_4 (ICDD PDF-4 No. 00-048-0477) (2).

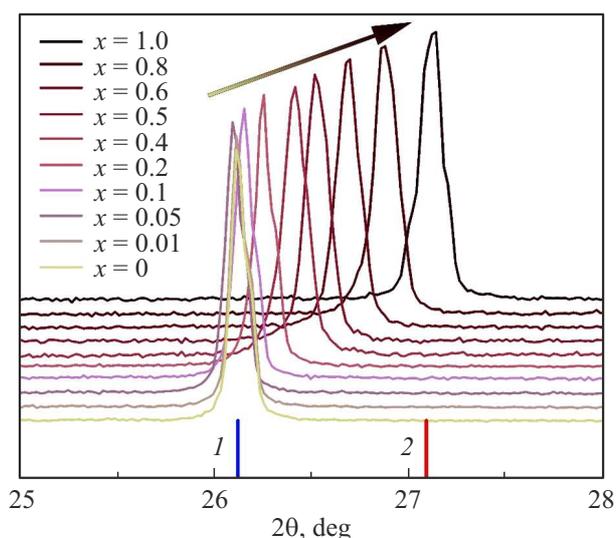


Рис. 2. Зависимость положения основного рефлекса (020) в зависимости от состава твердого раствора $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ ($x = 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1$), а также положение данного рефлекса для YbPO_4 (ICDD PDF-4 No. 00-045-0530) (1) и ScPO_4 (ICDD PDF-4 No. 00-048-0477) (2).

Таким образом, в результате рентгенофазового анализа установлено, что все синтезированные образцы серии твердых растворов являются однофазными и кристаллизуются в структурном типе ксенотим с тетрагональной сингонией и пространственной группой $I4_1/amd$ (No 141).

3.2. Люминесцентные свойства твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$

Спектры люминесценции, полученные при разных энергиях возбуждения для конечного состава с $x = 1$ (ScPO_4) представлены на рис. 4. В спектре люминесценции, измеренном при энергии возбуждения 7.3 eV,

что соответствует межзонным переходам, наблюдаются две широкие полосы с максимумами при 210 и 425 nm, а также ряд узких полос. Согласно работам [18,24] полоса свечения при 210 nm является собственной для ScPO_4 и связана с излучательной релаксацией автолокализованных экситонов с электронной компонентой, локализованной на состояниях 3d Sc и дырочной — на состояниях 2p O. Эта полоса возбуждается от области края фундаментального поглощения, первый пик в спектре возбуждения наблюдается при 7.2 eV (рис. 4) и связан с прямым созданием экситонов [33]. В спектре возбуждения широкой полосы при 425 nm наблюдается ряд полос в области прозрачности кристалла, что позволяет приписать эту полосу центрам свечения, связанным с дефектами кристаллической структуры. Селективное возбуждение этой полосы возможно в низкоэнергетическом пике при 4.6 eV. Узкие полосы наблюдаются в области 310, 580–720 и 950–1050 nm и связаны с наличием неконтролируемых примесей Gd^{3+} , Eu^{3+} и Yb^{3+} соответственно. Спектры возбуждения люминесценции для полос свечения Eu^{3+} и Yb^{3+} характеризуются наличием низкоинтенсивных широких полос ниже края фундаментального поглощения с максимумами при 6.03 (Eu^{3+}) и 6.41 (Yb^{3+}) eV. Данные полосы связаны с переходами с переносом заряда, а разница 0.38 eV между максимумами полос возбуждения Eu^{3+} и Yb^{3+} хорошо согласуется со значением 0.43 eV, предсказанным в рамках модели химического сдвига, развитой в работах Доренбоса [34].

Спектры люминесценции всей серии образцов при энергии возбуждения 9 eV представлены на рис. 5. За исключением конечного состава с $x = 1$ (ScPO_4) спектры характеризуются наличием двух полос с максимумами в УФ (290–310 nm) и синей (420–430 nm) спектральных областях, а также группы полос в ИК-области (950–1050 nm). Наблюдаемые полосы свечения связаны с внутрицентровыми переходами ${}^7\text{F}_{7/2} - {}^7\text{F}_{5/2}$ в Yb^{3+} . Широкие полосы в УФ и синей области спектра могут быть приписаны ЛПЗ, разница между макси-

