

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

---



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

# **НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,  
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**март–апрель 2009**

**№ 2(60)**



**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,  
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Вартамян,  
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин, д.т.н., профессор А.В. Демин,  
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),  
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,  
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,  
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,  
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,  
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин,  
д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина, д.т.н. О.А. Степанов,  
д.т.н., профессор В.Л. Ткалич, д.т.н., профессор А.А. Шалыто,  
д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь – Г.О. Котелкова

Редактор – к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО

Телефон: (812) 233 12 70

Факс: (812) 232 02 95 (с пометкой: для редакции  
Научно-технического вестника)

[http: //books.ifmo.ru/ntv](http://books.ifmo.ru/ntv)

E-mail: [karmanov@mail.ifmo.ru](mailto:karmanov@mail.ifmo.ru)

<b>ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ.</b>	
<b>ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	5
<b>Акишина Е.Ю., Лазарева К.Е., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А.</b> Влияние галогенов на спектральные и фоточувствительные свойства фото-термо-рефрактивных стекол .....	5
<b>Зинчик А.А., Музыченко Я.Б., Смирнов А.В., Стафеев С.К.</b> Расчет фрактальной размерности регулярных фракталов по картине дифракции в дальней зоне .....	17
<b>Ле Зуй Туан, Кирилловский В.К.</b> Исследование объектива микроскопа методом компьютерной изофотометрии с накоплением .....	24
<b>Демин А.В., Константинов К.В.</b> Имитационная модель оптико-электронного измерителя высоты нижней границы облака .....	33
<b>ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	39
<b>Вейко В.П., Касаткин В.Ю., Матыжонок В.Н., Петров А.А., Шахно Е.А.</b> Формирование пленочных покрытий силицидов металлов методами локального лазерного переноса и отжига .....	39
<b>Новиков Б.Ю., Шадчин М.К.</b> Лазерно-индуцированное формирование микроэлементов на основе стеклокерамических материалов.....	45
<b>Беликов А.В., Жолобова Е.П., Скрипник А.В., Струнина Т.В.</b> Исследование эффективности разрушения эмали зуба человека одномодовым излучением YAG: Er лазера .....	51
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ</b> .....	59
<b>Симаков А.П., Федоров Б.А., Смирнов А.В.</b> Исследование поверхности тонкодисперсных фракций ряда минералов с помощью рентгеновского малоуглового рассеяния .....	59
<b>Уханова Е.А., Смирнов А.В., Федоров Б.А.</b> Расчет функции распределения сферических частиц по размерам по данным рентгеновского малоуглового рассеяния.....	66
<b>КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	76
<b>Новосельский В.Б., Павловская Т.А.</b> Выбор и обоснование критерия эффективности при проектировании распределенных баз данных .....	76
<b>Ожиганов А.А., Жуань Чжипэн</b> Преобразователь линейных перемещений с псевдослучайными кодовыми шкалами на основе пересчетной схемы .....	83
<b>Ковязина Д. Р.</b> Автоматическая калибровка и синхронизация времени во встраиваемых вычислительных системах.....	87
<b>МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ</b> .....	94
<b>Кораблев Д.А.</b> Применение принципов построения эффективных пользовательских интерфейсов систем электронного документооборота .....	94
<b>Прохожев Н.Н., Михайличенко О.В., Коробейников А.Г.</b> Повышение устойчивости стегающих алгоритмов частотной области на основе дискретно-косинусного преобразования к внешним воздействиям .....	102
<b>НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ</b> .....	107
<b>Горовой В.А., Муромцев Д.И.</b> Реализация технологии активного обучения на базе онтологического моделирования.....	107
<b>Никитин В.В.</b> Формализация задач проектирования образовательных стандартов профессионального образования .....	114
<b>SUMMARY</b> .....	124

# CONTENTS

---

<b>OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS.</b>	
<b>OPTICAL TECHNOLOGIES</b> .....	5
<b>E. Akishina, K. Lazareva, N. Nikonorov, A. Sidorov, V. Tsekhomsky.</b> Effect of halogens on spectral and photosensitive properties of photo-thermo-refractive glasses .....	5
<b>A. Zinchik, Y. Muzychenko, A. Smirnov, S. Stafeyev.</b> Fractal dimension calculating of regular fractals by Fraunhofer diffraction .....	17
<b>Le Zuy Tuan, V. Kirillovsky.</b> Research of the microscope objective by the computer izophotometry method with accumulation .....	24
<b>A. Dyomin, K. Konstantinov.</b> Imitating model of an optical-electronic ceilometer .....	33
<b>LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES</b> .....	39
<b>V. Veiko, V. Kasatkin, V. Matyzhonok, A. Petrov, E. Shakhno.</b> Formation of metal silicides film coverings by methods of local laser transfer and annealing .....	39
<b>B. Novikov, M. Shadchin.</b> Laser-induced formation of micro-elements on the base of glass-ceramics .....	45
<b>A. Belikov, E. Zholobova, A. Skripnik, T. Strunina.</b> Investigation of human tooth enamel removal efficiency by single mode radiation of YAG: Er laser .....	51
<b>MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES</b> .....	59
<b>A. Simakov, A. Smirnov, B. Fyodorov.</b> Small-angle X-ray diffuse scattering research of mineral fine-dispersed fractions .....	59
<b>E. Ukhanova, A. Smirnov, B. Fyodorov.</b> Distribution function computation for spherical particles size on the basis of small angle X-ray scattering .....	66
<b>COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES</b> .....	76
<b>V. Novoselsky, T. Pavlovskaya.</b> Choice and justification of effectiveness criterion in distributed databases design .....	76
<b>A. Ozhiganov, Zhuan Chzhipehn.</b> The converter of linear movings with pseudorandom code scales on the basis of recalculation scheme .....	83
<b>D. Kovyazina.</b> Automatic time calibration and synchronization in embedded computer systems .....	87
<b>INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS</b> .....	94
<b>D. Korablyov.</b> Construction principles application of effective user interfaces of electronic document circulation systems .....	94
<b>N. Prokhozhev, O. Mikhailichenko, A. Korobeinikov.</b> Robustness increase of discrete cosine transform algorithms against frequency domain attacks .....	102
<b>NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION</b> .....	107
<b>V. Gorovoy, D. Mouromtsev.</b> Creating of the active learning technology on the basis of ontology modeling .....	107
<b>V. Nikitin.</b> Formal framework of professional educational standards design .....	114
<b>SUMMARY</b> .....	124

УДК 535.342:535.323:666.22

**ВЛИЯНИЕ ГАЛОГЕНОВ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНЫХ СТЕКОЛ****Е.Ю. Акишина, К.Е. Лазарева, Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, В.А. Цехомский**

Исследована роль фтора и брома в формировании спектральных и фоточувствительных свойств фото-термо-рефрактивных стекол. Предложен механизм фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла. На основании экспериментальных результатов высказана гипотеза о том, что при температурах, близких к температуре трансформации стекла, коллоидные частицы серебра являются центрами кристаллизации, вокруг которых образуется жидкая фаза, состоящая сначала из бромидов серебра, в которой растворяется фторид натрия. При охлаждении на поверхности коллоидного серебра выделяются наноразмерные кристаллы сложной структуры  $\text{AgBr-NaF}$ .

**Ключевые слова:** фото-термо-рефрактивное стекло, фото-термо-индуцированная кристаллизация, трехмерная фазовая голограмма, плазмонный резонанс, наночастицы серебра.

**Введение**

В начале 1990-х г.г. в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ) была разработана новая голографическая среда – фото-термо-рефрактивное стекло (ФТР стекло) – и метод записи в ней трехмерных фазовых голограмм [1, 2]. Это стекло было создано на базе полихромных стекол, разработанных ранее в компании Corning [3], и мультихромных стекол, разработанных в ГОИ [4]. В основе формирования этих стекол лежит процесс фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла, суть которого заключается в следующем. Воздействие УФ излучения на ФТР стекло, содержащие фоточувствительные добавки церия, приводит к образованию в нем центров кристаллизации в виде коллоидных частиц серебра. Термообработка вызывает рост микро- или нанокристаллов фторидов натрия на этих центрах. Это приводит к появлению дополнительных полос поглощения и изменению показателя преломления в облученной области. Изменение поглощения и показателя преломления лежит в основе записи объемных фазовых голограмм в ФТР стеклах.

В настоящее время ФТР стекла используются для изготовления высокоэффективных объемных фазовых голограммных элементов – узкополосных фильтров, брэгговских зеркал, мультиплексоров для лазеров, оптической связи, навигации и сканирования (см., например, [5]). Дифракционная эффективность голограмм достигает 90–95%. Голограммы имеют рекордно большую толщину (1–10 мм) и поэтому обладают высокой спектральной ( $\Delta\lambda < 0,1$  нм) и угловой ( $< 1$  угл. мин) селективностью. Малый размер кристаллической фазы (~10–40 нм) позволяет записывать решетки с высокой пространственной частотой (до  $10000 \text{ мм}^{-1}$ ). Кроме того, он сильно снижает уровень светорассеяния на границе стеклообразной и кристаллической фазы. Наведенные потери в ФТР стекле достигают  $0,1 \text{ см}^{-1}$  для видимого диапазона и  $0,01 \text{ см}^{-1}$  для ближнего ИК диапазона. Голограммы, записанные в ФТР стекле, обладают высокой химической устойчивостью и механической прочностью и в этом отношении практически не отличаются от коммерческого оптического стекла К8. Кроме того, они обладают высокой лучевой стойкостью к мощному непрерывному и импульсному лазерному излучению. Пороги оптического пробоя голограммы на ФТР стекле близки к порогам пробоя коммерческого оптического стекла ВК7:  $10 \text{ Дж/см}^2$  при импульсном облучении для  $\lambda = 1064$  нм и  $100 \text{ кВт/см}^2$  при непре-

рывном облучении для  $\lambda = 1095$  нм [6]. Оптические и спектральные характеристики голограммы остаются неизменными при многократном нагреве голограммы до высоких температур ( $500^\circ\text{C}$ ). Существенным достоинством ФТР стекла как материала для записи голограмм является ее высокая однородность (флуктуации показателя преломления в объеме – порядка  $10^{-5}$ ) и воспроизводимость характеристик при синтезе исходного стекла и при фото-термо-индуцированной кристаллизации. ФТР стекло, подобно оптическому стеклу К8, допускает применение традиционных методов механической обработки – шлифование и полирование, а также разнообразные технологии формования (например, молирование и создание асферических поверхностей). Изготовление ФТР стекла можно осуществлять как в лабораторных (до 600 г), так и в промышленных (до 300 кг) условиях с использованием простой и нетоксичной технологии. При этом химические реактивы, потребные для синтеза стекла, являются коммерчески доступными и недорогими. Следует отметить некоторые необычные для регистрирующих сред свойства ФТР стекла. Так, к этим материалам применима ионообменная технология, с использованием которой возможно создание ионообменных волноводов, а также упрочнение поверхности для повышения механической прочности, химической устойчивости, термической и оптической прочности наностеклокерамики. Более того, была продемонстрирована возможность создания на основе ФТР стекол так называемого «полифункционального стекла» [7, 8], которое сочетает в себе свойства трех материалов – лазерного, фоточувствительного и ионообменного. С этой целью ФТР стекло активировалось ионами иттербия и эрбия. При этом концентрация активаторов достигала 10 вес. %, что существенно для создания малогабаритных планарных волноводных усилителей и микрочип-лазеров.

Хотя история полихромных, мультихромных и ФТР стекол насчитывает около 60 лет и им посвящено много десятков работ, до сих пор нет полной ясности относительно основных механизмов выделения кристаллической фазы на коллоидных наночастицах серебра, образовавшихся в результате фотолиза при комнатной температуре и последующей термической обработке. Понимание механизмов фотопереноса зарядов при облучении и роста центров кристаллизации и кристаллической фазы при термообработке очень важно с точки зрения оптимизации характеристик ФТР стекол и разработки новых фоточувствительных материалов для записи голограмм.

Обычно механизм фото-термо-индуцированной кристаллизации в ФТР стеклах, описанный во многих работах (например, [9]), представляется в виде трех этапов, представленных схематично на рис. 1.

*Этап 1.* Под действием УФ излучения (например, He–Cd лазера) с длиной волны 325 нм, близкой к полосе поглощения  $\text{Ce}^{3+}$  ( $\lambda = 312$  нм) (рис. 2, кривая 1), происходят фотоионизация  $\text{Ce}^{3+}$  с образованием свободных электронов и их захват на ловушках  $\text{Ag}^+$  (рис. 1, а):



*Этап 2.* Последующая термообработка при  $T \sim 400^\circ\text{C}$  приводит к агрегации атомарного серебра  $\text{Ag}^0$  и образованию коллоидных частиц серебра –  $\text{Ag}^0_n$  (рис. 1, б). Эти коллоидные частицы играют роль центров кристаллизации.

*Этап 3.* При температурах, близких к температуре стеклования ( $T_g = 490^\circ\text{C}$ ) и выше (до  $550^\circ\text{C}$ ), на этих зародышах происходит рост микрокристаллов  $\text{NaF}$  (рис. 1, в).

Доза УФ облучения определяет концентрацию коллоидных частиц серебра и, соответственно, концентрацию микрокристаллов, а температура и время термической обработки (термопроявление) определяют размер микрокристаллов и объемную долю кристаллической фазы. В видимой области спектра наводится полоса поглощения с максимумом 450 нм, связанная с образованием и ростом коллоидных частиц серебра (рис. 2, кривая 2).

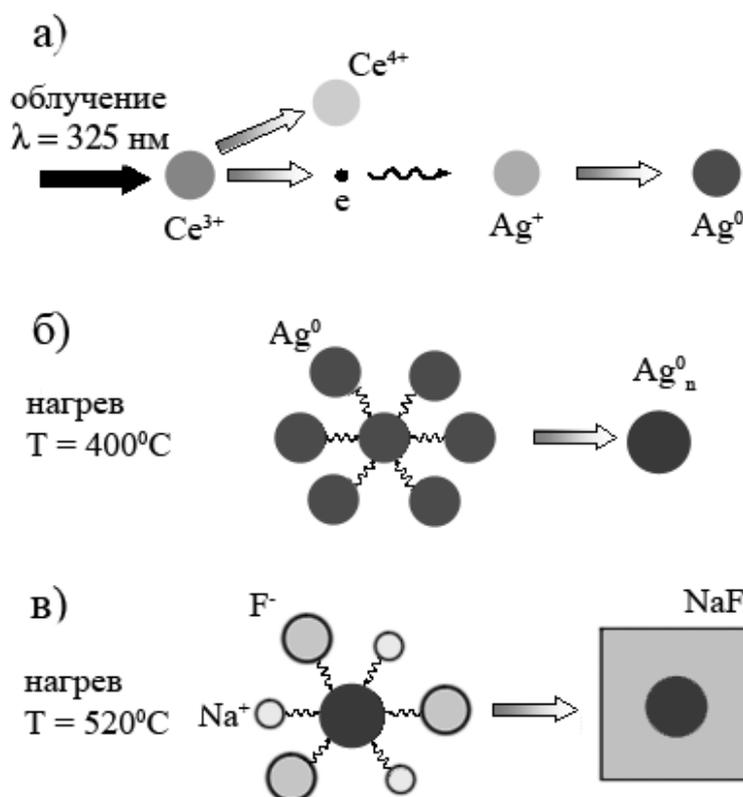


Рис. 1. Процесс фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла:  
 а) фотоионизация церия УФ излучением с образованием свободных электронов, захват электронов ионами серебра и образование атомарного серебра;  
 б) образование коллоидного серебра при нагревании облученного стекла ( $400^\circ\text{C}$ );  
 в) рост микрокристаллов  $NaF$  на коллоидных центрах при  $520^\circ\text{C}$

В состав ФТР стекол, помимо основных компонент,  $Na_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $ZnO$  и  $SiO_2$ , входят следующие добавки: ионы  $Ce^{3+}$ , являющиеся донором фотоэлектронов и определяющие светочувствительность этих стекол, ионы  $Ag^+$ ,  $Sb^{5+}$  и  $Sn^{4+}$  – акцепторы электронов, играющие важную роль в образовании центров кристаллизации и поддерживающие необходимые окислительно-восстановительные условия при синтезе исходного стекла, а также ионы  $F^-$  и  $Br^-$ , участвующие в формировании кристаллической фазы.

К матричному стеклу, наряду с технологическими требованиями, предъявляется также требование способствовать фотоиндуцированной кристаллизации и препятствовать гомогенной кристаллизации фторидов натрия. В работе [10] показано, что в отсутствие  $Al_2O_3$  и  $ZnO$  наблюдается поверхностная кристаллизация, а значительное увеличение этих компонентов в стекле препятствует фотоиндуцированному выделению фторида натрия. В этой же работе показано, что оптимальные эффекты наблюдаются в том случае, если отношение  $(Na_2O - Al_2O_3 - ZnO) / (Al_2O_3 + ZnO)$  лежит в пределах 1–2,4. Последнее объясняется тем, что ионы цинка и алюминия склонны образовывать в стекле оксигалоидные комплексы, что способствует удержанию в стекле определенного количества ионов фтора, освобождению этих ионов при термической обработке, а при большой концентрации эти ионы препятствуют фотоиндуцированной кристаллизации. Аналогичное влияние  $Al_2O_3$  на выделение кристаллической фазы  $CuCl$  в фотохромных стеклах было отмечено в работе [11].

В работе [10] впервые было показано, что в стеклах, не содержащих в своем составе бромидов, фото-термо-рефрактивные свойства не обнаруживаются. Более деталь-

но эта проблема была изучена в работе [12]. Так, авторы [12] методом ДСК показали, что кристаллизация ФТР стекол сильно зависит от концентрации бромидов. Однако в отмеченных работах механизм формирования кристаллической фазы фторида натрия и роль бромидов в этом процессе до конца не исследованы. В настоящей работе изучена роль бромидов и фторидов в процессе фото-термо-индуцированной кристаллизации ФТР стекла.

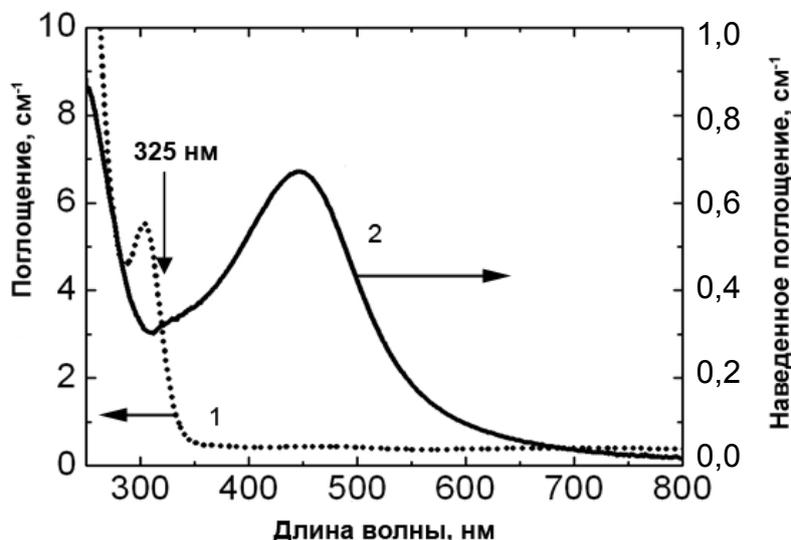


Рис. 2. Спектры поглощения ФТР стекла до экспонирования (кривая 1) и после облучения длиной волны  $\lambda=325$  нм в полосе поглощения  $Ce^{3+}$  ( $\lambda_{max}=312$  нм) и последующей термообработки при  $520^\circ C$  (кривая 2). Стрелкой показана длина волны УФ излучения

### Экспериментальные результаты и обсуждение

Для проведения исследований использовались стекла системы  $Na_2O - Al_2O_3 - ZnO - SiO_2$ , содержащие фиксированное количество добавок серебра, церия, сурьмы и олова, а также изменяющийся по концентрации ряд по фтору (0–3 мол%) и бромю (0–2.5 мол%). На рис. 3 и 4 показаны спектры оптической плотности исходных ФТР стекол с изменяющейся концентрацией фтора и брома. Из рис. 3 видно, что ионы фтора оказывают сильное влияние на полосу поглощения ионов  $Ce^{3+}$ . При увеличении концентрации фтора в стекле максимум этой полосы сдвигается в коротковолновую область спектра, а интенсивность полосы при этом незначительно уменьшается.

Смещение полосы поглощения в коротковолновую часть спектра по мере увеличения концентрации введенного фтора можно объяснить появлением в координационном окружении  $Ce^{3+}$  ионов фтора. Это смещение составляет 10–15 нм. Таким образом, можно говорить, что ионы церия, так же как ионы алюминия и цинка, проявляют к ионам фтора так называемый «галоидный эффект» [13], т.е., по-видимому, существует определенная конкуренция между ионами алюминия, цинка и церия по отношению к удержанию в стекле определенного количества ионов фтора. Вместе с тем, этот эффект имеет практическое значение, так как увеличение содержания фтора сдвигает полосу церия в коротковолновую область и уменьшает сечение поглощения на длине волны гелий-кадмиевого лазера 325 нм, на которой осуществляется запись голограмм. Это позволяет увеличить эффективную толщину голограммы.

Интересно отметить, что в случае брома, введенного в стекло, «галоидный эффект» с ионами церия не наблюдается (рис. 4). Изменение введенной концентрации ионов брома от 0 до 2,5 мол% в пределах точности эксперимента не изменяет положения полосы поглощения ионов  $Ce^{3+}$ .

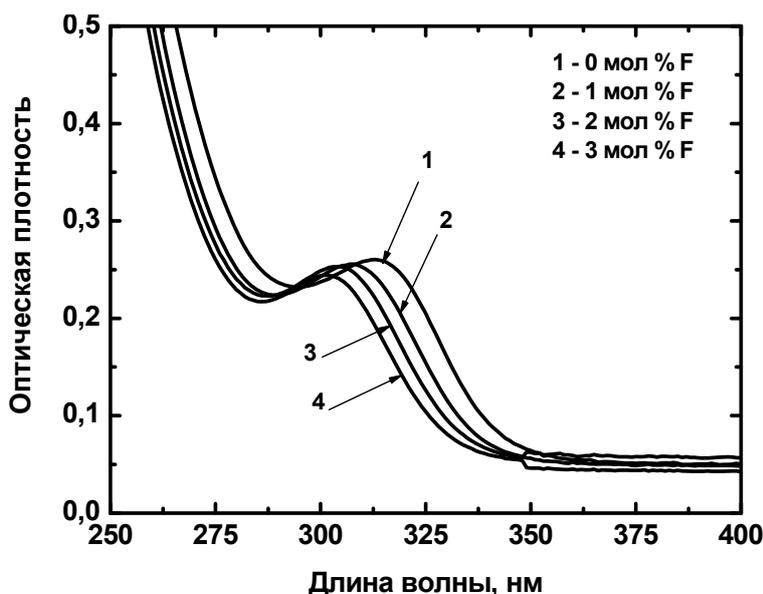


Рис. 3. Спектры оптической плотности исходного ФТР стекла с переменной концентрацией фтора. Толщина образцов составляла 0,7 мм

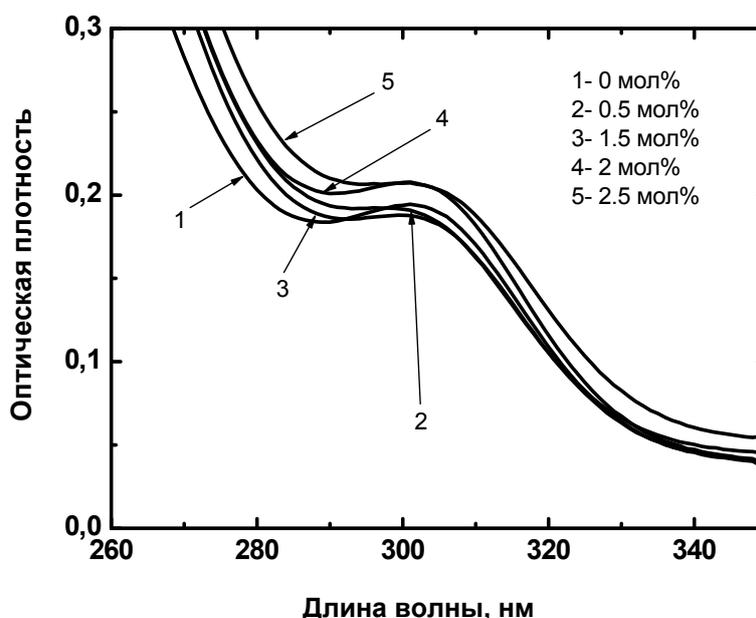


Рис. 4. Спектры оптической плотности исходного ФТР стекла с переменной концентрацией брома. Толщина образцов составляла 0,7 мм

Далее образцы подвергались термической обработке при температуре 500°C в течение 2–10 часов. В результате такой обработки возникла интенсивная полоса поглощения в диапазоне длин волн 400–500 нм (рис. 5 и 6), связанная с выделением коллоидных наночастиц серебра, которую в литературе часто называют плазмонным резонансом.

В стеклах с фиксированным содержанием брома и переменным содержанием фтора (1,0–3,0) мол % наблюдался существенный сдвиг полосы плазмонного резонанса в длинноволновую область по сравнению со стеклом без фтора ( $\lambda_{\max} = 418$  нм, рис. 5). В тоже время, в пределах концентраций фтора 1–3 мол% сдвиг полосы плазмонного резонанса практически не наблюдается. Наблюдаемый сдвиг в стеклах со фтором по сравнению со стеклом без фтора можно связать с несколькими механизмами.

1. Вязкость стекла может уменьшаться при введении фтора. Соответственно будет увеличиваться подвижность всех ионов, включая ионы серебра, которые при термообработке образуют коллоидные наночастицы серебра. В результате этого размер коллоидной частицы в стеклах, содержащих фтор, будет больше, чем без фтора. В свою очередь, известно, что увеличение размера коллоидной частицы серебра может приводить к сдвигу полосы поглощения в длинноволновую сторону.

2. В результате роста кристаллической фазы в матрице стекла могут возникать механические напряжения, которые будут приводить к изменению показателя преломления. Эти напряжения могут возникать за счет различия в коэффициентах температурного расширения (КТР) кристаллической фазы и матрицы стекла. В стеклах без фтора образуется коллоидное серебро и выделяется кристаллическая фаза  $AgBr$ . В стеклах со фтором образуются коллоидное серебро и кристаллическая фаза более сложного состава  $AgBr-NaF$ . Разные кристаллические фазы будут иметь разные КТР, и, таким образом, можно полагать, что это различие будет приводить к разным величинам напряжений и соответственно показателям преломления. Это может приводить к сдвигу полос поглощения в длинноволновую сторону. Высказанные механизмы нуждаются в дальнейших исследованиях.

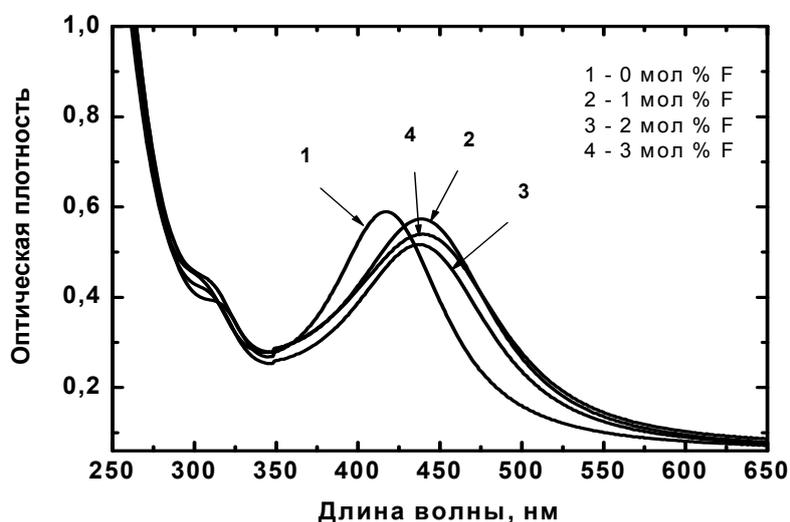


Рис. 5. Спектры поглощения стекол с переменным содержанием фтора и постоянной концентрацией брома после термообработки при  $500^{\circ}\text{C}$  в течение 10 часов

На рис. 6 показаны спектры поглощения стекол с переменным содержанием брома после УФ облучения и термообработки. Очень сильное влияние на форму и положение максимума полосы поглощения коллоидного серебра оказывает бром. Следует обратить внимание на то, что в отсутствие в стекле брома (рис. 6, кривая 1) полоса поглощения коллоидных наночастиц ( $\lambda_{\text{max}} = 408 \text{ нм}$ ) в основном определяется показателем преломления окружающего стекла. Введение брома приводит к смещению максимума полосы поглощения и значительному увеличению ее полуширины. У стекло, в которые введен бром (0,5 мол%), максимум полосы лежит при  $\lambda_{\text{max}} = 431 \text{ нм}$  (рис. 6, кривая 2) и дополнительно несколько смещается при увеличении содержания брома (рис. 6, кривые 3–5).

Рассмотрим возможные причины спектрального сдвига полосы плазмонного резонанса в стекле, содержащем простые наночастицы серебра. К сдвигу полосы плазмонного резонанса могут приводить следующие факторы [14]:

- изменение химического состава и кристаллической структуры наночастицы серебра, влияющее на ее диэлектрическую проницаемость;
- изменение химического состава границы наночастица–стекло, влияющее на процессы рассеяния свободных электронов металла на поверхности наночастицы;

- изменение (увеличение) размера наночастиц серебра при термообработке стекла без изменения их формы;
- изменение геометрической формы наночастицы в процессе УФ и термообработки стекла;
- изменение показателя преломления среды, окружающей наночастицы серебра.

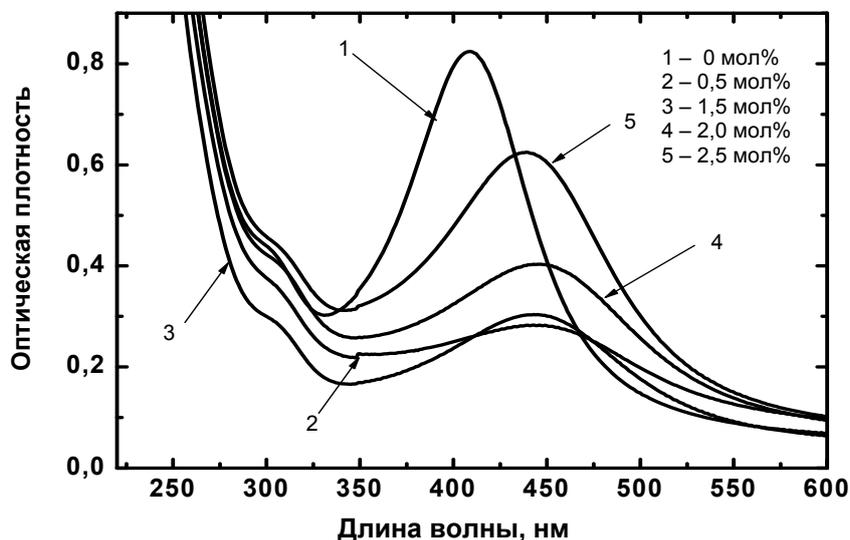


Рис. 6. Спектры поглощения стекол с переменным содержанием брома и постоянной концентрацией фтора после термообработки при 500°С в течение 2 часов

Два первых фактора могут оказывать существенное влияние на диэлектрическую проницаемость наночастиц серебра даже при очень малом изменении химического состава наночастицы или границы наночастица–стекло. Однако обнаружение малых концентраций примесей в наночастицах и изучение их влияния на оптические свойства является достаточно сложной задачей и в рамках данной работы не проводилось.

Рассмотрим влияние последних трех факторов на спектральное положение полосы поглощения наночастиц серебра в стеклянной матрице.

### Моделирование спектров поглощения

Будем использовать следующие допущения: размер наночастиц много меньше длины волны, концентрация наночастиц в стекле мала, электромагнитное взаимодействие между ними отсутствует.

Модель, основанная на теории Друде–Лорентца, с учетом рассеяния свободных электронов на поверхности наночастицы дает следующее выражение для диэлектрической проницаемости [15]:

$$\varepsilon(\omega, r) = \varepsilon_0(\omega) + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega(\gamma + Av_F/r)}, \quad (3)$$

где  $\omega$  – круговая частота излучения;  $r$  – радиус наночастицы;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость массивного серебра;  $\omega_p$  – плазменная частота серебра;  $\gamma$  и  $A$  – константы, учитывающие процессы рассеяния свободных электронов в металле на электронах, фононах и поверхности наночастицы ( $A < 1$ );  $v_F$  – скорость Ферми свободных электронов.

Оценка показывает, что при изменении диаметра сферической наночастицы серебра от 3 до 4 нм без изменения ее формы происходит длинноволновый сдвиг плазмонного резонанса на величину  $\Delta\lambda \approx 10$  нм. Этот хорошо согласуется с выводами, сде-

ланными в работе [16] на основании спектров поглощения фосфатных стекол с наночастицами серебра.

При введении фтора вязкость стекла может уменьшаться. Соответственно будет увеличиваться подвижность всех компонентов, включая ионы и атомы серебра. В результате размер коллоидной частицы в стеклах, содержащих фтор, как можно ожидать, будет больше, чем без фтора. Однако только фактором изменения размера наночастиц серебра, как показали сделанные оценки, нельзя объяснить наблюдаемые изменения. Можно предположить, что при формировании наночастиц серебра в стекле вокруг этих наночастиц выделяется  $AgBr$  в виде оболочки, окружающей наночастицу.

Рассмотрим влияние диэлектрической оболочки на спектральное положение плазмонного резонанса наночастицы серебра. Сечение поглощения сферической частицы с оболочкой в дипольном приближении описывается следующим выражением [14]:

$$\sigma_a = \frac{8\pi^2 \sqrt{\epsilon_h} r_s^3}{\lambda} \cdot \text{Im}(\delta). \quad (4)$$

Здесь  $\delta$  – поляризуемость наночастицы:

$$\delta = \frac{\epsilon_s \epsilon_a - \epsilon_h \epsilon_b}{\epsilon_s \epsilon_a + 2\epsilon_h \epsilon_b}, \quad \epsilon_a = \epsilon_c (3 - 2P) + 2\epsilon_s P, \quad \epsilon_b = \epsilon_c + \epsilon_c (3 - P),$$

$$P = 1 - \left( \frac{r_c}{r_s} \right)^3, \quad (5)$$

$\epsilon_h, \epsilon_c, \epsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость среды, ядра и оболочки соответственно,  $r_c$  – радиус ядра,  $r_s$  – радиус оболочки,  $\lambda$  – длина волны излучения.

Условием возникновения плазмонного резонанса является обращение в ноль действительной части знаменателя поляризуемости наночастицы [17]:

$$\text{Re}(A) = \text{Re}(\epsilon_s \epsilon_a + 2\epsilon_h \epsilon_b) = 0. \quad (6)$$

Из приведенных выражений следует, что толщина диэлектрической оболочки и ее диэлектрическая проницаемость должны оказывать существенное влияние на спектральное положение плазмонного резонанса. Численное моделирование нами проводилось для следующих параметров: показатель преломления среды  $n_h = 1,5$ ; материал ядра – серебро (использовались оптические константы пленки серебра из [18] для спектрального интервала  $\lambda = 0,4-0,6$  мкм); показатель преломления оболочки  $n_s = 2,2$ ; радиус ядра  $r_c = 2$  нм; толщина оболочки  $h = r_s - r_c$  варьировалась от 0 до 3 нм.

На рис. 7 показаны спектральные зависимости сечения поглощения сферической наночастицы с ядром из серебра и оболочкой из бромида серебра разной толщины. Из рисунка видно, что при увеличении толщины оболочки плазмонный резонанс наночастицы сдвигается в длинноволновую область спектра. Видно, что увеличение толщины оболочки от 0 до 3 нм приводит к сдвигу плазмонного резонанса на 100 нм в длинноволновую область спектра.

Возвращаясь к конкретному ФТР стеклу, можно предположить, что в процессе термообработки стекла может происходить не только изменение толщины оболочки, окружающей серебряную наночастицу, но и изменение показателя преломления этой оболочки. На рис. 8 показаны зависимости спектрального положения максимума плазмонного резонанса наночастицы от показателя преломления оболочки. Из рисунка видно, что увеличение показателя преломления оболочки приводит к сдвигу плазмонного резонанса в длинноволновую область спектра. Зависимость практически линейна. При увеличении толщины оболочки крутизна зависимости  $\lambda_{\max}(n_s)$  незначительно возрастает.

Таким образом, формирование диэлектрической оболочки на серебряной наночастице и изменение ее толщины в процессе термообработки стекла оказывает чрезвычайно сильное влияние на спектральное положение плазмонного резонанса. На длинно-

волновый сдвиг плазмонного резонанса может оказывать влияние и увеличение показателя преломления оболочки из-за изменения ее химического состава.

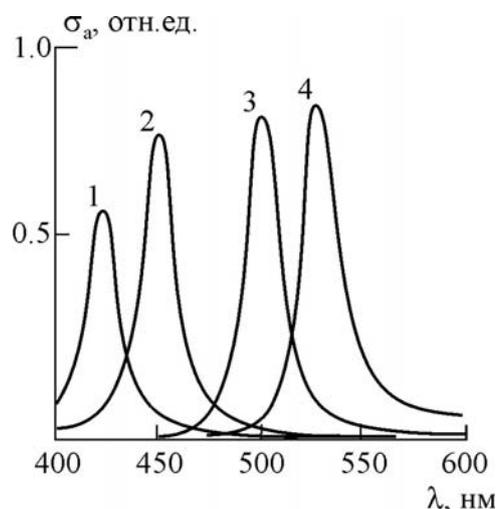


Рис. 7. Спектральные зависимости сечения поглощения наночастицы из серебра с оболочкой из бромида серебра. Толщина оболочки  $h = 0$  нм (кривая 1),  $0,5$  нм (кривая 2),  $1,5$  нм (кривая 3),  $3,0$  нм (кривая 4)

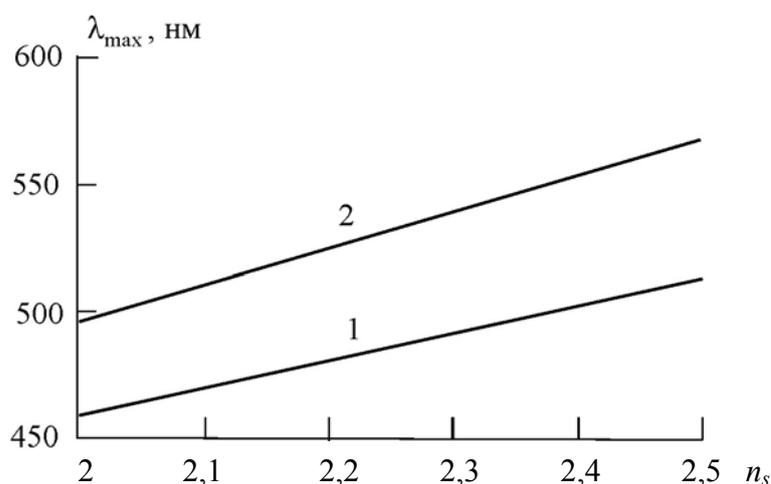


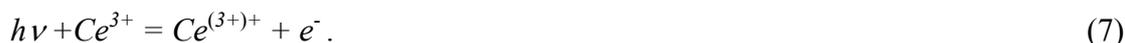
Рис. 8. Зависимость спектрального положения максимума плазмонного резонанса наночастицы от показателя преломления оболочки:  $h = 1$  нм (кривая 1),  $h = 3$  нм (кривая 2)

Увеличение концентрации бромида в стекле, как уже отмечалось (рис. 6), приводит к смещению полосы поглощения коллоидного серебра в длинноволновую область. Эта полоса поглощения, по мнению авторов [12], является комбинацией двух различных полос: первая является следствием поглощения кластеров серебра, а вторая – следствием поглощения бромида серебра. Приведенный анализ позволяет предположить, что две различные полосы поглощения, зафиксированные авторами работы [12], – это поглощение коллоидных частиц серебра, окруженных (в случае первой полосы) матричным стеклом, а вторая полоса (более длинноволновая) – поглощение оболочки, в основном состоящей из  $AgBr$ . При этом надо отметить, что у чистых кристаллов  $AgBr$ , не содержащих коллоидного серебра, отсутствуют полосы поглощения в области 485 нм [20]. Тогда появляется возможность высказать гипотезу фотоиндуцированного выделения кристаллической фазы в ФТР стекле.

### Механизм фото-термо-индуцированной кристаллизации ФТР стекла

С нашей точки зрения, процесс фото-термо-индуцированной кристаллизации в ФТР стекле имеет более сложный механизм, чем рассмотренный выше (например, [9]). Рассмотрим подробнее предложенный в настоящей работе механизм фотоионизации и перезарядки центров, а также процесс образования коллоидного серебра.

Под действием УФ излучения, совпадающего с полосой поглощения  $Ce^{3+}$ , в стекле происходит фотоионизация  $Ce^{3+}$  с образованием свободных электронов по следующей реакции:



Заметим, что, так как облучение стекла происходит при комнатной температуре, нельзя говорить, что церий изменяет валентное состояние на  $Ce^{4+}$ , как это отмечалось в ранних работах [13]. Предложенная запись,  $Ce^{(3+)+}$ , означает, что в процессе облучения трехвалентный церий захватил дырку, не изменяя своего окружения.

Освободившиеся электроны захватываются на ловушках, которыми могут являться ионы  $Ag^{+}$ ,  $Sb^{5+}$ ,  $Ce^{4+}$ , анионные вакансии стекла и другие дефекты и примеси стекла. В нашем случае наиболее вероятны следующие процессы:

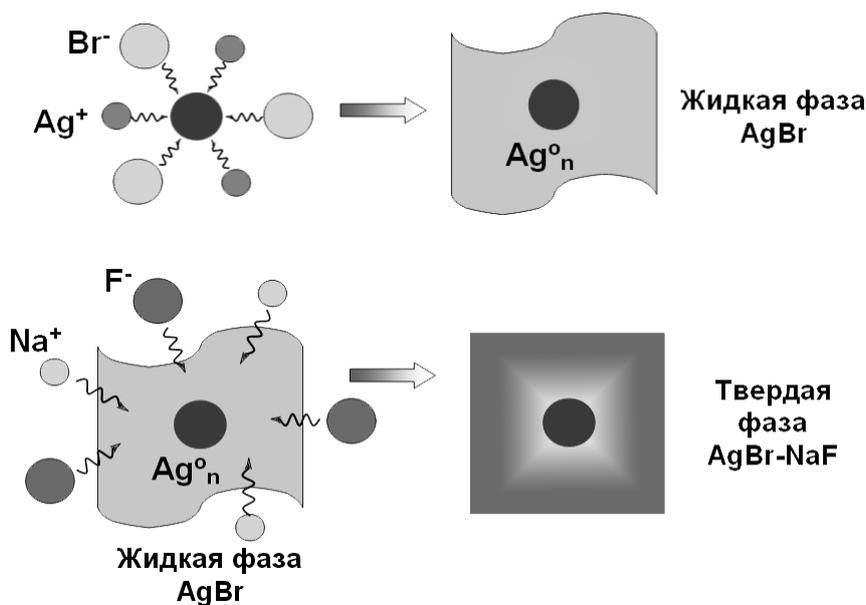


Рис. 9. Процесс образования кристаллической фазы в ФТР стекле: а) диффузия ионов серебра и брома с образованием жидкой фазы  $AgBr$  на коллоидной частице серебра; б) диффузия ионов натрия и фтора в жидкую фазу  $AgBr$  с образованием сложной кристаллической твердой фазы  $AgBr-NaF$

Захват электрона серебром с образованием атомарного серебра маловероятен (см. реакции (2)). Такой процесс наблюдается только при очень низких температурах [20]. Атомарное серебро  $Ag^0$  является термически нестабильным и при нагревании может окисляться до  $Ag^+$  [21]. В то же время заряженные центры  $(Sb^{5+})^{-}$  и  $(Sn^{4+})^{-}$  могут сохраняться при высоких температурах (до  $200^\circ C$ ) [21]. При температурах  $250\text{--}300^\circ C$  сурьма и олово начинают «сбрасывать» электроны, которые перезакхватываются ионами серебра с образованием кластеров серебра, и далее при температурах  $350\text{--}400^\circ C$  происходит рост коллоидных частиц серебра –  $Ag^0_n$ .

Далее, при термической обработке, на поверхности коллоидной частицы серебра сначала образуется тонкий слой  $AgBr$ . Термическая обработка ФТР стекол, как уже отмечалось, происходит при температурах 500–540°C. При этих температурах  $AgBr$  представляет собой жидкость (температура плавления массивных кристаллов  $AgBr$  равна 432°C). Фтористый натрий фактически растворяется в этой жидкости. При температурах свыше 500°C возникает жидкая фаза, состоящая из  $AgBr$  и  $NaF$ , из которой при охлаждении выделяются кристаллы сложного состава  $AgBr-NaF$  (рис. 9). Высказанная гипотеза подтверждается экспериментальными данными.

### Заключение

В работе исследована роль фтора и брома в формировании кристаллической фазы в ФТР стекле. Предложен механизм фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла. На основании экспериментальных и теоретических результатов высказана гипотеза о том, что при температурах, близких к температуре трансформации стекла, коллоидные частицы серебра являются центрами кристаллизации, вокруг которых образуется жидкая фаза, состоящая из бромидов серебра, в которой растворяются фториды натрия. При охлаждении на поверхности коллоидного серебра выделяются наноразмерные кристаллы сложной структуры  $AgBr-NaF$ , т.е. серебряная частица окружена оболочкой бромида серебра (толщиной единицы нанометров) и оболочкой фторида натрия (десятки нанометров). Полученные экспериментальные и теоретические результаты могут быть использованы при оптимизации состава ФТР стекол, а также при разработке новых фоточувствительных стекол для записи высокоэффективных объемных фазовых голограмм.

### Литература

1. Кучинский С.А., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Савин В.В., Туниманова И.В. Свойства объемных фазовых голограмм на мультихромных стеклах // Оптика и спектроскопия. – 1991. – Т. 70. – № 6. – С. 1296–1300.
2. Глебов Л.Б., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Петровский Г.Т., Савин В.В., Туниманова И.В., Цехомский В.А. Новые возможности фоточувствительных стекол для записи объемных фазовых голограмм // Оптика и спектроскопия. – 1992. – Т. 73. – № 2. – С. 404–412.
3. Stookey S. D., Beall G. H., Pierson J. S. Polychromatic glass // J. Appl. Phys. – 1978. – Vol. 49. – № 10. – P. 5114.
4. Панышева Е.И., Туниманова И.В., Цехомский В.А. О роли олова и сурьмы в процессе окрашивания мультихромного стекла // Физика и химия стекла. – 1990. – Т.16. – № 3. – С. 417–423.
5. Efimov O.M., Glebov L.B., Smirnov V.I. High efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass. US patent № 6673497 A.W. B2. 2004.
6. Efimov O. Glebov L., Papernov S., Schmid A. Laser-induced damage of photo-thermo-refractive glasses for optical holographic elements writing // Proc. SPIE. – 1999. – Vol. 3578. – P. 564–575.
7. Никоноров Н.В. Оптическая многофункциональная наностеклокерамика // Сборник докладов симпозиума «Нанофотоника», 18–22 сентября 2007, Черноголовка, Московская обл. – Изд. ИПХФ РАН. – С. 133.
8. Асеев В.А., Никоноров Н.В. Спектрально-люминесцентные свойства фото-термо-рефрактивных наностеклокерамик, активированных ионами иттербия и эрбия // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 12. – С. 81–88.

9. Glebov L., Glebova L. Swelling of photo-thermo-refractive glass resulted from thermal development // Glasstech. Ber. Glass Sci. Technol. – 2002. – № 75 C2. – P. 294–297.
10. Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Туниманова И.В., Чухарев А.В. Влияние состава стекла на изменение показателя преломления при фототермоиндуцированной кристаллизации // Физика и химия стекла. – 2001. – Т. 27. – № 3. – С. 365–376.
11. Dotsenko A.V., Glebov L.B., Tsekhomsky V.A. Physics and Chemistry of Photochromic Glasses. – New York: CRS Press, 1998. – 190 p.
12. Glebova L., Lumeau J, Klimov M., Zanotto E., Glebov L.B. Role of bromine on the thermal and optical properties of photo-thermo-refractive glass // Non-Crystalline Solids. – 2008. – Vol. 354. – P. 456–461.
13. Власова Н.И., Галант Е.И., Кефели А.А. Спектрофотометрический метод определения координации бора и алюминия в некоторых стеклах // ЖНХ. – 1960. – Т. 5. – № 8. – С. 1768–1773.
14. Борен К, Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
15. Hövel H., Fritz S., Hilger A., Kreibig U., Volmer M. Width of cluster plasmon resonances: bulk dielectric functions and chemical interface damping // Phys. Rev. – 1993. – Vol. B48. – № 24. – P. 18178.
16. Uchida K., Kaneko S., Omi S. // JOSA. – 1994. – Vol. B11. – № 7. – P. 1236.
17. Neeves A.E., Birnboim M.H. Composite structures for the enhancement of nonlinear-optical susceptibility // JOSA B. – 1989. – Vol. 6. – № 4. – P. 787.
18. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.
19. Мейкляр П.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. – М., 1972. – 399 с.
20. Житников П.А., Перегуд Д.Н. ЭПР исследования Ag и Ag<sub>2</sub> центров в фосфатном стекле // ФТТ. – 1975. – Т. 17. – № 6. – С. 1655–1660.
21. Панышева Е. И., Соловьева Н. Д., Туниманова И.В. Взаимодействие УФ и  $\gamma$ -излучения с мультихромным стеклом // Физ. и хим. стекла. – 1993. – Т. 19. – № 1. – С. 109–116.