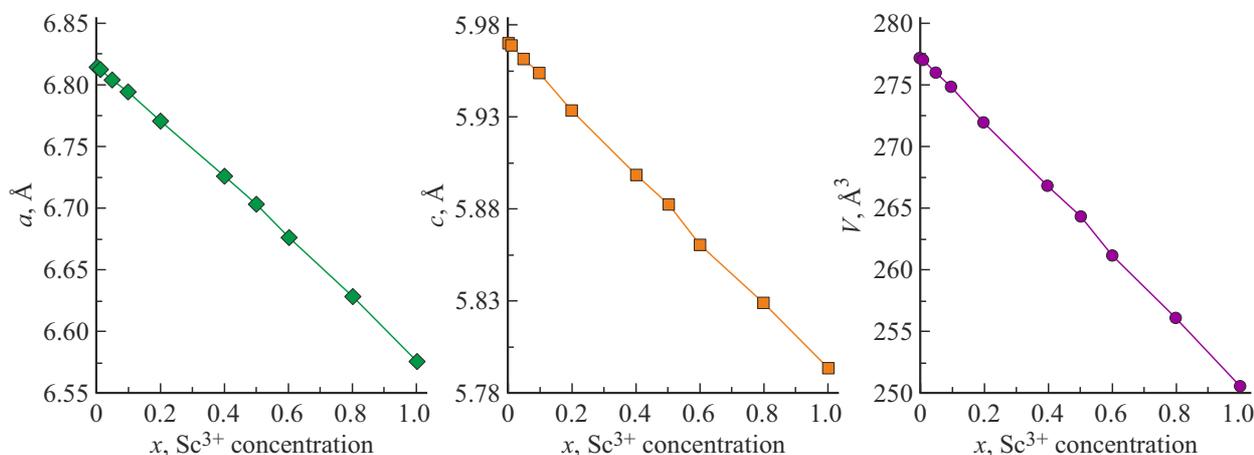


Рис. 3. Зависимость параметров a , c и объема элементарной ячейки от состава для твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ ($x = 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1$).