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| <i>Акишина Екатерина Юрьевна</i>      | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, k_eight@mail.ru sergey.arustamov@gmail.com                 |
| <i>Лазарева Ксения Евгеньевна</i>     | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, riwik87@mail.ru  |
| <i>Никоноров Николай Валентинович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, Nikonov@oi.ifmo.ru |
| <i>Сидоров Александр Иванович</i>     | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Sidorov@oi.ifmo.ru                |
| <i>Цехомский Виктор Алексеевич</i>    | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, tsekomsky@oi.ifmo.ru               |

УДК 535.421, 517.982.43, 515.127

**РАСЧЕТ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ РЕГУЛЯРНЫХ ФРАКТАЛОВ ПО КАРТИНЕ ДИФРАКЦИИ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ**

А.А. Зинчик, Я.Б. Музыченко, А.В. Смирнов, С.К. Стафеев

Проведено численное моделирование дифракции Фраунгофера от геометрических фракталов. Предложен оригинальный алгоритм расчета фрактальной размерности регулярного фрактала по дифракционной картине. В качестве примеров рассмотрены дифракционные картины от следующих геометрических фракталов: ковер Серпинского, фрактал Вишека, снежинка Коха. Проведено сравнение значений фрактальной размерности, полученных на основе численного эксперимента, с теоретическими значениями. Для фракталов с порядком итерации  $m=6$  расхождение между указанными значениями не превышает 1,5%.

**Ключевые слова:** фрактал, дифракция Фраунгофера, Фурье-преобразование, фрактальная размерность, самоподобие, степенной закон.

**Введение**

Модельная задача дифракции на плоских амплитудных фрактальных структурах актуальна для исследований многих видов объектов, характеризующихся фрактальными свойствами. Как известно из Фурье-оптики, в силу линейности Фурье-преобразования интеграл от фрактальной функции зрачка является, в свою очередь, фракталом дополнительной размерности. Это означает, что в области дифракции Фраунгофера (например, в задней фокальной плоскости идеальной оптической системы), пространственный спектр фрактальной маски также обладает свойствами самоподобия. При этом интенсивность на высоких пространственных частотах, соответствующих деталям исследуемой структуры, вносит существенный вклад в суммарную интенсивность. Использование фрактальных масок вместо традиционных пространственных фильтров позволяет повысить чувствительность оптического тракта к амплитудным и (или) фазовым искажениям, вносимым исследуемым объектом [1].

Фрактальная структура образуется путем бесконечного повторения (итерации) исходной формы во все уменьшающемся (или увеличивающемся) масштабе по определенному алгоритму, т.е. воспроизведением самоподобия в соответствии с определенной математической процедурой. Одной из важнейших характеристик фракталов является фрактальная размерность, математическое определение которой было дано Хаусдорфом [2]. Пусть имеется некоторое множество  $S$  в  $n$ -мерном пространстве. Будем покрывать это множество  $p$ -мерными шарами диаметром  $\varepsilon$ . Минимальное количество шаров, необходимых для полного покрытия, обозначим  $N(\varepsilon)$ . Величина

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (1)$$

называется фрактальной размерностью или емкостью множества  $S$ . Для простых геометрических объектов величина  $D$  совпадает с их топологической размерностью  $D_t$ . В общем случае для топологической и фрактальной размерностей справедливо следующее соотношение:  $D_t \neq D$ .

Проведенные ранее исследования [3, 5–7] показали, что дифракционная картина в области дифракции Фраунгофера от фрактальной структуры также является фрактальной, и была найдена связь между их фрактальными размерностями. Особый интерес представляет использование дифракционной картины для определения фрактальной размерности самого фрактала. В работе [8] указывается, что точность определения фрактальной размерности по дифракционной картине для фрактала Вишека не превышает 10 % при 5–6 порядках итерации (порядком итерации будем называть количество итераций при формировании данного фрактала).

Настоящая работа посвящена разработке алгоритма, позволяющего с повышенной точностью рассчитать фрактальную размерность плоского регулярного фрактала по его дифракционной картине.

### Теоретическая часть

С целью исследования предлагаемой методики было проведено численное моделирование дифракции Фраунгофера от наиболее известных геометрических фракталов, таких как ковер и треугольник Серпинского, снежинка Коха, фрактал Вишека.

В случае ковра Серпинского (рис. 1, а) площадь квадрата делится на девять частей, из которых только одна центральная остается прозрачной. Таким образом, масштабирующий множитель (кратность деления по каждой координате) равен трем, а число самоподобных элементов на каждой итерации равно восьми. Соответственно фрактальная размерность такого объекта равна  $D = \frac{\ln 8}{\ln 3} = 1,893$ . Одна из разновидностей

ковра Серпинского, фрактал Вишека, генерируется заменой одного квадрата на пять с масштабирующим множителем, равным трем, фрактальная размерность равна  $D = \frac{\ln 5}{\ln 3} = 1,465$ . Построение такого фрактала представлено на рис. 1, б. В случае снежинки Коха (рис. 1, в) фрактальная структура ближе к линейной, чем к поверхностной, и  $D = \frac{\ln 4}{\ln 3} = 1,262$  соответственно.

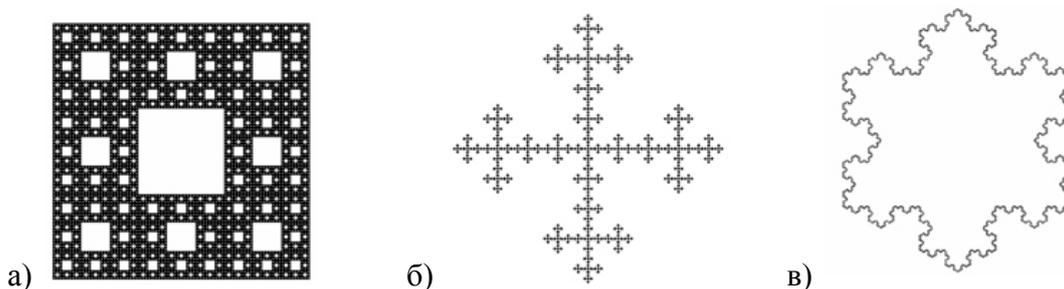


Рис.1. Примеры геометрических фракталов: а) ковер Серпинского ( $D=1,893$ ); б) фрактал Вишека ( $D=1,465$ ); в) снежинка Коха ( $D=1,262$ )

Выбранные примеры фрактальных объектов характеризуются существенно различными размерностями в диапазоне от почти двумерного до почти одномерного. Для более точного и информативного определения свойств дифракционной картины использовались различные уровни построения фракталов, различные углы поворота и масштабирующие множители.

Большинство работ по исследованию дифракции на фракталах посвящено дифракции Фраунгофера, т.е. случаю, когда распределение интенсивности за объектом представляет собой оптическое преобразование Фурье, достаточно просто реализуемое с помощью вычислительного алгоритма.

Дифракционный интеграл Фраунгофера для случая плоского объекта имеет вид [4]

$$\Phi(x, y) = \iint \Psi(x', y') \exp\left[-\frac{ik(xx' + yy')}{l}\right] dx' dy', \quad (2)$$

где  $x, y, x', y'$  – координаты в плоскости наблюдения и на объекте,  $l$  – расстояние до экрана,  $k$  – модуль волнового вектора или волновое число ( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  – длина волны),  $\Psi(x, y)$  – функция пропускания объекта. Учитывая, что в качестве приемника излучения чаще всего используется ПЗС-камера, чувствительная площадка которой имеет дискретную регулярную структуру, получаем следующее уравнение:

$$\Phi(mx_0, ny_0) = \sum_{p=1}^{p=N} \sum_{q=1}^{q=M} \Psi(x_q', y_p') \exp \left[ -\frac{ik(mx_0 x_q' + ny_0 y_p')}{l} \right], \quad (3)$$

где  $M$  и  $N$  – количество элементов дискретизации в плоскости исследуемого объекта по вертикали и горизонтали,  $x_0'$  и  $y_0'$  – размеры элемента дискретизации,  $x_0$  и  $y_0$  – размеры светочувствительной ячейки регистрирующего устройства,  $m$  и  $n$  – вертикальные и горизонтальные координаты этих элементов соответственно. Заметим, что выражение (3) соответствует формуле двумерного дискретного преобразованием Фурье.

Ранее было показано [4], что пространственное распределение интенсивности в дифракционной картине подчиняется степенному закону,

$$\langle I(r) \rangle \sim r^{-D} \quad (4)$$

где  $I$  – интенсивность,  $r$  – радиальная координата, угловые скобки обозначают усреднение по угловой координате. Из (4) следует, что фрактальная размерность объекта может быть рассчитана по следующей формуле:

$$D = \frac{\ln \langle I(r) \rangle}{\ln(r)}. \quad (5)$$

### Результаты моделирования

Предлагаемая методика оценки фрактальной размерности объекта по картине дифракции включает несколько этапов. На первом этапе над входным изображением фрактала, представляемым в виде матрицы значений, выполнялось комплексное Фурье-преобразование. На рис. 2, а–в, представлены изображения фрактала (слева) и его Фурье-образа в инвертированных полутонах (справа). Исходные фракталы представляют собой изображения размером  $729 \times 729$  отсчетов, что позволяет задать порядок итерации фрактала равным шести, поскольку на каждой итерации линейный размер фрактала возрастает в 3 раза.

На втором этапе для определения фрактальной размерности был реализован следующий алгоритм. Для рассчитанных дифракционных картин определялась зависимость интенсивности от расстояния до центра картины. Средняя интенсивность для каждого радиуса вычислялась как сумма интенсивности в точках, расположенных в пределах некоторого кольца, и нормировалась на площадь кольца. При этом толщина кольца в пределе минимизировалась, что позволяло получать одномерные функции  $I(r)$ . Далее строились графики зависимостей усредненной интенсивности от координаты в двойном логарифмическом масштабе. Тангенс угла наклона аппроксимированного графика  $I(r)$ , согласно (5), характеризует фрактальную размерность исходной структуры.

На рис. 3 показана зависимость усредненной интенсивности от радиуса в двойном логарифмическом масштабе для фрактала «ковёр Серпинского» с известной размерностью. Сильно осциллирующая кривая на этом рисунке, являющаяся результатом численного моделирования, отчетливо демонстрирует повторяющуюся структуру, форма которой становится все более детальной по мере удаления от центра дифракционной

картины, причем количество повторений данной структуры определяется порядком итерации фрактала.

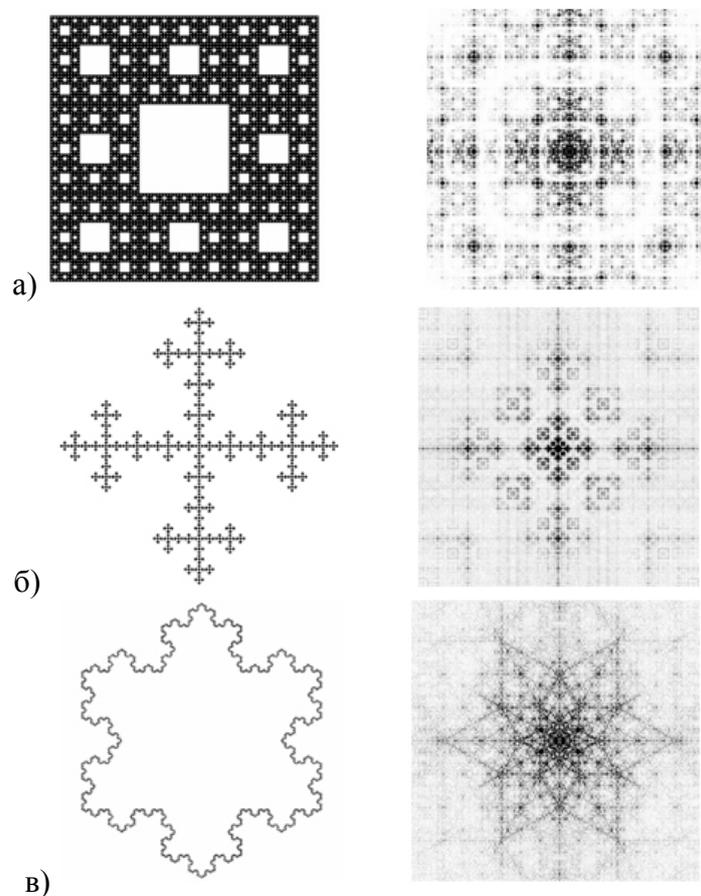


Рис. 2. Исходные фрактальные объекты и расчетные картины дифракции на них: а) ковер Серпинского; б) фрактал Вишека; в) снежинка Коха. Порядок итерации  $m = 6$

Кроме результатов вычислительного эксперимента, на рисунке проведена сплошная линия, тангенс угла наклона которой точно равен фрактальной размерности тестового фрактала. Заметим, что эта прямая может быть аппроксимирующей, так как она проходит через точки, соответствующие средней интенсивности каждого из повторяющихся фрагментов исследуемой кривой. Расчет наклона аппроксимирующей прямой по методу наименьших квадратов не дает ожидаемых результатов, поскольку разброс точек графика не подчиняется нормальному статистическому закону. Несоответствие наклона аппроксимирующей прямой (обозначенной на рисунке пунктиром) теоретическому значению объясняется следующими причинами: во-первых, на расчет наклона аппроксимирующей прямой существенно влияет область графика, соответствующая нулевому (самому грубому) порядку итерации фрактала; во-вторых, резко неравномерное распределение плотности точек по логарифмической шкале увеличивает относительный вклад точек с максимальными интервалами. Вследствие неравномерного распределения точек алгоритмы сглаживания и фильтрации зашумленного сигнала не дают желаемого результата.

Для решения этой проблемы была осуществлена следующая процедура. Усредненная дифракционная картина была разделена на кольцевые области, ширина которых, взятая в логарифмическом масштабе, одинакова. Количество кольцевых областей может быть произвольным. В этом случае становится возможным получить практиче-

ски равную плотность точек, попадающих в каждый интервал. Наибольшее соответствие между теоретическим значением фрактальной размерности и наклоном усредненной экспериментальной кривой получается при выборе числа областей, которое на единицу меньше, чем порядок итерации фрактала  $m$ . Первый порядок исключается, поскольку не содержит существенной информации.

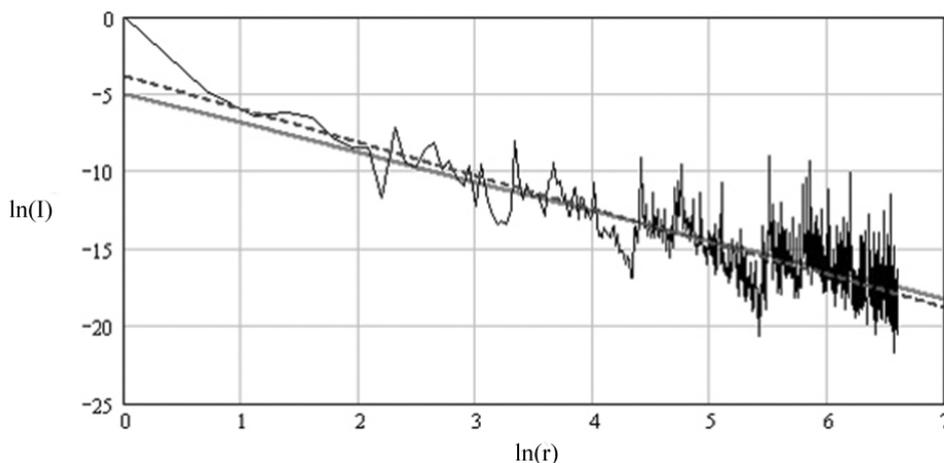


Рис. 3. График зависимости усредненной интенсивности от радиуса для фрактала с  $D = \log 8 / \log 3$  (ковер Серпинского)

В каждом из интервалов была рассчитана средняя интенсивность. Результаты представлены на рис. 4–6 для всех трех примеров геометрических фракталов. По найденным значениям средней интенсивности проведена аппроксимирующая прямая (обозначена на рисунках пунктиром). Для большей наглядности исходный массив значений интенсивности на рисунках сдвинут вниз. Значения рассчитанной фрактальной размерности приведены в правом верхнем углу каждого рисунка.

Тип фрактала	Теоретическая фрактальная размерность	Фрактальная размерность, полученная экспериментально	Относительная погрешность
Снежинка Коха	1,262	1,258	0,3%
Ковер Серпинского*	1,262	1,270	0,6%
Фрактал Вишека	1,465	1,472	0,4%
Фрактал Вишека **	1,465	1,451	0,9%
Фрактал Вишека ***	1,465	1,477	0,8%
Треугольник Серпинского	1,585	1,601	1%
Ковер Серпинского	1,893	1,872	1,1%

Таблица 1. Сравнение расчетных и теоретических фрактальных размерностей геометрических фракталов: \* – фрактал получается заменой одного непрозрачного квадрата на четыре таких же, расположенных по углам исходного, масштабирующий множитель равен 3; \*\* – исследуемый фрактал Вишека, повернутый на 45°; \*\*\* — фрактал, генерируемый при помощи замены одного квадрата, образуемого двумя диагональными линиями, на пять (заменой двух взаимноперпендикулярных линий на 10 таких же), масштабирующий множитель равен 3

Количественные результаты расчета фрактальной размерности от известных геометрических фракталов на основе анализа их дифракционных распределений приведены в табл. 1. Различные значения для разновидностей фрактала Вишека, имеющих одинаковую теоретическую размерность, обусловлены конечными размерами минимальных элементов фрактала и несколько различным расположением этих элементов на

плоскости. Увеличение порядка итерации фрактала уменьшает различие между размерностями разновидностей фрактала Вишека. Следует отметить, что для всех трех фракталов погрешность определения их размерности не превышает 1%.

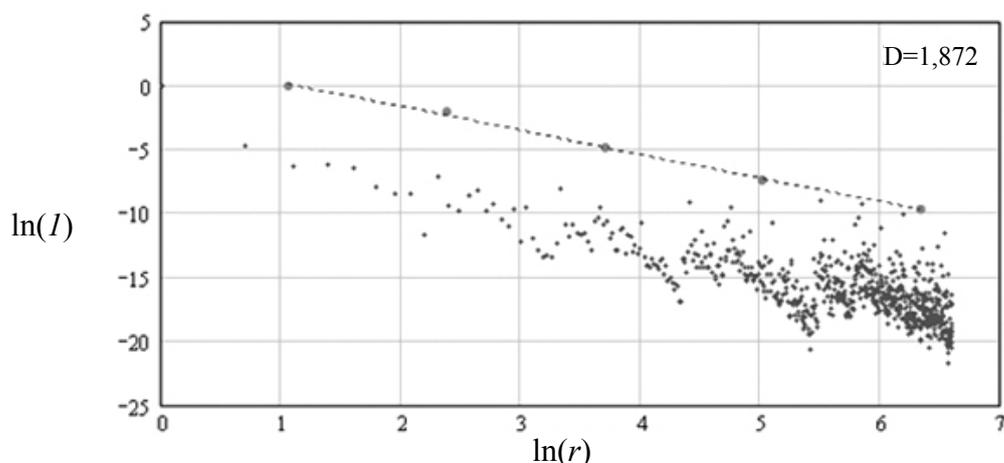


Рис. 4. График зависимости усредненной интенсивности от радиуса для фрактала с  $D = \ln 8 / \ln 3$  (ковер Серпинского)

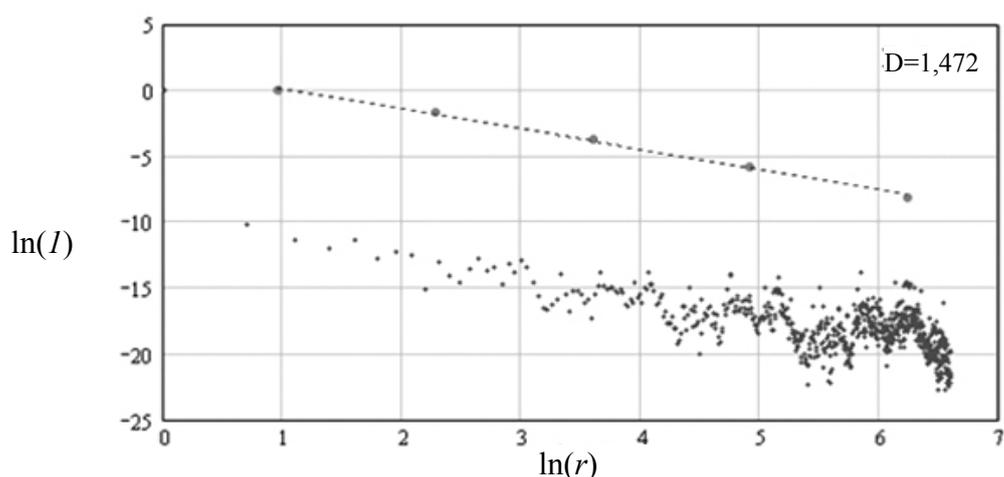


Рис. 5. График зависимости усредненной интенсивности от радиуса для фрактала с  $D = \ln 5 / \ln 3$  (фрактал Вишека)

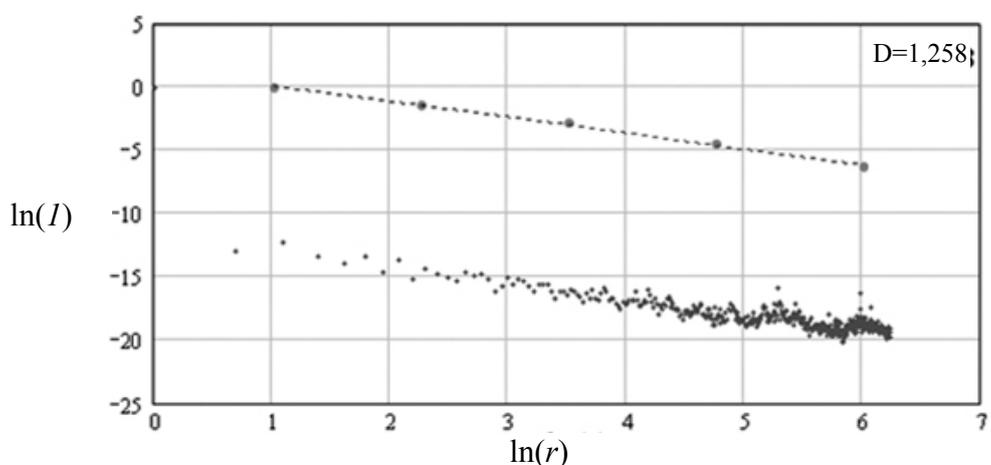


Рис. 6. График зависимости усредненной интенсивности от радиуса для фрактала с  $D = \ln 4 / \ln 3$  (снежинка Коха)

Представленные в таблице данные показывают, что разработанный метод позволяет определить фрактальную размерность с относительной погрешностью 1,5%. Расчет коэффициента корреляции между теоретическими и экспериментальными значениями дает величину  $K=0,998$ . Относительная погрешность возрастает с ростом фрактальной размерности, поскольку объекты с большей размерностью дают больший разброс значений интенсивности на периферии дифракционной картины.

### Заключение

Предложенный метод расчета фрактальной размерности по дифракционной картине эффективен для плоских регулярных фракталов различных типов. На практике далеко не все фракталы являются регулярными. Физические объекты зачастую обладают лишь приближенным или статистическим самоподобием. Такие объекты иногда называют физическими фракталами. Физические фракталы также характеризуются некоторым значением фрактальной размерности, для определения которой может использоваться рассмотренный в работе метод. Это позволит оценить фрактальные свойства широкого круга природных и синтетических материалов, коллоидных и пористых структур, что может способствовать уточненному объяснению их физических свойств.

### Литература

1. Зинчик А.А., Стафеев С.К. Использование фрактальных масок для визуализации оптических неоднородностей при оптической обработке искаженного изображения // Оптический журнал. – 2003. – Т 70. – № 11. – С. 49–52.
2. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
3. Uozumi J., Kumura H., Asakura T. Fraunhofer diffraction by Koch fractals // Journal of Modern Optics. – 1990. – Vol. 37. – № 6. – P. 1011–1031.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
5. Uno K., Uozumi J., Asakura T. Stastical propereties of the Fraunhofer diffraction field produced by random fractals // Applied Optics. – 1993. – Vol. 32. – № 15. – P. 2722–2729.
6. Hou B., Xu G., Wen W., Wong G. Diffraction by an optical fractal grating // Appl. Phys. Letters. – 2004. – Vol. 85. – № 25. – P. 6125–6127.
7. Rodrigo J., Alieva T., Calvo M. Diffraction by Cantor fractal zone plates // Journal of Modern Optics. – 2005. – Vol. 52. – № 18. – P. 2771–2783.
8. Боголюбов А.Н., Петухов А.А., Шапкина Н.Е. Оптическая дифракция на фрактальных решетках // Вестник МГУ. – Серия 3. Физика. – 2008. – № 2. – С. 7–10.

<i>Зинчик Александр Адольфович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zinchik@phd.ifmo.ru
<i>Музыченко Яна Борисовна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, myb@ Rambler.ru
<i>Смирнов Александр Витальевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, smirnav@phd.ifmo.ru
<i>Стафеев Сергей Константинович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, stafeev@phd.ifmo.ru

УДК 535.317.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТИВА МИКРОСКОПА МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ С НАКОПЛЕНИЕМ

Ле Зуй Туан, В.К. Кирилловский

Разработан и исследован метод компьютерной изофотометрии функции рассеяния точки (ФРТ) и соответствующая аппаратура для контроля качества изображения микрообъектива путем измерения ФРТ прямым методом и последующего расчета частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) и функции концентрации энергии (ФКЭ). С точки зрения потребителя, эксплуатирующего оптическую систему, строящую изображение, важнейшая задача контроля и аттестации – измерение действительной структуры изображения и сопоставление полученного результата с расчетной характеристикой. Обработка данных ведется в реальном времени, что позволяет получать результаты в кратчайшие сроки, при этом ФРТ определяется с передачей тонкой дифракционной структуры изображения тест-объекта, отображается трехмерный график ФРТ, что повышает надежность и достоверность результатов.

**Ключевые слова:** микрообъектив, контроль качества изображения, компьютерная изофотометрия.

### Введение

Цель данной работы состояла в разработке и исследовании метода компьютерной изофотометрии ФРТ и соответствующей аппаратуры для контроля качества изображения микрообъектива путем измерения ФРТ прямым методом в диапазоне более пяти порядков ( $10^5$ ) при сохранении максимального отношения сигнала к шуму на всем диапазоне и последующего расчета ЧКХ и ФКЭ.

С точки зрения потребителя, эксплуатирующего оптическую систему, строящую изображение, важнейшей задачей контроля и аттестации является измерение действительной структуры изображения и сопоставление полученного результата с расчетной характеристикой. Для решения этой задачи традиционно существует ряд методов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [1]. Большинство из них основываются на строчном сканировании оптического изображения точечного тест-объекта приемником излучения, имеющим непрерывную, плавно возрастающую световую характеристику, для получения ФРТ. Основным недостатком метода сканирования является ограниченный диапазон измерения перепада освещенности в изображении, который, как правило, не превышает двух порядков. С другой стороны, для получения корректных результатов при расчетах ЧКХ и функции концентрации энергии необходимо, чтобы ФРТ была определена в диапазоне перепада освещенностей (от максимального до минимального) не менее 3–5 порядков. Существующие приемники изображения не позволяют производить измерения в таком широком диапазоне.

В связи с этим были поставлены следующие задачи исследования:

1. модернизация и компьютеризация метода и аппаратуры измерения ФРТ с целью расширения диапазона измеряемых освещенностей и сохранения максимального отношения сигнала к шуму на всем диапазоне;
2. автоматизация процесса изофотометрии путем создания системы регистрации ФРТ видеокамерой, управляемой компьютером в процессе измерения;
3. создание и исследование компьютеризированной установки для испытания объектива микроскопа путем прямого измерения ФРТ в широком диапазоне перепада освещенности в изображении точечного тест-объекта;
4. разработка оригинального программного обеспечения для широкодиапазонного исследования ФРТ методом компьютерной изофотометрии и расчета по ФРТ характеристик качества изображения, таких как ЧКХ и функция концентрации энергии.

## Теоретические основы метода исследования качества изображения

Для решения задачи количественной оценки качества изображения оптики можно использовать метод оценки функции распределения освещенности в изображении светящейся точки (ФРТ), полученной путем прямого измерения структуры пятна рассеяния. ФРТ используют как первичную характеристику качества изображения, так как она позволяет расчетным путем перейти к другим требуемым характеристикам и критериям качества изображения, таким как функция рассеяния линии (ФРЛ), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), функция концентрации энергии [2].

На контрастность изображения, даваемого реальной оптической системой, могут влиять рассеянный свет, направленность освещения и т.д. При экспериментальном определении ЧКХ объективов традиционно пользуются мирой, имеющей синусоидальную структуру. Изображение миры сканируют узкой щелью. При исследованиях микрообъективов не удастся изготовить миры необходимой частоты. Здесь тест-объектами служат точечные и щелевые отверстия в покровном стекле, алюминированном по специальной технологии. Чаще всего они применяются для визуальной оценки качества изображения по виду дифракционного изображения точки, построенного испытуемым микрообъективом. Поэтому в современных условиях производства, при повышении требований к качеству изображения оптических систем, разрабатываются методы количественной оценки структуры пятна рассеяния. Совокупность этих методов можно разбить на три основные группы:

- 1) методы фотоэлектрического сканирования [1];
- 2) методы фотографической фотометрии [3];
- 3) изофотометрические методы [4].

Линейный участок световой характеристики для существующих фотоприемников в режиме непрерывного сканирования не позволяет надежно определять ФРТ при перепадах освещенности более чем в 100 раз. В то же время практика исследования ФРТ реальных приборов показывает, что для достоверной оценки концентрации энергии в пятне рассеяния необходимо измерить ФРТ в пределах 4–5 порядков ( $10^4$ – $10^5$ ).

### Изофотометрия с изменяющимся временем накопления

Для устранения рассмотренных недостатков традиционных методов определения ФРТ с 1974 г. ведется разработка изофотометрических методов анализа пятна рассеяния [4]. Эти методы позволяют регистрировать в пятне рассеяния перепады освещенности более чем в 5 порядков, строить графики ФРТ в любом сечении, топограмму распределения освещенности, а также вычислять концентрацию энергии в пятне и ЧКХ объектива. Изофотометрическая регистрация ФРТ нашла применение при контроле ряда прецизионных оптических систем и крупнейших астрономических зеркал (в том числе для телескопа БТА).

Рассмотрим принципиальное отличие в механизме оценки структурных характеристик изображения по методу изофот. Для получения системы изофот (изофотограммы) исследуемого распределения освещенности необходимо использовать функцию преобразования (ФП) типа «гребенка» (лат. *comb*). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов. Выполняется регистрация оптического изображения тест-объекта в виде серии последовательных кадров при осуществлении ряда экспозиций различной длительности. Удобно длительности экспозиций располагать по шкале, определяемой степенным законом:

$$t_i = 2^{-i},$$

где  $t$  – относительная продолжительность экспозиции.

Равномерная шкала логарифмов экспозиции позволяет последовательно «наводиться» импульсной характеристической кривой на равномерный ряд фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону изменения интенсивности. Для построенного семейства характеристических кривых  $D_{\Pi} = f(\lg E)$  при  $t = \text{const}$ , исходя из известного соотношения взаимозаменяемости, имеем:

$$H = Et,$$

где  $E$  – освещенность в оптическом изображении,  $H$  – экспозиция для формирования фиксированного значения оптической плотности в фотоизображении на среднем участке световой характеристики с минимальным уровнем шума. Каждой отдельной изофоте соответствует соотношение из следующей серии:

$$E_1 = H/t_1; E_2 = H/t_2 \dots E_n = H/t_n.$$

Нормируя полученный ряд освещенностей к значению максимальной освещенности в данном распределении, получим выражение в относительных (безразмерных) единицах:

$$E_{\text{отн}} = I/t_{\text{отн}}.$$

При этом время удобно задавать в целых числах, а относительную освещенность – в долях от максимального значения, принятого за единицу. Последние две формулы являются основными выражениями структурометрического метода изофотометрической регистрации. Таким образом, при использовании приемника изображения с импульсной функцией преобразования, изменяя время накопления на приемнике изображения, достигаем эффекта перемещения импульсной функции преобразования в новые положения вдоль оси  $\lg E$ .

На практике, при контроле качества изображения оптической системы, изображение светящейся точки, построенное исследуемой системой, многократно фотографируют на однотипный фотоприемник при различных длительностях экспозиции. Изофоты различных уровней, расположенные на отдельных снимках, после оконтуривания совмещают в топограмму распределения освещенности (изофотограмму).

Достоинства метода изофотометрии с переменным накоплением:

- большой диапазон измеряемого перепада освещенностей в пятне рассеяния (свыше  $10^4$ );
- высокая светочувствительность, что особенно важно при недостатке световой энергии в схеме, например, при контроле оптических поверхностей без зеркального покрытия;
- постоянное отношение сигнала к шуму от максимальных до минимальных регистрируемых интенсивностей.

К недостаткам этого метода в традиционном исполнении следует отнести необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции; это требование приводит к снижению оперативности исследований.

### **Разработка методики компьютерной изофотометрии ФРТ микрообъектива**

В данной работе за основу был взят метод изофотометрии с переменным накоплением. На основе этого метода создана установка (рис. 1) для контроля качества изображения по ФРТ микрообъектива. Камера превращает изображение пятна рассеяния в видеосигнал и посылает в компьютер через порт USB. В качестве приемника изображения применяется телевизионная камера с матрицей, включен блок ввода информации в компьютер. Разработано и установлено программное обеспечение, позволяющее быстро формировать и точно анализировать изображения больших массивов изофот.

Метод компьютерной изофотометрии основан на получении серии фотоснимков пятна рассеяния с переменным временем экспозиции при помощи матричной камеры,

соединенной с компьютером, для получения совокупности фотометрических сечений, соответствующих различным уровням равной освещенности (рис. 2). Каждое фотометрическое сечение формируется как фигура с четким контуром, который называется изофотой. Из системы изофот получаем карту распределения относительной освещенности ( $\tilde{E}$ ) в пятне рассеяния.

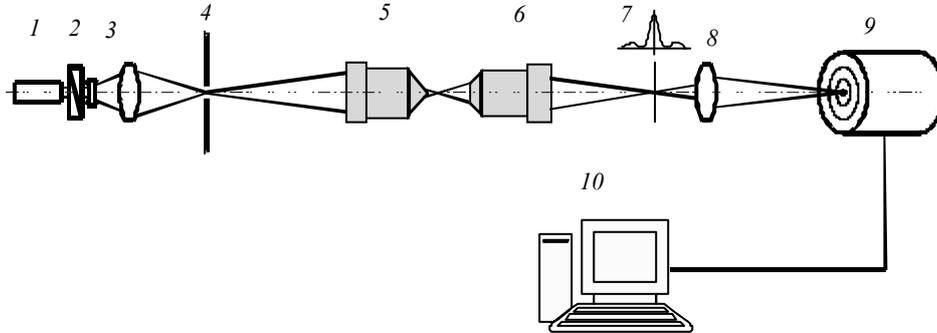


Рис. 1. Принципиальная схема установки для контроля качества изображения микрообъектива методом лазерной компьютерной изофотометрии ФРТ: 1 – лазер, 2 – фотометрический клин; 3 – система для фокусировки лазерного пучка, 4 – точечная диафрагма, 5 – микрообъектив, формирующий точечный тест-объект, 6 – исследуемый объектив, 7 – изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния), 8 – проекционный микрообъектив, 9 – ПЗС (приемник изображения), 10 – компьютер

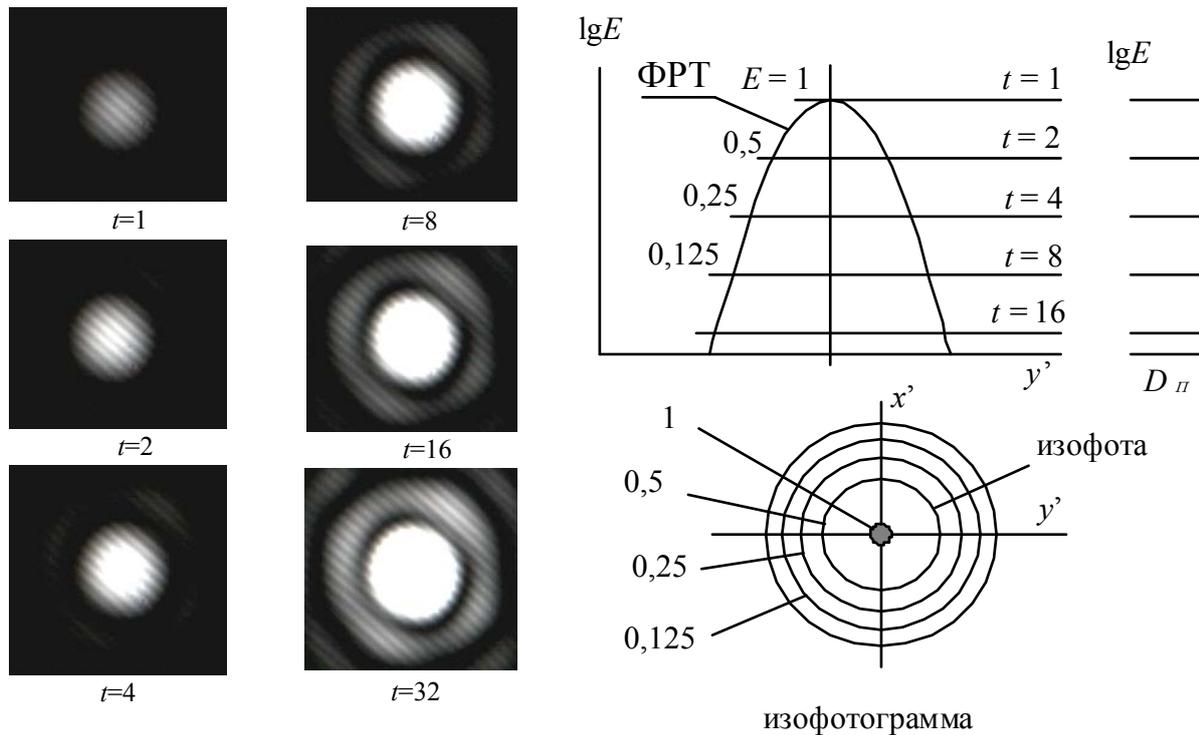


Рис. 2. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления

Для компьютеризации метода используются серийные цифровые видеокамеры, которые обладают способностью изменения времени накопления в широком диапазоне, что обеспечивает изофотометрию освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более четырех порядков. Для созданной экспериментальной установки была использована

недорогая матричная видеокамера VAC-135; ее диапазон изменения относительного времени накопления составляет 1–2047, т.е. свыше трех порядков.

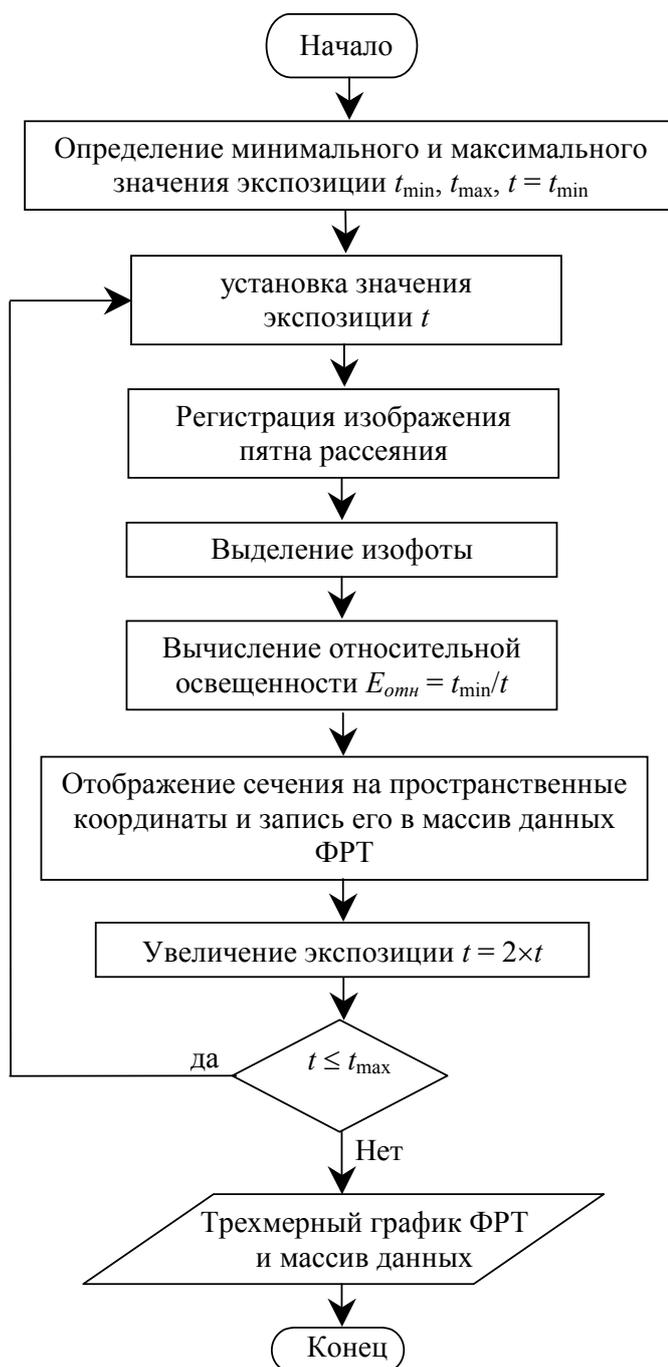


Рис.3. Схема алгоритмического решения компьютерной версии задачи изофотометрии с переменным накоплением

На рис. 3 показана схема алгоритмического решения компьютерной версии задачи изофотометрии с переменным накоплением. В исходном состоянии значение длительности экспозиции (*выдержки* при фоторегистрации) для цифровой камеры установлено минимальным,  $t_1$ , а фотометрический клин введен таким образом, что световой поток в схеме контроля формирует изображение, дающее изофоту в виде точки (первая изофота). Эта изофота соответствует максимуму интенсивности  $\tilde{E}_1$ , который принимаем рав-

ным единице. В процессе измерения после установки увеличенного времени экспозиции  $t_2=kt_1$  программа выполняет регистрацию фотографии пятна рассеяния и вводит ее в модуль выделения изофоты. Эта изофота является контуром фотометрического сечения, соответствующего новому уровню относительной освещенности  $\tilde{E}_2=t_1/t_2$ .

Таким образом,  $\tilde{E}_n = 1/\tilde{t}_n = t_1/t_n$  ( $n$  – порядковый номер изофоты), поэтому изофота помещается в систему координат на уровень  $\tilde{E}_n$ , который записывается в память. Когда  $t > t_{\max}$ , работа программы заканчивается, и на мониторе появляется графическое отображение ФРТ.

Совокупность ряда фотометрических сечений и суммированного в пространственных координатах их исходного взаимного расположения представляет собой объемную диаграмму ФРТ, т.е. функцию распределения интенсивности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой, без применения аппроксимации. Обработка полученных данных ведется в реальном времени, что позволяет получать результаты в кратчайшие сроки, при этом ФРТ определяется с передачей тонкой дифракционной структуры изображения тест-объекта, что повышает надежность и достоверность результатов контроля. Производится визуализация трехмерного графика фотометрической структуры ФРТ и расчет характеристик качества изображения, таких как ЧКХ и функция концентрации энергии. При испытаниях комплекса исследовался микрообъектив-ахромат  $8\times 0,20$ . Как видно из рис. 2, результаты эксперимента хорошо согласуются с расчетными данными.

### Результаты обработки, полученные с помощью программы

На основе найденного алгоритмического решения компьютерной версии задачи изофотометрии с переменным накоплением разработано программное обеспечение KIZO [5], обеспечивающее автоматическую широкодиапазонную изофотометрию изображения точечного тест-объекта при помощи матричной цифровой камеры, управляемой компьютером (рис. 4–12). Интервал между последовательными выдержками настолько мал, что ряд последовательных изофот сливается в сплошную поверхность, отображающую ФРТ со всеми подробностями ее дифракционной картины.

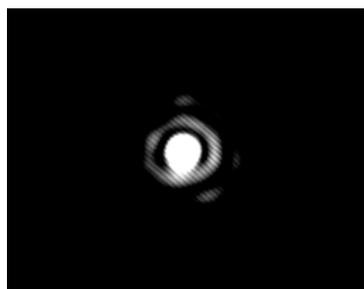


Рис. 4. Дифракционное изображение точечного тест-объекта (экспозиция, оптимальная для визуальной оценки)

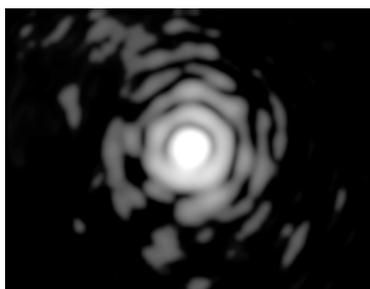


Рис. 5. Дифракционное изображение точечного тест-объекта (максимальная экспозиция по изофотометрической шкале)

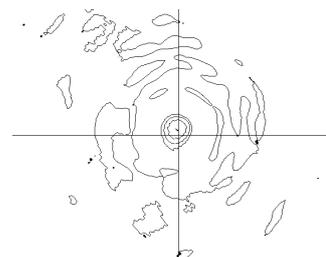


Рис. 6. Изофотограмма (иллюстративная версия)

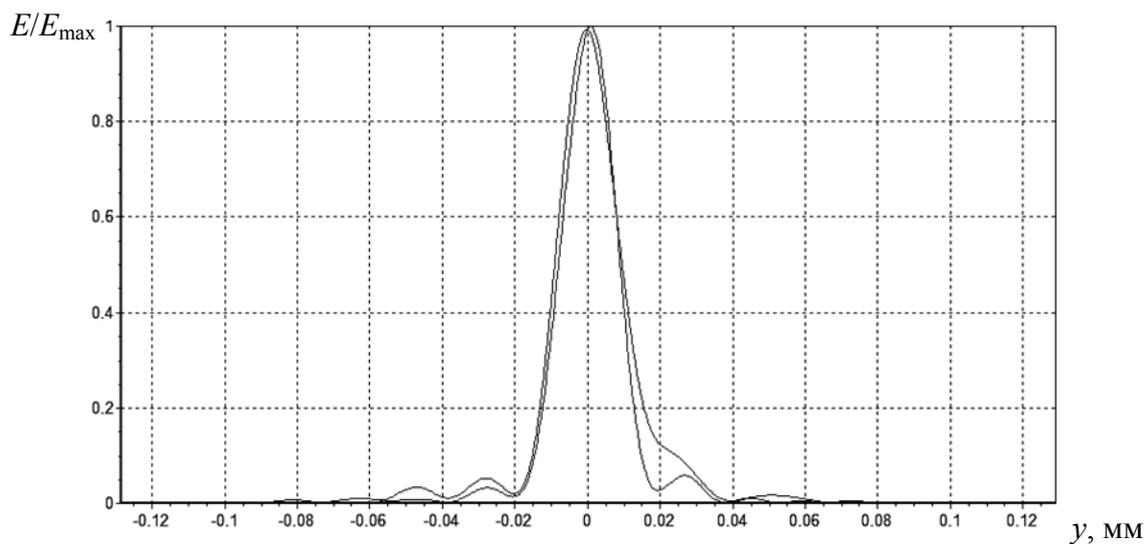


Рис. 7. График функции рассеяния точки (в двух сечениях)

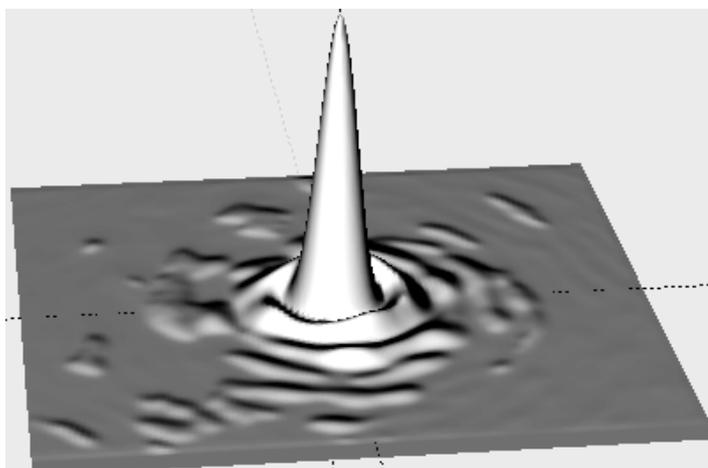


Рис. 8. Поверхность функции рассеяния точки

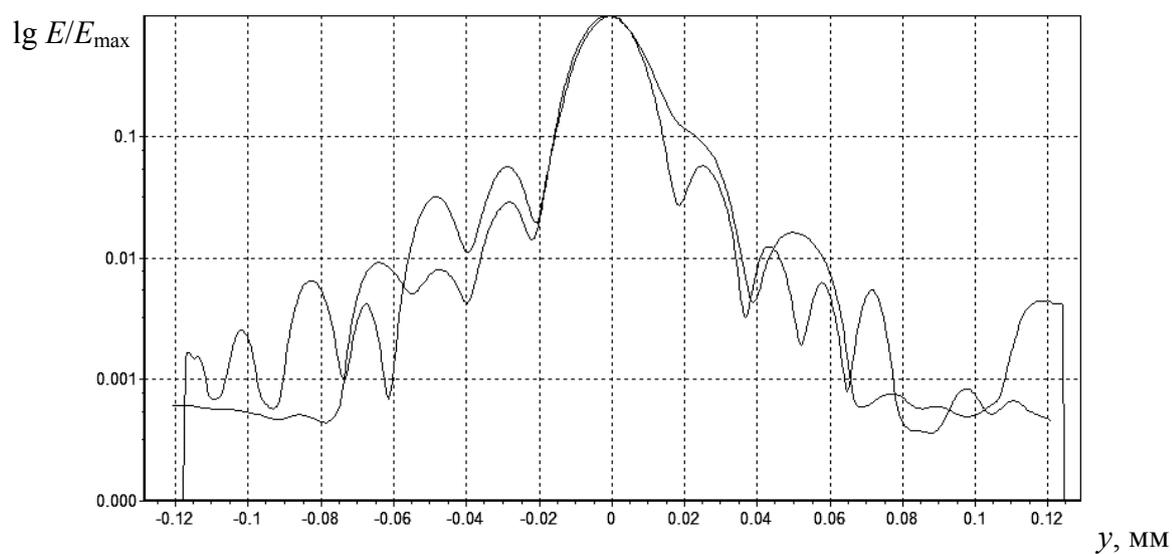


Рис. 9. График функция рассеяния точки в логарифмическом масштабе

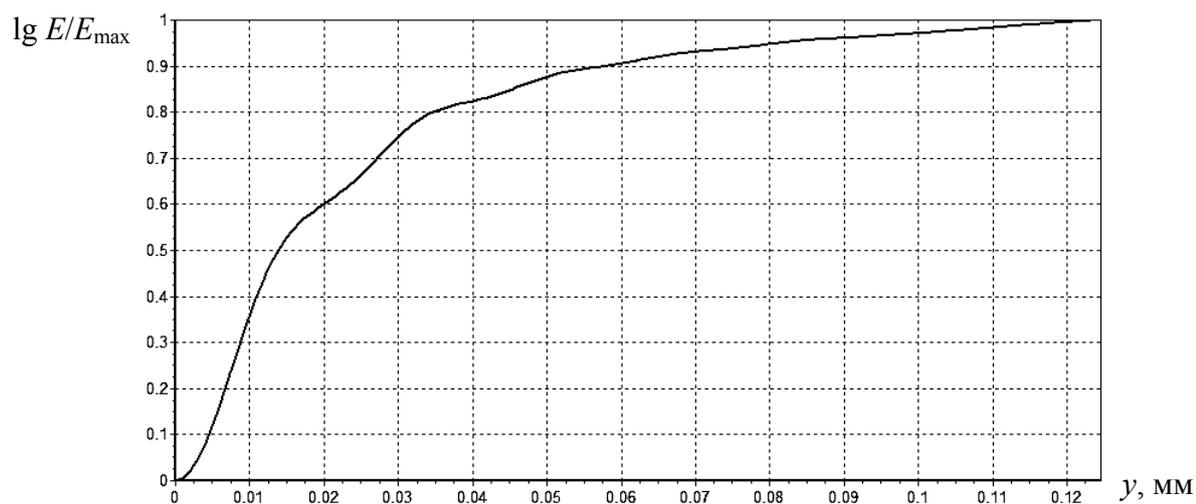


Рис. 10. График функции концентрации энергии

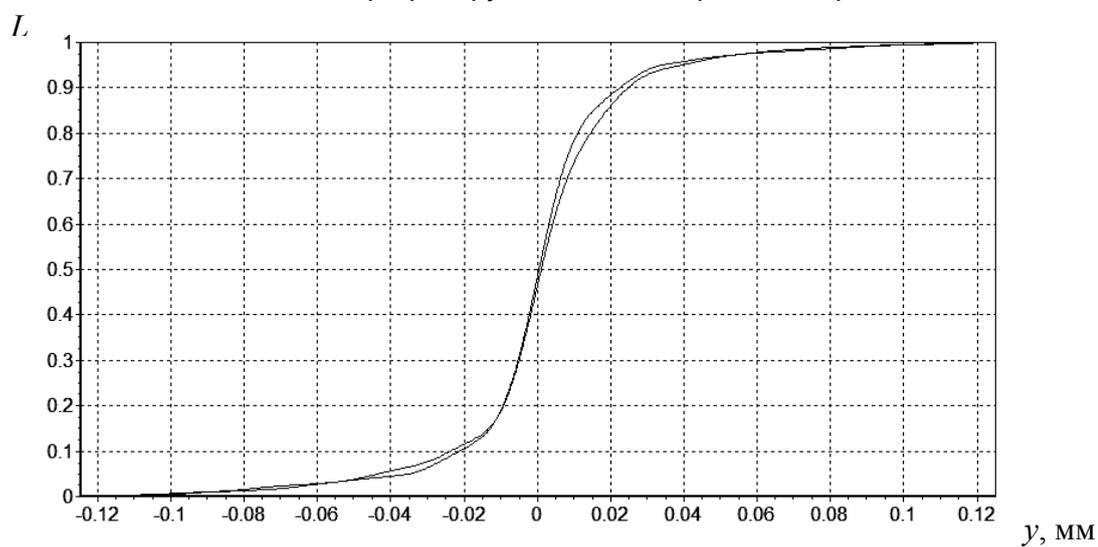


Рис. 11. Пограничная кривая

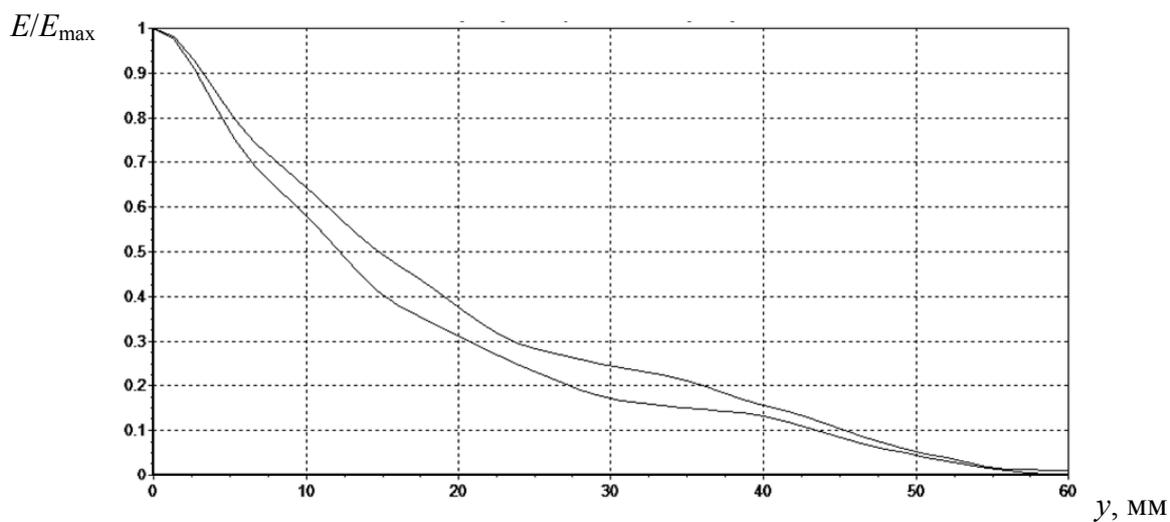


Рис. 12. График функции передачи модуляции (ЧКХ) в плоскости изображения, построенного микрообъективом

### Заключение

1. Разработан и исследован метод компьютерной изофотометрии ФРТ и соответствующая аппаратура для контроля качества изображения микрообъектива путем измерения ФРТ прямым методом при расширении диапазона измеряемых освещенностей и сохранении максимального отношения сигнала к шуму на всем диапазоне.
2. Автоматизирован процесс изофотометрии путем создания системы регистрации ФРТ видеокамерой, управляемой компьютером в процессе измерения.
3. Создана и исследована компьютеризированная установки для испытания объектива микроскопа путем прямого измерения ФРТ.
4. Разработано оригинальное программное обеспечение для широкодиапазонного исследования ФРТ методом компьютерной изофотометрии и расчета по ФРТ характеристик качества изображения, таких как ЧКХ и функция концентрации энергии.
5. Обработка полученных данных ведется в реальном времени, что радикально повышает оперативность измерений и делает метод эффективным для серийного производства.
6. ФРТ определяется с передачей тонкой дифракционной структуры изображения тест-объекта, производится визуализация трехмерного графика фотометрической структуры ФРТ, что повышает надежность и достоверность результатов.

### Литература

1. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. – М.: Машгиз, 1978. – 250 с.
2. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 88 с.
3. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 230 с.
4. Зверев В.А., Кирилловский В.К., Сокольский М.Н. Исследование качества изображения оптических систем методом изофотометрической фоторегистрации // ОМП. – 1976. – № 8. – С. 6–8.
5. Кирилловский В.К., Ле Зуй Туан. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для аппаратуры контроля качества изображения оптических систем // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 12–16.

*Кирилловский Владимир  
Константинович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, vkkir@yandex.ru

*Ле Зуй Туан*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, DuyTuan@mail.ru

УДК 53.072; 681.3

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКА

А.В. Демин, К.В. Константинов

В статье предложен метод имитационного моделирования оптико-электронного комплекса для измерения высоты нижней границы облаков способом просмотра активностей. Разработана и апробирована имитационная модель измерения высоты нижней границы облаков.

**Ключевые слова:** имитационная модель, высота нижней границы облаков.

### Введение

Одним из важных режимов обеспечения безопасности полетов является обеспечение безаварийной посадки летательных аппаратов (ЛА) на аэродром, которая, помимо технического состояния ЛА, определяется метеорологической обстановкой в зоне посадки ( $МО_{Ар}$ ). Контроль за  $МО_{Ар}$  обеспечивается аэродромным оборудованием, важным компонентом которого является система измерения высоты нижней границы облаков (НГО) в зоне посадки. Качество и достоверность работы измерительного комплекса (ИК) во многом определяется выбранной моделью облака и, в частности, моделью НГО. Процесс измерения высоты НГО может быть представлен в виде следующей последовательности: ИК $\Rightarrow$ атмосфера $\Rightarrow$ НГО $\Rightarrow$ атмосфера $\Rightarrow$ ИК.

Наряду с известными методами определения высоты НГО, наиболее объективным является ИК, выполненный как оптико-электронный комплекс (ОЭК<sub>НГО</sub>).

### Постановка задачи

Представление процесса измерения высоты НГО математической моделью является одним из важных моментов как при проектировании, так и при последующей эксплуатации ОЭК<sub>НГО</sub>. Целью настоящей статьи является построение имитационной модели процесса измерения высоты НГО «атмосфера $\Rightarrow$ НГО $\Rightarrow$ атмосфера» для оценки ожидаемых показателей работы ОЭК<sub>НГО</sub> в процессе проектирования и их корректировки при эксплуатации. На рис. 1 представлена структурная схема ОЭК<sub>НГО</sub>, оптическая схема которого выполнена по коаксиальной схеме, т.е. объектив излучателя и объектив приемной системы выполнены как общий для обоих каналов. Лазерный излучатель с  $\lambda=0,9$  мкм имеет дополнительную оптическую систему для изменения угловой расходимости и систему модуляции излучения. Перед фотоприемным устройством (ФПУ) установлен интерференционный фильтр с  $\lambda=(0,9\pm 0,05)$  мкм, тем самым обеспечивается минимизация воздействия на ФПУ постороннего излучения. Контроллер выполняет функцию программного управления комплексом в соответствии с математической моделью функционирования ОЭК<sub>НГО</sub> в параметрической или аналитической форме. Блок обработки данных выполняет функцию расчета высоты НГО.

### Метод моделирования

Из всех известных методов моделирования был выбран метод имитационного моделирования, основанный на моделировании непосредственно алгоритмами функционирования подсистем моделируемой системы, или имитационное моделирование системы способом просмотра активностей его подсистем (ИМ<sub>АК</sub>). Метод позволяет реализовать моделирование любой системы, особенностью которой является то, что функциональные действия каждой из ее подсистем различны, причем для выполнения дей-

ствий каждой из них требуется выполнение своих условий и ограничений. Эти условия и ограничения, как правило, известны и могут быть представлены в одной из форм, приемлемой для моделирования и реализации их в контроллере.



Рис. 1. Структурная схема оптико-электронного измерительного комплекса высоты нижней границы облака

На рис. 2 представлена имитационная модель измерения высоты нижней границы (ИМ<sub>НГО</sub>) в виде активируемых блоков, где приняты следующие символичные и функциональные обозначения:  $АБ_1$  – модель измерителя;  $АБ_2$  – модель атмосферы между НГО и ОЭК<sub>НГО</sub>, а именно, модельное или параметрическое представление (метеосводка, географическое место проведения ИМ ОЭК<sub>НГО</sub>, время суток, месяц, год, высота светила);  $АБ_3$  – модель помехи и возмущения, а именно, описание влияния атмосферы и приемопередающей аппаратуры на оптический сигнал ОЭК<sub>НГО</sub>;  $АБ_4$  – модель НГО.

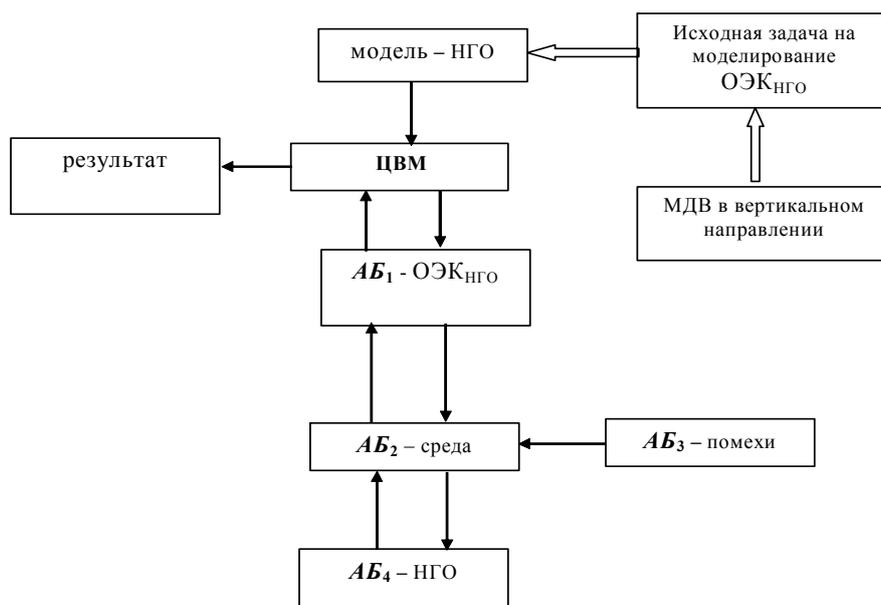


Рис. 2. Имитационная модель измерения высоты нижней границы облаков

Особенностью ИМ<sub>АК</sub> является то, что все функциональные действия подсистем могут быть синхронизированы и рассмотрены в процессе моделирования независимо друг от друга и в реальном масштабе времени [1].

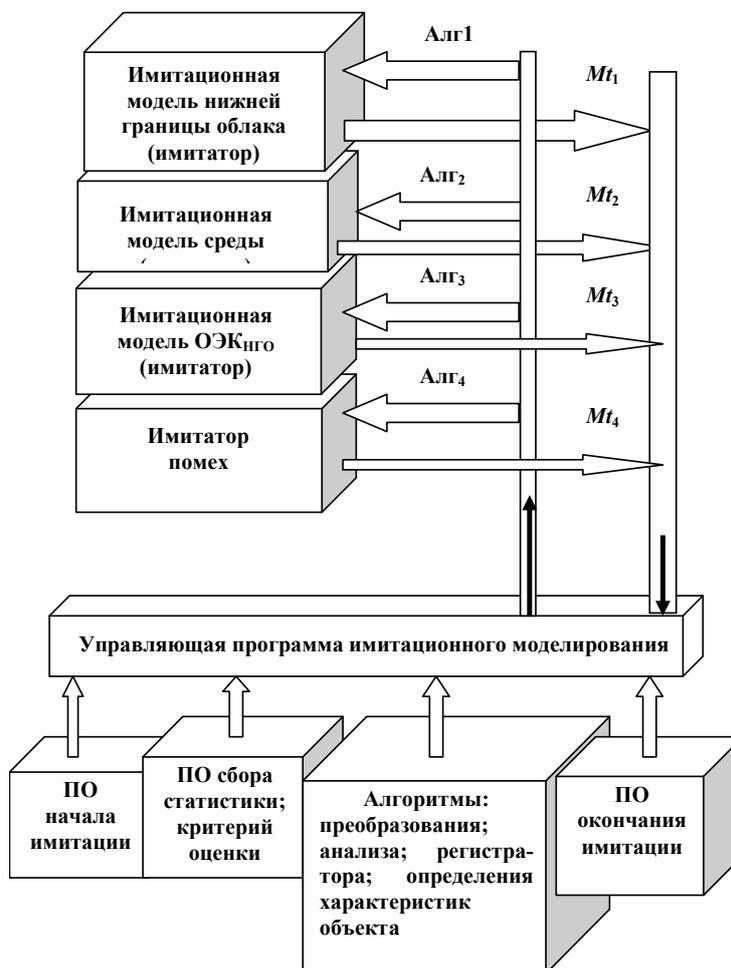


Рис. 3. Блок-схема имитационного моделирования опто-электронного комплекса измерения высоты нижней границы облака способом просмотра активностей

В соответствии с ИМ<sub>НГО</sub> на рис. 3 представлена блок схема имитационного моделирования ОЭК<sub>НГО</sub>, где приняты обозначения:  $M_t$  – модельное время имитируемого блока; Алг – алгоритм имитации (математическая модель) имитируемого блока; ПО – программное обеспечение имитационного моделирования по принятым аналитическим соотношениям. Начало имитации обусловлено установкой значений начальных состояний компонентов модели. Проверка выполнимости условия инициализации активностей выполняется либо путем определения параметров модели, либо путем вычисления момента активизации блока или параметров модели, либо путем вычисления момента активизации блока. Поскольку все функциональные действия в подсистемах ИМ<sub>ИУС</sub> происходят независимо друг от друга, то и модельное время  $M_t$  для каждого  $АБ_i$  разное.

### Построение математической модели тракта «атмосфера⇒НГО⇒атмосфера»

Предполагаем, что функционирование ОЭК<sub>НГО</sub> можно описать линейным оператором. Рассмотрим основы для построения математической модели тракта «атмосфера⇒НГО⇒атмосфера» как наиболее важного звена в общей модели процесса измерения НГО при определении параметров комплекса.

Известно, что совокупность атмосферных аэрозолей следует рассматривать как систему твердых или жидких дисперсных частиц в воздухе, размеры которых в зависимости от высоты и температуры в месте их локализации возможны в пределах  $10^{-3}$ – $10^2$  мкм. Совокупность атмосферных аэрозолей можно классифицировать на характерные типы – облака, туманы, дымки, осадки, ядра конденсации. При этом аэрозоль – одна из наиболее оптически активных и наименее изученных составляющих атмосферы – присутствует практически на всех высотах [2].

Выделяются следующие источники аэрозоля в атмосфере:

- морская, океаническая и земная поверхность;
- вторичная генерация в атмосфере за счет фотохимических реакций;
- продукты индустриальной и хозяйственной деятельности;
- продукты вулканической деятельности (газ, пыль), дым лесных пожаров;
- космическая пыль и продукты сгорания метеоров.

Облака бывают капельножидкими и кристаллическими. Капельножидкие облака состоят из сферических частиц, кристаллические облака имеют частицы неправильной формы – кристаллики льда.

Основные процессы, регулирующие распределения аэрозоля в атмосфере:

- турбулентная диффузия и конвективный перенос аэрозольных частиц;
- синоптические факторы – циклонные факторы, температурные инверсии, осадки;
- микромасштабные процессы – коагуляция, седиментация, абсорбция водяного пара.

Решить задачу о вертикальном распределении аэрозольных частиц в атмосфере можно, только зная источники и процессы, регулирующих их эволюцию.

Одним из факторов обеспечения безопасности при взлете–посадке является высота НГО, которые формируются из атмосферных аэрозолей размером от 0,5 мкм до 10 мкм [3]. Возможно следующее представление моделей НГО [3]:

- моделирование оптических свойств атмосферы путем задания моделей микроструктуры атмосферных аэрозолей;
- в соответствии с теорией Ми.
- представление НГО как объекта, обладающего определенными оптическими и микрофизическими свойствами.

Учитывая, что облака представимы набором атмосферных аэрозолей в форме сферических частиц, построение модели НГО, под которой будем понимать упорядоченный по высоте и спектру частот числовой массив объемных коэффициентов взаимодействия и компонент матрицы рассеяния, невозможно осуществить без достоверной количественной информации о микрофизических свойствах ансамбля аэрозольных частиц, статистически обоснованного для заданной геофизической ситуации.

Концентрация и функция распределения аэрозольных частиц по размерам, форме частиц и их химическому составу, как правило, известны на основе экспериментальных измерений. Опираясь на экспериментальные данные по аэрозолям, модель НГО можно представить в виде целочисленной модели:

$$N_{обл} = \left[ K_{\sigma} \times K_{\alpha} \times \left( \frac{\pi \times r^2 \times h}{V_{\text{аэр}}} \right) \right] + 1, \quad (1)$$

где  $N_{обл}$  – число аэрозолей в НГО, необходимое для регистрации в ОЭЖ<sub>НГО</sub>;  $r$  – радиус светового пучка на высоте  $H$  (радиус облучаемого участка облака);  $K_{\sigma}$  – коэффициент, определяющий рассеяние излучения в НГО;  $K_{\alpha}$  – коэффициент, определяющий ослабление излучения по трассе;  $V_{\text{аэр}}$  – объем аэрозоля;  $h$  – глубина облачного слоя.

Поскольку для регистрации высоты НГО в измерителе необходимо выдерживать определенное отношение сигнал/шум при заданной мощности и расходимости излуче-

ния, то в зависимости от концентрации аэрозолей в облаке глубина облачного слоя, а также рассеяние и ослабление излучения могут быть различны. Тем самым возникает неопределенность в определении высоты НГО, которая может уменьшаться двумя путями – либо повышением мощности излучения, либо изменением размера зоны облученности. Безусловно, разумное сочетание мощности и размера зоны облучения, а также учет возможного значения коэффициентов рассеяния и ослабления определяют некий оптимум параметров ОЭК<sub>НГО</sub>.

Не умаляя общности, определим коэффициент рассеяния излучения из условия, что НГО может быть представлена как совокупность аэрозолей сферической формы. Тогда, согласно теории рассеяния электромагнитных волн аэрозольными частицами, для частиц сферической формы выражение для объемного коэффициента рассеяния имеет вид

$$\sigma(\lambda) = N \int_0^{\infty} \pi r^2 \cdot K_p(r, m, \lambda) f(r) dr, \quad (2)$$

где  $N$  – число аэрозольных частиц в единице объема;  $K_p(r, m, \lambda)$  – фактор эффективного рассеяния излучения с длиной волны  $\lambda$  на частице радиусом  $r$ , имеющей комплексный показатель преломления  $m$ ;  $f(r)$  – функция распределения аэрозольных частиц по размерам.

Представим соотношение (2) в следующем виде:

$$K_{\sigma} = N(h) \times \left( \frac{d_{\text{аэр}}}{d_{\text{л}}} \left[ +1 \right] \right), \quad (3)$$

где  $d_{\text{аэр}}$  – среднее значение диаметра аэрозольной частицы;  $d_{\text{л}}$  – диаметр пучка отраженных от частицы лучей, возвращающихся в ОЭК<sub>НГО</sub> (не более  $0,25 d_{\text{аэр}}$ );  $N(h)$  – количество частиц аэрозоля в НГО в зависимости от высоты (рассчитанное из экспериментальных данных).

Под коэффициентом аэрозольного ослабления понимается величина  $\alpha_a(\lambda)$ , зависящая от длины волны  $\lambda$  и определяемая из закона Бугера в дифференциальной форме. В этой связи коэффициент аэрозольного ослабления примем равным баллу видимости в вертикальном направлении на момент измерения высоты НГО.

Излучение на выходе ОЭК<sub>НГО</sub> также представим в виде набора дискретных лучей, предельное значение которого будет равно

$$\max \{ N_{\text{изл}} \} = \left[ \frac{(D_{\text{вых.зр.}})^2}{(\lambda)^2} \right] + 1, \quad (4)$$

где  $D_{\text{вых.зр.}}$  – диаметр выходного зрачка объектива ОЭК<sub>НГО</sub>. Для обеспечения необходимого отношения сигнал/шум  $\eta$  число «единичных лучей» требуемой мощности ( $W_{\text{у.е.}}$  – отношение мощности вышедшего излучения к минимальной мощности, определяемой приемником) может быть определено следующим выражением:

$$N_{\text{изл}W} = \eta \times \left( \frac{K_{\sigma} \times K_{\alpha}^{-1} \times (\pi \times r^2) \times d_{\text{аэр}}}{V_{\text{аэр}}} \left[ +1 \right] \right) \times W_{\text{у.е.}}, \quad (5)$$

где  $K_{\alpha}$  – коэффициент аэрозольного ослабления.

В соответствии с соотношением (4) значение  $D_{\text{вых.зр.}}$  как оценка будет определяться выражением

$$D_{\text{вых.зр.}} = \left| \lambda \times \sqrt{N_{\text{изл}W}} \right|. \quad (6)$$

Таким образом, из соотношения (6) получаем диаметр выходного зрачка  $D_{\text{вых.зр.}}$ . Однако, как следует из соотношений (3), (5), этот диаметр зависит от числа аэрозолей в момент измерения, т.е. от метеоусловий (типа оптической погоды). Поэтому расчет  $D_{\text{вых.зр.}}$  производится по средним условиям, а нужное количество излучаемых лучей  $N_{\text{изл}}$  обеспечивается с помощью подбора числа зондирований. В дальнейших исследованиях будет представлена целочисленная модель излучающей и приемной части оптико-электронного комплекса измерителя высоты нижней границы облаков.

### Заключение

Предложен метод имитационного моделирования способом просмотра активностей. Разработана целочисленная модель «атмосфера⇒НГО⇒атмосфера», на основании которой получены соотношения для определения параметров оптико-электронного комплекса в общей модели процесса измерения высоты НГО.

### Литература

1. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. – СПб: Гидрометеиздат, 1992.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). – М.: Сов. радио, 1977.

*Демин Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, dav\_60@mail.ru

*Константинов Константин Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, const\_cv@mail.ru

УДК 621.373

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ СИЛИЦИДОВ  
МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ПЕРЕНОСА И ОТЖИГА**

**В.П. Вейко, В.Ю. Касаткин, В.Н. Матыжонок, А.А. Петров, Е.А. Шахно**

Пленки силицидов металлов, являющиеся узкозонными полупроводниками, представляют собой весьма перспективный материал для создания термодатчиков. В работе исследована возможность получения пленочных покрытий из силицидов хрома и железа методами локального лазерного переноса и лазерного отжига. Получены пленочные покрытия силицидов металлов на различных подложках, исследованы их электрические параметры. Определена зависимость свойств пленочных покрытий от условий нанесения.

**Ключевые слова:** локальный лазерный перенос, лазерный отжиг, пленка, силицид металла, подложка.

**Введение**

На протяжении последних лет развитие техники шло по пути миниатюризации, усовершенствования и усложнения различных технических устройств. В настоящее время достаточно большую нишу в современной технике заняли разнообразные микроэлектронные устройства, в которых широко используются различные пленочные покрытия. Для создания термодатчиков необходимы пленочные элементы из узкозонных полупроводников. Одними из таких полупроводников являются силициды металлов. Поэтому получение тонкопленочных элементов из этих полупроводников является актуальной задачей [1].

Существует много различных методов получения пленочных покрытий (например, лазерно-плазменное напыление, осаждение из жидкой или газообразной фазы, вакуумное напыление и т.д.). Одним из таких методов является метод локального лазерного переноса [2]. Данный метод имеет ряд достоинств. Он характеризуется своей химической чистотой и простотой, обеспечивает локальность обработки, позволяет непосредственно формировать пленочные покрытия со сложной топологией.

Другим методом получения пленочных покрытий силицидов металлов является метод лазерного отжига поверхности кремния с заранее нанесенной на нее металлической пленкой [3]. В частности, этот метод можно комбинировать с методом локального лазерного переноса, где осаждение металлической пленки производится локальным лазерным переносом, а само пленочное покрытие из силицида металла формируется путем отжига перенесенной пленки.

В настоящей работе была исследована возможность получения полупроводниковых пленочных покрытий силицидов металлов двумя вышеупомянутыми методами.

При использовании метода обратного локального лазерного переноса [4] (рис. 1) мишень располагается за прозрачной акцепторной подложкой. При облучении излучение проходит через прозрачную акцепторную подложку и падает на поверхность донора, расположенного вплотную или на небольшом расстоянии от акцептора. Поверхностные слои донора нагреваются, и часть материала удаляется (в виде твердой, жидкой или газообразной фазы). Далее вещество осаждается на акцепторной подложке.

Достоинством данного метода является возможность использования массивного донора. Однако при использовании метода возможно осаждение пленок только на прозрачные для лазерного излучения подложки.

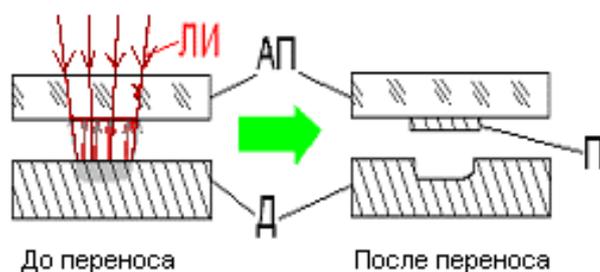


Рис. 1. Схема обратного локального лазерного переноса: ЛИ – лазерное излучение, АП – акцепторная подложка, Д – донор, П – полученная пленка

При использовании метода лазерного отжига (рис. 2) излучение падает на донорную пластину из кремния, на которую нанесена тонкая металлическая пленка. Излучение частично поглощается пленкой, прошедшее через пленку излучение поглощается кремнием. Под действием излучения происходит полное расплавление пленки и проплавление кремниевой пластины на некоторую глубину. Происходит диффузия жидких фаз. После охлаждения на пластине кремния формируется полупроводниковая пленка.

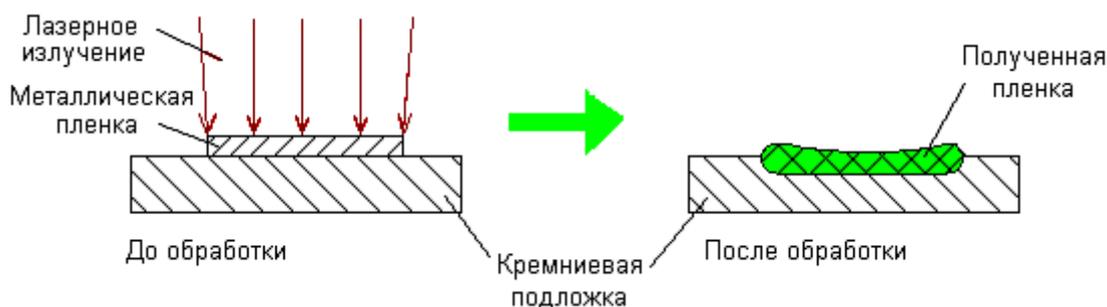


Рис. 2. Схема лазерного отжига

В результате проведения работы были получены пленочные покрытия силицидов металлов методом локального лазерного переноса и методом лазерного отжига при различных параметрах обработки.

Проведено исследование электрических свойств пленочных покрытий из силицидов металлов в зависимости от режимов лазерной обработки. На основе анализа зависимости электрического сопротивления от температуры определялось, полупроводниковая или нет получилась пленка (у собственных полупроводников с уменьшением температуры электрическое сопротивление растет, у металлов оно уменьшается, а у диэлектриков слабо зависит от температуры).

### Получение пленок методом локального лазерного переноса и их исследование

В лабораторной установке для локального лазерного переноса, основанной на схеме рис. 1, в качестве рабочего лазера был использован YAG:Nd-лазер, для визуализации луча – вспомогательный He-Ne лазер. Излучение YAG:Nd-лазера фокусировалось в зоне обработки, образец находился в вакуумной камере. Перемещение луча по образцу осуществлялось системой сканирования под управлением компьютера. Для определения мощности излучения часть его отводилась на измеритель мощности ИМО-2М.

Параметры лазерной установки и геометрические характеристики донора и акцептора были следующими: длительность импульса лазерного излучения – 250 нс, длина

волны лазерного излучения – 1,06 мкм, размер пятна в области фокуса – 50 мкм, расстояние между донорной пластиной и акцепторной подложкой – 60 мкм, остаточное давление в вакуумной камере – 0,1 мм рт.ст. Для нанесения пленок использовались донорные пластинки из силицидов железа и хрома, а в качестве акцепторов – подложки из стекла К8 и УС-1. Варьируемыми параметрами при проведении экспериментов являлись мощность лазерного излучения, частота следования импульсов YAG:Nd лазера и скорость сканирования лазерного пучка по поверхности донорной подложки.

Для определения электрических свойств полученных пленок (полупроводниковые они или металлические) образцы охлаждались в жидком азоте, после извлечения определялось изменение их электрического сопротивления с повышением температуры. Значение температуры фиксировалось термопарой, сопротивление – универсальным вольтметром. На рис. 3 представлены наиболее типичные температурные зависимости сопротивлений пленок силицидов железа и хрома, полученных методом локального лазерного переноса в различных режимах работы лазерной установки (мощность излучения  $P$  и частота следования импульсов  $f$ ).

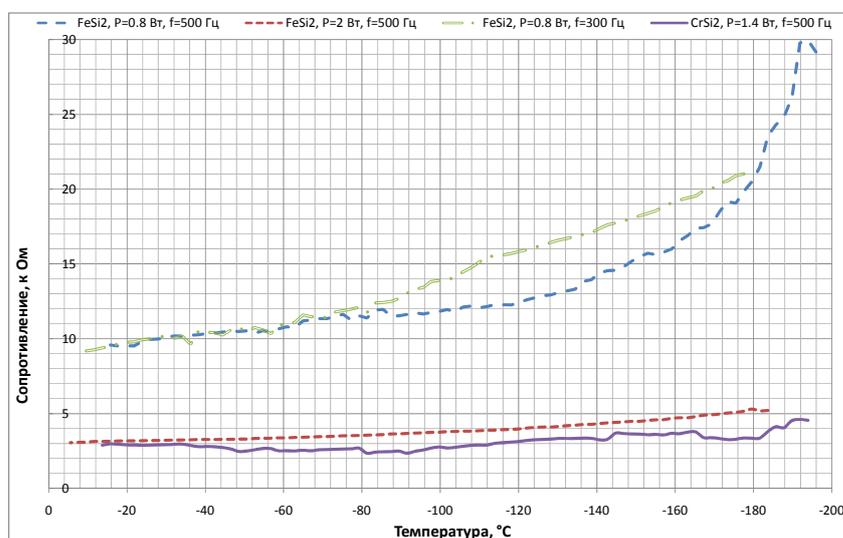


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления пленок, полученных методом локального лазерного переноса, от температуры

Был проведен спектральный анализ некоторых из полученных пленочных покрытий силицидов металлов с использованием спектрофотометра Varian Carry 500 в спектральном диапазоне 300–3000 нм. На основе полученных данных была примерно оценена толщина пленки. Она составила 1 мкм.

На основании анализа профиля поверхности было определено, что средняя толщина данного пленочного покрытия составляет около 1300 нм. При этом стоит обратить внимание, что в некоторых областях по ширине пленки наблюдаются пики, где толщина пленочного покрытия может достигать 4 мкм. Размер этих областей составляет величину порядка 10 мкм.

Измерения профилей поверхностей осуществлялось при помощи силового зондового микроскопа. На рис. 4, а, изображен 2D-профиль поверхности, а на рис. 4, б – одномерный профиль поверхности.

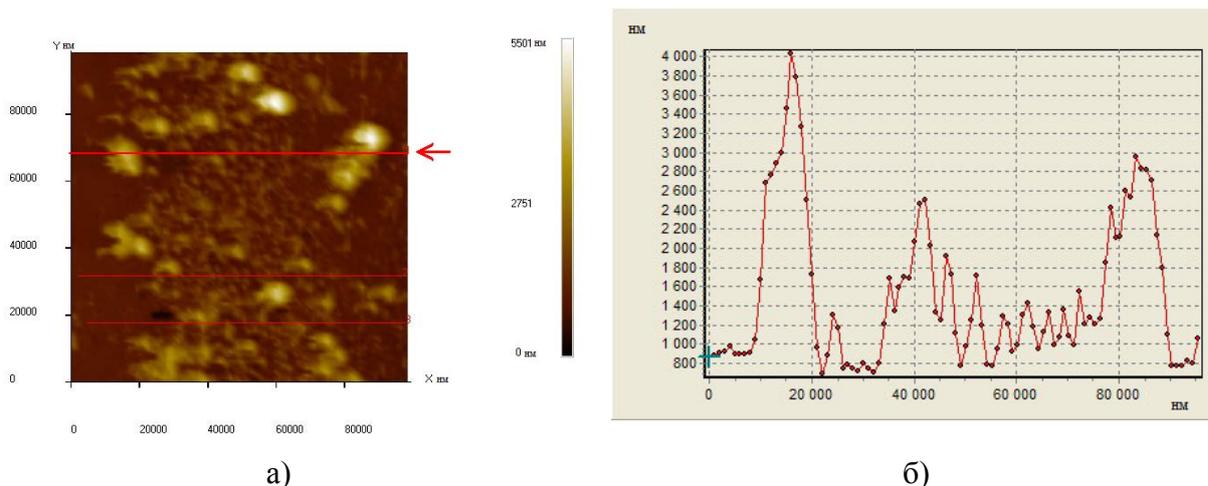


Рис. 4. Профиль поверхности пленки: а) 2D-профиль поверхности; б) одномерный профиль поверхности по линии, помеченной стрелкой

### Получение пленок методом лазерного отжига и их исследование

Схема установки аналогична схеме для лазерного переноса, за исключением того, что для отжига в оптический тракт был дополнительно введен френелевский ослабитель для дополнительной возможности изменения мощности на образце. Размер пятна в области фокуса – 60 мкм, остаточное давление в вакуумной камере – 0,1 мм рт.ст.

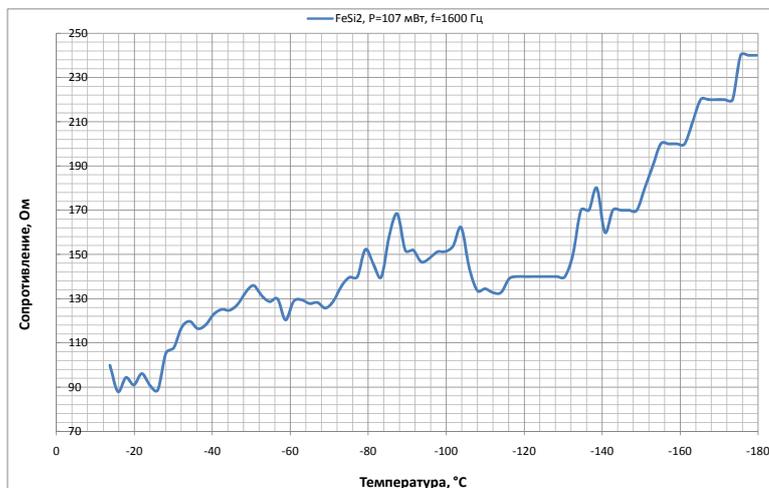


Рис. 5. Зависимость электрического сопротивления пленки, полученной методом лазерного отжига, от температуры

Методика эксперимента состояла в следующем. Пучок лазерного излучения импульсного YAG:Nd лазера, проходя через ослабитель Френеля, фокусировался над поверхностью пленки Fe, заранее нанесенной на кремниевую пластинку методом вакуумного напыления. Одновременное использование френелевского ослабителя и расфокусировка излучения было выбрано для удобства подбора плотности мощности на образце.

це. Под действием лазерного излучения происходило плавление пленки железа, а также приповерхностного слоя кремниевой подложки, на которую эта пленка была нанесена, и смешивание расплавов. После прекращения лазерного воздействия образовавшийся на поверхности расплав из железа и кремния застывал, и образовывался пленочный слой силицида железа.

Для определения средней мощности YAG:Nd лазера во время каждого эксперимента до проведения экспериментов по отжигу была произведена калибровка средней мощности излучения лазера в зависимости от токов накачки при установленном размере светового пятна и оптимальном угле раствора френелевского ослабителя. На основании полученной зависимости можно было определять среднюю мощность излучения в зоне обработки по току накачки.

Методика измерения температурных зависимостей пленочных покрытий из силицидов металлов аналогична той, что была применена для измерения температурных зависимостей сопротивления в случае локального лазерного переноса. На рис. 5 представлена измеренная температурная зависимость сопротивления пленочного покрытия силицида железа на кремниевой подложке, полученного методом отжига.

### Обсуждение результатов

Характер температурных зависимостей электрического сопротивления пленок, полученных методом локального лазерного переноса (рис. 3), свидетельствует о том, что полученные пленки – полупроводниковые, так как при повышении температуры сопротивление этих элементов падает. При этом наилучшие результаты получаются при переносе, где в качестве донора используется силицид железа.

Если качественно сравнить форму кривой зависимости электрического сопротивления от температуры для пластинки из  $\text{FeSi}_2$  с кривыми, описывающими эту зависимость для пленок из  $\text{FeSi}_2$ , то можно сделать вывод, что температурные зависимости полученных пленок из силицида железа качественно дублируют вид зависимости для массивного образца из силицида железа. Это говорит о возможности сохранения свойств данного полупроводникового материала при переносе. Однако здесь следует обратить внимание на то, что пластинка  $\text{FeSi}_2$  имеет полупроводниковую зависимость при температурах ниже  $50^\circ\text{C}$ . При более высоких температурах сопротивление пластинки начинает расти с увеличением температуры. Такое изменение зависимости электрического сопротивления от температуры, скорее всего, связано со структурно-фазовыми переходами. В случае же пленок силицида железа, полученных как локальным лазерным переносом, так и методом отжига, температурная зависимость электрического сопротивления от температуры сохраняет свой полупроводниковый характер на протяжении всего исследуемого интервала температур.

При подробном рассмотрении характеристик электрического сопротивления для пленок из силицидов железа можно сделать выводы о том, как зависят электрические свойства полученных покрытий от режимов их нанесения. В частности, видно, что повышение мощности (или плотности мощности) примерно в 2,5 раза приводит не только к существенному уменьшению диапазона изменения сопротивлений, но и к уменьшению сопротивления пленочного покрытия в принципе. К тому же изменение сопротивления при росте температуры становится менее резким. Это, скорее всего, связано с тем, что в данном случае при заданных скорости сканирования лазерного пятна по поверхности донора и частоте следования импульсов лазерного излучения увеличение плотности мощности приводит к существенному увеличению толщины пленочного покрытия. В свою очередь, изменение частоты следования импульсов (т.е. незначительное изменение коэффициента перекрытия) при заданных плотности мощности и скоро-

сти сканирования не привело к существенному изменению вида зависимостей электрического сопротивления от температуры. Отличие хода этих зависимостей при температурах ниже  $-150^{\circ}\text{C}$ , очевидно, связано с погрешностью измерений.

В случае переноса силицида хрома методом локального лазерного переноса зависимость получается очень неровной. К тому же при низких температурах данное пленочное покрытие обладает полупроводниковой температурной зависимостью сопротивления, а по мере температурного роста вследствие структурного перехода зависимость электрического сопротивления от температуры становится возрастающей.

Что касается получения силицида железа методом отжига, то из рис. 5 видно, что полученное покрытие также обладает полупроводниковыми свойствами. Относительно низкое сопротивление этого покрытия говорит о том, что оно обладает большей толщиной, чем пленочные покрытия, нанесенные при помощи метода локального лазерного переноса. Также наблюдается тенденция к сохранению формы температурной зависимости, такой же, как и в случае массивной пластинки силицида железа.

Исследование профиля поверхности пленки, полученной методом локального лазерного переноса, позволило заключить, что толщина полученных пленочных элементов составляет около 1 мкм. Для дальнейшего возможного использования такие пленки рекомендуется подвергать дополнительной обработке для удаления отдельных пиков.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что как методом локального лазерного переноса, так и методом лазерного отжига можно получить пленочные элементы из силицидов металлов, обладающие температурными зависимостями сопротивлений, характерными для полупроводников. Температурные зависимости полученных пленок из силицида железа качественно дублируют вид зависимости для массивного образца из силицида железа, что говорит о возможности сохранения электрических свойств данного полупроводникового материала при переносе. Была замечена существенная зависимость электрических свойств полученных пленочных элементов от плотности мощности лазерного излучения, при которой эти пленочные элементы были нанесены, что, в свою очередь, связано с сильной зависимостью свойств пленок от их толщины.

Наиболее хорошие результаты были получены для пленок  $\text{FeSi}_2$ , из чего можно сделать вывод, что используемые режимы нанесения вполне пригодны для получения полупроводниковых пленочных элементов из этого материала.

Пленочные покрытия, полученные методом лазерного отжига, оказываются существенно толще, чем покрытия, нанесенные методом локального переноса, поэтому этот метод целесообразно использовать для получения толстых пленок.

### Литература

1. Piqué A., Chrisey D.B., Auyeung R.C.V. et al. A novel laser transfer process for direct writing of electronic and sensor materials // *Applied Physics A*. – 1999. – V. 69. – № 6.
2. Вейко В.П., Шахно Е.А. Абляция и конденсация вещества при локальном лазерном переносе пленок // *Оптический журнал*. – 2000. – Т. 67. – № 4. – С. 104–111.
3. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. – София: Издательство Болгарской Академии наук, 1991. – 363 с.
4. Вейко В.П., Шахно Е.А. Лазерная абляция и конденсация в условиях малого расстояния между мишенью и подложкой // *Известия Академии наук*. – 1997. – Т. 61. – № 7. – С. 1367–1374.

- Вейко Вадим Павлович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, veiko@lastech.ifmo.ru
- Касаткин Василий Юрьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kas\_vasya@mail.ru
- Матыжонок Виктор Николаевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, VictoorM@GMail.com
- Петров Андрей Анатольевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, aa\_petrov@lastech.ifmo.ru
- Шахно Елена Аркадьевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, shakhno@lastech.ifmo.ru

УДК 536.42; 539.213.27; 681.7.02

## ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Б.Ю. Новиков, М.К. Шадчин

Локальная модификация фазового состояния стеклокерамических материалов является перспективным методом формирования микроэлементов. Описаны принципы лазерно-индуцированной фазово-структурной модификации двух типов стеклокерамических материалов – фоточувствительных стекол и ситаллов. Описано применение в данной технологии лазерного излучения различных длин волн. Показана возможность изготовления различных типов микроэлементов с широким диапазоном параметров.

**Ключевые слова:** микроэлементы, микроустройства, стеклокерамика, фоточувствительное стекло, ситалл, лазерная модификация.

### Введение

Потребность в миниатюризации и усложнении технических устройств обусловила существование множества методов производства микроэлементов. Некоторые методы основаны на деформации или удалении материала вблизи поверхности. Но более широко разрабатываются направления локальной смены фазового состояния, что приводит к локальным изменениям физико-химических свойств материалов.

Способы формирования структурной перестройки без применения лазерных технологий предусматривают выбор легко модифицируемого материала и использование специфических инструментов воздействия. Чаще всего такие способы многоэтапны и предусматривают многочасовую обработку материала. Использование лазерного излучения имеет ряд преимуществ перед другими методами локальной модификации, а именно – локальность и бесконтактность воздействия, высокоэнергетический характер излучения, возможность задания энергетических и геометрических параметров воздействия. Применение лазерного излучения позволяет расширить диапазон модифицируемых материалов, значительно сократить время формирования фазово-структурной модификации и избежать промежуточных этапов обработки.