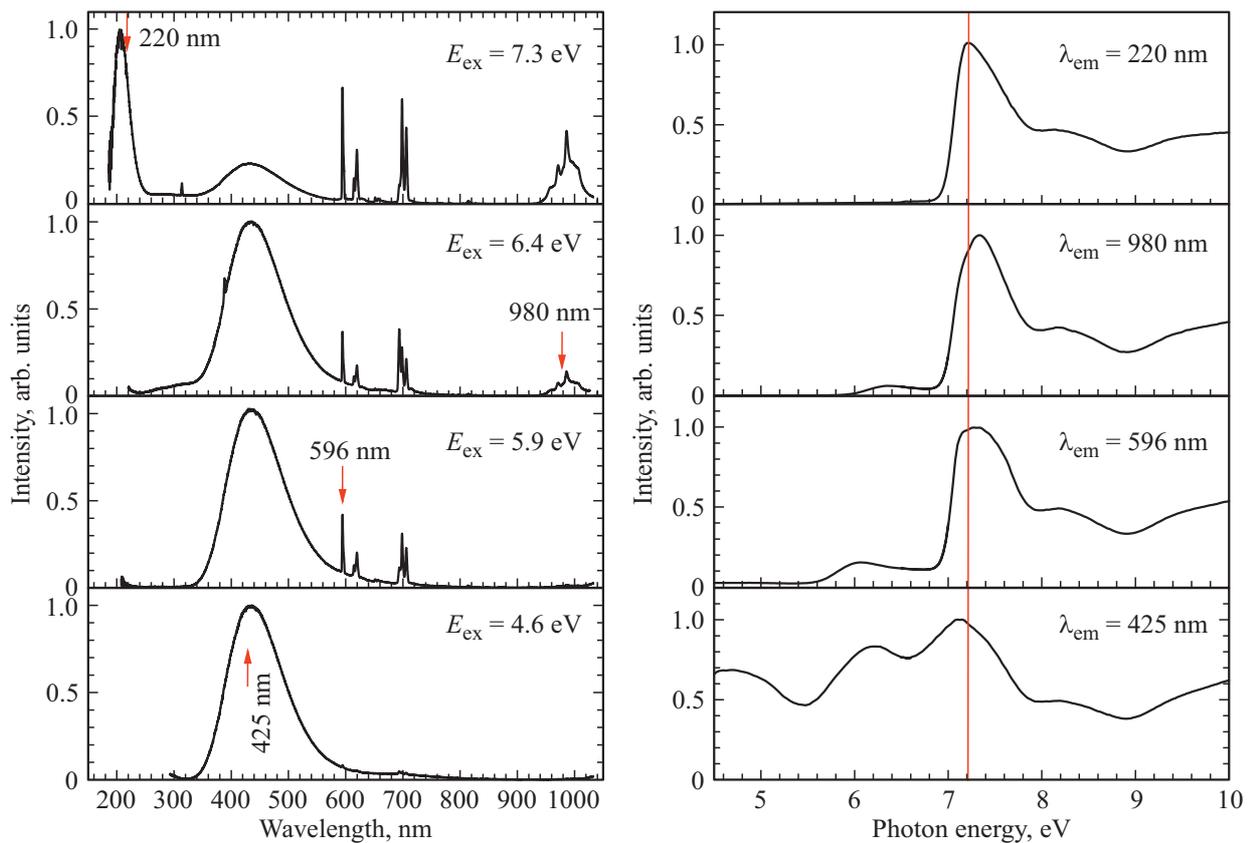


Рис. 4. Спектры люминесценции (слева) и возбуждения люминесценции (справа) для ScPO_4 . Энергия возбуждения для спектров люминесценции и длина волны регистрации спектров возбуждения указаны на рисунках. Красная вертикальная линия на правом рисунке обозначает положение экситонного пика.

мурами полос составляет $\sim 9800 \text{ cm}^{-1}$, что хорошо согласуется со значением энергетического зазора между уровнями ${}^7\text{F}_{7/2}$ – ${}^7\text{F}_{5/2}$ в Yb^{3+} — 10000 cm^{-1} [27,28]. Отметим отсутствие в растворах полосы экситонного свечения, характерную для ScPO_4 . Так, в твердых растворах $\text{Y}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ данная полоса наблюдалась вплоть до низких концентраций скандия ($x = 0.01$), а ее интенсивность достигала максимума при $x = 0.5$ [35]. Можно сделать вывод, что появление в $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ ($x \neq 1$) состояний с переносом заряда с участием электронных состояний иттербия приводит к тушению экситонной люминесценции.

Относительная интенсивность ИК-люминесценции и ЛПЗ зависит от состава твердого раствора (рис. 6). Интенсивность ИК-полосы постепенно уменьшается с увеличением концентрации иттербия в растворе. Такая зависимость связывается с концентрационным тушением 4f–4f-свечения. Действительно, расстояние, на которое может перемещаться возбуждение по иттербиевой под решетке, растет с концентрацией иттербия, что повышает вероятность попадания на дефект в процессе миграции и уменьшает вероятность излучательной релаксации возбуждения. Интенсивность ЛПЗ немонотонно зависит от содержания скандия. Интенсивность возрастает с увеличением концентрации Sc^{3+} и достигает максимума

при $x = 0.2$, превышая более чем в 2 раза интенсивность ЛПЗ в YbPO_4 . С ростом содержания Sc^{3+} до 0.4 интенсивность падает в 1.7 раза и при дальнейшем увеличении слабо зависит от состава. Увеличение интенсивности свечения наблюдалось ранее в различных твердых растворах как для примесной, так и для собственной люминесценции [36–39]. Рост интенсивности в твердых растворах связывается с ограничением расстояния разлета для разделенных электрон-дырочных пар в процессе термализации и миграции. Это увеличивает вероятность формирования экситонов или захвата генетических электронов и дырок одним центром излучения. Можно предположить, что наблюдаемая зависимость для ЛПЗ также обусловлена ограничением разлета электронов и дырок в $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$.

Спектры возбуждения ЛПЗ и ИК-люминесценции ($x \neq 1$), а также экситонного свечения ($x = 1$) представлены на рис. 7. Пик при 7.2 eV, который связан с формированием экситона на переходе $2p \text{ O} - 3d \text{ Sc}$ в ScPO_4 проявляется также и в спектрах возбуждения твердых растворов с высоким содержанием скандия ($x = 0.8, 0.6$). Наличие данного пика показывает, что энергия таких экситонов передается на центры ЛПЗ и ИК-люминесценции, что приводит к полному отсутствию свечения скандиевых автолокализованных экситонов.