Наибольший интерес представляет фазово-структурная модификация стеклокерамических материалов. Эти материалы имеют два фазовых состояния, радикально различных по оптической прозрачности, удельному объему, механическим свойствам, химической активности и другим свойствам. Аморфная фаза стеклокерамических материалов обладает свойствами, характерными для стекол, она обычно прозрачна и имеет

большой фазовый объем. При специальной обработке в стеклокерамических материалах формируется большое количество микрокристаллов, из-за которых поликристаллическая фаза этих материалов непрозрачна и обладает высокой механической устойчивостью. Особенности технологии лазерно-индуцированной фазово-структурной модификации стеклокерамических материалов, открывающими широкие возможности ее применения для формирования микроэлементов, являются:

- возможность управляемой смены поликристаллической и аморфной фаз материала, которые обладают существенными различиями в свойствах;
- локальность модификации материала;
- короткое (1–100 с) время протекания модификации.

Параметрами формируемых элементов можно управлять благодаря возможности задания характеристик лазерного излучения. Например, размерами элементов можно управлять через плотность мощности лазера, время воздействия и температуру предварительного подогрева; формой элементов – путем сканирования лазерного пучка или с помощью проекционных масок; оптическими свойствами (пропусканием, дисперсией) – через выбор состава исходного материала [1].

Существует два типа стеклокерамических материалов – фоточувствительные стекла и ситаллы.

### Модификация фоточувствительных стекол

Фоточувствительные стекла непосредственно предназначены для локальной фазово-структурной модификации, основным их качеством является способность к контролируемому формированию в исходном аморфном объеме кристаллизованных участков при проведении специальной поэтапной обработки: сначала определенные участки материала сенсibiliзируются УФ излучением, затем проводится отжиг в печи для развития кристаллической фазы, которая формируется только в местах УФ облучения [2]. Подобная обработка может быть проведена при замене излучения УФ ламп лазерным УФ излучением, которое, вместе с тем, обладает дополнительными достоинствами, например, позволяет уменьшить энергетические затраты и снизить время облучения. Применение лазерного УФ излучения наносекундной длительности дает возможность не использовать маску и, кроме того, позволяет облучать материал на длинах волн, которые находятся вне полосы поглощения фотоактиватора. Глубина записи скрытого изображения в фоточувствительном стекле при воздействии УФ излучения зависит от длины волны излучения и от плотности энергии потока [3].

Новые возможности формирования кристаллизованных областей фоточувствительного стекла можно получить при использовании излучения фемтосекундных лазеров (775 нм). В этом случае за счет процесса мультифотонного поглощения запись скрытого изображения может происходить внутри объема исходного материала, который прозрачен для рабочего излучения [4].

Расширить диапазон формируемых элементов позволяет дальнейшее травление исходной аморфной (для отечественного фоточувствительного стекла ФС-1) или лазерно-индуцированной поликристаллической фазы (для зарубежных фоточувствительных стекол Foturan, Fotoform) в кислотах, чаще всего в 10%-м или 5%-м растворе фтористоводородной (плавиковой) кислоты [2]. Дополнительным способом увеличения рельефа служит ионно-молекулярный обмен, который возможен только для аморфной фазы фоточувствительного стекла, кристаллическая фаза может при этом играть роль маски [5].

Двухэтапная локальная модификация фоточувствительных стекол является отлаженной промышленной технологией. Данная технология успешно применяется для производства разнообразных элементов и устройств, например, периодических микро-

структур, механических микроэлементов, элементов гидродинамических и химических микроустройств, сенсоров аналитических микросистем и т.п. Этот метод также может быть применен для записи голограмм и дифракционных решеток.

Воздействие излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера (10,6 мкм) позволяет проводить кристаллизацию фоточувствительных стекол за один этап [5, 6] (рис. 1), что неочевидно, так как традиционный метод обработки подразумевает несколько стадий инициирования кристаллизации. Кроме того, воздействие излучения  $\text{CO}_2$ -лазера позволяет осуществлять аморфизацию закристаллизованных фоточувствительных стекол, что также неочевидно. Для формирования вторичной аморфной фазы фоточувствительных стекол необходимо не только разрушение границ микрокристаллов, но и инициирование фотохимических реакций, обратных реакциям при формировании кристаллизации.



Рис. 1. а – обратная аморфизация фоточувствительного стекла Foturan под действием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера; б – кристаллизация и обратная аморфизация фоточувствительного стекла FC-1 под действием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера

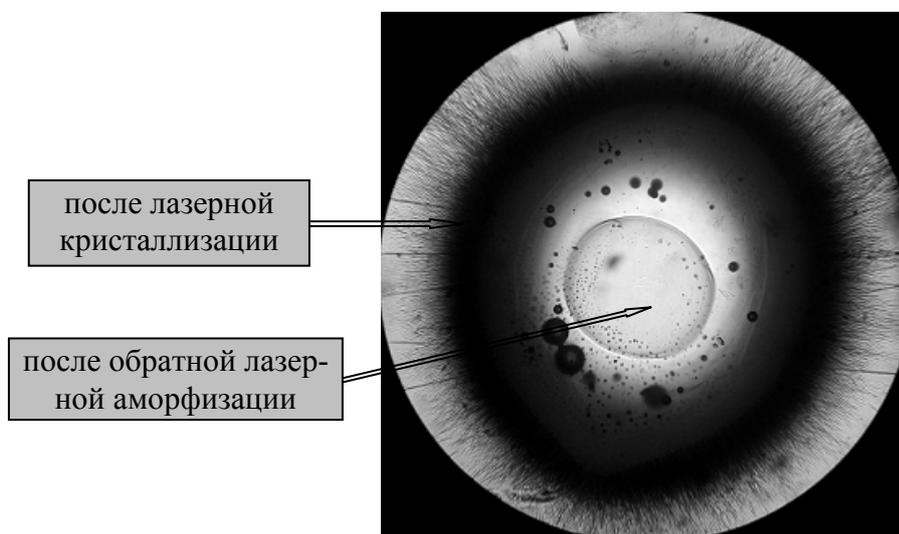


Рис. 2. Область фазово-структурной модификации фоточувствительного стекла FC-1, полученная под действием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. Фотография через микроскоп в проходящем свете

Длина волны излучения  $\text{CO}_2$ -лазера лежит в области фундаментального поглощения всех материалов на основе  $\text{SiO}_2$  (за счет колебательно-вращательных переходов), данное излучение эффективно поглощается как в аморфной, так и в кристаллической фазах стеклокерамических материалов. В этом случае источник нагрева – поверхностный,

распространение тепла в материале происходит по закону теплопроводности. Радиальное продвижение температурного фронта в материале накладывает ограничения на геометрические параметры модифицированных областей, т.е. формируемых микроэлементов. Кроме того, образуются зоны с различной температурой, в которых формируются различные кристаллические структуры (рис. 2), так как фоточувствительные стекла обладают несколькими кристаллическими фазами. Отсутствие в этом случае четкой границы между кристаллической и аморфной областями и развитие отдельных кристаллов в аморфной области также неблагоприятно для формирования микроэлементов.

### Модификация ситаллов

Локальная фазово-структурная модификация ситаллов возможна только при использовании лазерного излучения. Данный метод основан на локальном плавлении участка материала и возможности многократного формирования из расплава в одном и том же исходном объеме аморфной или поликристаллической фаз при задании определенных условий обработки. Лазерно-индуцированная ванна расплава занимает весьма малый участок по сравнению с объемом всей заготовки, после окончания облучения за счет эффективного теплоотвода в окружающие участки она охлаждается до температуры стеклования настолько быстро, что атомы не успевают перегруппироваться в упорядоченную структуру. А при замедленном охлаждении расплава формируются кристаллические структуры.

Одним из наиболее интересных применений данной технологии является изготовление двояковыпуклых микролинз методом лазерно-индуцированной сквозной аморфизации пластин ситалла СТ-50-1 [1, 5, 7] (рис. 3), возможное лишь с использованием данного метода. Локальное воздействие лазерного излучения приводит к формированию прозрачного аморфного окна в исходном непрозрачном поликристаллическом материале. Объем вещества в аморфной фазе больше, чем в кристаллической, поэтому расплав растекается по поверхностям пластины, и благодаря силе поверхностного натяжения модифицированная область приобретает линзообразную форму. Размеры микролинз могут варьироваться от сотен микрометров до нескольких миллиметров. Микролинзы показывают высокое оптическое качество и воспроизводимость более 90% (рис. 4). Отмечается, что возможно получать линзы с различной конфигурацией зрачка – эллиптические, квадратные и т.п., используя соответствующие маски.



Рис. 3. Схематическое изображение двояковыпуклой микролинзы, сформированной на тонкой пластине ситалла СТ-50-1 методом лазерно-индуцированной аморфизации

Фокусное расстояние формируемых микролинз лежит в широких пределах (от единиц мм до 30 мм), апертура составляет величину порядка 0,05–0,06. Для увеличения апертуры микролинз было предложено использовать дополнительную навеску (из того же или из другого материала), добавленную в зону облучения. В процессе воздействия лазерного излучения навеска расплавляется и перемешивается с материалом образца, образуется общая ванна расплава, при остывании которой формируются линзы с большими радиусами кривизны поверхности, т.е. с большей апертурой. При применении этой техники числовая апертура линз увеличивается до 0,1–0,6 и даже больше [1, 5, 7].

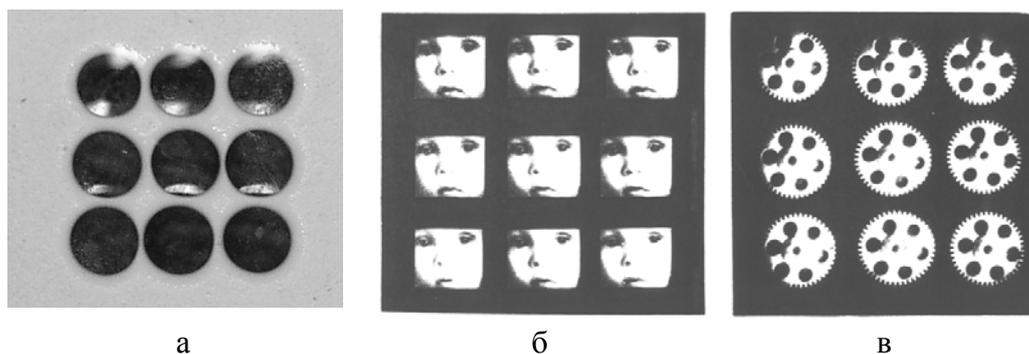


Рис. 4. Растр двояковыпуклых микролинз, полученный в пластине ситалла СТ-50-1 методом локальной лазерной аморфизации (а), и изображения объектов, снятых с его помощью (б, в). Фокусное расстояние микролинз около 21 мм [1]

При лазерно-индуцированной аморфизации поверхности ситалла СТ-50-1 с использованием навески или при сочетании этих методов возможно формирование геодезических (планарных) микролинз [1, 7, 8]. Такие линзы используются для фокусировки света в поверхности, перпендикулярной к их оптической оси. В качестве геодезической микролинзы может быть использована двояковыпуклая микролинза, тогда излучение следует вводить с боковой стороны выпуклости. В [8] предложено использовать метод навески для формирования оптических микросфер размером от десятков микрометров до нескольких миллиметров. Заготовка ситалла размягчается (т.е. аморфизируется) в свободном пространстве, сферическая форма элемента формируется за счет сил поверхностного натяжения.

Воздействие лазерного излучения на вращающуюся заготовку ситалла позволяет получить аморфизированные области с геометрическими профилями поверхностей, соответствующими рассеивающим линзам, линзам, обладающим кольцевым фокусом, с асферическими выпуклостями (например, параболическими). Большой интерес представляет также получение микроэлементов с асферическими поверхностями (эллипсоидальными, тороидальными, цилиндрическими и др.) при воздействии лазерного излучения со специально сформированным распределением плотности мощности по световому пятну, например, с помощью сканатора [7]. Сканирование лазерного луча по поверхности ситалла позволяет формировать протяженные аморфизированные области произвольной формы. Такие области могут быть использованы как просветленные каналы и цилиндрические линзы, которые являются оптимальными оптическими элементами для фокусировки излучения полупроводникового лазера в точку [1, 5, 7].

Были проведены исследования по фазово-структурной модификации ситаллов под действием излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера (10,6 мкм) [1, 5, 7] и излучения непрерывного YAG:Nd-лазера (1,06 мкм) [9]. При воздействии излучения  $\text{CO}_2$ -лазера изотерма плавления движется в ситалле за счет теплопроводности, что накладывает ограничения на параметры модифицированных областей.

Воздействие излучения YAG:Nd-лазера на ситалл СТ-50-1 имеет принципиальное отличие от случая применения излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. В [7] отмечается, что ослабление излучения YAG:Nd-лазера в ситалле СТ-50-1 обусловлено в основном рассеянием света на микрокристаллах, размеры которых (1–2 мкм) соизмеримы с величиной длины волны данного излучения. При лазерном воздействии сообщение материалу энергии, необходимой для нагрева до температуры плавления, происходит за счет многократного отражения излучения от границ микрокристаллов. Сформированная аморфная фаза начинает свободно пропускать излучение. В результате при облучении ситалла СТ-50-1 излучением YAG:Nd-лазера расплавление будет происходить сначала в слое, толщина которого

складывается из глубины проникновения излучения и слоя, прогретого до температуры плавления, а последующие слои будут формироваться сквозь этот аморфизированный участок, поглощение рабочего излучения в котором пренебрежимо мало. В данном случае происходит процесс динамического просветления ситалла в глубину, имеется возможность формировать аморфизированные области, глубина которых значительно больше их радиуса, что невозможно было получить при использовании излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Однако из-за того, что аморфная фаза ситалла пропускает излучение YAG:Nd-лазера, температура просветленной области может начать снижаться. В этом случае из-за некоторого остывания ванны расплава в ней могут формироваться отдельные кристаллы, происходит разделение на фазы (ликвация), возникает градиент показателя преломления и формироваться обратная кристаллизация по краям области воздействия. Эти эффекты, несомненно, ухудшают качество формируемых оптических элементов.

Локальное формирование обратной кристаллизации ситалла СТ-50-1 возможно только под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера, которое поглощается в поверхностном слое обеих фаз ситалла. Формирование обратной кристаллизации ситалла под действием излучения YAG:Nd-лазера возможно по следующему методу: прозрачная для рабочего излучения аморфная область нагревается за счет теплопроводностной передачи тепла из окружающих поликристаллических участков благодаря тому, что размер области воздействия намного больше размера области предполагаемой кристаллизации.

Последовательное формирование аморфизации и кристаллизации ситалла на разных глубинах позволяет изготовить «мостковые» (трехслойные) схемы, которые могут быть использованы для разработки систем записи информации. Последовательно комбинируя при разных размерах пучка аморфизацию и частичную кристаллизацию одной и той же зоны ситалла, можно создавать различные интегральные диафрагмы (включая аподизированные) и дифракционные оптические элементы. Процессы лазерной аморфизации и кристаллизации тонких стеклокерамических пленок находят применение при оптической записи и хранении информации [5].

### Заключение

Использование лазерного излучения различных длин волн позволяет расширить возможности модификации фоточувствительных стекол (например, внутриобъемная запись скрытого изображения под действием излучения фемтосекундного лазера, обратная аморфизация под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера) и упростить этапы ее формирования (протекание модификации за один этап под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера). Локальная фазово-структурная модификация ситаллов возможна только при использовании лазерного излучения, данная технология перспективна для формирования оптических элементов.

Лазерно-индуцированная фазово-структурная модификация стеклокерамических материалов позволяет изготавливать множество различных типов микроэлементов с широким диапазоном параметров. Параметрами формируемых элементов можно управлять благодаря возможности задания характеристик лазерного излучения. При воздействии лазерного излучения на разные участки материала возможно формирование оптических микросистем с различными наборами и компоновкой элементов.

### Литература

1. Вейко В.П., Киеу К.К. Лазерная аморфизация стеклокерамик: основные закономерности и новые возможности изготовления микрооптических элементов // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – № 1. – С. 92–98.

2. Caltech Engineering Design Research Laboratory [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://design.caltech.edu/micropropulsion/foturane.html> (на 31.01.2008), своб.
3. Fuqua P., Janson S.W., Hansen W.W., Helvajian H. Fabrication of true 3D microstructures in glass-ceramic materials by pulsed UV laser volumetric exposure techniques // Proceedings of SPIE. – 1999. – V. 3618. – P. 213–220.
4. Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K. Microfabrication of 3D hollow structures embedded in glass by femtosecond laser for Lab-on-a-chip applications // Applied Surface Science. – 2005. – V. 248. – P. 172–176.
5. Veiko V.P., Kieu Q.K., Nikonorov N.V. Laser modification of glass–ceramics structure and properties: a new view to traditional materials // Proceedings of SPIE. – 2004. – V. 5662. – P. 119–128.
6. Вейко В.П., Костюк Г.К., Никонов Н.В., Рачинская А.Н. Лазерная модификация структуры фоточувствительной стеклокерамики // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 9. – С. 5–9.
7. Скиба П.А. Лазерная модификация стекловидных материалов. – Минск: БГУ, 1999. – 131 с.
8. Вейко В.П., Кieu К., Rho S. Лазерное изготовление оптических микролинз и микросфер // Известия вузов. – Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 10. – С. 30–35.
9. Вейко В.П., Шахно Е.А., Яковлев Е.Б., Новиков Б.Ю. Нелинейное просветление ситалла излучением YAG:Nd-лазера // Известия вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 14–19.

*Новиков Борис Юрьевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, [novikov-bu@yandex.ru](mailto:novikov-bu@yandex.ru)

*Шадчин Максим Константинович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [Maximshadchin@gmail.com](mailto:Maximshadchin@gmail.com)

УДК 535:621.373.826:539

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ЭМАЛИ ЗУБА ЧЕЛОВЕКА ОДНОМОДОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ YAG: Er ЛАЗЕРА

А.В. Беликов, Е.П. Жолобова, А.В. Скрипник, Т.В. Струнина

Исследована динамика эффективности удаления эмали зуба человека излучением YAG: Er лазера, имеющего TEM<sub>00</sub> распределение. Экспериментально определены пространственно–энергетические параметры излучения одномодового YAG: Er лазера, работающего в режиме свободной генерации и способного формировать в зубе отверстия с аспектным соотношением выше, чем 10:1.

**Ключевые слова:** лазер, модовый состав, эффективность разрушения, эмаль, зуб человека, аспектное соотношение.

### Введение

Лазерное излучение сегодня получило достаточно широкое применение в медицинской практике. Интерес к использованию лазеров в терапевтической стоматологии определяется возможностью реализации ряда преимуществ по сравнению с традиционным механическим инструментарием – высокой локальностью воздействия, безболезненностью, отсутствием вибраций и шума, бесконтактностью, асептичностью и т.д.

Наиболее широко для терапии кариеса применяются YAG: Er ( $\lambda=2,94$  мкм) [1–7] и YSGG: Cr, Er ( $\lambda=2,79$  мкм) [1, 3, 7] лазеры, излучение которых эффективно поглощается свободной и связанной водой в твердых тканях зуба. Данные лазеры могут работать либо в импульсном режиме свободной генерации с длительностью импульса порядка нескольких сотен микросекунд, либо в режиме модулированной добротности с длительностью импульса до сотен наносекунд [6–9].

Существенным недостатком применяемых в настоящее время в стоматологии лазеров является их многомодовость. Наличие большого числа поперечных мод снижает пространственную когерентность лазерного излучения, что, как следствие, не позволяет сконцентрировать его в пятна малых диаметров. Известно, что для эффективного разрушения эмали излучением YAG: Er лазера необходимо на ее поверхности создать плотность энергии выше  $100 \text{ Дж/см}^2$  [10]. При этом эффективность удаления эмали в неконтактном режиме обработки достигает  $30\text{--}40 \text{ мм}^3/\text{кДж}$  [10]. Для пятен диаметром порядка  $500 \text{ мкм}$  плотность энергии в  $100 \text{ Дж/см}^2$  достижима при энергии лазерного импульса, близкой к  $200 \text{ мДж}$ , что при средней мощности современных эрбиевых лазеров порядка  $6 \text{ Вт}$  ограничивает частоту следования лазерных импульсов на уровне  $30 \text{ Гц}$ . Значительная энергия стимулирует высокие значения импульса отдачи, что снижает комфортность и точность процедуры и, кроме того, приводит к образованию около стенки лазерной полости большого количества трещин, снижающих адгезию пломбирочных материалов. Если использовать одномодовое лазерное излучение, то для расходимости YAG: Er лазера дифракционный предел будет определяться длиной волны света  $\lambda$  и диаметром наименьшей апертуры  $D$ :  $\Theta = 2,44 \frac{\lambda}{D}$ . В нашем случае при

$d=3,6 \text{ мм}$  (диаметр диафрагмы внутри резонатора) эта величина составила порядка  $2 \text{ мрад}$ . Даже если для фокусировки такого излучения использовать одну линзу, например, с фокусным расстоянием  $F=38 \text{ мм}$ , то одномодовое излучение YAG: Er лазера можно сфокусировать до диаметра пятна  $d \approx F \cdot \Theta = 75,7 \text{ мкм}$ .

Нетрудно подсчитать, что при таком диаметре необходимая для эффективного разрушения эмали плотность энергии,  $100 \text{ Дж/см}^2$ , будет достигаться при энергии лазерного импульса  $4,5 \text{ мДж}$ . Согласно [9], значение импульса отдачи уменьшится пропорционально снижению энергии, т.е. более чем на порядок.

В литературе отсутствуют данные об использовании одномодового YAG: Er лазера в стоматологии. В настоящей работе нами впервые в эксперименте *in vitro* была исследована зависимость глубины и диаметра кратера, формируемого в неконтактном режиме одномодовым излучением YAG: Er лазера в эмали, а также эффективности лазерного удаления эмали от количества лазерных импульсов, подаваемых в одну и ту же область на поверхности коронки зуба.

## Материал и метод

В качестве объекта исследования *in vitro* были использованы зубы человека, принадлежащие одной возрастной категории ( $25\text{--}40$  лет), удаленные по ортодонтическим показаниям и не имеющие на поверхности коронки сколов, макротрещин, кариеса и т.п. Для поддержания естественных свойств вплоть до начала эксперимента образцы хранились в  $0,1\%$ -м водном растворе тимола не более двух недель при температуре  $+4^\circ\text{C}$  в защищенном от света месте. Непосредственно перед лазерным воздействием зубы промывались в течение  $2\text{--}3$  минут струей воды, имеющей комнатную температуру.

Для проведения настоящего исследования была использована экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1.

В эксперименте использовался твердотельный лазер на кристалле YAG:Er (1). Резонатор лазера был образован «глухим» (2) и выходным (3) зеркалами. Коэффициент отражения выходного зеркала составлял порядка 80 %. Оба зеркала были плоскими. Диаметр и длина YAG:Er активного элемента составляли соответственно 4 мм и 127 мм. Для получения основной моды (TEM<sub>00</sub>) в резонатор лазера вводилась диафрагма (4) диаметром 3,6 мм, а сам резонатор имел длину порядка 520 мм. Распределение на выходе контролировалось по отпечаткам, которые лазерное излучение оставляло на фотобумаге «Kentek». Для измерения энергетических параметров лазерного излучения применялся измеритель средней мощности и энергии ИМО–2Н (5), а для оценки временных характеристик импульса – фотоприемник ФД–34 (6), соединенный с цифровым осциллографом Tektronix TDS 2022В (7). Излучение на (5) и (6) отводилось посредством светоделителей (8). После светоделителей размещалась линза (9) из CaF<sub>2</sub>, имеющая фокусное расстояние порядка 38 мм, в фокусе которой помещалась поверхность эмали зуба (10).

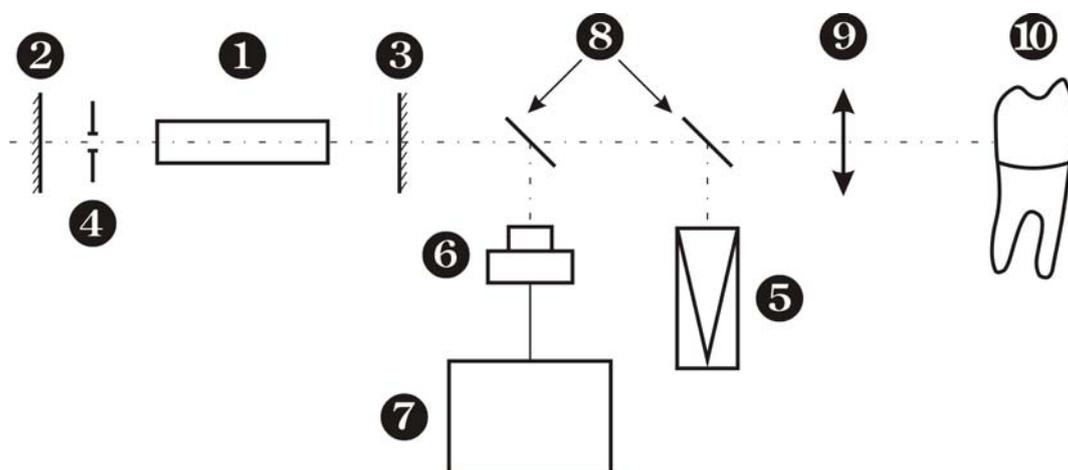


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В эксперименте мы использовали одномодовое YAG:Er лазерное излучение с энергией в импульсе порядка 30 мДж. При этом в фокусе линзы плотность энергии была близка к 660 Дж/см<sup>2</sup>. В одну и ту же область на поверхности эмали зуба направляли 5, 10, 25, 50 и 100 лазерных импульсов подряд с частотой 1 Гц. Лазерная обработка проводилась в неконтактном режиме. Перед каждым лазерным импульсом в область обработки подавалась порция дистиллированной воды комнатной температуры и объемом порядка 0,002 мл.

После лазерной обработки зуб распиливался вдоль продольной оси сформированного кратера. Полученные таким образом шлифы фотографировались, а затем определялись диаметр, глубина и объем кратеров. На основании проведенных измерений вычислялась эффективность лазерного удаления эмали как отношение объема кратера к суммарно затраченной на его формирование лазерной энергии. В эксперименте использовалось пятнадцать зубов. Статистическая обработка полученных в эксперименте данных проводилась средствами программного продукта StatGraphics Plus 2.1.

### Результаты и обсуждение

Использование энергии эрбиевых лазеров для разрушения твердых тканей зуба вполне оправдано, так как на этих длинах волн рассеяние является пренебрежимо малым, поэтому доля энергии, передаваемая ткани, определяется коэффициентом отражения на поверхности и коэффициентом поглощения. Эмаль зуба отражает 5 % на

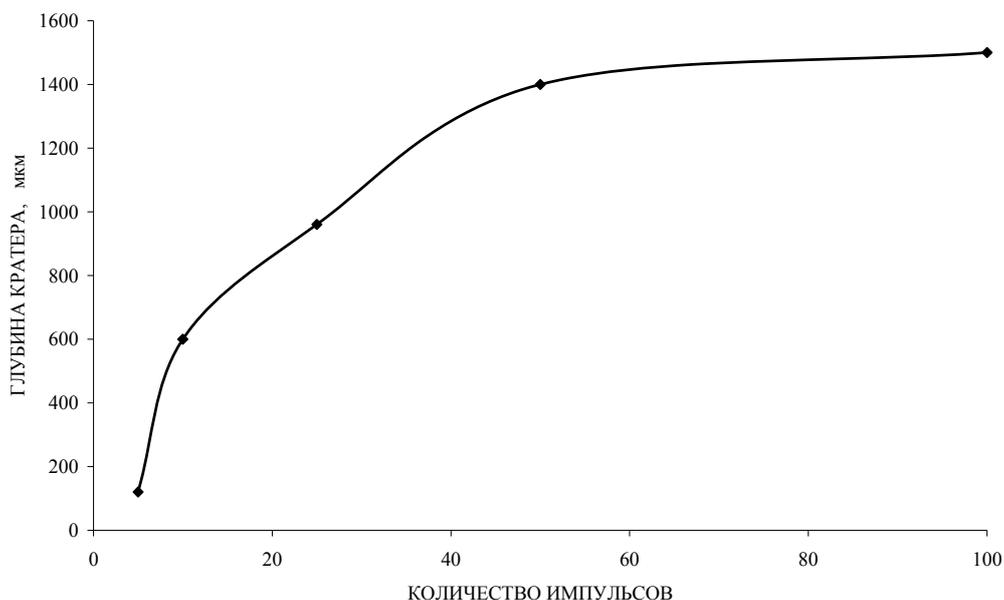
$\lambda=2,94$  мкм и 5 % на  $\lambda=2,79$  мкм [8]. Коэффициенты поглощения эмали составляют  $800 \text{ см}^{-1}$  на  $\lambda=2,94$  мкм и  $400 \text{ см}^{-1}$  на  $\lambda=2,79$  мкм [11]. Излучение YAG: Er лазера на длине волны 2,94 мкм хорошо поглощается свободной водой в эмали и дентине, а излучение YSGG: Cr, Er лазера на длине волны 2,79 мкм поглощается связанной водой в гидроксилapatите эмали и дентина. Коэффициенты поглощения твердых тканей зуба на вышеуказанных длинах волн могут варьироваться в процессе лазерного облучения вследствие изменения оптических свойств воды при ее нагревании, и если при нормальной температуре коэффициент поглощения на  $\lambda=2,94$  мкм выше, чем на  $\lambda=2,79$  мкм, то с ростом температуры соотношение может измениться в обратную сторону. На критической температуре  $+374^\circ\text{C}$  происходит падение коэффициента поглощения свободной воды приблизительно на порядок [6].

Для эрбиевых лазеров наиболее вероятный процесс разрушения связан с испарением связанной и свободной воды в твердых тканях зуба, что ведет к появлению внутренних напряжений и разрыву материала с образованием микротрещин. Подобные процессы имеют место при температурах гораздо ниже, чем температуры плавления и испарения минеральной матрицы (материал должен нагреться до  $+400^\circ\text{C}$  для свободной воды и около  $+800^\circ\text{C}$  для связанной воды) [6, 8]. Нагрев зуба в процессе его лазерной абляции необходимо минимизировать, так как остаточное тепло, не удаляемое вместе с продуктами абляции, вызывает повреждение пульпы (максимально допустимый перегрев пульпы 5,5 К [3]) и твердых тканей, прилежащих к месту облучения, что выражается в их растрескивании и карбонизации, ухудшающей адгезию поверхности лазерного кратера к пломбирочным материалам [6]. Именно нагрев пульпы зуба остаточной энергией ограничивает среднюю мощность современных эрбиевых стоматологических лазеров на уровне 6 Вт.

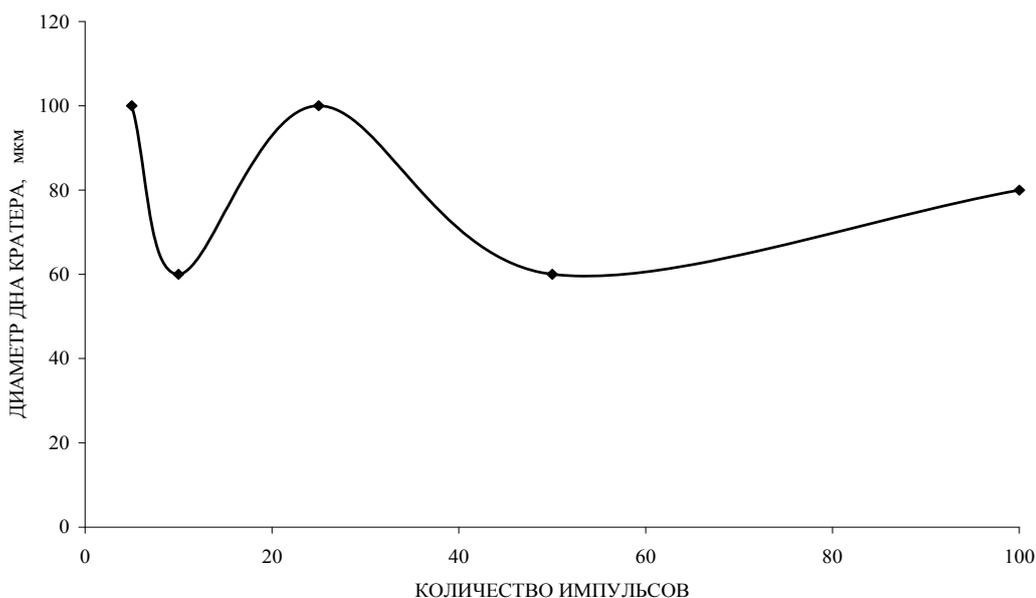
Помимо непосредственного разрушения твердых тканей зуба, существуют и другие механизмы, сопутствующие процессу удаления, которые тоже необходимо учитывать. При рассмотрении кинетики процесса удаления материала большую роль играет учет формирования эрозионного факела и плазменного слоя над обрабатываемой поверхностью, которые поглощают падающее на поверхность излучение, тем самым увеличивая потери энергии. Для эрбиевых лазеров необходимо также учесть и влияние пленки воды на поверхности обрабатываемого материала на ход процесса удаления. Наличие пленки воды на поверхности является следствием либо естественного процесса смачивания, либо намеренного орошения с целью охлаждения. Исследования показали, что при формировании на поверхности пленки воды толщиной порядка 1 мм происходило значительное увеличение эффективности удаления материала [12]. Подобный эффект может быть объяснен импульсом отдачи, который вода передает поверхности в процессе своего испарения под действием лазерного излучения. Помимо действия на интактную поверхность эмали и дентина, данный механизм способствует и очищению внутренней поверхности кратера от продуктов разрушения. Под действием лазерного излучения в твердых тканях зуба возбуждаются механические волны расширения и сжатия, способствующие их растрескиванию [9] и появлению ощущений боли. Подобные механические волны являются следствием импульса отдачи, который сообщают поверхности разлетающиеся продукты абляции. Вероятность подобного механизма возрастает при уменьшении длительности импульса.

Полученные в эксперименте результаты измерения глубины и диаметра дна лазерного кратера в эмали при различном количестве лазерных импульсов, падающих в одну и ту же область на поверхности эмали зуба, представлены соответственно на рис. 2, а, б. Рассчитанная по результатам измерений зависимость эффективности лазерного удаления эмали импульсами одномодового YAG: Er лазера от количества лазер-

ных импульсов, падающих в одну и ту же область на поверхности эмали зуба, приведена на рис. 3.



а



б

Рис. 2. Зависимость глубины (а) и диаметра дна (б) кратеров в эмали, сформированных излучением одномодового YAG: Ег лазера, от количества одномоментно приложенных лазерных импульсов ( $200 \text{ Дж/см}^2$ , неконтактный режим, погрешность не более  $\pm 10 \%$ )

Мы обнаружили, что с ростом количества лазерных импульсов, падающих в одну и ту же область на поверхности эмали зуба, глубина кратера возрастает вплоть до пятидесятого импульса, а затем перестает изменяться. Мы связываем данный результат с тем, что по мере возрастания количества лазерных импульсов дно полости движется в направлении распространения лазерного излучения и постепенно удаляется от фокальной плоскости. При этом плотность энергии на поверхности дна кратера падает. Кроме этого, при формировании полости на поверхности эмали образуется диафрагма, кото-

рая также ограничивает долю энергии, участвующую в углублении кратера. Динамика этих двух процессов приводит к тому, что глубина кратера практически перестает изменяться уже после воздействия пятидесяти импульсов.

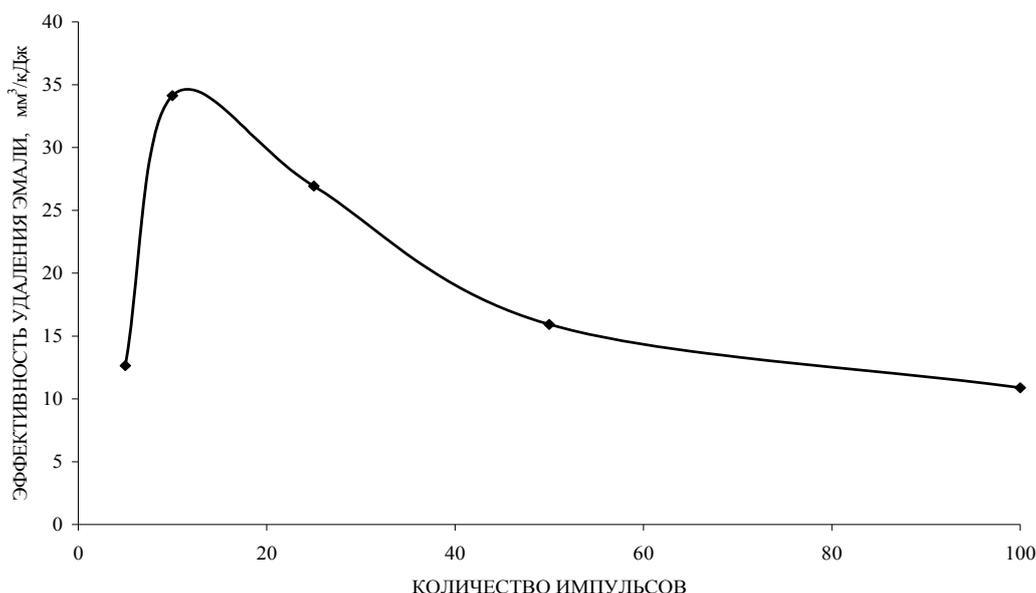


Рис. 3. Зависимость эффективности удаления эмали излучением одномодового YAG: Er лазера от количества одномоментно приложенных лазерных импульсов (200 Дж/см<sup>2</sup>, неконтактный режим, погрешность не более ±10 %)

Диаметр дна лазерного кратера неоднозначно изменяется с ростом количества импульсов YAG: Er лазера. Подобная неоднозначность может быть связана как с флуктуациями энергии лазерного излучения, обусловленными конкуренцией основной моды с модами высших порядков в процессе формирования, так и с неоднородностью свойств эмали. Неоднородность свойств эмали может проявляться в пространственной флуктуации пористости или в пространственной флуктуации концентрации воды в эмали. Кроме того, с ростом глубины кратера может случайным образом изменяться концентрация продуктов разрушения внутри и на его стенках. Рост диаметра в диапазоне от пятидесяти до ста импульсов, по-видимому, связан с тем, что в отсутствие роста глубины вся лазерная энергия поглощается на стенках полости, стимулируя образование трещин. Количество трещин с каждым импульсом увеличивается. Трещины настолько ослабляют эмаль, что при незначительном воздействии прилежащая к стенке лазерной полости и содержащая критическое количество трещин эмаль удаляется.

Следует обратить внимание на то, что кривая эффективности лазерного удаления эмали имеет экстремум. Видно, что эффективность удаления эмали одномодовым излучением YAG: Er лазера в неконтактном режиме максимальна для последовательности из десяти лазерных импульсов и составляет величину порядка 35 мм<sup>3</sup>/кДж. Отметим, что максимальные значения эффективности удаления эмали в неконтактном режиме излучением одномодового и многомодового YAG: Er лазеров практически совпадают. Однако, если для многомодового излучения максимальная эффективность удаления наблюдается для первого лазерного импульса [12], то для одномодового – для десятого. Подобный экстремальный характер можно объяснить высокой приосевой плотностью энергии, характерной для одномодового лазерного излучения. С ростом количества лазерных импульсов увеличивается объем области, содержащей микротрещины.

Отношение объема этой области к объему кратера при использовании одномодового лазера значительно больше, чем при использовании многомодового, потому что диаметр одномодового пятна значительно меньше диаметра пятна, формируемого многомодовым излучением. Длина и концентрация трещин около кратера для обоих типов лазерного излучения практически одинаковы, так как они определяются превышением плотности энергии над порогом разрушения и свойствами эмали. Разрушение эмали, содержащей трещины, требует меньшей энергии. Очевидно, что для одномодового излучения рост эффективности, связанный с формированием трещин вокруг кратера, компенсируется уменьшением эффективности за счет отдаления дна лазерной полости от плоскости фокусировки к десятому импульсу. Далее для одномодового YAG: Er лазерного излучения мы наблюдаем падение эффективности удаления эмали, обусловленное только отдалением дна лазерной полости от плоскости фокусировки. Для многомодового YAG: Er лазера из-за малости отношения объема области, содержащей трещины, к объему кратера, начиная уже со второго импульса, на динамику эффективности удаления определяющее воздействие оказывает отдаление дна лазерной полости от плоскости фокусировки.

### Заключение

В работе исследована динамика эффективности лазерного удаления эмали импульсами одномодового YAG: Er лазера в неконтактном режиме с водяным орошением области лазерного воздействия. Экспериментально установлено, что эффективность удаления эмали максимальна для последовательности из десяти лазерных импульсов с плотностью энергии, близкой к  $660 \text{ Дж/см}^2$ , и составляет величину порядка  $35 \text{ мм}^3/\text{кДж}$ . В эксперименте мы показали, что одномодовый пучок YAG: Er лазера с энергией порядка 30 мДж способен сформировать в эмали зуба человека отверстие с аспектным соотношением 18:1.

### Литература

1. Dederich D.N., Bushick R.D. Lasers in dentistry: Separating science from hype // JADA. – February 2004. – Vol. 135. – P. 204–211.
2. Coluzzi D.J. Lasers in dentistry – wonderful instruments or expensive toys? // International Congress Series 1248. – 2003. – P. 83–90.
3. de Paula E.C., de Paula E.F., Haypek P. Restorative dentistry and esthetics with lasers // International Congress Series 1248. – 2003. – P. 91–99.
4. Амосов В. Лазеры в стоматологии – лечение зубов без бормашины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edentworld.ru/cgi-bin/info/lib.pl?cid=&DocID=1216>, своб.
5. Besten P.K.D., White J.M., Pelino J., Lee K., Parkins F.M. Randomized prospective parallel controlled study of the safety and effectiveness of Er :YAG laser use in children for caries removal // SPIE. – 2000. – Vol. 3910. – P. 171–174.
6. Lee C., Ragadio J.N., Fried D. Influence of wavelength and pulse duration on peripheral thermal and mechanical damage to dentin and alveolar bone during IR laser ablation // SPIE. – 2000. – Vol. 3910. – P. 193–203.
7. Ragadio J.N., Lee C.K., Fried D. Residual energy deposition in dental enamel during IR laser ablation at 2.79, 2.94, 9.6, and 10.6  $\mu\text{m}$  // SPIE. – 2000. – Vol. 3910. – P. 204–209.
8. Featherstone J.D.B., Rechmann P., Fried D. IR laser ablation of dental enamel // SPIE. – 2000. – Vol. 3910. – P. 136–148.

9. Fried D., Shori R., Duhn C. Backspallation due to ablative recoil generated during Q-switched Er :YAG ablation of dental hard tissue // SPIE. – 1998. – Vol. 3248. – P. 78–84.
10. Altshuler G.B., Belikov A.V., Erofeev A.V. Laser treatment of enamel and dentin by different Er-lasers // SPIE. – 1994. – Vol. 2128. – P. 273–281.
11. Zuerlein M.J., Fried D., Seka W.D., Featherstone J.D.B. Absorbtion coefficients of dental enamel in the infrared: a solution to a seemingly straightforward problem // SPIE. – 1998. Vol. 3248. – P. 137–145.
12. Fredrickson C.J., Lu Q., Hayes D.J. Rapid ablation of dental hard tissue using promoter-assisted pulsed Nd :YAG-laser // SPIE. – 1997. – Vol. 2973. – P. 43–52.

- Беликов Андрей Вячеславович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, meddv@grv.ifmo.ru
- Жолобова Екатерина Павловна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, ktrpavl@mail.ru
- Скрипник Алексей Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, alesch\_skrupnik@mail.ru
- Струнина Татьяна Валерьевна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, struninatatiana@mail.ru

УДК 543.449:549.651/.514.51/.32:544.778.4:539.4.015.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ  
ФРАКЦИЙ РЯДА МИНЕРАЛОВ С ПОМОЩЬЮ  
РЕНТГЕНОВСКОГО МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ****А.П. Симаков, Б.А. Федоров, А.В. Смирнов**

Проведены исследования структуры поверхности механического разрушения шести минералов: альбита, лабрадора, кварца, алмаза, галенита и халькозина. Полученные индикатрисы рассеяния показали, что частицы порошков хрупких минералов в широком интервале размеров (10–150 нм) обладают гладкой поверхностью; пластичные минералы, напротив, обладают шероховатой поверхностью. Методом Гинье получен средний радиус частиц порошка галенита; он равен ~ 48 нм.

**Ключевые слова:** малоугловое рентгеновское рассеяние, шероховатость поверхности, фрактальная размерность, метод Гинье, механическое разрушение минералов, пластичность, хрупкость, спайность.

**Введение**

В настоящее время все большее значение приобретает такое направление геологической науки, как наноминералогия. Эта область научного знания сориентирована на изучение нанометрового дискретного материального пространства в минералах и других средах, т.е. на изучение и, что немаловажно, создание систем и структур нанометровой размерности. Исключительность наномира заключается, прежде всего, в специфических поверхностных эффектах, доминирующих над объемными особенностями наноструктур (комплексов, кластеров) [1].

Мощный толчок к исследованию наномира дало появление электронных микроскопов и других высокоточных приборов, позволяющих производить прямые наблюдения и качественные анализы на данном уровне организации вещества. Безусловно, прямое наблюдение предпочтительней косвенному исследованию, но в ряде случаев можно столкнуться с чисто техническими ограничениями. Данные, получаемые методом электронной микроскопии, могут оказаться слишком дискретными для ряда задач, связанных, например, с получением численных параметров нестроого выдержанных периодических структур. К таким структурам относятся, в частности, структуры распада твердого раствора, характерные для многих групп минералов. При этом косвенные методики как раз и характеризуются тем, что на выходе дают интегральный показатель от широкого набора объектов, а значит, многократно повышается точность измерения искомой величины. Результаты исследований, полученные с помощью одной из таких методик, легли в основу этой работы.

Метод исследования – рентгеновское малоугловое рассеяние (МУР) – был выбран по двум основным причинам. Во-первых, этот метод позволяет изучать особенности рассеивающих объектов в диапазоне размеров ~5–200 нм, в котором как раз и должны проявляться характеристические свойства поверхностей минералов. Кроме того, для минералога данный диапазон размеров регистрируемых объектов интересен также с точки зрения изучения распада твердого раствора в природных кристаллах. В частности, этим методом могут изучаться пертитовый и перистеритовый распад в полевых шпатах, включения рутила в кварце, гематита в нефелине и др. Во-вторых, согласно теории МУР, при соответствующем построении индикатрисы рассеяния метод позволяет ответить на вопрос, обладает ли поверхность исследуемых частиц фрактальными свойствами, и если такие свойства обнаружены, то можно определить фрактальную

размерность, т.е. оценить степень «шероховатости» поверхности. Данный метод также позволяет исследовать особенности различных тонкодисперсных минеральных фракций как естественного, так и искусственного происхождения (абразивов, твердых минеральных смазок и т.п.). Под «особенностями» здесь подразумеваются не только внутренние неоднородности и периодические структуры, но и качество поверхности частиц, составляющих фракцию.

При механическом разрушении минералов структура их поверхности должна определяться рядом их физических свойств, таких как спайность, хрупкость, пластичность. [2]. Поэтому вызывает большой интерес проведение сравнительного анализа интегральных структурных характеристик таких поверхностей. В настоящей работе в качестве объектов исследования выбран ряд минералов, в различной степени и комбинациях проявляющие названные свойства. Среди них – плагиоклазы (альбит и лабрадор), алмаз, кварц, галенит и халькозин.

### Характеристика объектов исследования

В настоящей работе исследовался следующий набор минералов: алмаз, кварц, лабрадор, альбит, галенит, халькозин (см. таблицу).

Характеристика		Алмаз C	Кварц SiO <sub>2</sub>	Альбит Na[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	Лабрадор (Ca,Na)[AlSi <sub>2-3</sub> O <sub>8</sub> ]	Галенит PbS	Халькозин Cu <sub>2</sub> S
Физические свойства	Совершенство спайности	Совершенная по {111}	Весьма несовершенная по {10 $\bar{1}$ 1}	Совершенная по {001}, средняя по {010}	Совершенная по {001}, средняя по {010}	Совершенная по {100}	Несовершенная по {110}
	Число систем плоскостей спайности	4	3	2	2	3	2
	Хрупкость	Весьма высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая
	Пластичность	Весьма низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая

Таблица. Ряд минералов с разными физическими свойствами

Отобранные минеральные образцы подвергались дроблению с последующим истиранием в ступке до максимально мелкого состояния. Исключение составляет только алмаз, который не подвергался истиранию, а только дробился. В ряде случаев полученный порошок разделялся на три фракции – частицы не крупнее 0,04 мм; от 0,04 до 0,1 мм; от 0,1 до 0,25 мм. Полученные порошки помещались в специально изготовленные кюветы. Материалом для кювет служила оптическая слюда (фтор–флогопит) в виде тонких пластин толщиной до 50 мкм. Такие пластины практически не рассеивают рентгеновские лучи под малыми углами и обладают низким коэффициентом ослабления.

### Методика исследования

Метод МУР широко используется в мировой практике для изучения природных и синтетических материалов [3, 4]. Являясь продолжением рентгеноструктурного анализа на область неупорядоченных объектов и, следовательно, используя хорошо развитый аппарат теории дифракции, метод МУР дает прямую структурную информацию о природе исследуемых образцов.

Мы ограничим анализ возможностей применения МУР к исследованию структуры рассеивающих объектов лишь двумя методиками, которые были непосредственно использованы в настоящей работе. Первая из них – метод Гинье [5] – позволяет рассчитать средние размеры  $R$  частиц в условиях отсутствия их интерференционного взаимодействия. Если  $I(q)$  – интенсивность рентгеновского рассеяния под углом  $\theta$ ,

$$q = \frac{4\pi \sin(\theta / 2)}{\lambda} \quad (1)$$

– модуль вектора рассеяния,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения, то метод Гинье состоит в построении зависимости  $\ln I(q)$  от  $q^2$ , которая в случае рассеяния независимыми частицами представляет собой прямую линию, наклон которой определяется величиной  $R$ .

Другая использованная нами методика МУР – это возможность оценки фрактальных свойств поверхностей рассеивающих минералов. Для математического описания этих свойств поверхность исследуемого объекта мысленно покрывают одним слоем плотно упакованных шаров радиуса  $r$ . Если число таких шаров  $N(r)$ , то в случае

$$N(r) \sim r^{-D_s} \quad (2)$$

в достаточно широком интервале изменения  $r$  поверхность такого объекта называют фрактальной, а величину  $D_s$  – фрактальной размерностью этой поверхности. Для гладких поверхностей (например, для трехмерных геометрических тел)  $D_s = 2$ . В случае неклассической геометрии фрактальная размерность  $D_s$  принимает значения в пределах  $2 < D_s < 3$ , причем с ростом  $D_s$  поверхность становится все более шероховатой.

Согласно теории МУР, развитой в работе Бейла и Шмидта [6], интенсивность рентгеновского рассеяния на однородных частицах, обладающих фрактальной поверхностью, подчиняется закономерности

$$I(q) \sim q^{-(6-D_s)}, \quad (3)$$

причем применимость формулы (3) ограничена случаем, когда  $qL \gg 1$ , где  $L$  – максимальный размер частиц.

Малоугловые измерения проводились с помощью блочной камеры Kratky. Использовалась рентгеновская трубка с медным катодом (линия излучения  $\text{CuK}\alpha$ , длина волны  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ). Детектором служил фотоэлектронный умножитель. Процесс получения кривых рассеяния был автоматизирован с помощью устройства сопряжения и программного обеспечения [7]. Юстировку рентгеновской камеры и первичную обработку результатов эксперимента проводили по методике, развитой в работе [8]. Коэффициент поглощения образца определяли с помощью приставки с движущейся щелью (Moving Slit Device) [9]. Во все представленные ниже экспериментальные индикатрисы рассеяния внесены коллимационные поправки на длину первичной щели и щели детектора. При этом была использована программа, основанная на применении сплайн-интерполяции при решении обратной коллимационной задачи [10–12].

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1–3 представлены экспериментальные индикатрисы рентгеновского малоуглового рассеяния на порошках всех исследованных минералов. Кривые построены в двойном логарифмическом масштабе с целью обнаружить (или опровергнуть) наличие фрактальных свойств поверхности частиц порошка.

После обработки результатов экспериментов (рис. 1) было обнаружено, что подавляющий вклад в интенсивность рассеяния вносит рассеяние на границе раздела минерал–вакуум, в то время как характер внутренних неоднородностей мало влияет на общий ход кривой рассеяния. Как видно, указанные индикатрисы в двойном логариф-

мическом масштабе представляют прямые линии, причем падение интенсивности в области прямолинейной зависимости составляет  $\sim 3$  порядка. Этот факт, несомненно, свидетельствует о фрактальных свойствах поверхности данных минералов и, согласно (3), дает возможность оценить их фрактальную размерность:  $D_s = 2$ . Иными словами, было установлено, что поверхности порошков лабрадора и альбита абсолютно плоские.

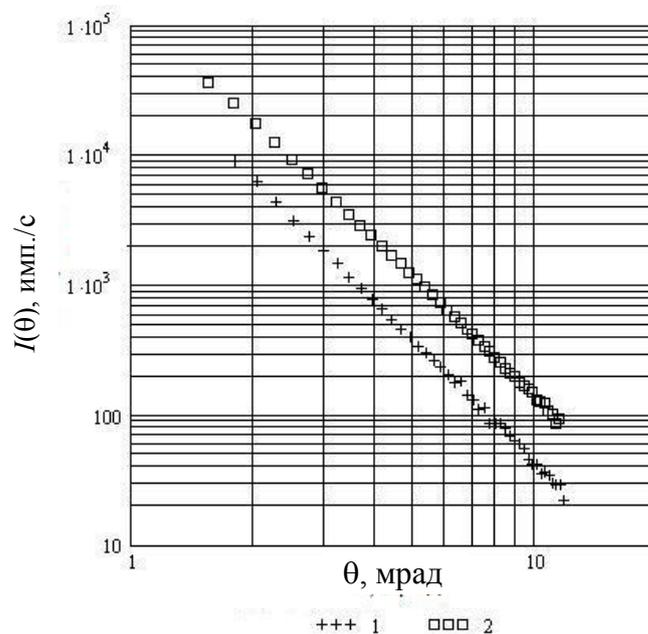


Рис. 1. Индикатрисы малоуглового рентгеновского рассеяния на порошках альбита и иризирующего лабрадора (двойной логарифмический масштаб):  
1 – иризирующий лабрадор; 2 – альбит

Чтобы проверить, не влияет ли на характер кривых рассеяния способ приготовления порошковых препаратов, были проведены рентгеновские измерения для фракционированных препаратов альбита. Результаты экспериментов показали, что при изменении длительности и способа истирания минерала в порошок, т.е. при изменении средних размеров частиц, кривые рассеяния остаются неизменными. Кроме того, прослеживалась обратная зависимость между средним размером частиц порошка и интенсивностью полезного сигнала [13]. Это еще раз свидетельствует о том, что именно рассеяние на границе образец–вакуум вносит основной вклад в суммарную интенсивность.

Далее мы рассмотрели вопрос: присущи ли абсолютно плоские рассеивающие поверхности лишь порошкам минералов с совершенной спайностью, или характер спайности не влияет на структуру рассеивающей поверхности. Была проведена съемка порошкового препарата кварца – минерала с весьма несовершенной спайностью. Полученная кривая рассеяния (рис. 2) в двойном логарифмическом масштабе обнаруживает линейную зависимость, полностью аналогичную указанной выше линейной зависимости для альбита и лабрадора. На том же рисунке представлена кривая рассеяния на порошке природного алмаза, полученном с помощью дробления. Как известно, алмаз обладает совершенной спайностью. Как видно, характер всех четырех кривых (рис. 1, 2), относящихся к образцам различной спайности, остается прежним: прямолинейная зависимость в широком интервале углов рассеяния и определяемая из наклона прямых одинаковая фрактальная размерность  $D_s = 2$ .

Таким образом, был сделан вывод о том, что характер рассеяния практически не зависит от качества спайности исходных минералов. Соответственно, за характер данной особенности рассеяния должно отвечать иное свойство минералов, идентичное как

для обоих плагиоклазов, так и для кварца. Наиболее очевидной общей чертой для них является то, что все эти каркасные силикаты обладают значительной хрупкостью и, соответственно, низкой пластичностью.

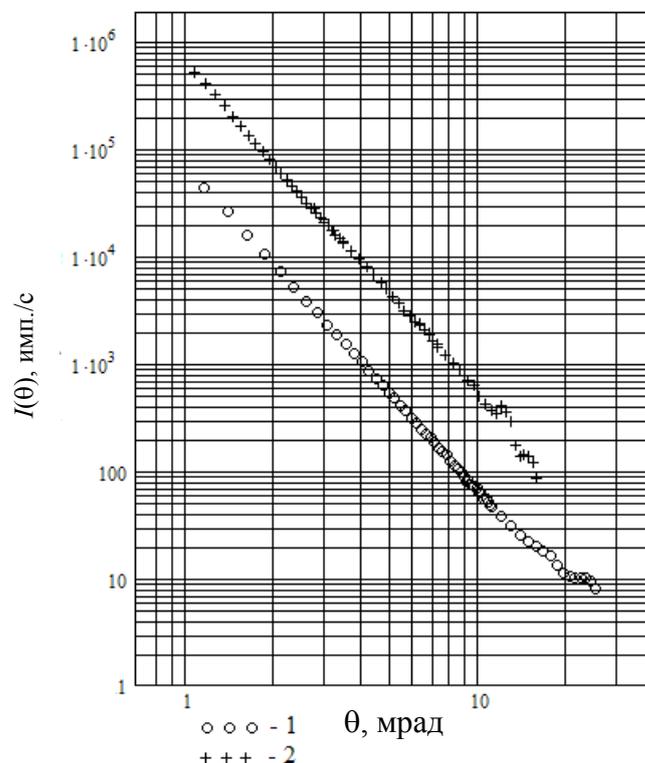


Рис. 2. Индикатрисы малоуглового рентгеновского рассеяния на порошках кварца и алмаза (двойной логарифмический масштаб): 1 – кварц; 2 – алмаз

Для проверки влияния хрупкости минерала на качество поверхностей зерен исследуемых порошков была получена кривая рентгеновского малоуглового рассеяния (рис. 3) на порошке галенита – минерала, обладающего не только совершенной спайностью, но и средней пластичностью. Известно, что при истирании галенита в порошок все выступающие углы его спайных осколков окатываются, а получившиеся зерна приобретают эллиптические, приближающиеся к шарообразным, формы.

Обработка результатов эксперимента показала, что галенит как один из минералов свинца обладает высоким коэффициентом поглощения рентгеновских лучей, что приводит к низкой интенсивности полезного сигнала даже при сравнительно небольших углах рассеяния. В связи с этим достаточно надежным можно считать лишь начальный участок кривой рассеяния – до  $\sim 4$  мрад (рис. 3). Как видно, в двойном логарифмическом масштабе этот участок кривой рассеяния также дает прямую линию, отличную по наклону от соответствующих кривых рассеяния кварца и плагиоклазов. Тем не менее, ввиду небольшой протяженности линейного участка нельзя определить, насколько такой наклон воспроизводим для остальной части кривой рассеяния галенита.

На рис. 3 представлена также индикатриса рассеяния халькозина – сульфида меди с высокой пластичностью и двумя плоскостями несовершенной спайности. Как видно, на кривой рассеяния, построенной в двойном логарифмическом масштабе, также проявилась ярко выраженная линейная зависимость с наклоном, отвечающим фрактальной размерности  $D_s = 2,5$ . Такая фрактальная размерность свидетельствует о существенной шероховатости рассеивающей поверхности халькозина.

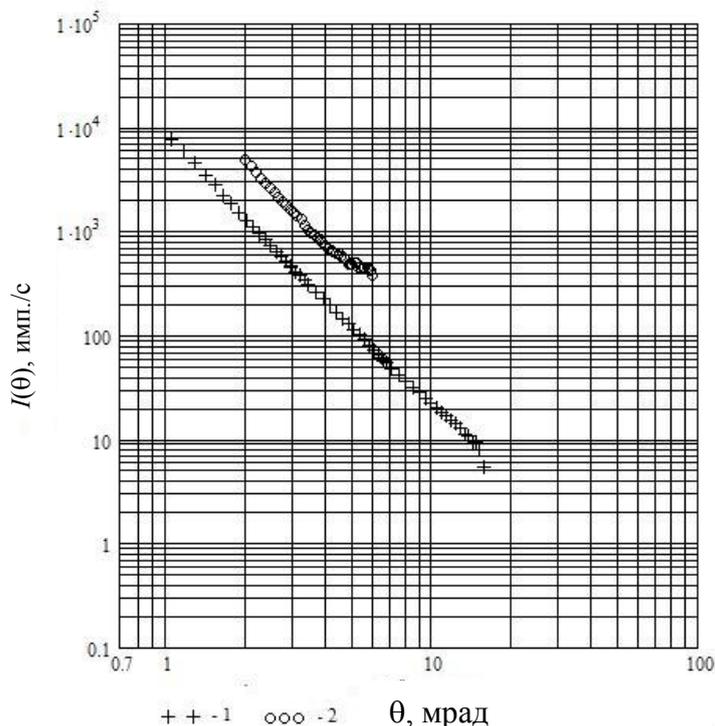


Рис. 3. Индикатрисы рентгеновского малоуглового рассеяния на порошках халькозина и галенита (двойной логарифмический масштаб): 1 – халькозин; 2 – галенит

Галенит, являясь сравнительно пластичным минералом, при истирании в порошок образует крупинки шарообразной формы. Как известно из теории МУР, индикатрисы рассеяния от однородных шаров обладают серией чередующихся максимумов и минимумов, причем минимумы достигают нулевой интенсивности. Если рассеивающий объект представляет систему невзаимодействующих незначительно искаженных по форме шаров (сфероидов), то максимумы и минимумы сглаживаются, но их положение меняется сравнительно мало. Поэтому по положению первого минимума можно оценить размеры сфероида. Расчеты показывают, что угол рассеяния  $\theta_{\min}$ , соответствующий положению первого минимума на кривой рассеяния шаров, связан с радиусом шара  $R$  соотношением

$$R \approx \frac{3\lambda}{4\theta_{\min}}, \quad (4)$$

причем для однородных по плотности сфероидов с целью большей точности определения  $\theta_{\min}$  можно использовать зависимость  $I(q) \cdot \theta^4$  от  $\theta^4$ .

После дополнительной обработки данных эксперимента на галенитовом порошке (внесения коллимационных поправок и сглаживания скорректированной кривой) был построен график интенсивности рассеяния галенита в координатах  $I(\theta) \cdot \theta^4$  от  $\theta^4$ . Получившаяся индикатриса имеет вид кривой с чередующимися минимумами и максимумами (рис. 4). Соотношение (4) для первого минимума приводит к значению среднего радиуса сфероидных частичек галенита  $R = 49$  нм.

Другим способом оценки размеров частиц порошка галенита является метод Гинье. На рис. 4 представлено построение зависимости  $\ln I(q)$  от  $q^2$ . Как видно, в начальной части кривой наблюдается четко выраженная прямолинейная зависимость, наклон которой однозначно связан с квадратом электронного радиуса инерции  $R_g$  рассеивающих частиц. Как показывают оценки, при данном построении  $R_g = 38$  нм, что в пересече-

те на средний радиус частицы дает  $R = 48$  нм. Хорошая сходимость полученных двумя методами значений  $R$  позволяет говорить о высоком качестве оценки размеров частиц порошка галенита.

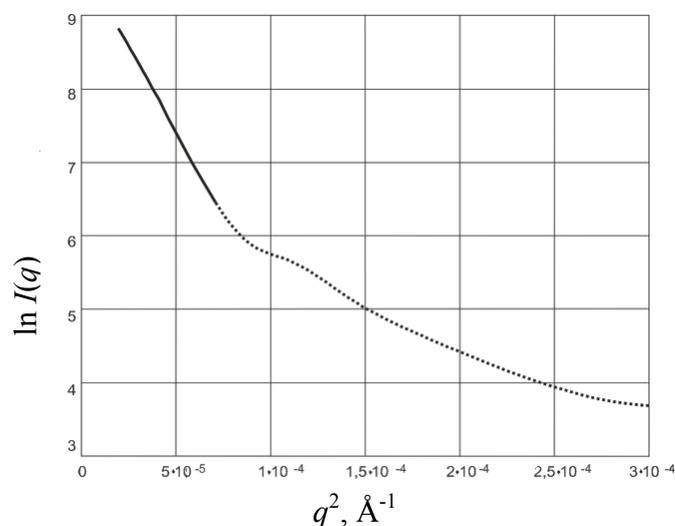


Рис. 4. График Гинье для интенсивности малоуглового рентгеновского рассеяния на порошке галенита. Прямолинейный участок выделен сплошной линией

### Выводы

Показано, что порошки относительно хрупких минералов – лабрадора, альбита, кварца, алмаза – обладают в широком интервале размеров (10–150 нм) плоской поверхностью частиц независимо от качества спайности исследуемого минерала (фрактальная размерность  $D_s = 2$ ). Порошки относительно пластичных минералов – галенита и халькозина – имеют в том же интервале размеров существенно более шероховатую поверхность ( $D_s = 2,5$ ).

Анализ кривых малоуглового рентгеновского рассеяния порошка галенита позволил оценить средние размеры частиц, моделируемых сфероидами с небольшой степенью вытянутости. Показано, что построение Гинье приводит к среднему радиусу частиц  $R \sim 48$  нм. Проведенная оценка того же среднего радиуса сфероидов, исходя из положения первого минимума, возникающего при рентгеновском рассеянии шарообразных частиц, дает значение  $R \sim 49$  нм.

Показана эффективность применения малоуглового рентгеновского рассеяния для изучения структуры порошков минералов.

### Литература

1. Юшкин Н.П. и др. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. – СПб: Наука, 2005. – 581 с.
2. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. – М., 1951. – 543 с.
3. Kratky O. Instrumentation, Experimental Technique, Slit Collimation // Small-angle X-ray scattering. – London: Academic Press, 1983. – P. 53–84.
4. Porod G. General Theory // Small-angle X-ray scattering. – London: Academic Press, 1983. – P. 17–52.
5. Guinier A., Fournet G. Small-angle Scattering of X-rays. – New-York: Wiley, 1955. – 268 p.
6. Bale H.D., Schmidt P.W. The theory of small-angle X-ray scattering by the fractal surfaces. // Phys.Rev.Lett. – 1984. – Vol. 53. – P. 596–603.

7. Мельничук А.П., Прищепенок О.Б., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Прецизионная юстировка камеры Краткого и программа первичной обработки данных рентгеновского малоуглового рассеяния // Изв. вузов. Приборостроение. – 2002. – Т. 45. – С. 48–54.
8. Мельничук А.П., Волков С.А., Смирнов А.В., Поживилко К.С., Зинчик А.А., Стафеев С.К., Федоров Б.А. Современные возможности компьютеризации малоуглового рентгеновского дифрактометра // Изв. вузов. Приборостроение. – 1998. – Т. 41. – С. 50–53.
9. Stabinger H., Kratky O. A new technique for the measurement of the absolute intensity of X-ray small angle scattering. The moving slit method // Makromol. Chem. – 1978. – V. 179. – № 6. – S. 1655–1659.
10. Schelten J., Hossfeld F. Application of spline functions to the correction of resolution errors in small angle scattering // J. Appl. Cryst. – 1971. – V. 4. – № 3. – P. 210–223.
11. Greville T.N.E. Theory and Applications of Spline Functions. – London: Acad. Press, 1969.
12. Смирнов А.В., Сизиков В.С., Федоров Б.А. Решение обратной коллимационной задачи для рентгеновского малоуглового изотропного рассеяния с помощью сплайновых функций. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – С. 41–47.
13. Симаков А.П. Нанонеоднородности в плагиоклазах особенности малоуглового рентгеновского рассеяния от порошков минералов // Записки СПГГИ (ТУ). – 2007. – Т. 170. – Ч. 1. – С. 46–49.

<i>Смирнов Александр Витальевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, smirnav@ifmo.ru
<i>Федоров Борис Александрович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, borfedorov@rambler.ru
<i>Симаков Антон Петрович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр техники и технологий, аспирант, simakov@spmi.ru

УДК 544.77.023.522:543.449:535.261; 548.734.032:548.734.56

## РАСЧЕТ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОГО МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

Е.А. Уханова, А.В. Смирнов, Б.А. Федоров

На модельных кривых проведена оценка метода расчета функции распределения сферических частиц по размерам. Этот метод основан на прямом интегральном преобразовании всей индикатрисы малоуглового рентгеновского рассеяния. Показана эффективность метода, проверена его устойчивость к статистическим шумам, проведена оценка погрешности, связанной с ограниченностью экспериментальной кривой рассеяния. Для композитных материалов, образованных наноразмерными алмазными частицами в пироуглеродной матрице, получены экспериментальные кривые малоуглового рассеяния. На основе указанного метода рассчитаны функции распределения наночастиц по размерам. Обнаружена корреляция функции распределения с толщиной пироуглеродного слоя.

**Ключевые слова:** функция распределения по размерам, наноразмерные алмазные частицы в пироуглеродной матрице, малоугловое рентгеновское рассеяние.

### Введение

Малоугловое рентгеновское рассеяние широко используется для изучения надмолекулярной структуры неоднородностей вещества (частиц, микропор, инородных включений и т.д.). Теоретически основы малоуглового рассеяния были заложены в ра-

ботах [1, 2]. Этот метод позволяет получать прямую структурную информацию в диапазоне размеров  $10\text{--}10^4 \text{ \AA}$  [3]. Для системы одинаковых невзаимодействующих частиц метод позволяет определить размеры и форму этих частиц. В случае полидисперсной системы ограничиваются обычно нахождением некоторых средних характеристик их размеров. Такие усредненные характеристики не дают достаточной информации о полидисперсной системе, так как одному и тому же среднему значению параметра может соответствовать множество распределений. Предпочтительно решение более сложной задачи – оценки функции распределения частиц по размерам.

Для расчета функции распределения частиц по размерам необходимо иметь индикатрису рассеяния в достаточно широком интервале углов рассеяния, часто недоступном экспериментально. Поэтому в работе [4] был разработан метод нахождения функции распределения для системы удаленных друг от друга однородных сферических частиц, существенной частью которого является отыскание правильной асимптотики индикатрисы рассеяния за границей экспериментального диапазона. В данной работе этот метод опробован для индикатрис, рассчитанных по модельным функциям распределения частиц, а также для экспериментальных индикатрис от обсуждаемых ниже композитных материалов. Была поставлена задача – проверить эффективность метода и провести оценку ограничений, накладываемых эффектом «обрыва» экспериментальной кривой и статистической погрешностью эксперимента.

В качестве натурального объекта для опробования метода был выбран ряд созданных в ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт материалов» композитов, образованных остовом из спрессованных наноразмерных частиц кристаллического углерода в форме алмаза, на который из газовой фазы осаждается слой пироуглерода [5]. Такие материалы обладают высокой пористостью (до 72% пустого пространства), малым коэффициентом поглощения для рентгеновских лучей и благодаря развитой структуре в диапазоне  $10\text{--}100 \text{ нм}$  позволяют получать значительные интенсивности рассеяния. Разброс размеров и возможное несовершенство формы частиц приводят к созданию неупорядоченной аморфной структуры. Последнее обстоятельство позволяет надеяться на отсутствие заметного вклада межчастичной интерференции рассеянного излучения и оправдывает применение методов анализа индикатрис рассеяния, разработанных для упорядоченных систем.

Экспериментальные интенсивности рассеяния для указанных выше образцов были получены на линии  $\text{CuK}_\alpha$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) с помощью камеры Краткого [6, 7]. Коллимационные искажения экспериментальных индикатрис были исправлены в соответствии с методикой, изложенной в работе [8].

### Описание метода

Как показано в работе [4], функция распределения по диаметрам  $r$  сферических частиц может быть определена с помощью интегрального преобразования

$$\rho(r) = \frac{1}{\pi^3 \delta^2 r^2} \int_0^\infty [q^4 I(q) - C] \alpha(qr) dq, \quad (1)$$

где  $I(q)$  – интенсивность рассеяния ( $q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{2\pi}{\lambda} \theta$ ,  $\theta$  – угол рассеяния),  $\delta$  – разность электронных плотностей частиц и их окружения,  $C = \lim_{q \rightarrow \infty} [q^4 I(q)]$ , а вспомогательная функция  $\alpha(qr)$  в подынтегральном выражении имеет вид

$$\alpha(qr) = \cos(qr) \left( 1 - \frac{8}{q^2 r^2} \right) - \frac{4 \sin(qr)}{qr} \left( 1 - \frac{2}{q^2 r^2} \right). \quad (2)$$

Для компьютерного моделирования величина  $\delta$  в дальнейшем полагается равной единице.

Формула (1) строго справедлива, если: а) образец содержит только сферические частицы, б) кривая рассеяния свободна от интерференционных эффектов, в) индикатриса рассеяния при сравнительно больших значениях модуля вектора рассеяния убывает пропорционально  $q^{-4}$ .

Экспериментальная индикатриса измеряется в диапазоне от 0 до  $\theta_{\max}$  ( $\theta_{\max}$  – самое большое из доступных значений угла). Предполагается, что в области  $q \geq q_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda} \theta_{\max}$  функция  $\beta(q) = [q^4 I(q) - C]$  имеет вид  $Aq^{-2} + Bq^{-4}$ , где коэффициенты  $A$  и  $B$  находятся из экспериментальных данных с учетом требования непрерывности характеристической функции системы и ее производной [4]. Основной вклад в восстановленную функцию распределения  $\rho_1(r)$  дает интегрирование по экспериментальной области  $q \in [0, q_{\max}]$ :

$$\rho_1(r) = \frac{1}{\pi^3 r^2} \int_0^{q_{\max}} \beta(q) \alpha(q, r) dq. \quad (3)$$

Постоянные  $A, B, C$  определяются по двум точкам экспериментальной индикатрисы в области  $q < q_{\max}$  рассеивающей системы. Они находятся из уравнений

$$A = E_1(x^4 - q_{\max}^4) - E_2(x^4 + 3q_{\max}^4) + 4E_3q_{\max}^4, \quad (4)$$

$$B = E_1(x^2q_{\max}^4 - q_{\max}^2x^4) + 3E_2(q_{\max}^2x^4 + x^2q_{\max}^4) - 6E_3q_{\max}^6, \quad (5)$$

$$C = E_1(q_{\max}^2 - x^2) - E_2(x^2 + 3q_{\max}^2) + 2E_3q_{\max}^2, \quad (6)$$

где введены следующие вспомогательные параметры:

$$E_0 = [2q_{\max}^2x^4 + 4q_{\max}^4x^2 - 6q_{\max}^6]^{-1}, \quad (7)$$

$$E_1 = -3E_0q_{\max}^3 \int_0^{q_{\max}} q^4 I(q) dq, \quad (8)$$

$$E_2 = E_0q_{\max}^8 I(q_{\max}), \quad (9)$$

$$E_3 = E_0x^8 I(q_{\max}). \quad (10)$$

Величины  $q_{\max}$  и  $x$  – максимальное и близкое к максимальному значение модуля вектора рассеяния соответственно.

Поправочный вклад  $\rho_2(r)$  в интеграл (1) от области  $q > q_{\max}$  определяется постоянными  $A$  и  $B$ :

$$\rho_2(r) = \frac{1}{\pi^3 r^3} [A \cdot r \cdot D_a(q_{\max} \cdot r) + B \cdot r^3 \cdot D_b(q_{\max} \cdot r)], \quad (11)$$

где

$$D_a(x) = 2 \frac{\sin x}{x^4} - 2 \frac{\cos x}{x^3} - \frac{\sin x}{x^2}, \quad (12)$$

$$D_b(x) = \frac{4 \sin x}{3x^6} - \frac{4 \cos x}{3x^5} - \frac{2 \sin x}{3x^4} + \frac{\cos x}{9x^3} - \frac{\sin x}{18x^2} - \frac{\cos x}{18x} - \frac{Si(x)}{18} + \frac{\pi}{36}, \quad (13)$$

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin x dx}{x}. \quad (14)$$

Полная функция распределения является суммой основного и вспомогательного вкладов:

$$\rho(r) = \rho_1(r) + \rho_2(r).$$

### Опробование метода на модельных индикатрисах

Проверка метода была проведена для модельных индикатрис, рассчитанных по следующим функциям распределения:

а) функция распределения максвелловского типа  $\rho_a^{(T)}(r) = A_1 r^2 \exp\left(\frac{-ra}{2}\right)$  с параметром  $a = 0,08 \text{ \AA}^{-1}$ ,  $A_1$  – нормировочная константа;

б) композиция двух гауссиан  $\rho_b^{(T)}(r) = A_2 \left( \exp\left(\frac{-(r-r_1)^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(\frac{-(r-r_2)^2}{2\sigma^2}\right) \right)$ , с параметрами  $r_1=50 \text{ \AA}$ ,  $r_2=100 \text{ \AA}$ ,  $\sigma=10 \text{ \AA}$ ,  $A_2$  – нормировочная константа;

в) таблично заданная функция  $\rho_c^{(T)}(r)$ , быстро спадающая в области относительно больших размеров.

Все три функции распределения представлены на рис. 1.

Был выбран диапазон значений вектора рассеяния  $q = 0,002-0,2 \text{ \AA}^{-1}$ , соответствующий экспериментальным данным. Для значений вектора рассеяния из этого диапазона найдены модельные индикатрисы рассеяния, каждая из которых является сверткой индикатрисы рассеяния  $I_a(q)$  [3, с. 81] однородной сферической частицей диаметра  $r$  с функцией распределения частиц по размерам  $\rho(r)$ :

$$I(q) = \int_0^{\infty} \rho(r) I_a(q) dr .$$

Индикатрисы для тестовых функций распределений представлены на рис. 2.

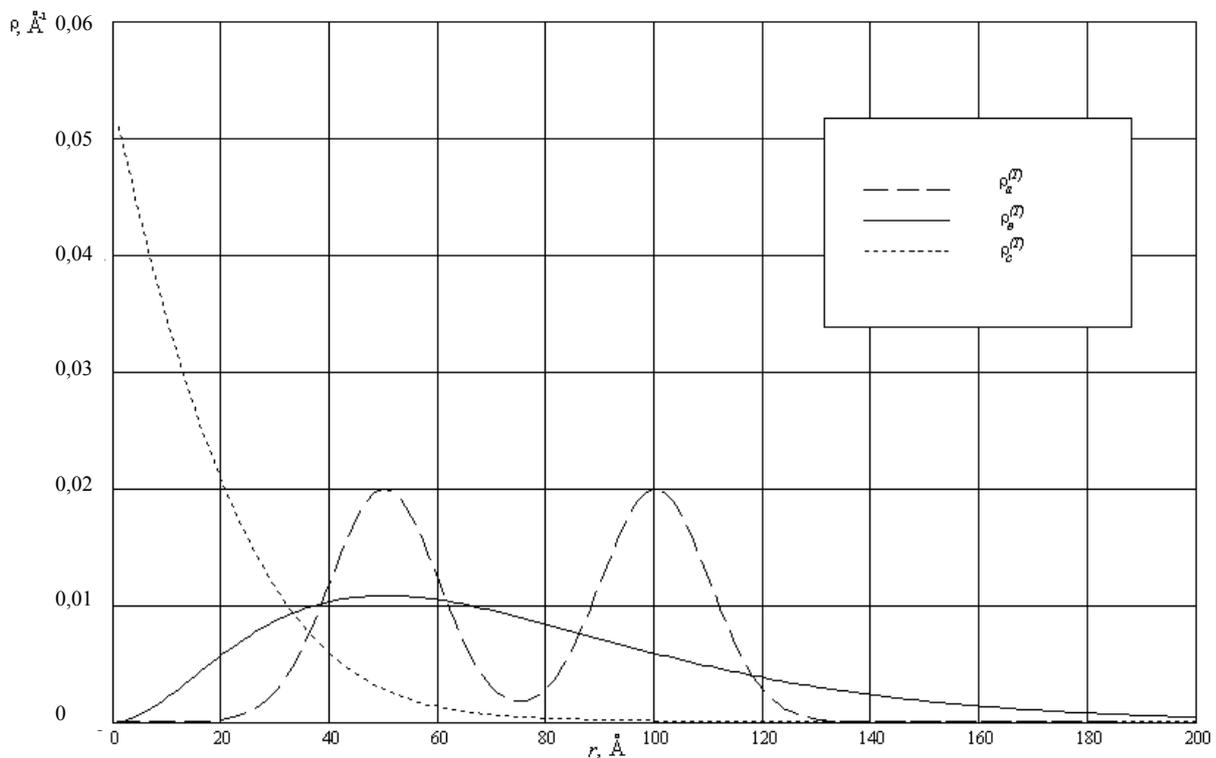


Рис. 1. Тестовые функции распределения частиц по размерам

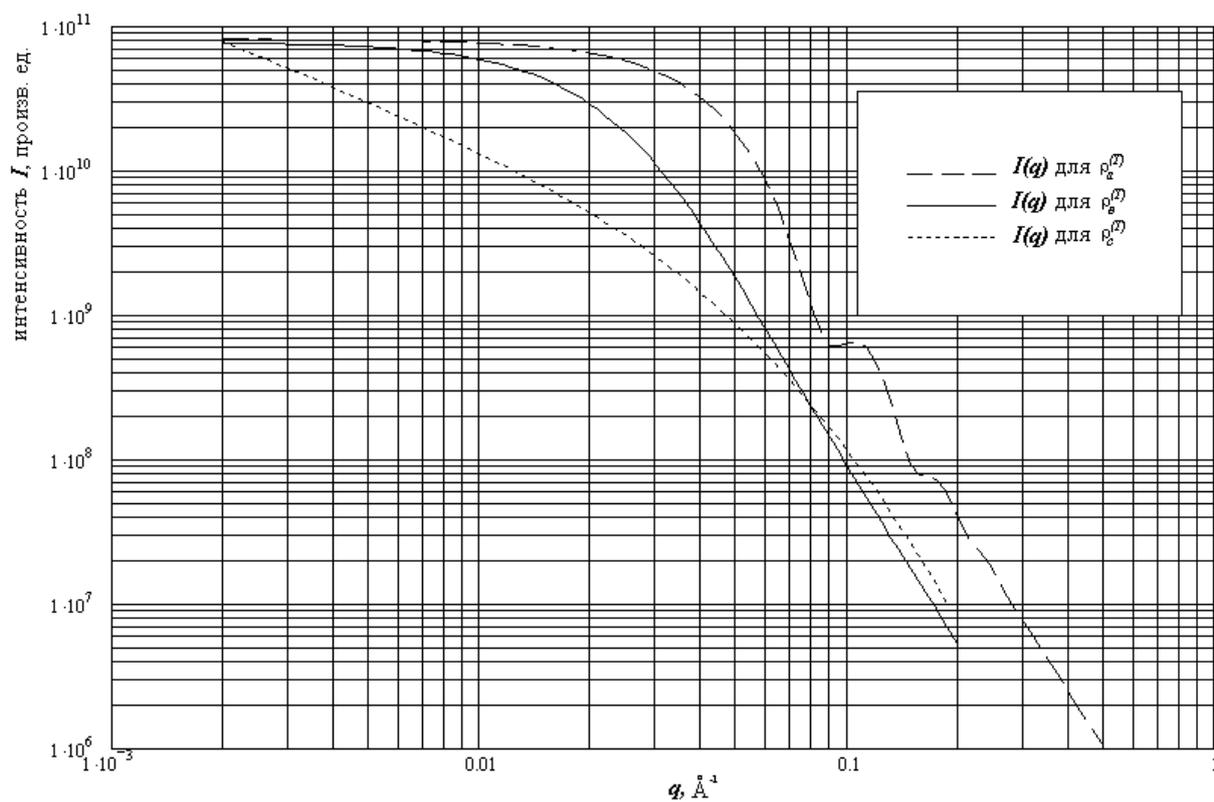


Рис. 2. Модельные индикатрисы рассеяния для тестовых распределений

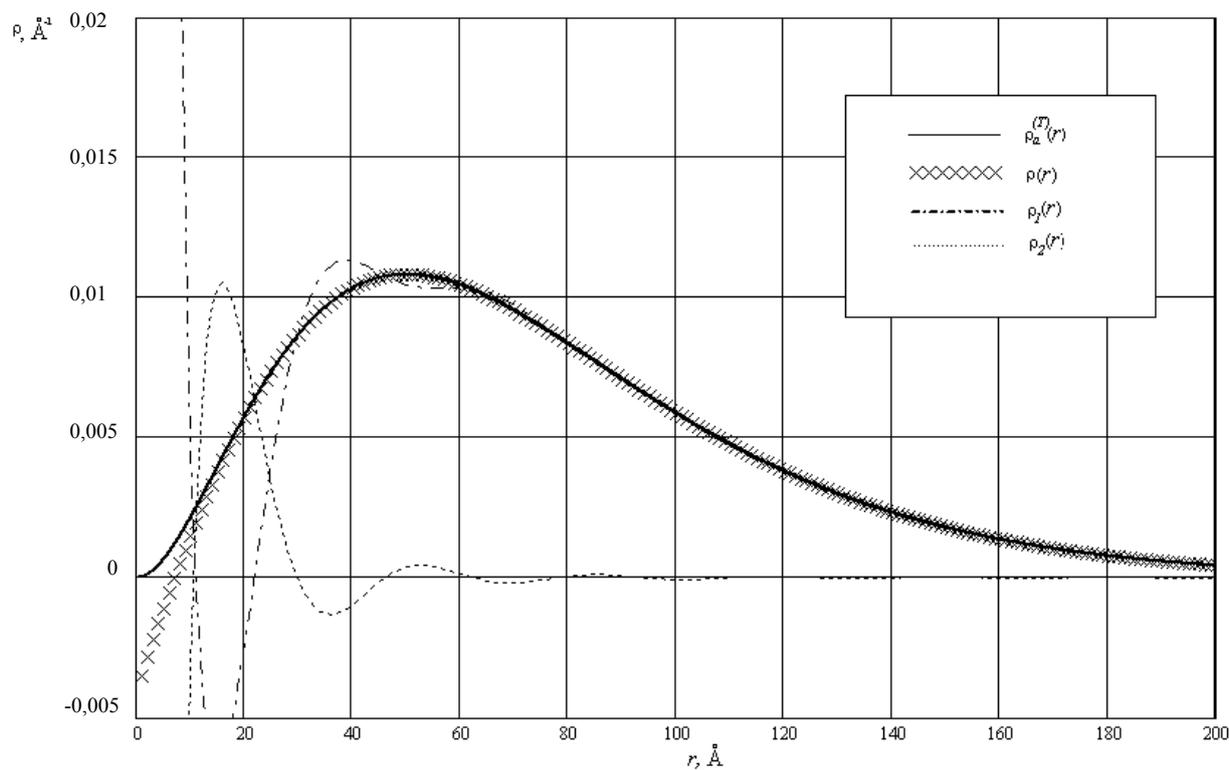


Рис. 3. Исходная тестовая функция  $\rho_a^{(T)}(r)$  распределения максвелловского типа, восстановленная функция  $\rho(r)$  и вклады основной,  $\rho_1(r)$ , и вспомогательной,  $\rho_2(r)$ , функций

С помощью рассмотренного метода для каждой индикатрисы восстанавливалась функция  $\rho(r)$ . Результат восстановления  $\rho(r)$  для функции максвелловского типа представлен на рис. 3. Индикатриса была оборвана при  $q > 0,2 \text{ \AA}^{-1}$ , что соответствует брэгговским размерам  $d_{\text{Бр}} \cong 30 \text{ \AA}$ . Видно, что в диапазоне размеров  $r \in [0, 40 \text{ \AA}]$  вклад поправочного слагаемого  $\rho_1$  существенен. В области  $r < 10 \text{ \AA}$  восстановленная функция заметно отличается от исходной.

Для проверки устойчивости метода к экспериментальным погрешностям в модельную индикатрису рассеяния для распределения  $\rho_a^{(T)}(r)$  был внесен равномерно распределенный статистический шум с дисперсией, пропорциональной  $I$ . Результат восстановления приведен на рис. 4. Как видно из сравнения рис. 3 и 4, функция  $\rho(r)$ , восстановленная по «зашумленной» индикатрисе, отличается только небольшими видоизменениями в области аргумента от  $20 \text{ \AA}$  и ниже. На рис. 5 вместе с тестовой функцией  $\rho_b^{(T)}(r)$  приведены вклады  $\rho_1(r)$ ,  $\rho_2(r)$  и полная восстановленная функция  $\rho(r)$ . Для такого распределения индикатриса асимптотически приближается к закону  $1/q^4$  при  $q$ , больших по сравнению с индикатрисой для распределения максвелловского типа  $\rho_a^{(T)}(r)$ . Поэтому использовалась индикатриса  $I(q)$ , рассчитанная до  $q_{\text{max}} = 0,5 \text{ \AA}^{-1}$  ( $d_{\text{Бр}} = 12 \text{ \AA}$ ). Видно, что результат восстановления вполне удовлетворителен во всем диапазоне  $q$ , причем для  $r \geq 20 \text{ \AA}$  поправочный вклад  $\rho_2(r)$  мал, и восстановленная функция практически совпадает с основным вкладом  $\rho_1(r)$ . Результаты для третьей тестовой функции  $\rho_c^{(T)}(r)$  представлены в полулогарифмическом масштабе на рис. 6. Индикатриса для этой тестовой функции  $\rho_c^{(T)}$  была оборвана при  $q_{\text{max}} = 0,2 \text{ \AA}^{-1}$  ( $d_{\text{Бр}} \approx 30 \text{ \AA}$ ). Заметим, что для этой функции основная доля частиц имеет радиус меньше  $30 \text{ \AA}$ . При этом восстановленная функция  $\rho(r)$  во всем рассмотренном диапазоне размеров  $0 \leq r \leq 400 \text{ \AA}$  также удовлетворительно совпадает с исходной  $\rho_c^{(T)}$ . Отличительной особенностью работы метода в данном случае является то, что поправочный вклад  $\rho_2(r)$  имеет одинаковую величину с основным вкладом  $\rho_1(r)$  в диапазоне  $0 \leq r \leq 20 \text{ \AA}$  и  $r \geq 120 \text{ \AA}$ .

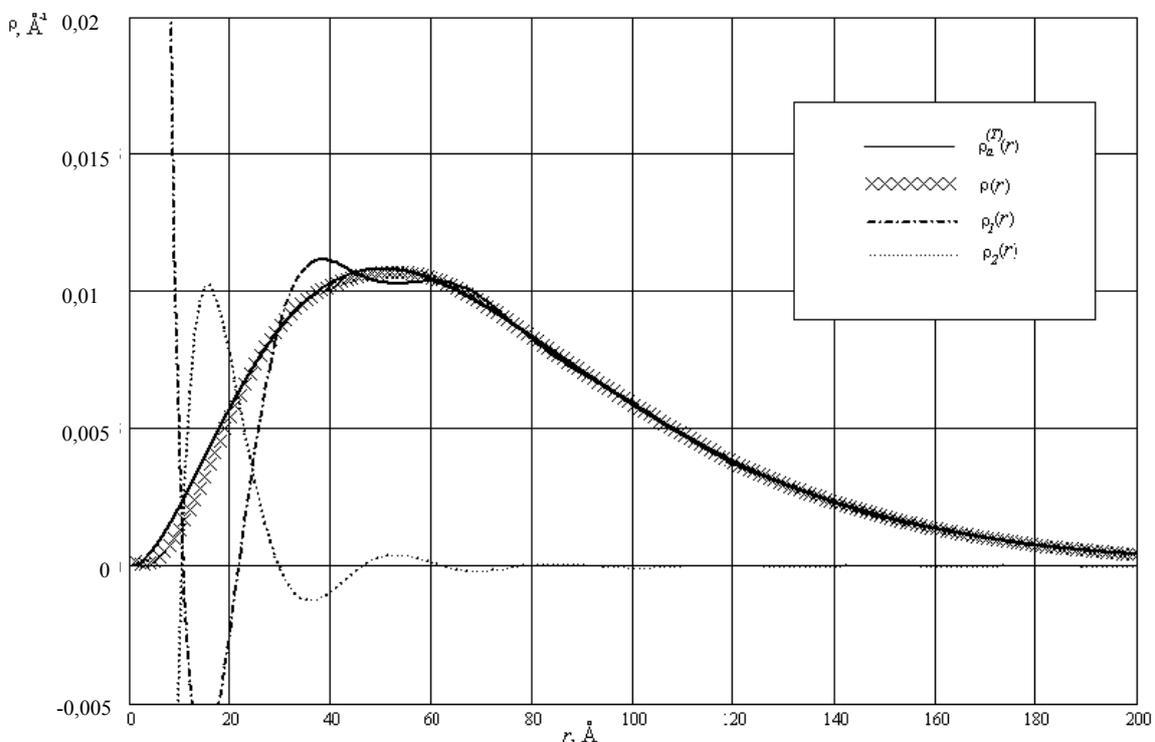


Рис. 4. Восстановленная функция распределения максвелловского типа по «зашумленной» индикатрисе. Обозначения те же, что и на рис. 3

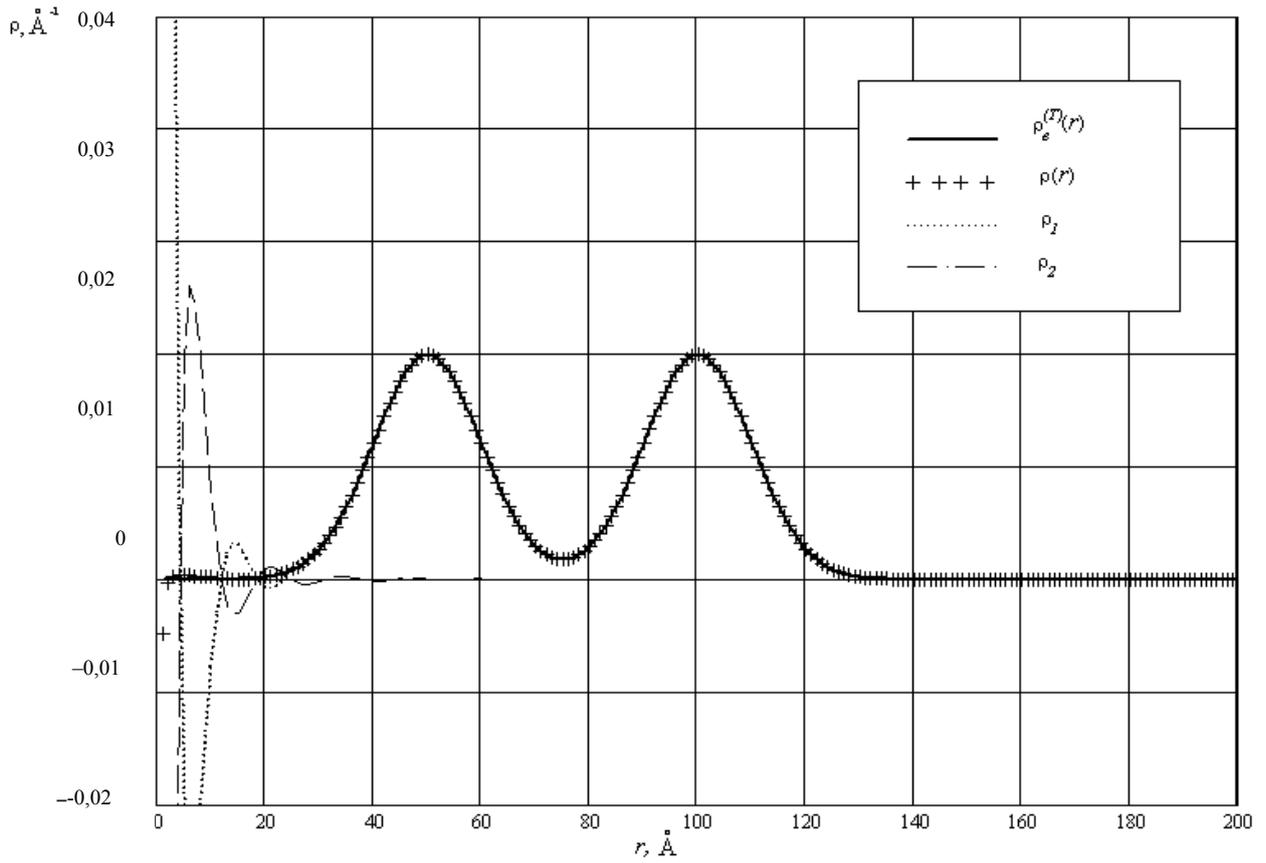


Рис. 5. Восстановленная функция распределения для композиции двух гауссиан

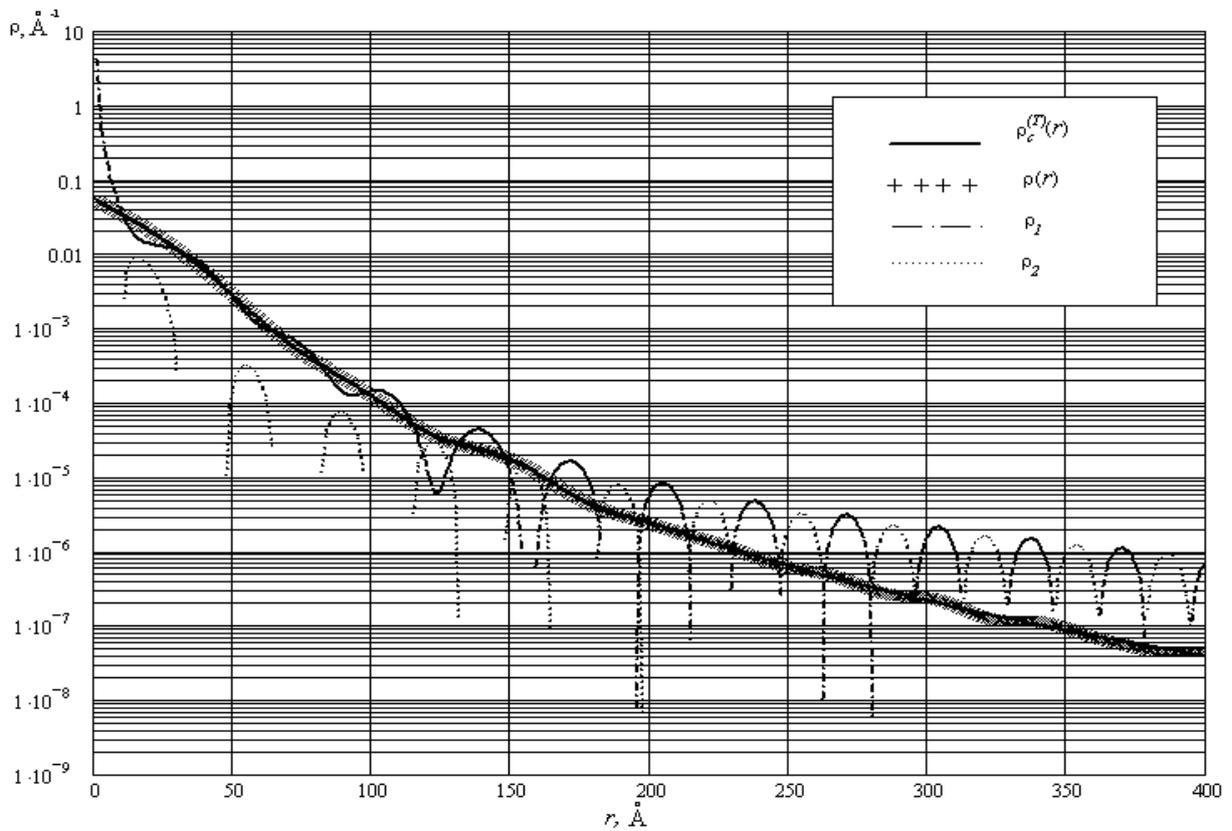


Рис. 6. Восстановленная функция для тестового распределения  $\rho_c^{(T)}(r)$

### Расчет функций распределения по индикатрисам рассеяния для образцов композитных материалов

С помощью обсуждаемого метода была проанализирована структура ряда образцов NDC0, NDC10, NDC20, NDC30, NDC40 (NDC – nanodiamond compose), произведенных из приблизительно монодисперсных частиц наноалмаза в матрице из пироуглерода с толщиной пироуглеродного слоя  $d_{\text{пуг}} = 0, 2, 4, 6, 8 \text{ \AA}$  соответственно. Кроме того, исследовался композит на основе смеси частиц разного размера, обозначаемый производителем MC50. Индикатрисы для образцов (рис. 7) были измерены в диапазоне  $q = 0,002-0,2 \text{ \AA}^{-1}$  ( $d_{\text{бр}} = 30-3000 \text{ \AA}$ ). Все индикатрисы имеют приблизительно совпадающий начальный участок, но по-разному спадают в области больших значений  $q$ . Существенно, что для образцов NDC характер спада систематически изменяется с номером. Для образца MC50 индикатриса заметно отличается от всех остальных.