Низкоэнергетический порог в спектрах возбуждения смещается скачкообразно в область низких энергий до 5.6 eV ($x = 0.8$) и далее постепенно до 5.4 eV при

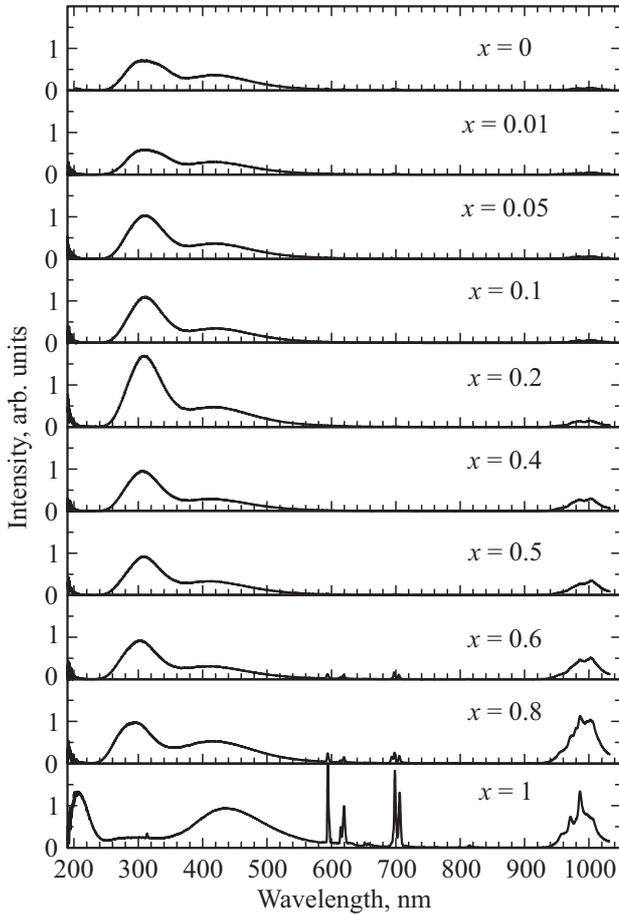


Рис. 5. Спектры люминесценции серии $Yb_{1-x}Sc_xPO_4$ при $E_{возб} = 9\text{ eV}$.

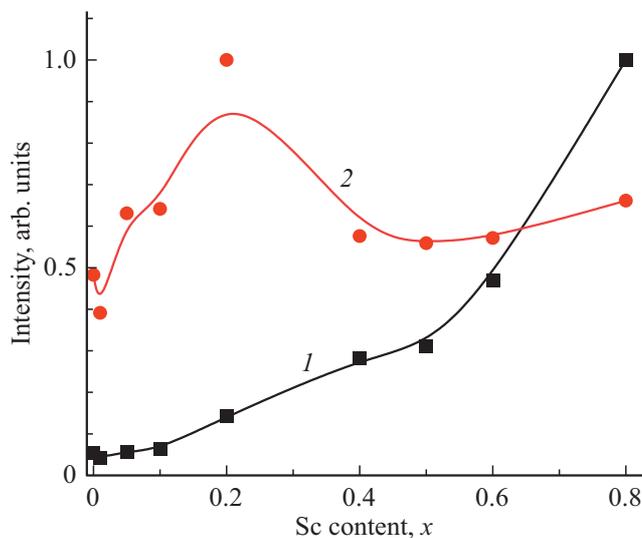


Рис. 6. Относительные интенсивности ИК люминесценции (1) и УФ люминесценции с переносом заряда (2), полученные из спектров люминесценции, представленных на рис. 5.