При приближении к правой границе диапазона по  $q$  каждая из индикатрис выходит на степенную зависимость, близкую к  $q^{-\alpha}$ ;  $\alpha = 3,3-3,7$ , при этом в двойном логарифмическом масштабе графики превращаются в линейные. Для уменьшения искажений, возникающих при внесении коллимационных поправок вблизи  $q_{\text{max}}$ , каждая индикатриса дополнялась отрезком, являющимся в двойном логарифмическом масштабе прямолинейным продолжением экспериментальной индикатрисы в области  $q = [q_{\text{max}}, 4q_{\text{max}}]$ . После внесения коллимационных поправок в экспериментальную кривую рассеяния точки с  $q \geq q_{\text{max}}$  отбрасывались.

Пересчитанные таким образом кривые рассеяния («точечные» индикатрисы) для каждого экспериментального образца могли содержать постоянное слагаемое  $C_0$ , обусловленное неоднородностью образца на молекулярном уровне [9]. Для дальнейшей обработки это слагаемое должно было быть исключено из  $I(q)$ . Постоянная  $C_0$  была найдена на основе графика  $q^4 I(q)$  в зависимости от  $q^4$  по наклону прямолинейного участка вблизи  $q_{\text{max}}$ .

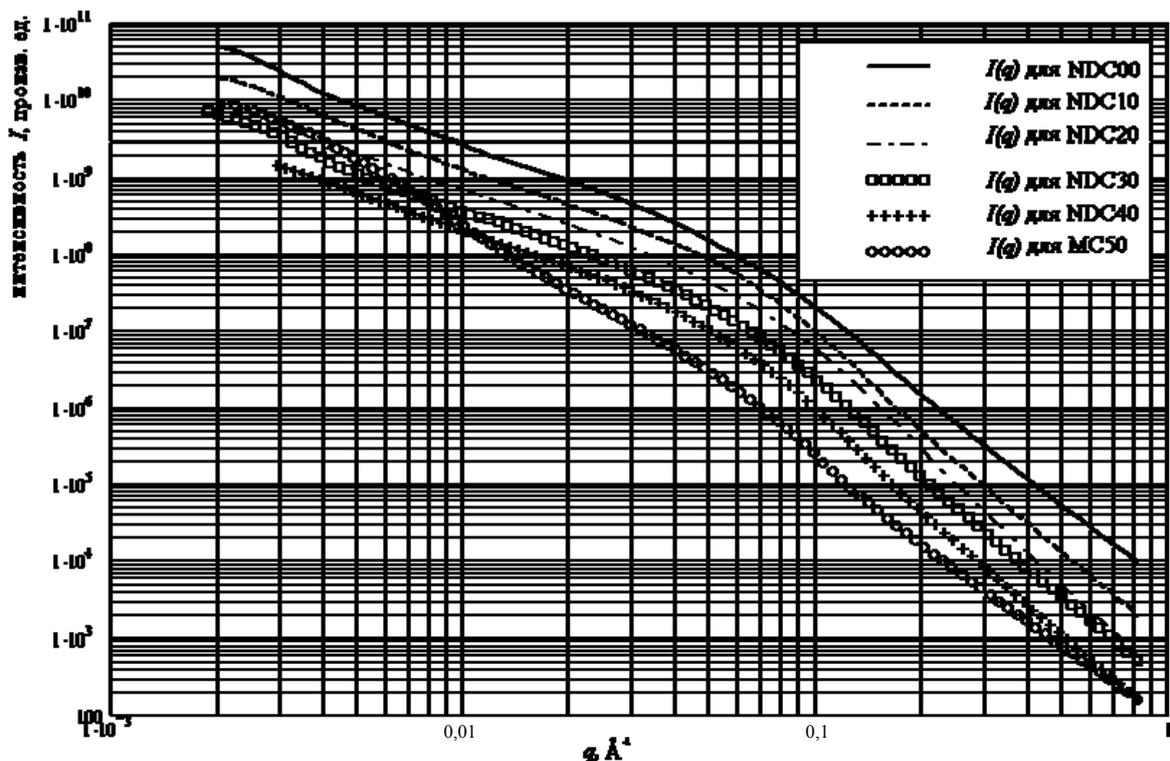


Рис. 7. Индикатрисы рассеяния для образцов NDC00–NDC40, MC20

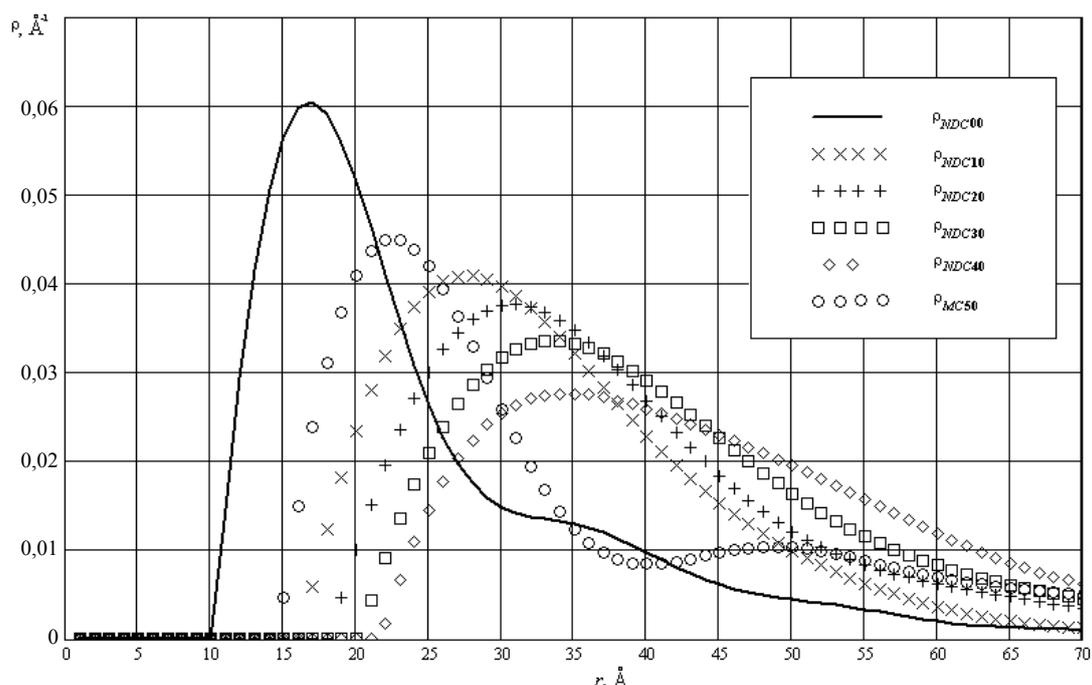


Рис. 8. Восстановленные нормированные функции распределения по размерам сферических частиц для образцов углеродных наноконпозитов

«Точечная» индикатриса после вычитания величины  $C_0$  использовалась в процедуре (3)–(14) для отыскания функции распределения  $\rho(r)$ . При этом величины  $x$  и  $q_{\max}$  в формулах (4)–(10) подбирались вблизи правой границы экспериментального диапазона так, чтобы, с одной стороны,  $x$  находилось «достаточно» далеко от  $q_{\max}$ , с другой стороны – чтобы график функции  $\beta(q)$  совпадал в диапазоне  $q = x - q_{\max}$  с предписываемым ей видом,  $Aq^{-2} + Bq^{-4}$ . При удачном выборе  $q_{\max}$  результирующая функция  $\rho(r)$  не сильно изменялась при варьировании  $x$  в довольно широких пределах, и поправочный вклад  $\rho_2(r)$  был относительно мал в области  $r \geq 20 \text{ \AA}$ .

Образец	$r_{\max}, \text{ \AA}$	$r_1, \text{ \AA}$	$r_2, \text{ \AA}$	$\Delta r, \text{ \AA}$	$d_{\text{пу}}, \text{ \AA}$
NDC00	16,8	12,0	24,1	12,1	0
NDC10	27,8	19,4	41,4	22,0	2
NDC20	30,8	21,8	44,7	22,9	4
NDC30	33,5	23,8	49,6	25,8	6
NDC40	34,6	24,8	57,5	32,7	8
MC50	22,5 (49,0)	16,8*	31,1*	14,3	4

Таблица. Полученные из данных по малоугловому рассеянию параметры распределения частиц по размерам: \* – для первого максимума

Полученные на основе описанного формулами (3)–(14) метода нормированные функции  $\rho(r)$  приведены на рис. 8. У всех функций имеется начальный участок с отрицательными значениями, которые были заменены нулевыми при нормировке. В таблице представлены значения диаметра  $r_{\max}$ , при котором  $\rho(r)$  максимально, значения диаметров  $r_1, r_2$ , в интервале между которыми  $\rho(r) \geq 1/2\rho(r_{\max})$ , а также ширина этого интервала  $\Delta r$ . В последнем столбце приведены средние толщины  $d_{\text{пу}}$  пироуглеродного слоя по данным производителя. Для всех образцов NDC положение максимума и основной интервал  $r$  систематически расширяется и смещается в область больших  $r$  с увеличением номера образца. Распределение для образца MC20 имеет второй максимум. Параметры первого максимума для этого образца имеют значения, промежуточные между аналогичными значениями для образцов NDC00–NDC10.

## Заключение

В работе показано, что метод нахождения функции распределения для полидисперсной системы сферических частиц, основанный на прямом интегральном преобразовании индикатрисы малоуглового рентгеновского рассеяния, эффективно работает для существенно отличающихся друг от друга тестовых функции. На примере одного из модельных распределения показано, что метод устойчив к статистическим шумам.

С помощью рассмотренного метода найдены функции распределения по размерам  $r$  частиц для ряда образцов NDC приблизительно монодисперсных частиц наноалмаза в матрице из пироуглерода с разной толщиной пироуглеродного слоя. Определены положение максимума и ширина функции распределения частиц по размерам для каждого из образцов. Найденные функции распределения систематически изменяют свои параметры с увеличением толщины пироуглеродного слоя. Распределение «расплывается», одновременно смещаясь в область больших  $r$ . Распределение для полидисперсного образца MC20 существенно отличается от всех образцов NDC наличием максимума в области относительно больших значений  $r$ .

## Литература

1. Guinier A., Fournet G. Small-Angle Scattering of X-rays. – N.Y.: Willey, 1955. – 268 p.
2. Glatter O., Kratky O. Small-Angle X-ray Scattering. – London: Acad. Press, 1982. – 515 p.
3. Свергун Д.И., Фейгин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. – М.: Наука, 1986. – 281с.
4. Letcher J.H., Schmidt P.W. Small-Angle X-Ray Scattering Determination of Particle-Diameter Distributions in Polydisperse suspensions of Spherical Particles // J. Appl. Phys. – 1966. – V. 37. – P. 649–655.
5. Гордеев С.К. Углеродные нанокпозиционные материалы из наноалмаза: получение и свойства // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 6. – С.60–67.
6. Мельничук А.П., Волков С.А., Смирнов А.В. и др. Современные возможности компьютеризации малоуглового рентгеновского рефрактометра // Изв. вузов. Приборостроение. – 1998. – Т. 41. – № 6. – С. 50–53.
7. Мельничук А.П., Прищепёнок О.Б., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Прецизионная юстировка камеры Краткого и программа первичной обработки данных рентгеновского малоуглового рассеяния // Изв. вузов. Приборостроение. – 2002. – Т. 45. – № 7. – С. 48–54.
8. Смирнов А.В., Сизиков В.С., Федоров Б.А. Решение обратной коллимационной задачи для рентгеновского малоуглового изотропного рассеяния с помощью сплайновых функций // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 1. – С. 41–47.
9. Vonk C.G. Investigation of non-ideal two-phase polymer. Structures by small-angle X-ray scattering // J. Appl. Cryst. – 1973. – V.6. – № 1. – P. 81–86.

<i>Уханова Екатерина Аркадьевна</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, cathrin_k80@mail.ru
<i>Смирнов Александр Витальевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, smirnav@phd.ifmo.ru
<i>Федоров Борис Александрович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, fed@phd.ifmo.ru

## 4

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 658.512.011.56

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БАЗ ДАННЫХ

В.Б. Новосельский, Т.А. Павловская

В статье рассматривается жизненный цикл проектирования распределенных баз данных (РБД), описываются этапы проектирования. На основании взаимозависимости этапов фрагментации данных, размещения данных и выбора стратегии исполнения запросов формулируется задача проектирования РБД. Производится выбор и обоснование критерия эффективности при проектировании РБД. Авторы рассматривают составляющие критерия и исследуют зависимость критерия от различных параметров.

**Ключевые слова:** распределенные базы данных, фрагментация, размещение, распределенное исполнение запроса.

## Введение

Создание распределенных информационных систем является весьма актуальной задачей. Это связано с возрастающими потребностями в приложениях, доступ к которым осуществляется из различных географических местоположений. Увеличиваются требования к оперативности и достоверности информации. Управление информацией происходит с помощью баз данных (БД). Для достижения высокой производительности распределенных приложений, работающих с базами данных, необходимы эффективные методы проектирования распределенных баз данных (РБД).

В статье рассматривается жизненный цикл проектирования РБД, описываются этапы проектирования. На основании взаимозависимости этапов фрагментации данных, размещения данных и выбора стратегии исполнения запросов формулируется задача проектирования РБД. Производится выбор и обоснование критерия эффективности проекта РБД. Авторы рассматривают составляющие критерия и исследуют зависимость критерия от различных параметров.

## Жизненный цикл проектирования РБД

Жизненный цикл проектирования РБД состоит из двух фаз – начального проектирования и репроектирования. Большинство исследователей под начальным проектированием понимают фрагментацию БД и размещение фрагментов по узлам вычислительной сети (ВС). С течением времени возможно ухудшение производительности приложений, работающих с РБД, вызванное изменениями в инфраструктуре распределенной среды (ИРС).

Под инфраструктурой понимаются физические и логические параметры функционирования системы, а именно – транзакции и их частоты, топология ВС, характеристики узлов ВС и т.д. При возникновении таких изменений требуется репроектирование РБД для сохранения производительности приложений. Фаза репроектирования, помимо этапов, входящих в начальное проектирование, дополнительно содержит методы материализации обновленного дизайна. Жизненный цикл процесса проектирования изображен на рис. 1.

Далее кратко описаны основные этапы проектирования.

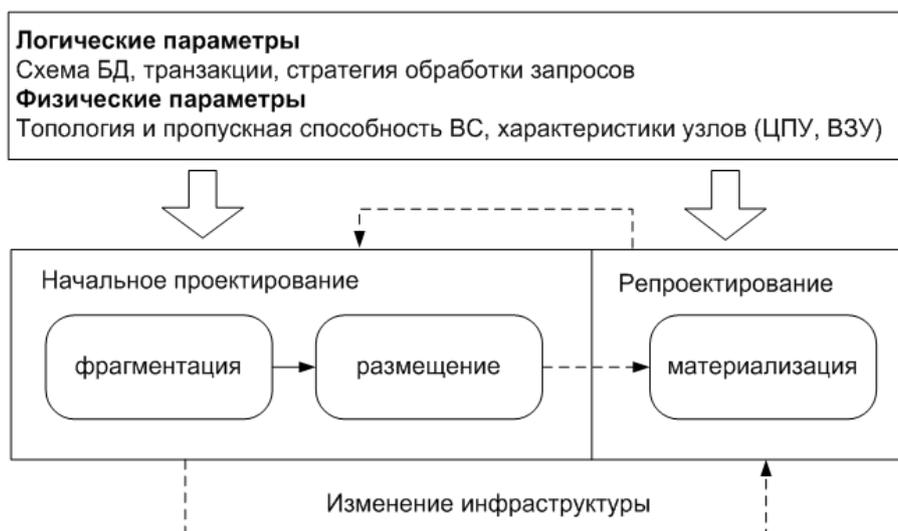


Рис. 1. Жизненный цикл проектирования РБД

### Фрагментация данных

Основной целью фрагментации является сужение пространства поиска при исполнении запроса. Фрагментация данных допускает разбиение отношения на два или более сегмента или фрагмента. Каждый фрагмент может храниться на любом узле ВС. Принято выделять две базовых стратегии фрагментации данных – горизонтальную и вертикальную фрагментации. Вертикальная фрагментация – это разделение атрибутов на группы, горизонтальная фрагментация – разделение отношения на подмножества таким образом, что каждое подмножество содержит полный набор атрибутов. Примеры горизонтальной и вертикальной фрагментации показаны на рис. 2, 3 соответственно.



Рис. 2. Горизонтальная фрагментация

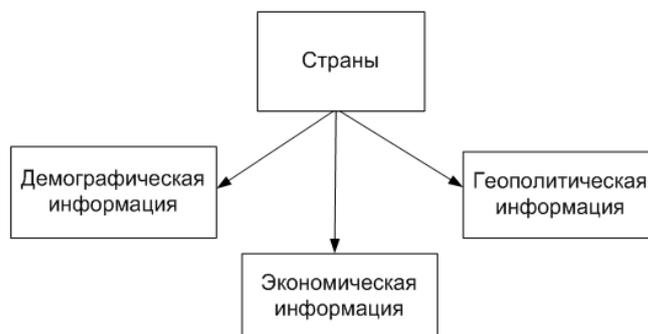


Рис. 3. Вертикальная фрагментация

Горизонтальная фрагментация разделяется на первичную (primary) и вторичную (derived) фрагментацию. Целью первичной горизонтальной фрагментации является оптимизация операций над множествами, позволяющая, во-первых, сузить пространство поиска и, во-вторых, обеспечить возможность параллельного выполнения операций. Целью же вторичной горизонтальной фрагментации является повышение скорости навигационных операций, достигаемое за счет объединения множеств объектов различных типов.

### Размещение данных

Размещение данных представляет собой процесс принятия решения о месте хранения данных с целью минимизации целевой функции при выполнении запросов. Выделяют следующие типы стратегии размещения данных:

- централизованное размещение данных – вся база данных хранится на одном узле;
- секционированное размещение данных – каждый фрагмент БД хранится на определенном узле;
- реплицированное размещение данных – одна или более копий фрагментов БД хранятся на нескольких узлах.

Репликация данных связана с хранением копий данных на нескольких узлах сети. Поскольку копии фрагментов повышают уровень доступности данных и уменьшают время отклика, репликация уменьшает общие затраты на коммуникации при выполнении запросов.

### Критерий эффективности РБД

Проектирование схем фрагментации и размещения отношений основывается на информации о способах и методах использования РБД. Методы использования зависят от стратегии исполнения запросов, которая, в свою очередь, должна учитывать схемы фрагментации и размещения. Таким образом, проектирование фрагментации, размещения и стратегии исполнения запросов должно производиться одновременно. Следовательно, задачу проектирования РБД следует формулировать так: для данной логической схемы БД, множества запросов и конфигурации ВС описать схему фрагментации, схему размещения фрагментов и стратегии исполнения каждого запроса таким образом, чтобы оптимизировать целевую функцию.

Целевой функцией этапа фрагментации данных является уменьшение времени исполнения запроса. В работах, посвященных размещению данных, в качестве критерия эффективности выбирается минимизация общего количества передаваемых по сети данных [1] или минимизация времени ответа на запрос [2]. Целью репликации является повышение надежности и коэффициента готовности транзакций [3, 4]. Коэффициент готовности транзакций отражает вероятность того, что транзакция успешно завершится за ожидаемое время. При выборе стратегии исполнения запроса критерием эффективности выступает время исполнения запроса и коэффициент готовности транзакций [5]

Производительность системы определяется отношением объема работы ко времени, за которое она была совершена. Следовательно, критерием эффективности РБД должно быть время ответа на запрос. Однако время ответа и коэффициент готовности транзакций взаимосвязаны: с уменьшением времени ответа на запрос повышается загрузка ресурсов ВС, что приводит к уменьшению коэффициента готовности транзакций. Для учета этой зависимости формализуем критерий эффективности следующим образом:

$$\xi = \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^n (c_t \cdot Q_{ij} + c_a \cdot W_{ij}) \cdot f_{ij} \rightarrow \min,$$

где  $k$  – количество узлов ВС;  $n$  – количество запросов;  $f_{ij}$  – частота возникновения  $j$ -го запроса в  $i$ -ом узле;  $Q_{ij}$  – временной коэффициент  $j$ -ого запроса, порожденного в  $i$ -м узле;  $W_{ij}$  – коэффициент использования ресурсов при обработке  $j$ -го запроса, порожденного в  $i$ -м узле;  $c_t$  и  $c_a$  – коэффициенты важности времени ответа и готовности транзакции, которые лежат в пределах  $[0,1]$ . Значения коэффициентов определяются на основании требований к РБД, например, для РБД реального времени  $c_t=1$ ,  $c_a=0$ .

Временной коэффициент  $j$ -го запроса определяется как  $Q_{ij}=T_{ij}^d/T_{ij}^l$ , т.е. равен отношению времени ответа на запрос, исполненный в РБД, к расчетному времени ответа на запрос, исполненный локально в узле  $i$ , при условии наличия в узле всех необходимых фрагментов. Коэффициент использования ресурсов равен сумме коэффициентов использования центрального процессора и внешнего запоминающего устройства узлов, вовлеченных в операцию, и коэффициента использования сетевых ресурсов.

Такой критерий обеспечивает оптимальность решения, но не обеспечивает допустимость, так как минимизируется общее время ответа системы в целом. Поэтому необходимо ввести ограничение на максимально допустимое время ответа на запрос в каждом узле,  $Q_j < \overline{Q}_j$ , где  $j = 0 \dots n$ ,  $\overline{Q}_j$  – максимально допустимое время ответа на запрос  $j$ .

### Время ответа на запрос

Время ответа в РБД имеет две составляющие: время локальной обработки и время ответа сети. Время локальной обработки складывается из задержек в центральном процессоре и внешнем запоминающем устройстве, конкурентного доступа к сетевой среде и времени выборки и обработки данных.

Время ответа сети формируется из времени передачи данных, задержек в очередях и промежуточных узлах сети и латентности, т.е. задержки на передачу сигнала [2]. Время передачи данных зависит от пропускной способности сети. Задержки в очередях и промежуточных узлах вызваны обработкой, которая происходит в узлах, находящихся между передающим и принимающим узлами. Латентность напрямую зависит от расстояния между узлом-приемником и передатчиком. Как отмечено в [2], эта составляющая особенно важна в высокоскоростных сетях передачи данных (СПД).

В РБД существует возможность параллельного доступа к ресурсам, поэтому для оценки времени ответа необходимо рассмотреть процесс исполнения запроса в распределенной среде.

### Распределенное исполнение запроса

Наиболее часто план исполнения запроса представляется в виде дерева операторов, в котором листья представляют отношения, которые участвуют в запросе, а промежуточные вершины – операторы. Параллельная обработка при таком описании разделяется на нескольких видов:

- межоператорная (inter-operation) – параллельное исполнение операторов, лежащих на разных ветвях дерева;
- внутриоператорная (intra-operation) – параллельное исполнение на различных фрагментах одного отношения суб-операторов, полученных в результате декомпозиции оператора;
- конвейерная (pipeline) – узел дерева «потребитель» может начать выполнение до того, как «производитель» завершит свою работу.

Для оценки взаимовлияния стратегии исполнения запроса и схем фрагментации и размещения оценим время исполнения одного оператора  $o$  при локальном и распределенном исполнении. Процесс распределенного исполнения оператора на трех узлах показан на рис. 4.

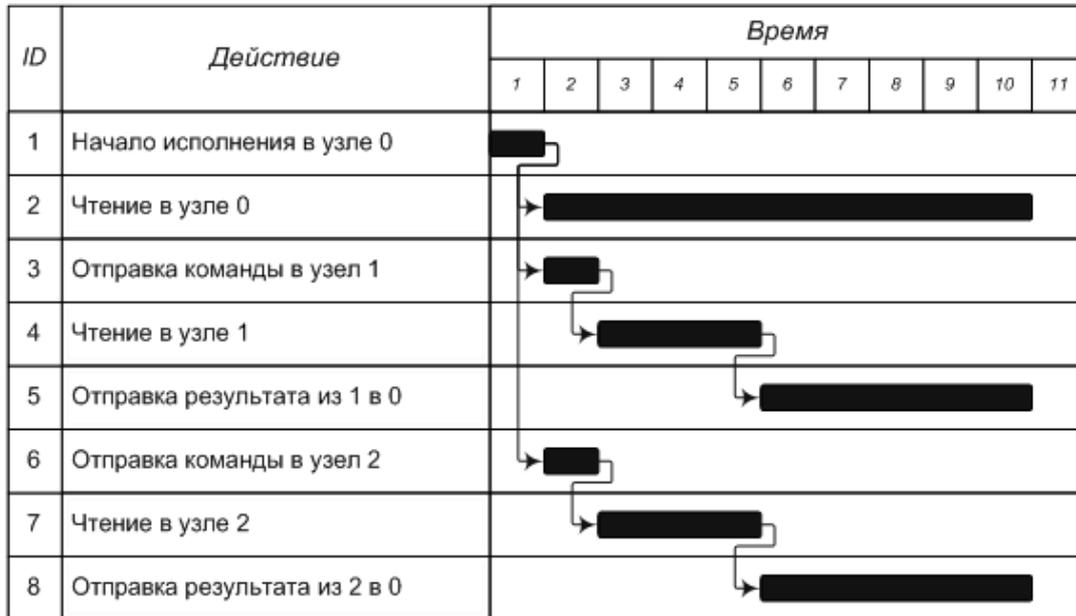


Рис. 4. Диаграмма Ганта распределенного исполнения оператора

Для простоты положим, что все узлы равноудалены от локального, их скорость чтения одинакова и равна скорости чтения в локальном узле, на всех узлах достаточно ресурсов для параллельного доступа к сети.

Положим  $Q$  – общее количество читаемых данных,  $S$  – скорость чтения единицы данных в  $k$ -м узле. Если все данные помещены в узел  $k$ , время выборки  $T_{loc} = \frac{Q}{S}$ . Разместим часть записей  $f$  ( $f=[0..1]$ ) из выборки  $Q$  в  $n$  различных узлах, причем, так как все узлы равнозначны, в каждом узле будет размещена равная доля. На основании диаграммы процесса исполнения запроса запишем следующее равенство:

$$(1 - nf) \frac{Q}{S} = P + f \frac{Q}{S} + f \frac{Q}{R},$$

где  $R$  – скорость передачи единицы данных по сети;  $P$  – время передачи запроса от  $i$ -го узла до узла  $k$ . Обозначим разницу скоростей локального и сетевого чтения  $R = \Delta S$  и выразим общее количество данных, считываемых с удаленных узлов. Оно прямо пропорционально сокращению времени ответа:  $T' = n \left( 1 - \frac{PS}{Q} \right) / \left( n + 1 + \frac{1}{\Delta} \right)$ . Как видно

из уравнения, ускорение будет наблюдаться только в том случае когда  $\frac{PS}{Q} < 1$ . Так

как основным компонентом времени передачи небольшого сообщения, особенно в высокоскоростных сетях (почти 90% в сети T1 при расстоянии 900 км, согласно [2]), является задержка на распространение сигнала, то она может быть оценена из расстояния между узлами. Например, при  $P = 5$  мс,  $S = 50$  Мб/с данное неравенство будет выполняться при  $S \geq 250$  Кб.

График зависимости сокращения времени исполнения запроса от соотношения скоростей локального и сетевого чтения при чтении 1Мб данных ( $\frac{PS}{Q} = 0,25$ ) приведен на рис. 5.

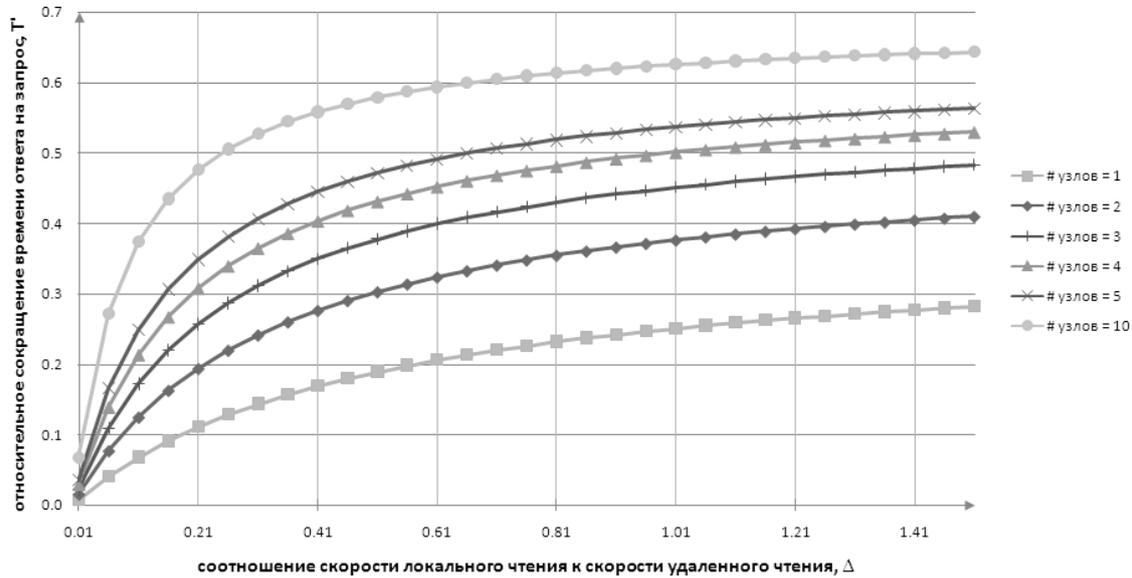


Рис. 5. График сокращения времени исполнения запроса

Очевидно, что  $T' \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 - \frac{PS}{Q}$ , т.е. максимально возможное сокращение времени ответа определяется на основании физических характеристик сети и количества передаваемых данных.

Необходимо отметить, что чтение и обновление данных имеют различные временные характеристики, особенно в распределенной среде.

### Распределенное исполнение запроса на обновление

Во многих работах (например, [1, 6]) не делается различия между запросами на выборку и запросами на обновление. Однако исполнение запроса на обновление в распределенной среде существенно отличается от выборки данных. При обновлении распределенных фрагментов СУРБД в основном используют двухфазный протокол подтверждения транзакции:

1. всем узлам отсылается сообщение «подготовка к подтверждению транзакции»;
2. от всех узлов получается ответ «готов к подтверждению транзакции»;
3. всем узлам отсылается сообщение «подтвердить транзакцию»;
4. от всех узлов получается ответ «транзакция подтверждена».

Вопрос параллельного исполнения обновления рассматривается в работе [7], в которой получена следующая аналитическая формула времени обновления:

$$T_u = 3 * \left[ \text{MAX}_{j=1}^n \left[ \left( \sum_{i=1}^j S_{t,i} \right) + R_{j,t} \right] \right] + \sum_{i=1}^n S_{t,i}, \text{ где } S_{t,i} - \text{ время передачи запроса от узла-источника транзакции } t \text{ до } i\text{-го узла; } R_{j,t} - \text{ время передачи ответа от узла } j \text{ до узла-источника транзакции } t; n - \text{ число узлов, на которых размещены фрагменты. } S_{t,i} \text{ вклю-}$$

ключения транзакции  $t$ ;  $n$  – число узлов, на которых размещены фрагменты.  $S_{t,i}$  вклю-

чает время на передачу и задержки в сети,  $R_{j,i}$  состоит из задержки от  $t$  до  $j$ , времени обработки на узле  $i$ , времени передачи ответа от узла  $i$ .

Для простоты можно положить, что время передачи запроса до всех узлов одинаково и сообщения отсылаются и обрабатываются узлами параллельно, тогда время обновления  $T_u \approx 4S_{i,i} + 3R_{i,i}$

Как видно из формул, время обновления существенно превышает время выборки, т.е. при уменьшении времени выборки за счет размещения фрагментов на разных узлах увеличивается время обновления и возрастает загрузка узлов и ВС. Таким образом, при фрагментации и размещении необходимо учесть затраты на обновление данных при увеличении количества реплик в соответствии с коэффициентами важности времени ответа и готовности транзакции.

### Заключение

В статье рассмотрен жизненный цикл проектирования РБД и описаны его этапы. Сформулирована задача проектирования РБД. Выбран и обоснован критерий эффективности проекта РБД. Рассмотрены составляющие времени распределенного исполнения оператора, исследована их зависимость от различных параметров сети и узлов ВС.

### Литература

1. Apers P.M.G. Data allocation in distributed database systems // ACM Transactions on Database Systems. – 1988. – Vol. 13. – № 3. – P. 263–304.
2. Johansson J.M., March S.T., Naumann J.D. Modeling Network Latency and Parallel Processing in Distributed Database Design // Decision Sciences Journal. – 2003. – Vol. 34. – № 4. – P. 677–706.
3. Ma H., Schewe K.-D., Wang Q. A heuristic approach to cost-efficient derived horizontal fragmentation of complex value databases // Eighteenth conference on Australasian database. Ballarat, Australia. – 2007. – P. 103–111.
4. Mukkamala R., Bruell S.C., Shultz R.K. Design of partially replicated distributed database systems: an integrated methodology // ACM SIGMETRICS conference on Measurement and modeling of computer systems. Santa Fe, New Mexico, United States. – 1988. – P. 187–196.
5. Kossmann D. The state of the art in distributed query processing // ACM Computing Surveys. – 2000. – Vol. 32. – № 4. – P. 422–469.
6. Ma H., Schewe K.-D., Wang Q. A heuristic approach to cost-efficient fragmentation and allocation of complex value databases // 17th Australasian Database Conference. Hobart, Australia. – 2006. – P. 183–192.
7. Johansson J.M., March S.T., Naumann J.D. The effects of parallel processing on update response time in distributed database design // Twenty first international conference on Information systems. Brisbane, Queensland, Australia. – 2000. – P. 187–196.

**Новосельский Вениамин Борисович** – ООО «ТиетоЭнатор», руководитель технической группы, veniaminn@gmail.com  
**Павловская Татьяна Александровна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, профессор, mux@tp2055.spb.edu

УДК 621.3.085.42

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ КОДОВОЙ ШКАЛОЙ НА ОСНОВЕ ПЕРЕСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

А.А. Ожиганов, Жуань Чжипэн

В статье рассматриваются принципы построения однопорочечных псевдослучайных кодовых шкал для преобразователей линейных перемещений, а также предлагается структура кодопреобразователя псевдослучайного кода в обыкновенный двоичный код.

**Ключевые слова:** кодовая шкала, М-последовательность, считывающие элементы.

### Введение

Технический прогресс в науке и технике непрерывно связан с широким использованием вычислительных и управляющих машин, специфика работы которых предопределила развитие устройств ввода-вывода информации в ЭВМ. Задачи названных устройств – преобразование поступающей информации в виде аналоговых сигналов в числовой эквивалент и преобразование кода в аналоговый сигнал.

Преобразователи угловых и линейных перемещений в цифровой код предназначены для решения первой задачи и являются одними из востребованных устройств ввода информации в ЭВМ. Можно назвать много объектов – летательные аппараты, корабли, астрономические инструменты, станки с программным управлением и т.д. – точность управления которыми, а также их надежность, в первую очередь, зависит от точности и надежности преобразователей перемещений в цифровой код.

В настоящее время можно проследить тенденцию в развитии преобразователей перемещений за счет совершенствования существующих и разработки новых типов кодирующих устройств преобразователей [1]. При этом наибольшее внимание уделяется улучшению технологических, надежностных, а также массо-габаритных характеристик преобразователей перемещений. Исследованию вопросов повышения качественных показателей устройств преобразования информации посвящено большое число работ, однако в большинстве случаев анализируются возможности улучшения свойств преобразователей при использовании классических принципов их организации.

В данной работе рассматривается принципиально новый подход к построению кодовых шкал преобразователей линейных перемещений, базирующийся на использовании псевдослучайных двоичных последовательностей максимальной длины (М-последовательностей). Основной отличительной чертой таких кодовых шкал является использование всего одной информационной кодовой дорожки, что, естественно, позволяет улучшить основные технологические характеристики преобразователей перемещения на их основе.

### Теоретические аспекты построения псевдослучайных кодовых шкал для преобразователей линейных перемещений

Круговая псевдослучайная кодовая шкала (ПСКШ) имеет всего одну информационную кодовую дорожку, выполненную в соответствии с символами М-последовательности, и  $n$  считывающих элементов (СЭ), размещенных вдоль дорожки. При полном перемещении шкалы считывающие элементы дают возможность получить  $M = 2^n - 1$  различных  $n$ -разрядных кодовых комбинаций, что обеспечивает разрешающую способность преобразователя угловых перемещений на основе ПСКШ  $\delta = 2\pi/M$  [2].

Для генерации М-последовательности  $\mathbf{a}$  длиной  $M = 2^n - 1$  используется примитивный полином  $h(x)$  степени  $n$  с коэффициентами поля Галуа GF(2) [3], т.е.

$$h(x) = \sum_{i=0}^n h_i x^i, \quad (1)$$

где  $h_0 = h_n = 1$ , а  $h_i = 0, 1$  при  $0 < i < n$ . Символы М-последовательности  $a_{n+j}$  удовлетворяют рекурсивному соотношению

$$a_{n+j} = \bigoplus_{i=0}^{n-1} a_{i+j} h_i, \quad j = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

где знак  $\bigoplus$  означает суммирование по модулю два, а индексы при символах М-последовательности берутся по модулю  $M$ . Начальные значения символов М-последовательности  $a_0 a_1 \dots a_{n-1}$  могут выбираться произвольно, за исключением нулевой комбинации.

М-последовательности относятся к классу циклических кодов и могут задаваться с помощью порождающего полинома  $g(x) = (x^M + 1) / h(x)$ . Для каждой М-последовательности длины  $M$  существует ровно  $M$  различных циклических сдвигов, которые могут быть получены путем умножения порождающего полинома  $g(x)$  на  $x^j$ , где  $j = 0, 1, \dots, M - 1$ .

Поскольку ПСКШ строятся в соответствии с символами М-последовательности, можно путем циклических сдвигов определить порядок размещения на шкале  $n$  СЭ, т.е.  $m$ -му СЭ,  $m = 1, 2, \dots, n$ , ставится в соответствие  $j_m$ -й циклический сдвиг  $x^{j_m} g(x)$  М-последовательности. Тогда полином, определяющий порядок размещения на шкале  $n$  СЭ, имеет вид

$$r(x) = \sum_{m=1}^n x^{j_m}, \quad (3)$$

где  $j_m \in \{0, 1, \dots, M - 1\}$ . Положив  $j_1 = 0$ , согласно (3), получим положения 2-го, 3-го, ...,  $n$ -го СЭ, смещенные относительно первого СЭ на  $j_2, j_3, \dots, j_n$  элементарных участков информационной дорожки шкалы соответственно [4].

Основные подходы к построению однодорожечных ПСКШ для преобразователей линейных перемещений рассмотрены в [5]. Разрешающая способность таких шкал  $\delta_n = L / M = L / (2^n - 1)$ , где  $L$  – длина кодируемого перемещения, а  $n$  – разрядность КШ.

В отличие от круговой шкалы, линейная ПСКШ разомкнута, поэтому для обеспечения заданной разрешающей способности шкалы необходимо получить соответствующую последовательность символов  $\mathbf{A} = \{A_i\}$ ,  $i = 0, 1, \dots$ , пригодную для синтеза единственной информационной дорожки линейной ПСКШ. Задача генерации последовательности  $\mathbf{A}$  в общем виде решается с использованием рекурсивного соотношения (2) в предположении, что размещение СЭ на ПСКШ корректно и задается полиномом (3). Для определенности начальные значения символов последовательности  $\mathbf{A}$  выбираются  $A_0 = A_1 = \dots = A_{n-2} = 0$ ,  $A_{n-1} = 1$ .

Очевидно, символы последовательности  $\mathbf{A}$  должны полностью включать в себя символы М-последовательности  $\mathbf{a}$ , а также некоторые дополнительные символы этой же последовательности, число которых зависит от выбранного полинома размещения  $r(x)$  на ПСКШ СЭ.

Определим разность между номерами циклических сдвигов М-последовательности, соответствующих размещению на шкале двух соседних СЭ, как  $d_i = j_m - j_{m-1}$ , где  $i = 1, 2, \dots, n - 1$ ,  $m = 2, 3, \dots, n$ . Тогда число применений рекурсивного

соотношения (2) при заданных начальных условиях, необходимое для генерации последовательности  $A$ , может быть получено по формуле

$$t = 2^n - (n + 1) + \sum_{i=1}^{n-1} d_i . \tag{4}$$

С учетом того, что

$$\sum_{i=1}^{n-1} d_i = d_1 + \dots + d_i + \dots + d_{n-1} = (j_2 - j_1) + \dots + (j_m - j_{m-1}) + \dots + (j_n - j_{n-1}) = j_n ,$$

соотношение (4) в конечном виде принимает вид

$$t = 2^n - (n + 1) + j_n . \tag{5}$$

Общее число символов последовательности  $A$  с учетом  $n$  задаваемых начальных значений может быть найдено из соотношения

$$T = 2^n + j_n - 1 . \tag{6}$$

Сформулируем основные принципы построения линейных ПСКШ.

1. В зависимости от требуемой разрядности линейной ПСКШ выбирается примитивный полином  $h(x)$ .
2. С учетом требований к размещению на шкале считывающих элементов формируется полином размещения  $r(x)$ .
3. На основе рекурсивного соотношения (2) с учетом выражений (5) и (6) генерируется последовательность  $A$ .
4. Рисунок линейной ПСКШ выполняется в соответствии с символами последовательности  $A$ , при отображении их на информационной дорожке шкалы, например, слева направо в последовательности  $A_0 A_1 \dots A_{T-1}$ .

Поясним изложенный принцип построения линейной ПСКШ на примере трехразрядной шкалы, которая приведена на рис. 1.

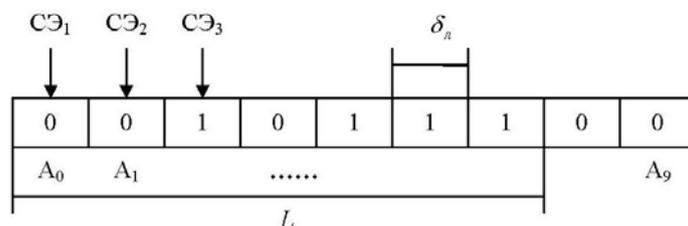


Рис. 1. Трехразрядная линейная ПСКШ с размещением СЭ в соответствии с полиномом  $r(x) = 1 + x + x^2$

Информационная дорожка шкалы соответствует символам последовательности 001011100, для построения которой использован примитивный полином  $h(x) = x^3 + x + 1$ . Размещение трех СЭ вдоль дорожки линейной ПСКШ определяется полиномом  $r(x) = 1 + x + x^2$ . В примере получаем семь различных трехразрядных кодовых комбинаций: 001, 010, 101, 011, 111, 110, 100. Из рис. 1 видно, что последовательно снимаемый со шкалы код отличается от обыкновенного двоичного кода (ОДК). Поэтому для преобразования такого кода в ОДК необходим кодопреобразователь.

### Преобразование псевдослучайных кодов в обыкновенный двоичный код

В данной работе задача преобразования псевдослучайного кода (ПК), получаемого с ПСКШ, в ОДК решена посредством пересчетной схемы (ПС). На рис. 2 приведена структура такого преобразователя. Операторный блок предназначен для преобразования ПК, снимаемого со шкалы, при произвольном полиноме размещения СЭ, заданного

в соответствии с соотношением (3), в код, получаемый с ПСКШ при размещении СЭ с шагом в один квант. Естественно, что при размещении СЭ на ПСКШ с шагом в один квант операторный блок в схеме кодопреобразователя отсутствует.

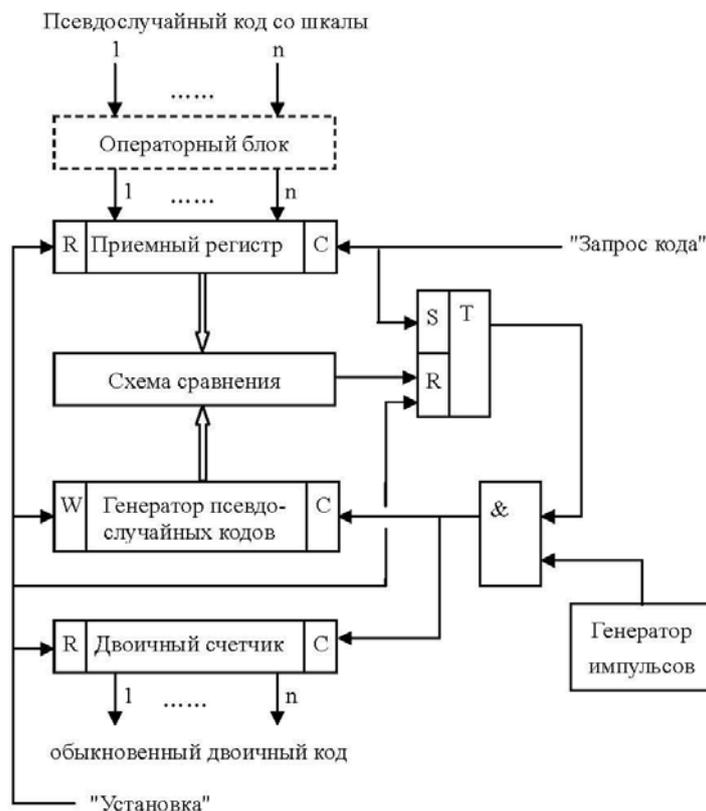


Рис. 2. Структура преобразователя псевдослучайного кода, получаемого с ПСКШ, в ОДК на основе ПС

Работа схемы осуществляется следующим образом. По сигналу «Установка» приемный регистр, двоичный счетчик и триггер устанавливаются в нулевое состояние. По этому же сигналу в генератор псевдослучайных кодов записывается код, соответствующий положению ПСКШ, принятому за исходное. По сигналу «Запрос кода» текущий псевдослучайный код со шкалы после преобразования в операторном блоке записывается в приемный регистр, триггер устанавливается в единичное состояние, и импульсы с генератора импульсов через вентиляющую схему начинают поступать на счетный вход двоичного счетчика и на вход синхронизации генератора псевдослучайных кодов.

Псевдослучайный код	Обыкновенный двоичный код
001	000
010	001
101	010
011	011
111	100
110	101
100	110

Таблица. Последовательность кодовых комбинаций, получаемых с ПСКШ и с выходов ПС

В момент совпадения кода, хранящегося в приемном регистре, и кода, снимаемого с генератора псевдослучайных кодов, на выходе схемы сравнения вырабатывается импульс, который сбрасывает триггер в нулевое состояние. После этого поступление импульсов через вентиляющую схему на входы генератора псевдослучайных кодов и двоичного счетчика прекращается.

С выхода счетчика снимается обыкновенный двоичный код, соответствующий текущему положению ПСКШ. Для приведенного примера трехразрядной шкалы операторный блок отсутствует, поскольку СЭ вдоль информационной дорожки ПСКШ размещаются с шагом в один квант. В таблице приведены кодовые комбинации, поступающие на вход ПС и получаемые на ее выходе.

### Заключение

В статье рассмотрены принципы построения одноканальных псевдослучайных кодовых шкал для преобразователей линейных перемещений, а также предложена структура кодопреобразователя псевдослучайного кода в обыкновенный двоичный код.

### Литература

1. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
2. Ожиганов А.А. Псевдослучайные кодовые шкалы // Приборостроение. – 1987. – Т. 30. – № 2. – С. 40–43.
3. Макуильямс Ф.Д., Слоан Н.Д. Псевдослучайные последовательности и таблицы // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64. – № 12. – С. 80–95.
4. Ожиганов А.А. Алгоритм размещения считывающих элементов на псевдослучайной кодовой шкале // Приборостроение. – 1994. – Т. 37. – № 2. – С. 22–27.
5. Ожиганов А.А. Псевдослучайные кодовые шкалы для преобразователей линейных перемещений // Приборостроение. – 1995. – Т. 38. – № 11–12. – С. 37–39.

*Ожиганов Александр Аркадьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ojiganov@mail.ifmo.ru  
*Жуань Чжипэн* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, zhipeng\_ruan@mail.ru

УДК 004.031.6

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА И СИНХРОНИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ВО ВСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ Д.Р. Ковязина

В статье рассматриваются два подхода, обеспечивающие воспроизведение точного астрономического времени во встраиваемых вычислительных системах (ВсС) малой временной точности – калибровка и синхронизация времени. В рамках первого подхода предлагается конкретное техническое решение, а в рамках второго подхода – метод синхронизации времени. Особое внимание уделяется автоматизации процедур коррекции времени в предложенных решениях.

**Ключевые слова:** калибровка времени, синхронизация времени, встраиваемые системы.

### Введение

Синхронизация времени во встраиваемых системах (ВсС) необходима для выполнения целевой функции – учета изменений параметров объекта управления, ведения журналов событий, выполнения действий по расписанию. В перечисленных примерах целью синхронизации времени является обеспечение точного астрономического времени в системе.

Современные ВсС можно поделить по временной точности на три сегмента (в скобках указаны типовые точностные показатели):

1. малая временная точность ( $\sim 1$  мин. – 1 с) – массовые системы телемеханики и телеуправления: системы управления наружным освещением (СУНО), автоматические системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), охранные системы;
2. средняя временная точность ( $\sim 0,1$ – 0,001 с) – промышленная автоматика;
3. высокая временная точность ( $10^{-6}$ – $10^{-9}$  с) – навигационные системы, военные метрологические системы, бортовые системы объективного контроля.

С ростом точностных требований по времени, предъявляемых к системам, увеличивается их сложность, стоимость, ресурсоемкость, ужесточаются требования по обеспечению надежности и безопасности. Однако на сегодняшний день для ВСС высокой и средней временной точности существует много решений проблемы обеспечения точного времени – это и специализированные серверы времени с соблюдением атомных стандартов точности, и избыточность эталонных источников, и сложные алгоритмы калибровки и синхронизации времени. Данные решения просто неприемлемы для применения в ВСС малой временной точности (ВСС МВТ), так как являются дорогими, сложными или недоступными для широкого круга разработчиков, требуют высоких вычислительных мощностей от компонентов системы. Кроме того, к методам коррекции времени в ВСС МВТ предъявляются следующие требования: обеспечение необходимой стабильности времени, масштабируемость, пониженное энергопотребление. Таким образом, присутствует дефицит эффективных решений для сегмента дешевых ВСС, хотя такие системы бурно развиваются сегодня и проникают во многие сферы.

Данная статья посвящена исследованию названных проблем для ВСС малой временной точности и предложению приемлемых для данных систем решений по обеспечению точного астрономического времени.

### Основные понятия

В современных ВСС одним из основных источников времени являются часы реального времени (Real-Time Clock, RTC). Так как часы реального времени являются физическим устройством, они испытывают на себе влияние физических факторов: кратковременные (помехи), умеренные по времени (колебания параметров окружающей среды, прежде всего температуры), долговременные (старение). Влияние этих факторов сказывается на главном счетном механизме – кварцевом генераторе, замедляя или ускоряя производимую им частоту. Поэтому важными параметрами кварцевого резонатора являются рабочий диапазон температур, отклонение частоты при нормальной температуре (статическая составляющая дрейфа), температурная стабильность (динамическая составляющая дрейфа), старение, нагрузочная емкость.

Чем выше требования к точности генерируемой частоты, тем сложнее будет устройство, тем тщательнее нужно относиться к перечисленным параметрам. Изменение любого параметра в лучшую сторону ведет к удорожанию часового устройства в принципе. Так, например, применение термокомпенсированного (Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO) или термостатированного (Oven Controlled Crystal Oscillator, OCXO) кварцевого генератора заметно улучшает параметр температурной стабильности (в десятки и тысячи раз соответственно) по сравнению с обычным кварцевым генератором [1]. С другой стороны, такое улучшение способствует удорожанию примерно в те же разы стоимости кварцев. Поэтому часы реального времени, использующие обычные кварцевые генераторы, имеют механизмы программной калибровки показаний времени.

Корректность показаний часов определяется в результате сравнения их с источниками точного времени (опорные часы, эталонные часы). Под точным реальным временем обычно понимается всеобщее скоординированное время (UTC). Синхронизация

времени корректирует показания часов. Калибровка времени корректирует частоту хода часов, минимизируя статическую, а иногда и динамическую составляющую дрейфа часов, что в результате влияет на показания часов. Калибровка времени просто необходима для автономных ВСС, синхронизация времени характерна для распределенных ВСС. Однако для распределенных ВСС с ненадежным (нестабильным) каналом связи необходимы обе процедуры коррекции времени. Простой метод синхронизации времени заключается в обыкновенной передаче временной метки от одного узла распределенной ВСС к другому (от сервера точного времени к клиенту), сложный метод синхронизации выполняет дополнительную обработку этих временных меток согласно определенному алгоритму. Таким образом, для калибровки времени главным является выбор эталонного источника времени; для синхронизации времени – выбор алгоритма согласования с опорным источником. Кроме того, калибровка времени производится на этапе пуско-наладочных работ, а синхронизация времени – во время эксплуатации ВСС.

Процедура калибровки времени – определение погрешности частоты часов относительно эталонного источника времени и расчет калибровочного коэффициента. Сегодня производители часов реального времени предлагают использовать для калибровки тестовый сигнал частотой 512 Гц, который генерируется часами в специальном режиме работы. Такие устройства в большом количестве представлены на рынке (Dallas Semiconductor, STMicroelectronics). Таким образом, это дополнение дает возможность значительно уменьшить продолжительность процедуры калибровки времени (секунды, минуты), автоматизировать ее, повысить точность. В этом случае метод определения погрешности частоты часов заключается в измерении частоты тестового сигнала часов (512 Гц) по опорному источнику с эталонной частотой. В рамках описанного метода было разработано конкретное техническое решение, которое называется «устройство калибровки часов».

### Устройство калибровки часов

В предлагаемом устройстве калибровки часов в качестве эталонного источника используется GPS-приемник, сигнал которого 1 Гц является опорным. Такой выбор обусловлен следующими факторами: простота и доступность, относительно низкая стоимость по сравнению с частотомерами, генераторами эталонных частот, высокая точность, портативность, возможность встраивания в автоматическую систему.

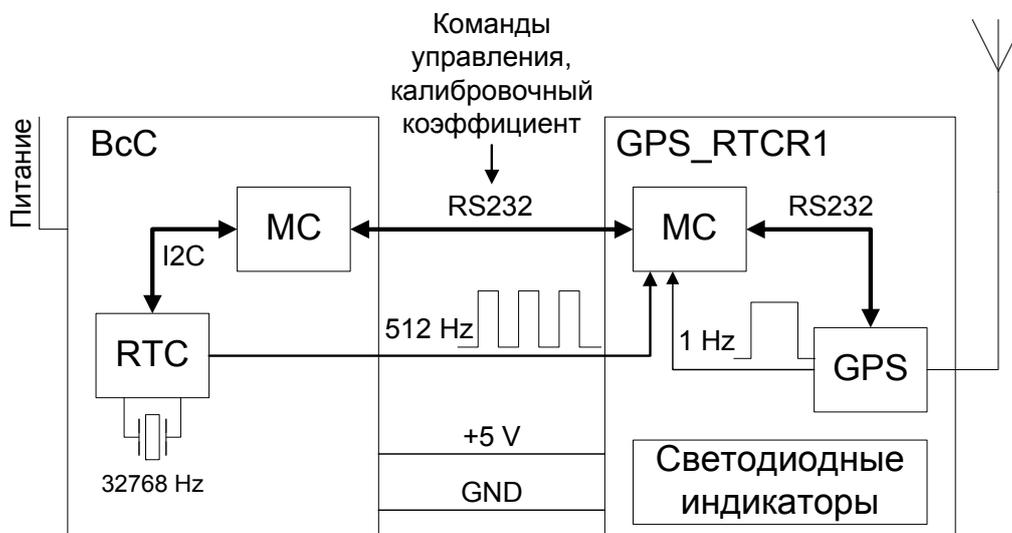


Рис. 1. Комплекс калибровки времени

На рис. 1 изображена структурная схема комплекса калибровки времени, в который входит калибруемый модуль ВcС и устройство калибровки часов (GPS\_RTCR1). Как видно из схемы, чтобы использовать устройство калибровки часов, в модуле ВcС необходимо поддерживать протокол связи по интерфейсу RS232, вывести тестовый сигнал 512 Гц RTC на внешний разъем, провести линии питания.

Вся вычислительная работа сосредоточена в устройстве калибровки часов и не требует участия человека. Устройство калибровки часов выполняет следующие функции:

1. расчет ошибки частоты 512 Гц RTC;
2. выявление неисправных часов;
3. расчет и запись калибровочного коэффициента RTC;
4. отслеживание пропадания сигнала 512 Гц и 1 Гц (GPS);
5. отображение этапов процедуры калибровки на светодиодах.

Точность времени (100 нс) и опорной частоты GPS объясняется тем, что приемник получает данные от нескольких атомных часов, которые находятся на спутниках; чаще всего встроенные часы приемника (термокомпенсированные или термостатированные) тоже обладают хорошей точностью и стабильностью работы [2].

Алгоритм работы устройства калибровки часов состоит из трех этапов: поиск GPS-спутников, измерение частоты тестового сигнала по эталонному и расчет калибровочного коэффициента. Связь с калибруемым модулем ВcС и запись в него калибровочного коэффициента находятся за пределами этого представления. Продолжительность процедуры калибровки составляет 2 мин. (второй этап), точность – 1 ppm (~2,6 с/месяц).

К достоинствам этого решения можно отнести простоту реализации и доступность, малую длительность процедуры калибровки. Существенным недостатком данного решения является ограниченная зона распространения радиосигнала. В результате неопределенность времени поиска GPS-спутников в начале процедуры калибровки делает неопределенной продолжительность всего процесса. Кроме того, при использовании GPS присутствует так называемая зависимость от другого государства (США). Практически во всех странах в настоящее время широко используется только GPS, нормальное функционирование которой целиком зависит от правительства США.

Как было отмечено ранее, калибровка времени выполняется на этапе производства ВcС единой. Однако условия эксплуатации вносят свои отрицательные коррективы в работу часов реального времени. Поэтому на этапе эксплуатации распределенных ВcС требуется использовать методы синхронизации времени для обеспечения точного времени в системе.

### Метод синхронизации времени

Условиями применения сложных методов синхронизации времени в распределенных ВcС МВТ являются:

- отсутствие внутреннего эталонного источника времени в узле;
- длительная передача сообщения между сервером и клиентом, превышающая допустимую погрешность;
- низкая точность внутреннего эталонного источника времени;
- высокая стоимость использования внутреннего эталонного источника времени узла.

Метод синхронизации времени может преследовать две цели – уменьшение задержки передачи, чтобы она укладывалась в разрешенную погрешность, либо точное определение задержки передачи. Снятие неопределенности задержки расширяет область применения метода синхронизации. Эта цель и преследуется предлагаемым методом синхронизации времени.

Предлагаемый метод синхронизации основан на положениях теории вероятностей и математической статистики. Сам алгоритм относится к виду синхронизации передатчик–приемник. Базовая концепция заимствована из протокола синхронизации времени NTP (Network Time Protocol) [3]. Она хорошо изложена в литературе, но этого недостаточно для практического использования. Поэтому была предложена конкретная реализация алгоритма, доработанная до метода, который может быть использован в распределенных ВСС малой временной точности.

Узел-клиент, который нуждается в корректировке времени, обменивается сообщениями с временными метками с узлом-сервером, имеющим эталонный источник времени.  $T_1$  – время передачи сообщения клиентом,  $T_2$  – время приема сообщения сервером,  $T_3$  – время передачи сообщения сервером,  $T_4$  – время приема сообщения клиентом. Клиент получает сообщение с временными метками  $T_1, T_2, T_3$  и сам делает временную засечку  $T_4$ , рассчитывает временной сдвиг *Offset* ( $O$ ) своих часов относительно эталонных часов сервера по формуле

$$O = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2}. \quad (1)$$

По рассчитанному значению временного сдвига клиент корректирует свои часы. Эта процедура повторяется некоторое количество раз для сбора статистики. Величина временного сдвига ( $O$ ) подчиняется закону нормального распределения [4]. Известно, что это наиболее часто встречающийся на практике закон распределения.

В данном случае  $x$  (случайная величина) – временной сдвиг (*Offset*). На рис. 2 изображена кривая Гаусса с  $m = 1, \sigma = 0,25$  ( $m$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение).

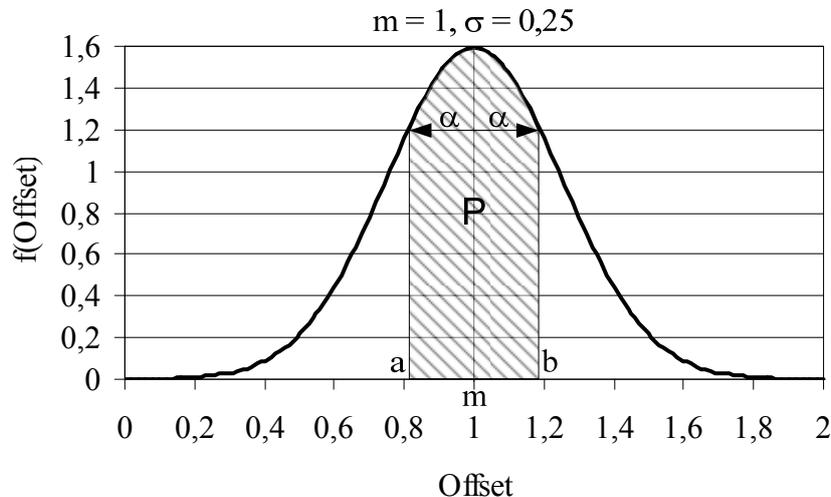


Рис. 2. Кривая Гаусса, отражающая возможное распределение временного сдвига (*Offset*) локальных часов

Задача заключается в определении временного сдвига ( $O$ ), т.е. его математического ожидания, с заданной точностью  $\alpha$ . Весь вопрос состоит в том, что является ограничивающим фактором в процессе выполнения процедуры синхронизации (обмена временными метками между клиентом и сервером), т.е. как долго он продолжается. Можно было бы, грубо упрощая, считать, что этот процесс выполняется до тех пор, пока рассчитываемое среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  не достигнет точности  $\alpha$  ( $\sigma \leq \alpha$ ). Но это не соответствует действительности, так как мы имеем дело с вероятностными величинами.

На графике распределения вероятность попадания случайной величины  $x$  в интервал  $[a, b]$  – это площадь под кривой  $P$  (рис. 2). В данном случае известно «правило

трех сигма» для нормального закона можно интерпретировать так: если необходимо, чтобы точность коррекции часов равнялась  $\alpha$  для 99,7 % значений рассчитанных временных сдвигов (*Offset*), то  $\alpha = 3\sigma$ . А это значит, что процедура синхронизации выполняется до того момента, пока не станет  $\sigma \leq \frac{1}{3}\alpha$ . Таким образом, временной сдвиг

$m - \alpha \leq \text{Offset} \leq m + \alpha$ . Поэтому подготовительным этапом для реализации предложенного алгоритма является составление таблицы множителей, на которые необходимо умножить требуемую точность, и вероятностей выполнения заданного условия. Например, в описанном ранее примере множитель равен 1/3, а вероятность – 99,7 %. Такую таблицу можно использовать на практике в любой системе, так как при создании таблицы применялись значения функции Лапласа (вычисление квантилей функции нормального распределения) и ничего специализированного под конкретную систему. Эта информация может служить в качестве конфигурационных данных системы. К ограничивающим факторам (требуемая вероятность и точность) следует добавить максимальное количество сообщений с временными метками, необходимых для синхронизации.

Вызов процедуры синхронизации должен выполняться автоматически в случае обнаружения ошибки локальных часов в узле-клиенте и истечения периода синхронизации. Величина периода выбирается с ориентацией на худший показатель дрейфа часов узла-клиента, т.е. таким образом, чтобы потеря точности в результате дрейфа не превышала допустимой погрешности. Надежность в этом подходе обеспечивается многократностью выполнения операции обмена временными метками, а также предусмотренными для используемого канала связи механизмами отказоустойчивости (например, информационной избыточностью).

Гибкость и аппаратная независимость – достоинства предложенного метода. Кроме того, вся обработка сосредоточена в узле-клиенте, сервер только предоставляет точные показания времени по запросу клиента. Метод построен на допущении, что время передачи сообщения-запроса равно времени передачи сообщения-ответа. Недостатками предложенного метода являются сложность, необходимость подготовительной работы (составление таблицы множителей), возможная длительность выполнения в случае медленного канала связи, что отражается на реактивности системы в целом.

### Заключение

В статье предлагается конкретное техническое решение (устройство калибровки часов) и метод синхронизации времени, которые могут быть применены в ВСС малой временной точности. Оба решения могут быть автоматизированы.

Разработанное устройство калибровки часов было успешно использовано на этапе тестирования изделия ООО «ЛМТ» CSC-1.1/Г – программируемого таймера для систем управления наружным освещением [5]. Длительность процедуры калибровки времени, использовавшейся до этого, составляла 1 неделю. Устройство калибровки часов помогло сократить эту величину до 2 мин., тем самым уменьшило в целом длительность производства изделия и повысило точность процедуры калибровки (~2,6 с/месяц).

Предложенный метод синхронизации времени требует дальнейших исследований, прежде всего, для выяснения его точностных характеристик. Достоинствами метода являются гибкость и аппаратная независимость. Изложенного в статье материала достаточно, чтобы применить этот метод в любой распределенной ВСС малой временной точности.

## Литература

1. John R. Vig. Quartz Crystal Resonators and Oscillators. For Frequency Control and Timing Applications – a Tutorial // US Army Communications–Electronics Research, Development & Engineering Center Fort Monmouth, NJ, USA, 2004.
2. GPS Modules. System Integration Manual (SIM). Doc No GPS.G4–MS4–05007, 2006.
3. Mills D. L. Improved Algorithms for Synchronizing Computer Network Clocks // Electrical Engineering Department, University of Delaware, 1994.
4. Elson J., Girod L., Estrin D. Fine–Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts // Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, 2002.
5. Научно–производственная фирма «ЛМТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lmt.ifmo.ru>, своб.

*Ковязина Динара Раисовна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [dinara\\_k@list.ru](mailto:dinara_k@list.ru), [dinara@d1.ifmo.ru](mailto:dinara@d1.ifmo.ru)

УДК 004.514

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ  
ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА**

Д.А. Кораблев

В работе описываются основные принципы построения эффективного пользовательского интерфейса систем электронного документооборота. Приводятся методики применения принципов. Рассматриваются положительные примеры использования принципов проектирования в существующих системах электронного документооборота.

**Ключевые слова:** пользовательский интерфейс, электронный документооборот, принципы построения.

**Введение**

Электронный документооборот, или, более широко, автоматизация процессов подготовки и согласования документов, находит все большее применение в различных сферах деятельности бизнеса и государства. Согласно отчету Gartner, в настоящее время в мире насчитывается более 70 млн. пользователей систем электронного документооборота. При этом мировой рынок систем документооборота является одним из быстрорастущих – по оценкам IDC, его рост составляет до 47,2% в год. В России наблюдается похожая ситуация – исследования определяют объем рынка систем электронного документооборота в России в 2008 г. на уровне \$170 млн., при этом отмечается тенденция к его увеличению. Однако применение систем документооборота сопряжено с рядом трудностей как организационного, так и технического характера.

Взаимодействие пользователя с системой управления документами обеспечивает пользовательский интерфейс, набор инструментов которого дает пользователю возможность осуществлять все необходимые операции над информацией, содержащейся в базе данных: создавать, удалять, просматривать, редактировать карточки документов и данные, хранящиеся в справочниках; осуществлять поиск необходимых документов в соответствии с заданными критериями; исполнять задания и поручения, необходимые для движения документов и выполнения бизнес-процессов внутри организации. Следовательно, от эффективности и качества интерфейсов во многом зависит эффективность и качество результатов работы пользователей с системами документооборота [1].

На основании анализа работ [1–14], посвященных разработке пользовательских интерфейсов, можно выделить наиболее значимые принципы, представленные ниже.

**Пользовательские интерфейсы**

**Золотое сечение** – это самая комфортная для глаза пропорция. Форма, в основе построения которой лежит сочетание симметрии и золотого сечения, способствует наилучшему зрительному восприятию и появлению ощущения красоты и гармонии. Золотое сечение – это пропорциональное деление отрезка на неравные части, при котором весь отрезок так относится к большей части, как сама большая часть относится к меньшей; или, другими словами, меньший отрезок так относится к большему, как больший ко всему:  $a : b = b : c$  или  $c : b = b : a$ .

Отрезки золотой пропорции выражаются бесконечной иррациональной дробью 0,618..., если  $c$  принять за единицу,  $a = 0,382$ . Отношение же отрезков  $a$  и  $b$  составляет 1,618.

С золотым сечением связано имя итальянского математика Фибоначчи. Ряд чисел 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55 и т.д. известен как ряд Фибоначчи. Каждый член ряда, начиная с третьего, равен сумме двух предыдущих, а отношение смежных чисел ряда приближается к отношению золотого сечения ( $21: 34 = 0,617$ ;  $34: 55 = 0,618$ ).

К главным задачам эффективного дизайна пользовательского интерфейса относятся ясность, интуитивность, а также концентрация внимания пользователя на нужных местах страницы [2]. У пользователей должно присутствовать ощущение баланса, порядка, гармонии и комфорта. Именно для этого применяют принцип золотого сечения. Охарактеризуем применение принципа золотого сечения при построении пользовательских интерфейсов.

- Все окна, предоставляемые пользователю для работы, необходимо проектировать таким образом, чтобы соотношение ширины и высоты равнялось золотой пропорции 0,618.
- Если в информационной области окна расположено два функционально различных блока, целесообразно разместить их таким образом, чтобы их соотношение по ширине равнялось золотой пропорции 0,618.
- Если информационная область содержит в себе разнотипные элементы, такие как кнопки, поля ввода и др., то необходимо размеры окна и элементов строить в соответствии с рядом Фибоначчи.

Проиллюстрируем применение принципа золотого сечения в системах автоматизации документооборота. Допустим, макет страницы имеет фиксированную ширину, 960 px, и содержит два основных блока – таблицу документов и список папок (в примере рассмотрен интерфейс системы управления документооборотом компании ЮТК [3]), тогда они будут поделены так, как показано на рис. 1.

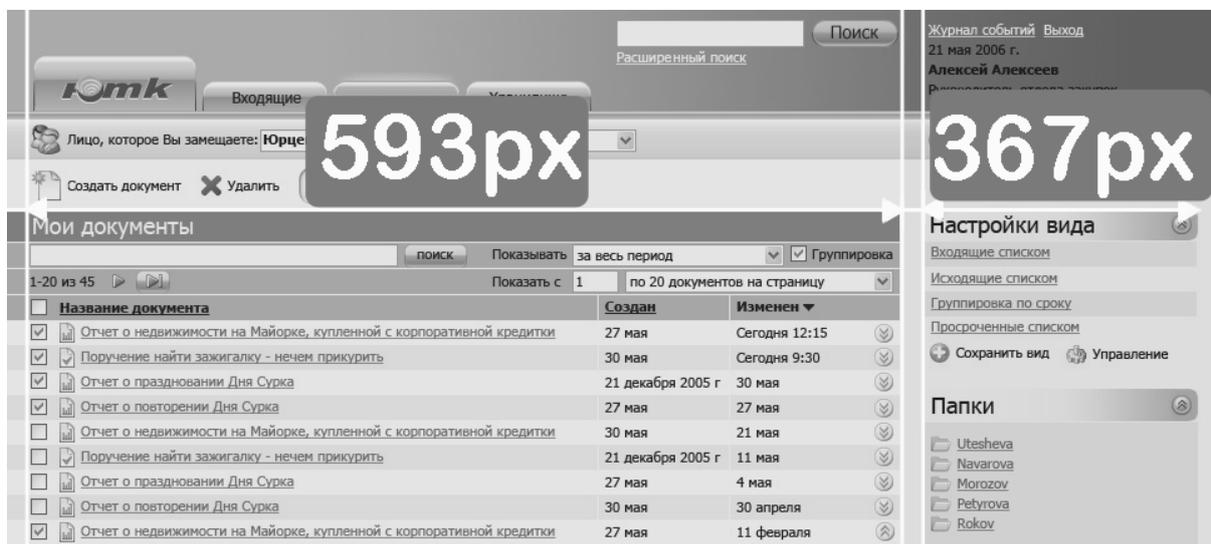


Рис. 1. Интерфейс системы управления документооборотом компании ЮТК

Хотя дизайн страницы не совсем соответствует принципам золотого сечения, пользователи этого не чувствуют, так они интуитивно разделяют макет на два отдельных блока (шириной 593 px и 367 px), а свободное пространство между блоками на экране является пассивным и «отфильтровывается» при просмотре.

**Принцип группировки.** Согласно принципу группировки, экран программы должен быть разбит на ясно очерченные блоки элементов, может быть, даже с заголовком для каждого блока. При этом группировка должна быть осмысленной, расположение элементов в группах и расположение самих групп друг от друга должны быть продуманы.

Интерфейс программы, в котором группы элементов разделены, «сканируется» пользователем значительно быстрее обычного, поскольку в таком случае больше «точек привязки» (как и в меню с пиктограммами). К тому же наличие явных разделителей многократно облегчает построение ментальной модели, поскольку не приходится гадать, как связаны между собой элементы. Наконец, в объемных интерфейсах группировка элементов облегчает создание кластеров в кратковременной памяти.

Применение принципа:

- однотипные задачи объединять в отдельные группы, отделенные друг от друга визуальным разделителем;
- схожие действия, выполняемые программой, объединять в пункты меню;
- группировать подобные инструменты в соответствующие панели инструментов.

Существует два основных способа разделять группы: между группами можно помещать пустой элемент (разделитель) или же размещать отдельные группы в разных уровнях иерархии. Для разграничения групп традиционно используют полосы.

Хороший пример системы, использующей принцип группировки, – интерфейс системы документооборота СИБУР [6] (рис. 2). Все однотипные задачи, выполняемые пользователем, сгруппированы, озаглавлены и визуально отделены друг от друга.

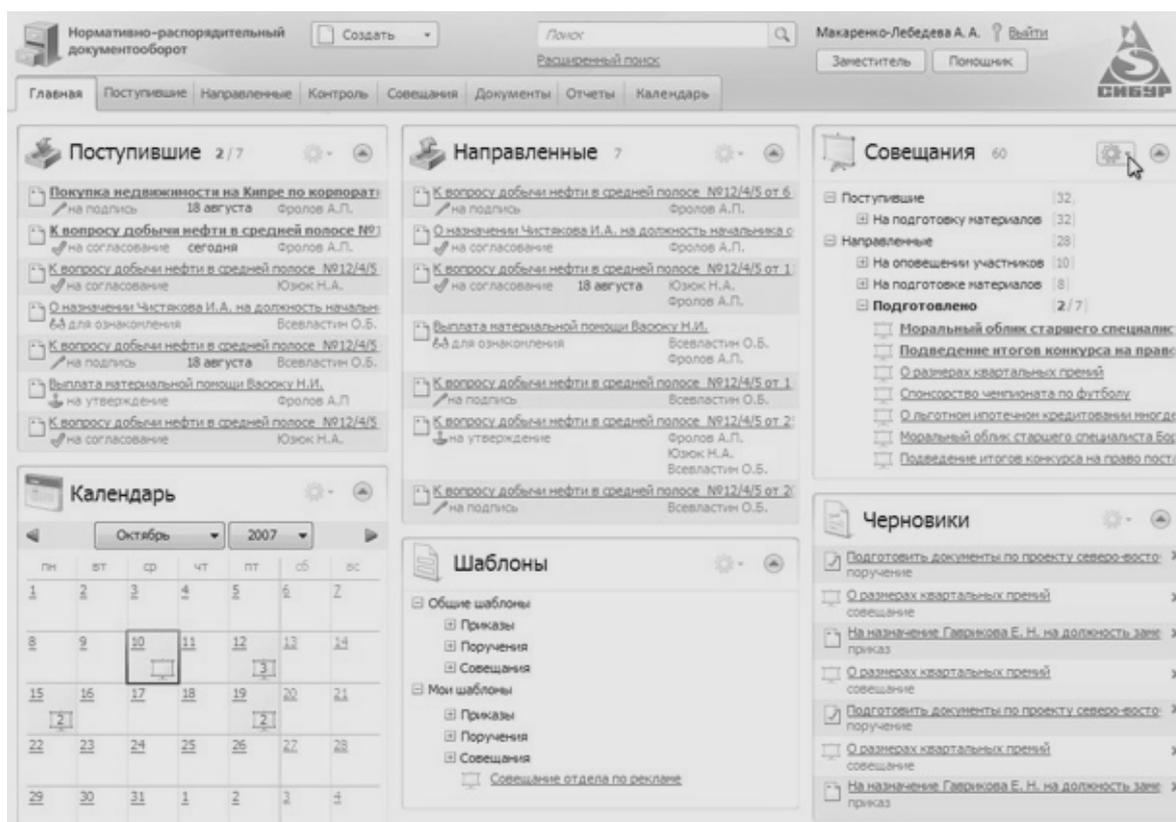


Рис. 2. Интерфейс системы управления документооборотом СИБУР

**Кошелек Миллера.** Принцип назван в честь ученого-психолога Г.А. Миллера, который исследовал кратковременную память, проверяя выводы, сделанные ранее его

коллегой Г. Эббингаузом. Эббингауз пытался выяснить, сколько информации может запомнить человек без каких-либо специальных мнемонических приемов. Оказалось, что емкость памяти ограничена семью цифрами, семью буквами или названиями семи предметов. Это «магическое число» 7, служащее своего рода меркой памяти, и было проверено Миллером, который показал, что память действительно в среднем не может хранить более семи элементов; в зависимости от сложности элементов это число может колебаться в пределах от пяти до девяти.

Применение принципа:

- количество пунктов меню не должно превышать 7–9;
- количество кнопок на панелях инструментов не должно превышать 7–9;
- количество опций на каждой закладке также не должно превышать 7–9;
- если количество элементов, соответствующих пп. 1–3, превышает 9, необходимо создать дополнительный уровень группировки (смотри предыдущий раздел).

Хорошим примером применения данного принципа служит главное окно системы документооборота «Босс-Референт» [7] (рис. 3): тринадцать кнопок на левой панели, между которыми есть три визуальных разделителя, воспринимаются гораздо лучше, чем если бы кнопки шли единым блоком. Можно заметить, что число пунктов меню не доходит до семи, а в основном элементов меньше. Такие небольшие группы объектов хорошо воспринимаются взглядом пользователя, уже слегка утомленного сложными интерфейсами современных программ.

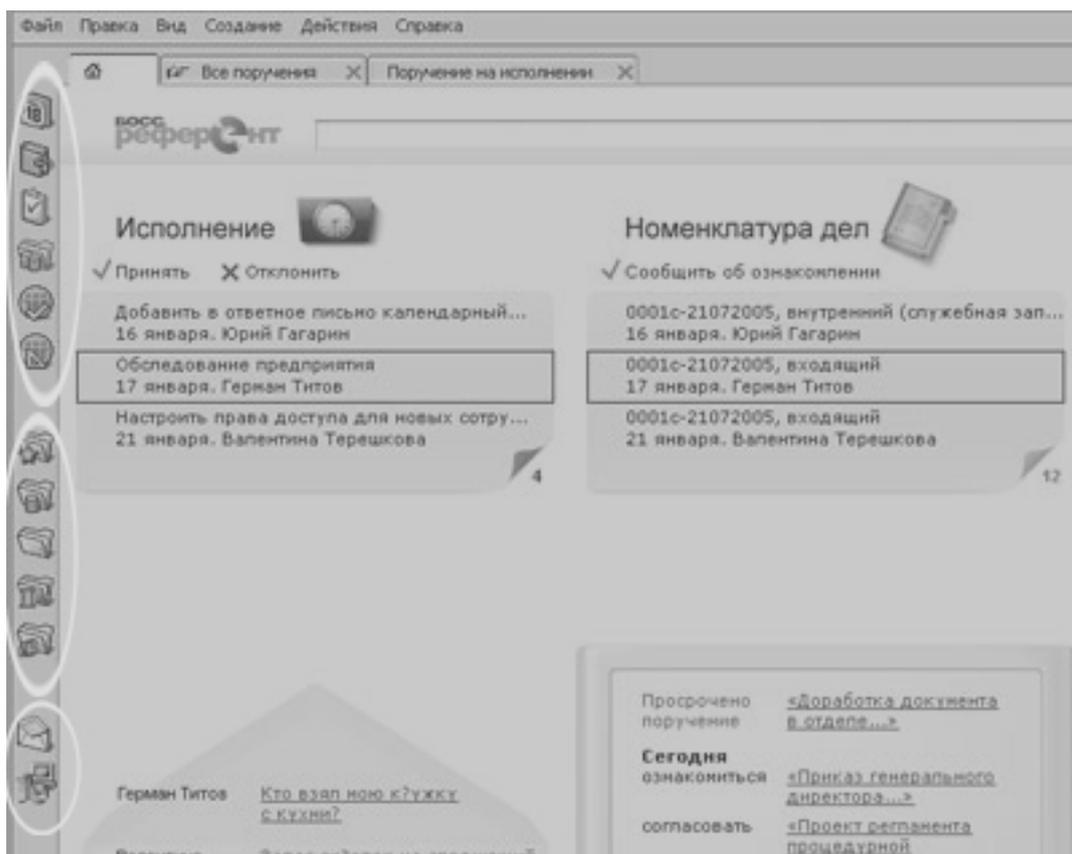


Рис. 3. Интерфейс системы управления документооборотом «Босс-Референт»

### Обратная связь

Финальной фазой любого человеческого действия является оценка его результата. Если нажатие на кнопку не дало никакого подтверждения о том, что операция произведе-

дена успешно, человек нажмет кнопку еще раз, думая, что он сделал что-то неправильно. Каждое действие пользователя должно получать визуальное, а иногда и звуковое подтверждение того, что программное обеспечение восприняло введенную команду [8]. Отсутствие достаточной обратной связи гарантированно приводит к фрустрации и является одной из самых опасных ошибок при проектировании интерфейса.

Применение принципа:

- реализовывать обратную связь как можно ближе к точке последнего взаимодействия пользователя с системой;
- предоставить пользователю информацию относительно состояния процесса, особенно если данный процесс выполняется в течение длительного времени. К таким процессам относятся сортировка документов, хранение документов на медленных носителях, печать;
- предоставлять пользователю возможность прервать длительный процесс.
- во время работы с документами выделять цветом поля ввода, которые пользователь не заполнил или заполнил неверно.

Отсутствие достаточной обратной связи гарантированно приводит к фрустрации и является одной из самых опасных ошибок при проектировании интерфейса [9]. Хороший пример обратной связи – работа системы управления документооборотом компании ЮТК (рис. 4): если пользователь допустил ошибку в заполнении, он сразу получает уведомление об этом.

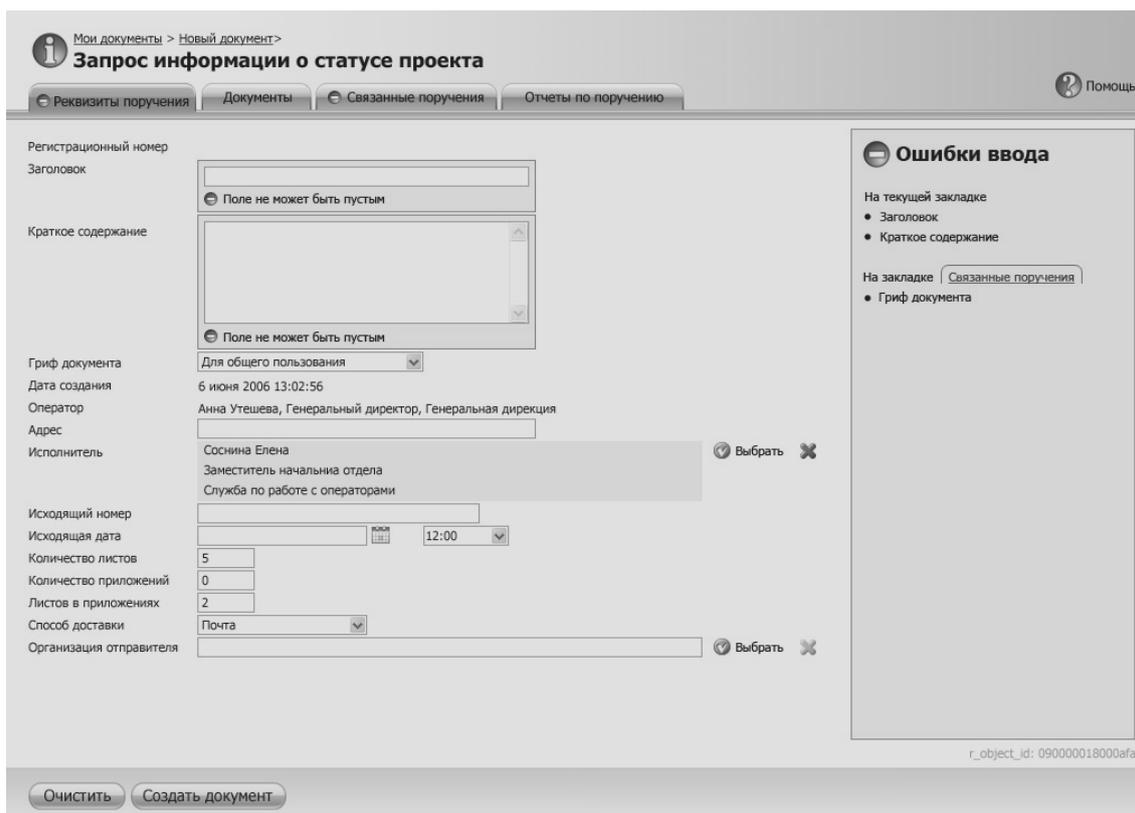


Рис. 4. Интерфейс системы управления документооборотом компании ЮТК

**Ограничение количества основных цветов.** Принцип предполагает использование ограниченного числа основных цветов в программе – не более трех, исключая, конечно, оттенки. При правильном использовании цвета в интерфейсе системы документооборота можно более эффективно управлять вниманием пользователя к отдельным

частям интерфейса, а также заметно улучшить внешний вид приложения. С другой стороны, неправильное использование цвета может серьезно навредить эффективному использованию программного продукта. Цвет является сильным средством привлечения внимания, обилие оттенков заставит пользователей обратить внимание на экран [10]. Это помогает сделать интерфейс более дружелюбным и легким в использовании. Однако такой «эффект Лас-Вегаса» может и отвлекать пользователей при работе. «Цветные» интерфейсы выглядят теплыми и дружественными, поскольку полны ярких цветов, привлекают клиентов и пользователей, но когда те часами сидят перед экраном компьютера, им не нужны яркие краски, отвлекающие от работы. Так что при разработке следует ограничиться тремя–четырьмя основными оттенками.

Применение принципа:

- интерфейс системы документооборота должен быть спроектирован таким образом, чтобы основная часть программы была выполнена одним цветом;
- все поля ввода должны быть выполнены одним цветом;
- неизменяемая часть интерфейса должна иметь цвет, отличный от цвета полей ввода и основного цвета;
- поля, обязательные для заполнения и необязательные, должны быть выполнены в разных цветах.

Хорошим примером служит интерфейс системы документооборота «ЕВФРАТ» [11] (рис. 5), в котором используется не более трех основных цветов.

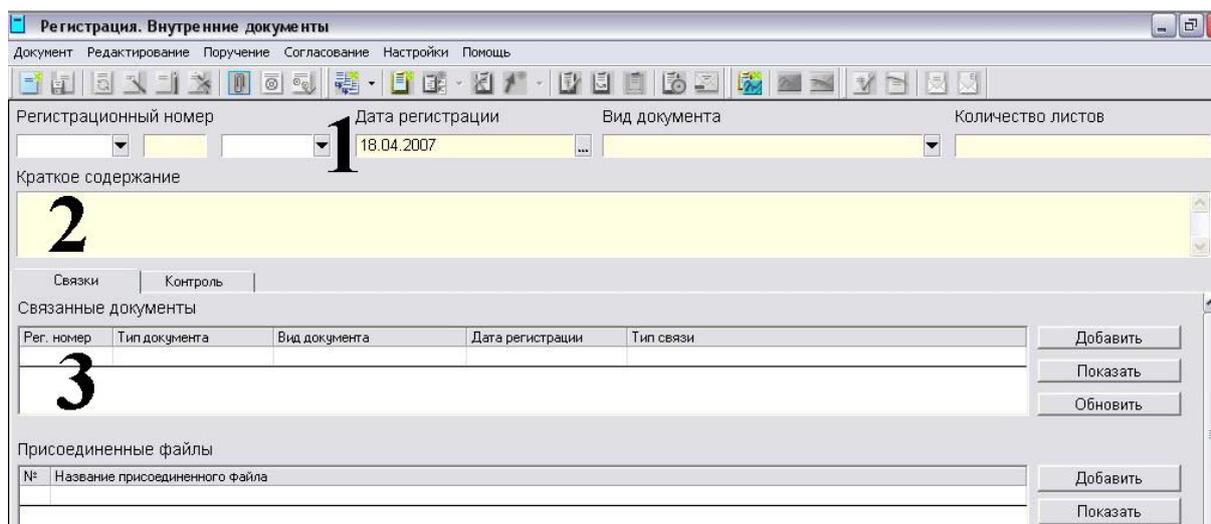


Рис. 5. Интерфейс системы управления документооборотом «ЕВФРАТ»

**Видимость отражает полезность.** Смысл этого принципа состоит в том, чтобы вынести самую важную информацию и элементы управления на первый план и сделать их доступными пользователю, а менее важную переместить, например, в меню. Интерфейс программы должен быть построен вокруг объектов, с которыми манипулирует пользователь, и отражать состояние текущего объекта.

Применение принципа:

- при выборе различных объектов (текст, таблицы, графика) пункты меню для работы с ними должны меняться в соответствии с выбранным объектом;
- аналогично должны меняться панели инструментов;
- при выделении объекта нужно выводить рядом всплывающее меню с перечнем характерных операций;

– первоначально на экране должно присутствовать минимальное количество компонентов, а все редко используемые элементы должны быть убраны в пункты меню.

Хорошим примером применения этого принципа являются контекстные панели инструментов системы «Босс-Референт» (рис. 6), которые меняются в зависимости от того, с какой частью программы в данный момент работает пользователь.

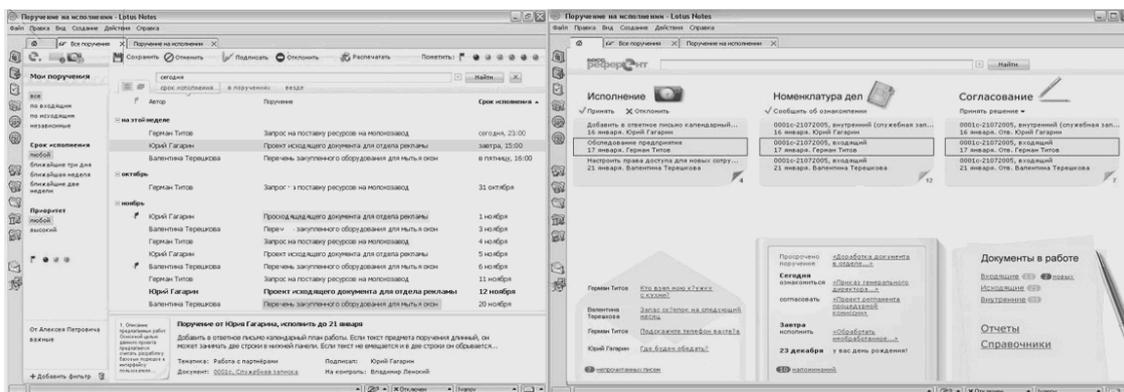


Рис. 6. Интерфейс системы управления документооборотом «Босс-Референт»

**Умное заимствование.** Базовое заимствование – это использование стандартных элементов, общих для всех программ Windows (меню, списки, кнопки и т.п.). Это позволяет легко добиться последовательности в интерфейсе. Заимствование широко распространенных приемов дизайна интерфейсов и удачных находок авторов конкурирующих программ позволяет резко сократить время обучения и повысить комфорт пользователя. При работе он будет использовать уже приобретенные навыки – этот вопрос затрагивает и принцип равенства между системой и реальным миром [12].

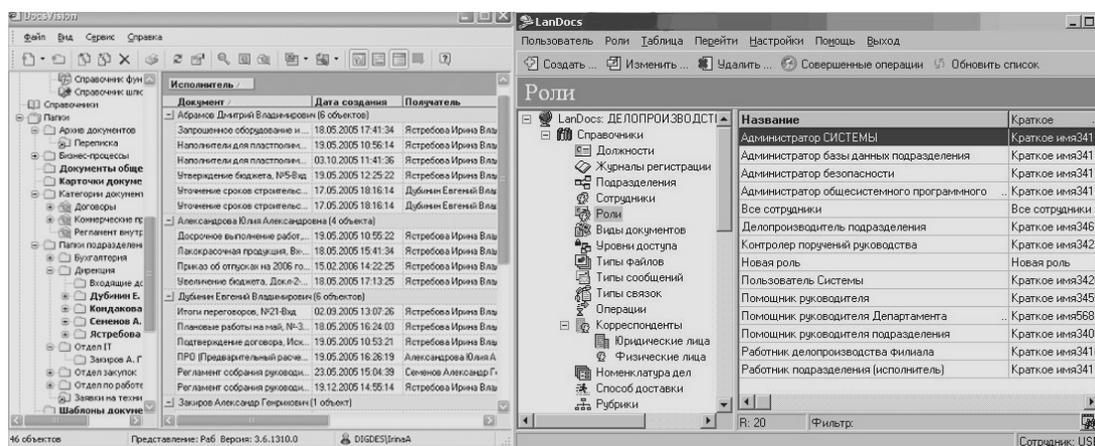


Рис. 7. Интерфейс систем управления документооборотом «DocsVision» и «LanDocs»

Применение принципа:

- при сохранении документа использовать стандартное диалоговое окно операционной системы или внешне похожее на него;
- при выборе цвета и шрифта интерфейса использовать стандартное диалоговое окно операционной системы;
- использовать в системе документооборота стандартную раскладку горячих клавиш операционной системы;
- организовать визуальное сходство кнопок и иконок системы с аналогичными элементами операционной системы, под которую ведется разработка.

Программы, лидирующие на рынке, часто обладают схожим дизайном, например интерфейс системы «DocsVision» [13] (рис. 7, слева) и интерфейс системы «LanDocs» [14] (рис. 7, справа).

### Заключение

Рассмотренные принципы построения пользовательских интерфейсов позволяют разработать эффективный пользовательский интерфейс систем электронного документооборота. Без их использования возникает риск получить громоздкий и неудобный для пользователя продукт. Развитие систем электронного документооборота показывает, что конкуренция продуктов из области функциональности перемещается в область удобства и комфортности их для пользователей. В этих условиях принципы проектирования становятся технологиями, обеспечивающими рыночный успех проекту.