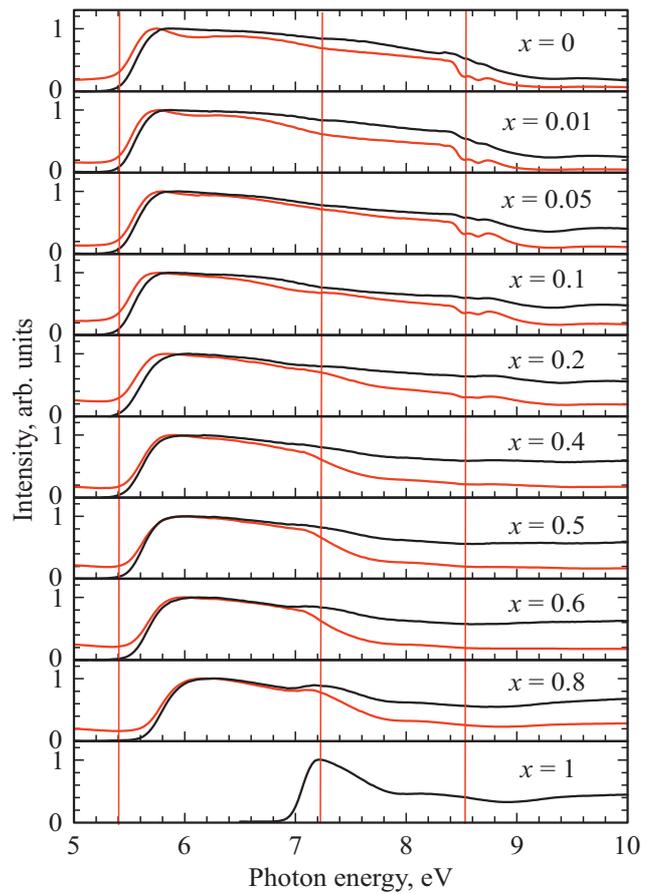


Рис. 7. Спектры возбуждения люминесценции серии $Yb_{1-x}Sc_xPO_4$, $\lambda_{lum} = 970\text{ nm}$ (красные кривые) и 290 nm (черные кривые) для всех образцов, кроме $ScPO_4$, где $\lambda_{lum} = 220\text{ nm}$. Сплошная вертикальная линия при 5.4 eV соответствует низкоэнергетическому порогу полосы с переносом заряда для $YbPO_4$, пунктирная линия при 7.2 eV соответствует энергетическому положению экситонного пика в $ScPO_4$, пунктирная линия при 8.73 eV соответствует положению экситонного пика в $YbPO_4$.

дальнейшем уменьшении содержания скандия в твердом растворе. Низкоэнергетическое смещение порога в спектрах связано с возможностью возбуждения ЛПЗ и ИК-свечения через полосу с переносом заряда. Порог в спектре возбуждения люминесценции проявляется при энергиях, при которых возбуждающее излучение начинает полностью поглощаться образцом, то есть в области, когда глубина проникновения света в образец становится порядка его толщины. Коэффициент поглощения в полосе с переносом заряда растет пропорционально концентрации иттербия ($1 - x$). В предположении гауссовой формы этого коэффициента поглощения для концентраций иттербия $> 20\%$ этот порог будет соответствовать длинноволновому краю полосы и с ростом концентрации будет смещаться в низкоэнергетическую область, а его крутизна будет расти. Из-за высокой концентрации иттербия возбуждение выходит на насыщение в области,

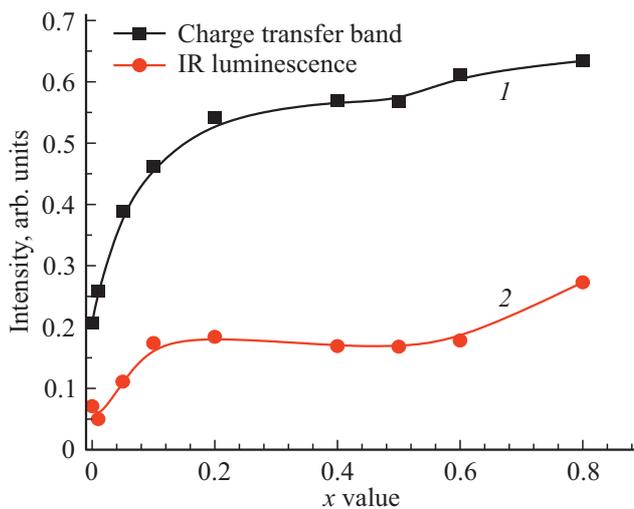


Рис. 8. Зависимость от состава твердого раствора отношения в спектрах возбуждения (рис. 7) интенсивности при $E_{ex} = 9$ eV к интенсивности в первом пике возбуждения $E_{ex} = 5.6\text{--}6.1$ eV для ЛПЗ (кривая 1) и ИК — люминесценции (кривая 2).

много шире, чем ширина на половине высоты полосы поглощения одиночного иттербиевого иона.

Характер изменения ширины запрещенной зоны при переходе от ScPO_4 к YbPO_4 важен для анализа полученных спектров возбуждения люминесценции. Насколько нам известно, экспериментальные данные по ширине запрещенной зоны YbPO_4 в литературе отсутствуют.

Расчеты зонной структуры YbPO_4 проводились в рамках теории функционала плотности в работе [40]. Согласно расчету, $E_g(\text{YbPO}_4) = 6.13$ eV и определяется прямыми электронными переходами в Γ точке зоны Бриллюэна. При этом потолок валентной зоны сформирован за счет смешивания состояний $2p$ O и $3p$ P с небольшими вкладом от состояний $3s$ P и $4f$ Yb, а дно зоны проводимости — состояниями $5d$ Yb с незначительным вкладом состояний $3p$ P. Расчеты зонной структуры ScPO_4 проводились в ряде работ в разных приближениях в рамках теории функционала плотности [41–43]. В зависимости от использованного приближения значение E_g варьируется в диапазоне $4.11\text{--}4.6$ eV и определяется электронными переходами от $2p$ O и $3p$ P на состояния $3d$ Sc, формирующие дно зоны проводимости. Таким образом, на основе результатов расчетов зонной структуры можно сделать вывод, что $E_g(\text{ScPO}_4) < E_g(\text{YbPO}_4)$. При этом необходимо учитывать, что расчеты зонной структуры, как правило, приводят к недооценке ширины запрещенной зоны кристаллов. Так, для ScPO_4 экспериментально установлено, что ширина запрещенной зоны составляет $7.2\text{--}7.6$ eV [24,44], что на ~ 3 eV больше расчетных значений.

Ширина запрещенной зоны YbPO_4 и твердых растворов с высоким содержанием иттербия может быть оценена из анализа спектров возбуждения для ИК

люминесценции Yb^{3+} . В спектрах наблюдается тонкая структура, состоящая из узких пиков при 8.57 и 8.73 eV. Ранее для твердых растворов $\text{LiY}_{1-x}\text{Yb}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ было показано, что аналогичная тонкая структура в спектрах возбуждения ЛПЗ связана с переносом энергии от автолокализованных экситонов, а также экситонов, локализованных вблизи дефектов [45]. Можно предположить аналогичную природу узких пиков в спектрах возбуждения $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$. Таким образом, пик при 8.57 eV может быть связан с формированием экситонов, локализованных вблизи дефектов, а пик при 8.73 eV — с формированием экситонов, которые затем автолокализируются. Положение высокоэнергетического пика при 8.73 eV может быть использовано для оценки ширины запрещенной зоны в YbPO_4 . Это значение примерно на 2.6 eV больше полученного в DFT расчете [40], что соответствует указанной выше недооценке ширины зоны в этом методе расчета для ScPO_4 .

В спектрах возбуждения ЛПЗ интенсивность лишь незначительно уменьшается в области энергий выше ширины запрещенной зоны по сравнению с интенсивностью в полосах с переносом заряда. Отметим, что в ранее исследованных гранатах и алюминатах, легированных иттербием, интенсивность возбуждения существенно уменьшалась, когда энергия возбуждения превышала ширину запрещенной зоны [46,47]. Исследованные твердые растворы $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ характеризуются высокой эффективностью переноса энергии разделенных электрон-дырочных пар на центры свечения ЛПЗ. При этом эффективность излучательной релаксации электронов и дырок при межзонном возбуждении возрастает для твердых растворов с промежуточными значениями x (рис. 8). Это является дополнительным аргументом в пользу предположения о том, что в данной серии твердых растворов происходит ограничение длины разлета пар в процессе их термализации и последующей миграции по кристаллу к центрам свечения. Таким образом, исследованные твердые растворы могут представлять практический интерес в качестве преобразователей высокоэнергетического излучения в люминесценцию УФ и синего диапазонов.

4. Заключение

Методом твердофазного синтеза получена серия твердых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ ($x = 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1$). Анализ рентгенограмм показал, что происходит формирование непрерывного ряда твердых растворов. Параметры a и c , а также объем элементарной ячейки линейно уменьшаются при замещении иттербия на скандий в соответствии с законом Vegarda. Показано, что только в спектрах люминесценции конечного состава растворов ScPO_4 наблюдается свечение экситонов, в твердых растворах происходит перенос энергии от экситонов на состояния с переносом заряда. Интенсивность ЛПЗ зависит от состава твердо-

го раствора и достигает максимальной интенсивности при $x = 0.2$. На основе анализа спектров возбуждения можно сделать вывод, что увеличение интенсивности связано с ограничением в твердых растворах расстояния разлета электрон-дырочных пар. Также на основе анализа спектров возбуждения оценена ширина запрещенной зоны $YbPO_4$ — 8.73 eV. Сделан вывод, что твердые растворы $Yb_{1-x}Sc_xPO_4$ могут представлять практический интерес как УФ-фосфоры с повышенным выходом люминесценции.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-12-00219 (Повышение эффективности преобразования энергии в люминесцентных и сцинтилляционных материалах на основе твердых растворов и композитов).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Welch, M. Buonanno, V. Grilj, I. Shuryak, C. Crickmore, A.W. Bigelow, G. Randers-Pehrson, G.W. Johnson, David J. Brenner. *Sci. Rep.* **8**, 2752 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21058-w>
- [2] Xianli Wang, Yafei Chen, Feng Liu, Zhengwei Pan. *Nature Commun.* **11**, 2040 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16015-z>
- [3] Y. Zhou, D.D. Jia, L.A. Lewis, S.P. Feofilov, R.S. Meltzer. *Nucl. Instrum. Meth. A* **633**, 31 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.12.238>
- [4] B. Caillier, J. Caiut, C. Muja, J. Demoucron, R. Mauricot, J. Dexpert-Ghys, Ph. Guillot. *Photochem. Photobiol.* **91**, 526 (2015). <https://doi.org/10.1111/php.12426>
- [5] H. Kitagawa, T. Nomura, T. Nazmul, K. Otori, N. Shigemoto, T. Sakaguchi, H. Ohge. *Am. J. Infect. Control* **49**, 299 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.08.022>
- [6] S. Miwa, S. Yano, Y. Hiroshima, Y. Tome, F. Uehara, S. Mii, E.V. Efimova, H. Kimura, K. Hayashi, H. Tsuchiya, R.M. Hoffman. *J. Cell. Biochem.* **114**, 2493 (2013). <https://doi.org/10.1002/jcb.24599>
- [7] Puxian Xiong, Mingying Peng. *Opt. Mater. X* **2**, 100022 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.omx.2019.100022>
- [8] G.V. Belessiotis, P.P. Falara, I. Ibrahim, A.G. Kontos. *Materials* **15**, 4629 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15134629>
- [9] M. Broxtermann, L.M. Funke, J.-N. Keil, H. Eckert, M.R. Hansen, A. Meijerink, T. Yu, N. Braun, Th. Jüstel. *J. Lumin.* **202**, 450 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.05.056>
- [10] M. Ferhi, K. Horchani-Naifer, S. Hraiech, M. Ferid, Y. Guyot, G. Boulon. *Rad. Meas.* **46**, 1033 (2011). <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.06.062>
- [11] J.M.A. Caiut, S. Lechevallier, J. Dexpert-Ghys, B. Caillier, Ph. Guillot. *J. Lumin.* **131**, 628 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.11.004>
- [12] J. Kappelhoff, J.-N. Keil, M. Kirm, V.N. Makhov, K. Chernenko, S. Moller, Th. Jüstel. *Chem. Phys.* **562**, 111646 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2022.111646>
- [13] L.A. Boatner. *Rev. Mineral. Geochem.* **48**, 87 (2002). <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.4>
- [14] M. Ridley, B. McFarland, C. Miller, E. Opila. *Materialia* **21**, 101289 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101289>
- [15] А.Е. Гречановский, Н.Н. Еремин, В.С. Урусов. *ФТТ* **55**, 1813 (2013).
- [16] A.G. Hernández, D. Boyer, A. Potdevin, G. Chadeyron, A. G. Murillo, F. de J.C. Romo, R. Mahiou. *Opt. Mater.* **73**, 350 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.08.034>
- [17] V.S. Levushkina, D.A. Spassky, E.M. Aleksanyan, M.G. Brik, M.S. Tretyakova, B.I. Zadneprovski, A.N. Belsky. *J. Lumin.* **171**, 33 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.10.074>
- [18] D. Spassky, A.N. Vasil'ev, V. Nagirnyi, I. Kudryavtseva, D. Deyneko, I. Nikiforov, I. Kondratyev, B. Zadneprovski. *Materials* **15**, 6844 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15196844>
- [19] В.С. Возняк-Левушкина, А.А. Арапова, Д.А. Спаский, И.В. Никифоров, Б.И. Заднепровский. *ФТТ* **64**, 12, 1925 (2022). <https://doi.org/10.21883/FTT.2022.12.53644.449>
- [20] T. Lyu, P. Dorenbos. *J. Mater. Chem. C* **6**, 369 (2018). <https://doi.org/10.1039/c7tc05221a>
- [21] Congting Sun, Dongfeng Xue. *Dalton Trans.* **46**, 7888 (2017). <https://doi.org/10.1039/c7dt01375b>
- [22] A. Belsky, A. Gektin, A.N. Vasil'ev. *Phys. Status Solidi B* **257**, 1900535 (2020). <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.201900535>
- [23] R. Kirkin, V.V. Mikhailin, A.N. Vasil'ev. *IEEE T. Nucl. Sci.* **59**, 5, 2057 (2012). <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2012.2194306>
- [24] A. Trukhin, L.A. Boatner. *Mater. Sci. Forum. Trans. Tech. Publications Aedermannsdorf, Switzerland.* **239**, 573 (1997).
- [25] E. Nakazawa. *Chem. Phys. Lett.* **56**, 161 (1978). [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(78\)80210-3](https://doi.org/10.1016/0009-2614(78)80210-3)
- [26] L. van Pieterse, M. Heeroma, E. de Heer, A. Meijerink. *J. Lumin.* **91**, 177 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(00\)00214-3](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(00)00214-3)
- [27] M. Nikl, A. Yoshikawa, T. Fukuda. *Opt. Mater.* **26**, 545 (2004). <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2004.05.002>
- [28] D. Krasikov, A. Scherbinin, A. Vasil'ev, I. Kamenskikh, V. Mikhailin. *J. Lumin.* **128**, 1748 (2008). <http://doi.org/10.1016/j.jlumin.2008.04.001>
- [29] A. Fukabori, V. Chani, K. Kamada, A. Yoshikawa. *J. Cryst. Growth* **352**, 124 (2012). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.01.027>
- [30] M. Nikl, N. Solovieva, J. Pejchal, J.B. Shim, A. Yoshikawa, T. Fukuda, A. Vedda, M. Martini, D.H. Yoon. *Appl. Phys. Lett.* **84**, 882 (2004). <http://dx.doi.org/10.1063/1.1645987>
- [31] R. Shannon. *Acta Cryst. A* **32**, 751 (1976). <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
- [32] L. Vegard. *Z. Fur. Phys.* **5**, 17, 17 (1921). <https://doi.org/10.1007/BF01349680>
- [33] P. Dorenbos. *J. Phys.: Condens. Matter.* **25**, 225501 (2013). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/22/225501>
- [34] P. Dorenbos. *Opt. Mater.* **69**, 8 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.03.061>
- [35] O. Voloshyna, O. Sidletskiy, D. Spassky, Ia. Gerasymov, I. Romet, A. Belsky. *Opt. Mater.* **76**, 382 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.01.003>
- [36] O. Sidletskiy, A. Gektin, A. Belsky. *Phys. Status Solidi A* **211**, 2384 (2014). <https://doi.org/10.1002/pssa.201431137>

- [37] D. Spassky, S. Omelkov, H. Mägi, V. Mikhailin, A. Vasil'ev, N. Krutyak, I. Tupitsyna, A. Dubovik, A. Yakubovskaya, A. Belsky. *Opt. Mater.* **36**, 1660 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.12.039>
- [38] A.V. Gektin, A.N. Belsky, A.N. Vasil'ev. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61**, 262 (2013). <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2277883>
- [39] D. Spassky, A. Vasil'ev, S. Vielhauer, O. Sidletskiy, O. Voloshyna, A. Belsky. *Opt. Mater.* **80**, 247 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.05.019>
- [40] Z. Khadraoui, K. Horchani-Naifer, M. Ferhi, M. Ferid. *Chem. Phys.* **457**, 37 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemphys.2015.05.014>
- [41] F. Kang, G. Sun, P. Boutinaud, F. Gao, Z. Wang, J. Lu, S. Xiao. *J. Mater. Chem. C* **7**, 32, 9865 (2019).
<https://doi.org/10.1039/c9tc01385g>
- [42] L. Han, Ch. Guo, Zh. Ci, Ch. Wang, Yu. Wang, Y. Huang. *Chem. Eng. J.* **312**, 204 (2017).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.136>
- [43] D.J. Singh, G.E. Jellison, Jr., L.A. Boatner. *Phys. Rev. B* **74**, 155126 (2006).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.74.155126>
- [44] A.N. Trukhin, L.A. Boatner. In: *Proceeding of the 5th Int. Conf. on Inorganic Scintillators and their Applications / Ed. V. Mikhailin. University of Moscow, Russia, M. (2000).* P. 697–702.
- [45] G. Stryganyuk, S. Zazubovich, A. Voloshinovskii, M. Pidzyrai-lo, G. Zimmerer, R. Peters, K. Petermann. *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 036202 (2007).
<http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/19/3/036202>
- [46] N.V. Guerassimova, I.A. Kamenskikh, V.V. Mikhailin, I.N. Shpinkov, D.A. Spassky, E.E. Lomonova, M.A. Borik, N.I. Markov, V.A. Panov, M.A. Veshnyakova, M. Kirm, G. Zimmerer. *Nucl. Instrum. Meth. A* **486**, 1–2, 234 (2002).
[http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00708-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00708-8)
- [47] I.A. Kamenskikh, N. Guerassimova, C. Dujardin, N. Garnier, G. Ledoux, C. Pedrini, M. Kirm, A. Petrosyan, D. Spassky. *Opt. Mater.* **24**, 267 (2003).
[http://dx.doi.org/10.1016/S0925-3467\(03\)00133-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00133-2)

Редактор Т.Н. Василевская