### Литература

1. Проектирование пользовательского интерфейса на персональных компьютерах. Стандарт фирмы IBM. Вильнюс: DBS Ltd, 1992.
2. Гультияев А.К., Мишин В.А. Проектирование и дизайн пользовательского интерфейса. – СПб: КОРОНА-принт, 2000.
3. Система управления документооборотом компании ЮТК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stcompany.ru/>, свободный.
4. Жарков С.В. Shareware: профессиональная разработка и продвижение программ. – СПб: ВНУ-СПб, 2002.
5. Тео Мандел. Дизайн интерфейсов. – М: ДМК пресс, 2005.
6. Интерфейс системы документооборота СИБУР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stcompany.ru/>, свободный.
7. Система «Босс-Референт» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.boss-referent.ru/>, свободный.
8. Головач В.В. Дизайн пользовательского интерфейса II. Искусство мыть слона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://uibook2.usethics.ru/>, свободный
9. Тидвел Дж. Разработка пользовательских интерфейсов. – СПб: Питер, 2008.
10. Раскин Дж. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем. – М.: Символ-Плюс, 2005.
11. Система электронного документооборота и автоматизации делопроизводства «ЕВФРАТ-Документооборот» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.evfrat.ru](http://www.evfrat.ru), свободный.
12. Торрес Р. Дж. Практическое руководство по проектированию и разработке пользовательского интерфейса. – М.: Вильямс, 2002.
13. Организация документооборота и бизнес-процессов на современном предприятии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.docsvision.com](http://www.docsvision.com), свободный.
14. Система LanDocs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.landocs.ru](http://www.landocs.ru), свободный.

*Кораблев Дмитрий Александрович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики, аспирант, [dmitriikorablev@inbox.ru](mailto:dmitriikorablev@inbox.ru)

УДК 681.4

## ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕГАНОАЛГОРИТМОВ ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНО- КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Н.Н. Прохожев, О.В. Михайличенко, А.Г. Коробейников

В статье рассматривается методика повышения устойчивости стеганоалгоритмов, использующих дискретно-косинусное преобразование (ДКП) в графических стеганоконтейнерах. Исследования проводятся на примере двухкоэффициентного алгоритма Коха–Жао. Проводится оценка искажений в результате внешних воздействий на информацию, встроенную в стеганоконтейнер. В качестве внешних воздействий применяются наиболее распространенные виды обработки изображений, такие как сжатие JPEG с потерями, фильтрация, зашумление и масштабирование. Рассматриваются способы повышения устойчивости путем выбора наиболее оптимальных областей встраивания.

**Ключевые слова:** стеганография, алгоритмы частотной области, сжатие JPEG.

### Введение

Стеганографические алгоритмы на основе ДКП представляют собой большую группу и широко применяются в стеганографических системах для встраивания цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в неподвижные изображения-контейнеры. Эти алгоритмы позволяют внедрять ЦВЗ с очень высоким уровнем скрытности и малыми значениями искажений контейнера. Еще одним значительным плюсом методов на основе ДКП является совместимость с таким широко распространенным стандартом хранения цифровых изображений, как JPEG. Большинство алгоритмов использует ЦВЗ в виде битовых последовательностей, с помощью которых очень удобно представлять строки символов или битовые изображения. Внедренная информация может однозначно подтверждать авторство или права собственности на защищаемое изображение. Однако, вследствие случайного или злонамеренного внешнего воздействия на изображение-контейнер, внедренная в него информация может быть повреждена или даже полностью уничтожена. Целью данной работы является разработка методики повышения устойчивости алгоритмов частотной области встраивания в коэффициенты ДКП.

### Алгоритм встраивания ЦВЗ

Большинство алгоритмов, встраивающих информацию в область коэффициентов ДКП, кодируют встраиваемый бит информации путем модификаций пар, троек или множества коэффициентов матрицы ДКП. Для проведения оценки в работе использован двухкоэффициентный алгоритм Коха–Жао (Koch–Zhao). В алгоритм заложены принципы, являющиеся базовыми для целого семейства алгоритмов частотной области. Данный алгоритм хорошо приспособлен для использования в изображениях, подвергающихся сжатию JPEG или даже для внедрения ЦВЗ непосредственно в JPEG-поток.

### Оценка устойчивости алгоритма

Методика определения устойчивости того или иного алгоритма или стеганосистемы в целом состоит из следующих шагов:

1. скрываемая информация внедряется в контейнер;
2. контейнер подвергается внешнему воздействию или атаке;
3. скрытая информация извлекается из контейнера;

4. извлеченная информация сравнивается с оригинальной и определяется степень их соответствия.

На рис.1 представлена последовательность действий при определении устойчивости алгоритма к внешним воздействиям на изображение-контейнер [1].

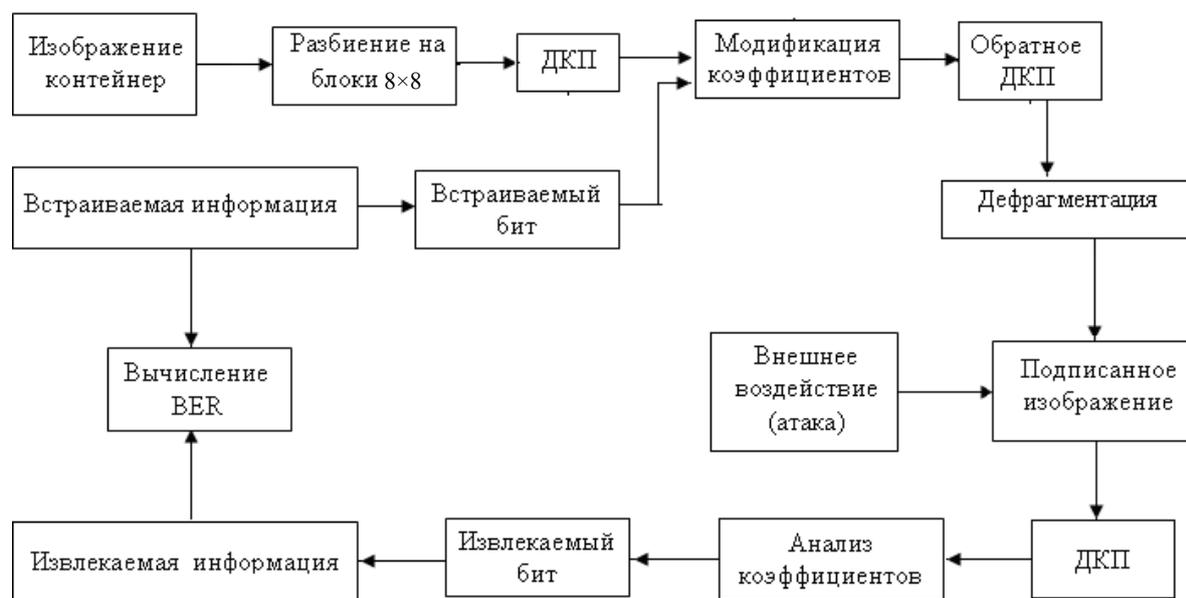


Рис. 1. Модель оценки устойчивости алгоритма к внешним воздействиям

### Количественная оценка потерь информации

В качестве тестового изображения контейнера было использовано 10 полутонных естественных изображений размером  $600 \times 800$  пикселей. Соответствие внедренной и извлеченной после внешнего воздействия на контейнер информации оценивается с помощью коэффициента ошибочных бит BER (Bit Error Rate) [2]:

$$\text{BER}(S, S'') = \frac{\sum p_i}{N},$$

где

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i \neq S''_i, \\ 0, & \text{если } S_i = S''_i, \end{cases}$$

$S_i$  –  $i$ -й бит оригинала встраиваемой строки;  $S''_i$  – бит извлеченной строки;  $N$  – общее количество бит.

### Повышение устойчивости встроенной информации

Традиционно для встраивания внедряемого бита информации используются коэффициенты диапазона среднечастотных компонент изображения (СЧ). Это обусловлено тем, что внедрение ЦВЗ в высокочастотные компоненты считается крайне неустойчивым, а использование низкочастотных компонентов (НЧ) приводит к слишком серьезным искажениям контейнера. Поэтому большинство авторов используют небольшой диапазон коэффициентов, лежащих вдоль второстепенной диагонали матрицы ДКП. Таким образом, соблюдается некоторый компромисс между устойчивостью и скрытостью изображения.

Оценим, насколько оправдан такой подход. В ходе исследований был проведен следующий эксперимент. Коэффициент матрицы ДКП разных частотных компонентов изменялся в некотором диапазоне и измерялся уровень искажений изображения. Уровень искажений оценивался при помощи соотношения сигнал/шум (PSNR), вычисляемого по формуле [1]:

$$\text{PSNR} = 10 \lg_{10} \frac{XY \cdot \max_{x,y} (C_{x,y})^2}{\sum_{x,y} (C_{x,y} - S_{x,y})^2},$$

где  $X, Y$  – размер изображения,  $C_{x,y}$  – значение пикселя изображения-оригинала,  $S_{x,y}$  – значение пикселя изображения после добавления шума. По результатам эксперимента было установлено, что уровень искажений, измеряемый соотношением сигнал/шум, не зависит от принадлежности коэффициента к той или иной группе частотных компонент. Разумеется, такое измерение искажений не совсем корректно, поскольку PSNR слабо коррелирует с системой человеческого зрения. Действительно, при визуализации артефактов внедрения низкочастотные компоненты проигрывают высокочастотным за счет более крупных деталей артефактов, тогда как высокочастотные артефакты больше напоминают шум. Но такая ситуация наблюдается только при визуализации артефактов, когда же уровень искажений ниже порога восприятия, качество изображения остается одинаковым. Поэтому в данной работе внедрение ЦВЗ осуществлялось с условием отсутствия визуализации артефактов внедрения.

Для внедрения информации были выбраны коэффициенты из низкочастотной области. Выбор осуществлялся при помощи матрицы квантования JPEG, что позволяет, во-первых, повысить устойчивость к самому преобразованию JPEG, а во-вторых, исключить внедрение в коэффициенты компонентов, слишком подверженных изменениям или таких, в которых сосредоточена основная энергия изображения. По матрице квантования JPEG была выбрана маска коэффициентов, значения которых лежат в диапазоне от 14 до 24. Таким образом, для экспериментов выбраны два алгоритма: двухкоэффициентный алгоритм Коха с внедрением ЦВЗ в среднечастотные компоненты (стандартное использование) и тот же алгоритм, но с внедрением ЦВЗ в область низкочастотных компонентов, маска которого была сформирована на основе матриц квантования JPEG.

### Практические результаты сравнительного анализа устойчивости алгоритмов к внешним воздействиям

В качестве внешних воздействий были выбраны наиболее распространенные манипуляции, которым может быть подвергнуто изображение: сжатие JPEG с различными коэффициентами качества, зашумление изображения-контейнера белым гауссовским шумом, масштабирование и фильтрация. Данные виды воздействий приводят к необратимым изменениям контейнера и, как следствие, представляют реальную угрозу для встроенной в контейнер информации.

**Сжатие JPEG с потерями.** Для проверки устойчивости к сжатию JPEG изображение-контейнер подвергалось сжатию JPEG во всем диапазоне значений коэффициента качества JPEG ( $K_{jpeg}$ ). Результат представлен на рис. 2. Заметное увеличение устойчивости обусловлено, прежде всего, снижением потерь на этапе квантования при сжатии JPEG. Если рассмотреть матрицу квантования стандарта JPEG, то легко убедиться, что в области низкочастотных компонентов коэффициенты матрицы квантования имеют наименьшие значения. Следовательно, и изменения в соответствующих коэффициентах матрицы ДКП будут меньше, чем изменения коэффициентов более высокочастотных компонентов при равном значении  $K_{jpeg}$ . Это позволяет сохранить встроенную информацию при сжатии с более низкими значениями коэффициента качества.



Рис. 2. Устойчивость ЦВЗ к JPEG сжатию с потерями

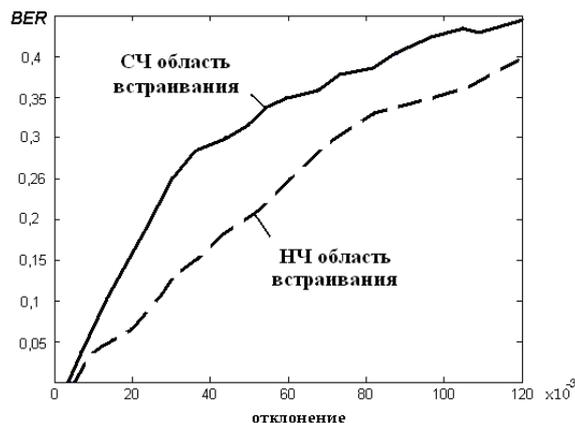


Рис. 3. Устойчивость ЦВЗ к зашумлению

**Гауссовский белый шум.** Для проверки устойчивости к зашумлению в контейнер вносился белый гауссовский шум с нулевым средним значением и разными значениями среднеквадратичного отклонения, изменяющимися от 0 в сторону возрастания. Увеличение величины отклонения расширяет интервал графика распределения, увеличивая тем самым диапазон значений «шумовых» пикселей. При максимальных значениях отклонения, представленных на графике, деградация изображения достигает такого уровня, что его дальнейшее использование в коммерческих целях является маловероятным. Результат устойчивости ЦВЗ к зашумлению представлен на рис. 3. В силу того, что шум представлен единичными пикселями, он, в первую очередь, влияет на коэффициенты высокочастотных компонентов, однако и низкочастотные компоненты тоже подвержены сильному воздействию, особенно при значительном зашумлении.

**Масштабирование.** В ходе эксперимента с масштабированием изображение-контейнер сжималось в 2 раза (50%). Очевидно, что считывание ЦВЗ из сжатого изображения полностью лишено всякого смысла, поэтому изображение восстанавливалось до исходного размера, и только затем выполнялось считывание ЦВЗ. Результаты исследования устойчивости к масштабированию представлены в табл. 1.

Масштаб	СЧ компоненты	НЧ компоненты
50%	BER = 0,46	BER = 0,21

Таблица 1. Устойчивость ЦВЗ к масштабированию

Значительную устойчивость к масштабированию не демонстрируют даже низкочастотные компоненты. Объяснить это можно алгоритмом масштабирования, при котором происходит некоторое усреднение блока пикселей, размер которого зависит от масштаба изменений. При 50%-м сжатии блок 8×8 превращается в блок 4×4, что неиз-

бежно приводит к потере 75% информации. Гарантированное сохранение встроенной информации в этом случае возможно только в DC коэффициенте и в коэффициентах, непосредственно к нему прилегающих.

**Применение фильтров.** Фильтрацию также можно отнести к разряду наиболее вероятных внешних воздействий на контейнер с внедренным ЦВЗ. Из большого многообразия фильтров для цифровых изображений были выбраны три вида: низкочастотный гауссовский фильтр, усредняющий фильтр с размером окна 3×3 пикселя и контрастный фильтр, повышающий резкость изображения, с тем же размером окна. Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Характерным отличием низкочастотных компонентов является слабая чувствительность к усредняющей фильтрации, по крайней мере, с окном такого размера, который был применен. Увеличение размеров окна, безусловно, повлияет и на устойчивость низкочастотных компонентов, но это приведет и к серьезной деградации изображения-контейнера.

Фильтр	СЧ компоненты, BER	НЧ компоненты, BER
Низкочастотный	0,008	0,02
Усредняющий	0,42	0,18
Контрастный	0	0,03

Таблица 2. Устойчивость ЦВЗ к фильтрации

### Выводы

Полученные результаты показывают преимущества использования области низкочастотных компонентов для внедрения ЦВЗ. Наиболее убедительное преимущество, как и ожидалось, наблюдается в повышении устойчивости к сжатию JPEG, что обусловлено использованием матрицы квантования при выборе областей встраивания. Преимущество низкочастотной области встраивания прослеживается и в устойчивости к таким воздействиям, как масштабирование и усредняющая фильтрация. Вместе с тем, даже использование области низкочастотных компонентов не дает желаемой устойчивости к этим внешним воздействиям. Детальный анализ механизма воздействий позволит подобрать оптимальную область встраивания, что, в свою очередь, позволит значительно повысить устойчивость ЦВЗ к внешним воздействиям частотного характера при сохранении высокого качества изображения.

### Литература

1. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика – М.: Издательство МК-Прес, 2006. – 288 с.
2. Kundur D., Hatzinakos D. Towards a telltale watermarking technique for tamper-proofing // Proceedings of ICIP '98. – Chicago, Illinois, 1998. – Vol. 2. – P. 409.

**Прохожев Николай Николаевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kaja2@yandex.ru

**Михайличенко Ольга Викторовна**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ст. преподаватель, 19791109@list.ru

**Коробейников Анатолий Григорьевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, korobeynikov\_a\_g@mail.ru

УДК 378.147.88

**РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ АКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ  
НА БАЗЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****В.А. Горовой, Д.И. Муромцев**

В статье рассмотрены теоретические подходы и пример практической реализации инновационной методики обучения для систем дистанционного образования и самостоятельной работы учащихся. Описаны принципы построения образовательного процесса активного типа, проблемы и задачи активного обучения с позиций e-learning. Рассмотрены возможности онтологического моделирования и сетевые технологий WEB 2.0 для построения систем e-learning нового поколения. Приведены сценарии обучения с использованием описанной методики.

**Ключевые слова:** технология дистанционного обучения, активное обучение, онтологический инжиниринг, wiki-технология.

**Введение**

Эффективность систем дистанционного образования зависит от степени использования методов активного обучения в процессе подачи учебного материала. При этом отсутствие прямого контакта ученика и учителя создает ряд ограничений, среди которых можно выделить невозможность контроля за процессом, так как учащийся предоставлен самому себе, уменьшение стимулирующих факторов, которые обычно присутствуют при очном обучении, невозможность организации коллективной работы в группах и т.п. Традиционные подходы к преодолению этих ограничений предлагают структурирование и форматирование учебных материалов, чтобы учеба приносила читателю как можно больше удовольствия, включая «оживление» текстов, «дозированное» обучение на расстоянии, насыщение программы вопросами, заданиями и упражнениями. Важной проблемой является оценка степени усвоения знаний, которая невозможна без их применения на практике. Для этого предлагается использовать практические упражнения и задания (в том числе для самопроверки). Но, очевидно, такой формальный подход может давать результат только в случае высокой ответственности ученика и больше похож на самообучение.

Использование методов активного обучения в педагогической практике, позволяющее решить проблемы активизации учебной деятельности, так или иначе, лежит в основе всех современных педагогических теорий и технологий. Большинство из них направлено на преодоление таких, давно ставших привычными и трудноразрешимыми, проблем высшей школы, как необходимость развития мышления, познавательной активности, познавательного интереса, на введение в обучение эмоционально-личностного контекста профессиональной деятельности. При этом все они в качестве средств достижения поставленных целей используют те или иные инструменты из числа методов активного обучения. Создание аналогов этих методов для систем дистанционного образования является актуальной и целесообразной задачей.

Современные информационные технологии позволяют использовать виртуальное пространство в качестве модели учебного процесса, ничем не уступающей работе в аудитории или лаборатории. Речь идет об использовании набора инструментов и сервисов, получивших в последнее время широкое распространение в сети Интернет под названием WEB 2.0. Авторами статьи предлагается усилить описываемую методику онтологическим моделированием предметной области. Таким образом, учебно-

методический комплекс дистанционного образования получит не только интегрированную компоненту достоверного контроля степени усвоения материала, но и механизм мониторинга процесса обучения. Как следствие, это позволит выявлять и корректировать возможные ошибки учащегося на ранних этапах. В результате эффективность дистанционной формы обучения и качество подготовки должны возрасти в несколько раз.

### **Принципы построения образовательного процесса активного типа**

Выделяют следующие принципы активного обучения, реализуемые при организации учебного процесса [1].

*Индивидуализация* – создание системы многоуровневой подготовки специалистов, учитывающей индивидуальные особенности обучающихся, позволяющей избежать уравниловки и предоставляющей каждому возможность максимального раскрытия способностей для получения соответствующего этим способностям образования. Индивидуализация обучения может осуществляться по содержанию, когда обучающийся имеет возможность корректировки направленности получаемого образования, объему учебного материала, что позволяет способным слушателям более глубоко изучать предмет в познавательных, научных или прикладных целях, а также по времени усвоения, допуская изменение в определенных пределах регламента изучения объема учебного материала в соответствии с темпераментом и способностями слушателя. При этом активизируется учебно-познавательная деятельность за счет повышения уровня учебной мотивации, что, в свою очередь, наблюдается при максимально возможном приближении темпа, направленности и других аспектов организации учебного процесса к индивидуальным стремлениям и возможностям слушателя.

*Гибкость* – сочетание вариативности подготовки, предусматривающей деление на специальности, специализации и далее в соответствии с запросами заказчиков и с учетом пожеланий обучающихся, с возможностью оперативного, в процессе обучения, изменения ее направленности. Обучающимся предоставляется возможность выбора структуры подготовки в широком спектре вариантов ее направленности и в соответствии с развитием профессиональных интересов.

*Элективность* – предоставление слушателям максимально возможной самостоятельности выбора образовательных маршрутов – элективных курсов, получение на этой основе уникального набора знаний или нескольких смежных специальностей, отвечающих индивидуальным склонностям обучающихся, специфике планируемой ими будущей профессиональной деятельности или просто познавательным интересам.

*Контекстный подход* – подчинение содержания и логики изучения учебного материала, в первую очередь общеобразовательных дисциплин, исключительно интересам будущей профессиональной деятельности, в результате чего обучение приобретает осознанный, предметный, контекстный характер, способствуя усилению познавательного интереса и познавательной активности.

*Развитие сотрудничества* – практическое осознание необходимости перехода на принципы доверия, взаимопомощи, взаимной ответственности обучающихся и преподавательского состава вуза в деле подготовки специалиста. Реализация на практике принципов педагогики сотрудничества состоит в оказании обучающимся помощи в организации их учебной деятельности в сочетании с сохранением требовательности к ее результативности, в развитии уважения, доверия к обучающемуся, в предоставлении ему возможностей для проявления самостоятельности, инициативы и индивидуальной ответственности за результат.

Различают следующие процессы, составляющие основу активного обучения: мыслительный процесс, письменное изложение, действия. Методика, описанная в данной статье, позволяет реализовать перечисленные принципы как на уровне изучения отдельных дисциплин, так в рамках междисциплинарных задач.

### **Проблемы и задачи активного обучения с позиций e-learning**

Электронное обучение (e-Learning или eLearning) – это обучение при помощи информационных, электронных технологий. Среди всего разнообразия форм данного вида обучения наибольший интерес представляет обучение в сети Интернет, к преимуществам которого можно отнести:

- самостоятельную работу с электронными материалами с использованием персонального компьютера, КПК, мобильного телефона;
- получение консультаций, советов, оценок у удаленного (территориально) эксперта (преподавателя), возможность дистанционного взаимодействия;
- создание распределенного сообщества пользователей (социальных сетей), ведущих общую виртуальную учебную деятельность;
- своевременную круглосуточную доставку электронных учебных материалов;
- стандарты и спецификации на электронные учебные материалы и технологии, дистанционные средства обучения;
- формирование и повышение информационной культуры, овладение современными информационными технологиями;
- возможность развивать учебные веб-ресурсы;
- возможность в любое время и в любом месте получить современные знания из любой доступной точки мира.

В последнее время все чаще упоминается термин e-Learning 2.0 [2, 3], подразумевающий использование в процессе обучения средств WEB 2.0 [4]. В отличие от традиционного подхода, когда ученику предлагается изучить некий набор материалов, выполнить тестовые задания, которые затем проверяются преподавателем, новая форма e-Learning 2.0 предполагает широкую социализацию процесса обучения и использование такого программного обеспечения, как блоги, wiki, социальные сети и пр. В литературе этот феномен также упоминается под названием «Длинный хвост» (Long Tail Learning) [5], так как в процесс преподавания вовлекаются не только учителя, но и большое количество учеников, обменивающихся опытом в решении частных задач, таким образом обучая друг друга. Последние тенденции в системах e-Learning позволяют дать обновленную формулировку задач активного обучения:

- свободное получение необходимой помощи в усвоении материала, в том числе на большом количестве примеров практического использования аналогичных знаний другими учениками;
- возможность диалога как между учеником и учителем, так и между учениками;
- стимулирование учащегося к успешному и качественному завершению учебы;
- регулярная публикация в сети сообщений об успехах учащегося;
- персонализация работы с учебными материалами;
- возможность совместной работы в процессе обучения.

### **Онтологическое моделирование как основа систем e-learning нового поколения**

Онтологии широко используются для задач e-Learning. Онтологический инжиниринг был успешно применен в Японии для улучшения ИТ-образования [6]. Одна из лучших карт памяти, описывающих применение онтологий в образовании, предлагается в работе [7]. Как видно из рис. 1, с точки зрения приложений онтологии используют-

ся как когнитивный инструмент для таких задач, как создание, экстернализация, передача и оценка знаний. Цель авторов – предоставить такой инструмент, который поможет решить все эти задачи в сфере образования. Помимо того, что предлагаемая система основана на работе с онтологиями, она также поддерживает процессы совместной работы.

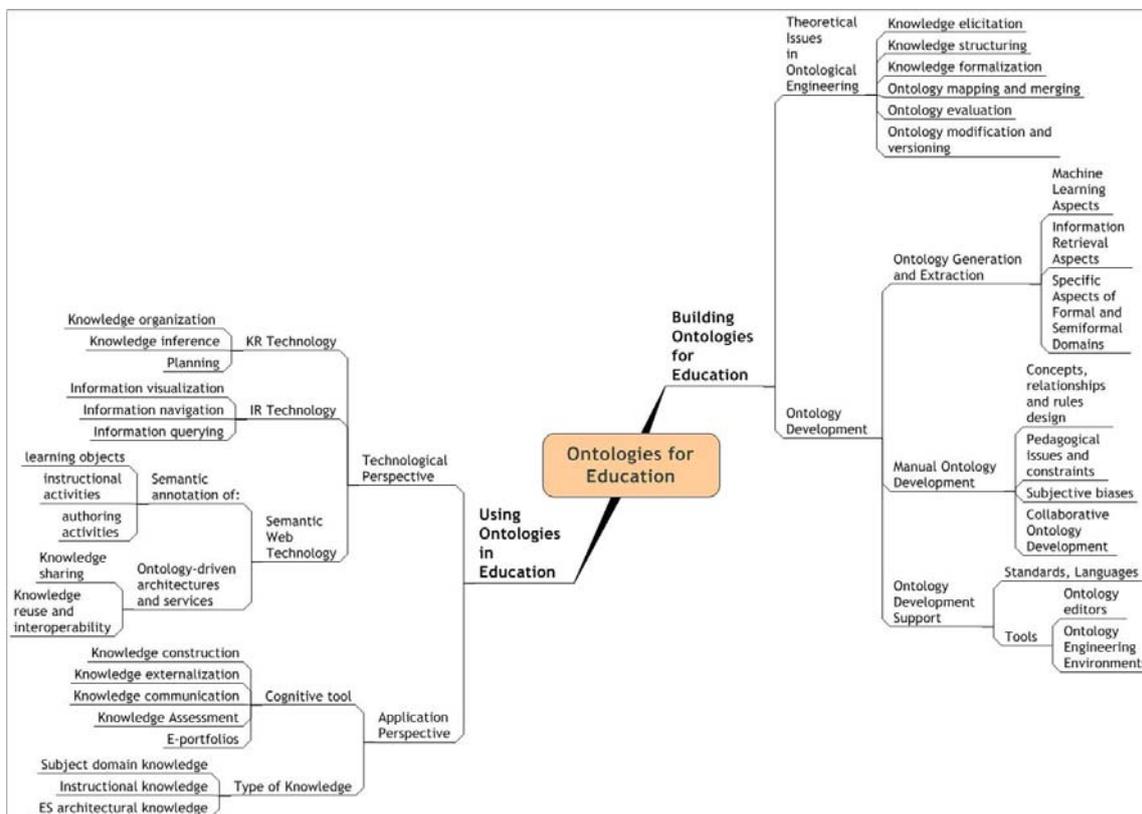


Рис. 1. Карта памяти использования онтологий в образовании [7]

Авторы предлагают методологию и технологию создания образовательных порталов с онтологической структурой. Проект носит название Ontolinge Wiki (от «онтологический инжиниринг» и «wiki»). Таким образом, в OntolingeWiki объединены преимущества онтологий, визуальных карт памяти и wiki-технологии. Система предоставляет web-интерфейс для образовательной онтологии и поддерживает ее аннотирование при помощи wiki-страниц. Эта технология может предоставить модель процесса обучения, которая помогает и преподавателю, и ученикам предоставить знания и проверить их. Результат студенческой работы в Ontolinge Wiki может быть очень важной частью E-portfolio, которое становится очень популярным среди студентов, преподавателей и работодателей.

### Создание образовательных порталов с онтологической структурой

Онтологии могут быть потрясающим когнитивным инструментом, но, чтобы им стать, важно подобрать подходящее представление. Визуализация, основанная на технологии гиперграфа [8], является хорошим решением для представления онтологий, так имеет несколько преимуществ: можно видеть сразу все концепты и масштаб онтологии, концепты в фокусе внимания показываются крупнее, чем на периферии, навигация простая и интуитивная.

Хорошая онтология с хорошей визуализацией может стать великолепным инструментом для образования, если предоставить возможность аннотирования концептов онтологии каким-либо содержимым. Wiki-технология хорошо подходит для подобного рода задач, а также предоставляет прекрасное окружение для совместной работы, что очень важно в задачах образования.

Edu Onto Wiki [9] был одним из первых проектов, использовавших преимущества онтологий как инструмента структурирования знаний и wiki как великолепного средства для совместной работы. Edu Onto Wiki оказал некоторое влияние на проект Ontolinga Wiki, но последний имеет несколько ключевых отличий. Во-первых, авторы считают, что визуальное представление онтологий очень важно с когнитивной точки зрения, поэтому в проекте Ontolinga Wiki используется гиперграф, в отличие от стандартного представления в виде дерева в Edu Onto Wiki. Во-вторых, используется стандартный полноценный wiki-движок Doku Wiki вместо самописного с ограниченной функциональностью. Наконец, Ontolinga Wiki – это сервис, позволяющий студентам и преподавателям загружать онтологии и аннотировать их с помощью wiki. Сервис напрямую не поддерживает процесс совместной разработки онтологий, просто принимая на вход любые онтологии в формате OWL. Совместная работа поддерживается на стадии аннотирования онтологии с помощью wiki.

### **Организация практических занятий на базе методологии OntolingaWiki**

Как было отмечено выше, основными акцентами при использовании OntolingaWiki для проведения практических занятий являются индивидуализация и гибкость, контекстный подход и сотрудничество. В качестве одного из возможных сценариев проведения занятий предлагается следующий.

1. Ученики создают онтологию для решения задачи в указанной предметной области, возможно, при участии преподавателя. При создании онтологии отражаются индивидуальные особенности мышления и предпочтения ученика. Становится ясным, на что ему следует обратить большее внимание, какие вопросы требуют дополнительного изучения и проработки.
2. Онтология передается в качестве входных данных OntolingaWiki. Визуализация онтологической структуры решения повышает мотивацию учащегося, следствием чего становится усиление познавательного интереса и познавательной активности. Кроме того, если работа ведется группой учеников, то на этом этапе требуется принятие коллективного решения – одного из важнейших навыков при совместной работе.
3. В OntolingaWiki для каждого концепта автоматически создается wiki-страница, в которую вносится информация об описываемом понятии. Поддержка совместной работы на уровне инструментария способствует развитию информационной культуры, так как каждый начинает осознавать ценность своего вклада в общий процесс.
4. В конечном итоге преподаватель оценивает онтологию решения задачи, представленную в виде графа и wiki-контента. Это результат не только отражает особенности каждого отдельного ученика, но и легко масштабируется, следовательно, может быть использован в качестве основы для дальнейшего изучения вопроса.

В качестве примера задачи, в которой успешно применяется инструментальный OntolingaWiki, можно привести создание виртуальной экспозиции музея образовательного оптического центра СПбГУ ИТМО. Рис. 2 иллюстрирует реализацию фрагмента этой системы, включающей гиперграфовый навигатор вверху и представление контента в форме, аналогичной wikipedia, внизу.

The image shows a screenshot of a web portal. At the top, there is a large, complex ontology graph with various nodes and connecting lines. Below the graph, there is a search bar and a page titled "Архимед". The page contains text about Archimedes, a small image of a bust, and a sidebar with navigation options like "Показать:" and "Помощь:". A blue octopus logo with "А И С" is on the right.

Рис. 2. Образовательный портал музея оптических технологий

В качестве другого примера можно привести новый формат сдачи рефератов и курсовых работ. Вместо традиционных текстовых документов студенты могут сдавать свой проект в описываемом инструменте, что создает много преимуществ для процесса обучения.

- Использование подхода «сверху вниз» при создании проекта, обусловленное использованием онтологии в качестве основы для портала, позволяет создавать хорошо структурированную информацию.
- Wiki-технология в качестве средства наполнения и поддержания актуальности содержимого проекта является очень эффективной и удобной в использовании, позволяя вести совместную работу в группах и вовремя получать обратную связь от преподавателя по ходу создания проекта.
- Созданные в OntolingaWiki проекты доступны всем студентам курса через web-интерфейс и позволяют им получать экспертизу в новых предметных областях, формируя «длинный хвост» образовательного процесса.

### Заключение

Рассмотрены теоретические подходы и пример практической реализации инновационной методики обучения для систем дистанционного образования и самостоятельной работы учащихся. В качестве технологической основы данной работы использованы современные сетевые информационные технологии WEB 2.0, позволяющие использовать виртуальное пространство в качестве модели учебного процесса, ничем не уступающего работе в аудитории или лаборатории. Онтологическое моделирование предметной области дополняет методику средством достоверного контроля степени усвоения материала и мониторинга процесса обучения. Разрабатываемая технология может использоваться

на занятиях в качестве вспомогательного инструмента инженерии знаний, обеспечивающего применение принципов активного обучения. В данном контексте наиболее значимыми из них становятся развитие концептуального мышления и аналитических способностей, формирование и повышение информационной культуры, овладение современными информационными технологиями, персонализация процесса работы с учебными материалами и обеспечение возможности совместной работы в процессе обучения. Важным следствием такого подхода является возможность выявления и коррекции возможных ошибок учащегося на ранних этапах, так как процесс практического применения полученных учащимся знаний становится наглядным. Предполагается, что эффективность обучения и качество подготовки с применением описанной методики должны возрасти в несколько раз. Авторы предполагают внедрить свою разработку в рамках отдельных курсов в нескольких ведущих вузах Санкт-Петербурга.

Работа частично поддержана грантами РФФИ и СПбГУ, а также грантом правительства Санкт-Петербурга в 2008 г. (контракт № 42-мкн)

### Литература

1. Вербицкий А.А., Кругликов В.А. Контекстное обучение: формирование мотиваций // Высшее образование в России. – 1998. – № 1. – С. 101–107.
2. Karrer T. What is eLearning 2.0, 2006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elearningtech.blogspot.com/2006/02/what-is-elearning-20.html>, свободный.
3. Karrer T. Understanding eLearning 2.0, 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.learningcircuits.org/2007/0707karrer.html>, свободный.
4. Downes S. E-Learning 2.0., 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.downes.ca/post/31741>, свободный.
5. Karrer T. Corporate Long Tail Learning and Attention Crisis, 2008 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elearningtech.blogspot.com/2008/02/corporate-learning-long-tail-and.html>, свободный.
6. Kasai, T., Yamaguchi, H., Nagano, K. and Mizoguchi, R. Building an ontology of IT education goals // Int. J. Continuing Engineering Education and Lifelong Learning. – 2006. – Vol. 16. – № 1–2. – P. 1–17.
7. Gavrilova T., Dicheva D., Sosnovsky S., Brusilovsky P. Ontological Web Portal for Educational Ontologies // Proc. of Workshop «Applications of Semantic Web Technologies for E-Learning. (SW-EL'05)» in conjunction with 12th Int. Conf. on Artificial Intelligence in Education (AI-ED'05), Amsterdam, 2005. – P. 19–29.
8. Документация Hypergraph [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://hypergraph.sourceforge.net>, свободный.
9. Luciano Galliani, Corrado Petrucco, Anna Nadin. Edu Onto Wiki: The Evolution of an Ontology on Educational Sciences Towards a Socio-Relational Environment. – SWAP, 2005

*Горовой Владимир Андреевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет. Высшая школа менеджмента, ассистент, [vladimir.gorovoy@gmail.com](mailto:vladimir.gorovoy@gmail.com)

*Муромцев Дмитрий Ильич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, [Mouromtsev@gmail.com](mailto:Mouromtsev@gmail.com)

УДК 62-50

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

В.В. Никитин

Рассматриваются задачи, этапы, методы и алгоритмы проектирования образовательных стандартов профессионального образования. На основных этапах разработки стандартов профессионального образования используются методы обработки многомерных сложно организованных данных.

**Ключевые слова:** профессиональные и образовательные стандарты, задачи проектирования стандартов, модель области профессиональной деятельности, модель специалиста, модель содержания подготовки специалиста, методы классификации.

### Введение

Одной из центральных задач подготовки профессиональных кадров является разработка государственных профессиональных и образовательных стандартов. В последние годы в России активизируется работа по совершенствованию профессиональных стандартов [1], активно идет и разработка образовательных стандартов третьего поколения для высшего профессионального образования.

В существующих методиках и процедурах разработки профессиональных и образовательных стандартов высока доля субъективизма участников этого процесса, приводящая к тому, что стандарты разных профессий или направлений/специальностей, с одной стороны, сильно пересекаются между собой, с другой стороны, в них часто отсутствуют содержательные моменты. Это объективно требует решения задачи формализации и последующей автоматизации процессов разработки стандартов. Формализация этих процессов представляет собой многоэтапную процедуру формирования, анализа и обработки больших массивов информации [2].

В разработке образовательных стандартов можно выделить следующие основные задачи [2]:

- построение модели области профессиональной деятельности;
- построение модели специалиста<sup>1</sup>;
- построение модели содержания подготовки специалиста.

В статье рассмотрены методы формализации процессов сквозного проектирования стандартов высшего профессионального образования. В качестве математического аппарата использованы методы анализа сложно организованных многомерных данных.

### Общий процесс проектирования

При разработке образовательных стандартов мы исходим из следующего.

1. Профессиональная деятельность любого специалиста задается:
  - a. областью его профессиональной деятельности;
  - b. объектом (объектами) его профессиональной деятельности;
  - c. этапом (этапами) жизненного цикла этого объекта (этих объектов) профессиональной деятельности;
  - d. характерными видами профессиональной деятельности специалиста;

<sup>1</sup> Термин «специалист» здесь используется как обобщающее понятие для обозначения квалификации (степени) выпускников профессионального образования.

- е. специфичным набором решаемых специалистом универсальных и профессиональных задач.
2. Компетентность специалиста раскрывается через отдельные компетенции и заключается в способности/готовности решать определенный набор универсальных и профессиональных задач.
  3. Образовательные уровни и степени (квалификации) специалиста определяются конкретными значениями (a)–(e).
  4. Процесс проектирования образовательных стандартов профессионального образования включает следующие этапы:
    - анализ профессиональной деятельности и требований к специалистам в определенной сфере;
    - разработка модели области профессиональной деятельности;
    - разработка модели специалиста для данной области профессиональной деятельности;
    - разработка модели содержания подготовки специалиста;
    - синтез и оценка содержания подготовки на основе разработанных моделей.
  5. Образовательный стандарт профессионального образования определяется как кластер в многомерном пространстве признаков, заданных моделью области профессиональной деятельности, моделью специалиста и моделью содержания его подготовки.

### **Построение модели области профессиональной деятельности**

Важный начальный этап проектирования модели области профессиональной деятельности состоит в определении объектов профессиональной деятельности (ОПД) специалиста, относительно которых «выстраиваются» его профессиональная деятельность и профессиональные компетенции.

Формирование множества ОПД для определенной области профессиональной деятельности и их классификация представляют собой слабо формализуемую и трудоемкую задачу. Это, в первую очередь, сказывается на формировании содержания образования в высокотехнологичных, динамически развивающихся отраслях, для которых характерно частое появление новых объектов и связанных с ними понятий, существование большого числа синонимичных понятий, быстрое «устаревание» некоторых понятий, изменения в описании и интерпретации отдельных понятий. Особенно это проявляется на комплексных объектах, которые являются сложной агрегацией множества простых объектов и определяются обобщающими понятиями. Важно отметить, что именно эти обобщающие понятия, как правило, используются в качестве определений ОПД в стандартах высшего профессионального образования.

Сегодня общепризнанным способом идентификации таких сложных объектов служат онтологии, на основе которых можно определить не только набор более простых понятий, но и связи между понятиями (например, степень сходства и различия между ними), что позволяет сформировать набор обобщающих понятий. В качестве объектов профессиональной деятельности могут рассматриваться физические и абстрактные объекты, системы, процессы или явления, на которые направлено воздействие специалиста.

Создание онтологий в различных областях профессиональной деятельности является сегодня одной из самых актуальных задач. Ее решением на разных уровнях занимаются исследовательские центры и международные организации. Одним из наиболее крупных проектов является проект UN SPSC (United Nations Standard Products and Services Code, <http://www.unspsc.org/>) – стандартный классификатор товаров и услуг.

Исходную онтологию можно построить одним из следующих методов:

- использование существующих энциклопедических словарей, тезаурусов и классификаций в профессиональной области;
- автоматизированный лингвистический анализ источников, содержащих сведения о данной области, с последующим привлечением экспертов для отбора выделенных терминов;
- привлечение экспертов для формирования словаря понятий и задания связей между ними.

Основными результатами построения структуры связей между понятиями являются:

- выделение понятий, являющихся обобщением некоторой иерархии понятий, которые интерпретируются как ОПД;
- выделение понятий, которые являются листовыми в выделенных иерархиях, дальнейшая детализация которых не рассматривается при построении модели данной области профессиональной деятельности.

Онтология ОПД является динамичной структурой, в которой могут появляться новые объекты, изменяться структура связей между ними, а соответственно, и состав обобщающих и листовых объектов. Кроме того, и объекты, и связи между ними могут быть дополнены весовыми коэффициентами, характеризующими их важность с точки зрения изучения и освоения на современном уровне развития данной области профессиональной деятельности. Изменение онтологической модели области профессиональной деятельности должно вести за собой и изменение содержания профессионального образования.

Задача формирования обобщающих ОПД при проектировании как профессиональных, так и образовательных стандартов профессионального образования для той или иной области профессиональной деятельности решается как задача формирования классов простых (исходных) ОПД. Сложность этой задачи связана, прежде всего, с объемом исходной информации. Число ОПД исчисляется сотнями и тысячами, а число классов, в которые их нужно объединить, – десятками. При решении задачи вручную эксперт вынужден резко ограничивать число рассматриваемых вариантов классификации, основываясь на своих субъективных оценках. Применение метода классификации для построения онтологии конкретной области профессиональной деятельности заключается в последовательном «улучшении» исходной онтологии [3].

В [4] показано, как в результате применения методов автоматической классификации получен улучшенный вариант онтологии ОПД для области профессиональной деятельности «Информатика и информационно-коммуникационные технологии». Исходная онтология имеет трехуровневую иерархическую структуру. На верхнем уровне находятся 6 классов объектов профессиональной деятельности:

1. компоненты аппаратных средств информационных технологий;
2. корпоративные информационные системы и услуги, связанные с их проектированием и эксплуатацией;
3. компоненты программных средств информационных технологий;
4. контент-ориентированные информационные системы;
5. коммуникационные средства, системы и услуги, связанные с их проектированием и эксплуатацией;
6. средства микроэлектронной техники и услуги, связанные с их проектированием и производством.

На втором уровне каждый из этих классов (обобщающих понятий) подразделяется на несколько подклассов (более простых понятий). Например, класс «корпоративные

информационные системы и услуги, связанные с их проектированием и эксплуатацией» подразделяется на три подкласса:

- 2.1. инструментальные программные средства интеграции корпоративных информационных систем;
- 2.2. услуги по поддержке жизненного цикла корпоративных информационных систем;
- 2.3. функциональные подсистемы корпоративных информационных систем.

Наконец, самый нижний, третий уровень (уровень исходных понятий, которые и называются объектами профессиональной деятельности, ОПД) представлен 44-мя ОПД. Используя алгоритм размытой классификации, формируется в итоге не шесть классов исходных ОПД, а семь. На основе класса «корпоративные информационные системы и услуги, связанные с их проектированием и эксплуатацией» сформированы два новых класса – класс с тем же названием, но меньшего размера, и новый класс «прикладные информационные системы».

После построения онтологии области профессиональной деятельности необходимо рассмотреть ОПД в контексте этапов их жизненного цикла. Изучение и освоение ОПД охватывает, как правило, все этапы их жизненного цикла. Однако уровень компетентности специалиста может охватывать как все этапы жизненного цикла для конкретного объекта, так и только часть этих этапов. Возможен также охват одного или нескольких этапов жизненного цикла для ряда близких по назначению объектов. Поэтому в модели области профессиональной деятельности можно выделить отдельное инвариантное множество понятий, отражающие этапы жизненного цикла объекта.

Этапы жизненного цикла могут быть рассмотрены в соответствии со стандартом ISO/IEC 12207 [5]. В качестве основных этапов жизненного цикла ОПД выделяются: а) научные исследования, б) проектирование (конструирование), в) производство, г) маркетинг и продажа, е) эксплуатация, ф) утилизация. Тогда модель области профессиональной деятельности специалиста определим следующим образом:

$$S = \langle Q, C, A \rangle.$$

Здесь  $Q = \{q_i \mid i = 1, \dots, N\}$  – множество классов ОПД (элемент множества – код класса ОПД);  $C = \{c_j \mid j = 1, \dots, M\}$  – множество этапов жизненного цикла ОПД;  $\|a_{ij}\|$ ,  $i = 1, \dots, N$ ;  $j = 1, \dots, M$  – матрица коэффициентов актуальности элементов профессиональной деятельности (сочетаний «класс объектов профессиональной деятельности»– «этап жизненного цикла»); коэффициент матрицы равен 1, если для  $i$ -го класса ОПД актуальна подготовка специалистов по  $j$ -му этапу жизненного цикла, 0 – в противном случае.

Оценка актуальности является интегральной характеристикой, которая определяется четырьмя составляющими:

- степенью необходимости выбранного этапа жизненного цикла для данного класса ОПД (критерий 1 – «необходимость»);
- состоянием рынка труда (критерий 2 – «предложение»);
- перспективами развития научно-технического прогресса (критерий 3 – «перспектива»);
- социальной престижностью профессий и рода занятий (критерий 4 – «престижность»).

Оценки актуальности могут быть получены только на основе мнений экспертов. Для повышения объективности таких оценок экспертные методы необходимо дополнять статистическими процедурами оценивания. В работе [6] описан алгоритм определения коэффициентов актуальности. Для формирования оценок коэффициентов актуальности по тематике, задаваемой определенным этапом жизненного цикла для конкретного класса ОПД, необходимо: 1) провести экспертизу, в которой были бы отражены мнения экспертов по каждой из сфер; 2) определить значения полученных в резуль-

тате экспертизы критериев; 3) осуществить свертку указанных критериев; 4) определить значения коэффициентов актуальности.

Развитие определенной области профессиональной деятельности специалиста выражается в изменении параметров ее модели:

- появление новых обобщающих ОПД за счет как «поднятия» в иерархии онтологии «простых» ОПД до уровня обобщающих, так и введения новых обобщающих ОПД;
- снижение до критического уровня общественного интереса к определенным ОПД, что выражается в снижении значения показателя актуальности до критического уровня;
- детализация отдельных этапов жизненного цикла ОПД, что выражается в изменении множества  $S$ ;
- изменение весовых коэффициентов в матрице  $\|a_{ij}\|$ .

### Построение модели специалиста

Сформировав модель области профессиональной деятельности, можно приступить к построению модели специалиста.

На этом этапе формируется множество моделей специалистов в пространстве модели области профессиональной деятельности. Такое множество моделей специалистов можно интерпретировать как первичный список (перечень) направлений профессиональной подготовки специалистов. Подобное множество объединяет (в рамках задаваемого стандартом объема часов на подготовку специалиста и требуемых квалификационных уровней) один или несколько классов ОПД по одному или нескольким этапам жизненного цикла (ЖЦ). При этом возможные варианты объединения пар «этап ЖЦ» – «класс ОПД» должны учитывать:

- близость или идентичность классов ОПД;
- сходство по этапам ЖЦ;
- сходство набора видов профессиональной деятельности;
- сходство функций профессиональной деятельности;
- общность квалификационных уровней;
- возможность объединения в рамках задаваемого стандартом объема часов на подготовку специалиста.

Фактически речь идет о классификации многомерных объектов в пространстве признаков, имеющем сложную структуру (признаки разной природы, с разными весами). Поскольку человек-эксперт не в состоянии проводить анализ непосредственно в многомерном пространстве, на этом этапе можно использовать методы многомерной автоматической классификации. Алгоритм решения этой задачи описан в [6], где множество моделей специалистов называется множеством интегрированных элементов профессиональной деятельности (ИЭПД). Приведем лишь содержательные моменты данного алгоритма.

*Процедура 1. Построение меры близости (сходства) между парами «класс ОПД – этап ЖЦ».* При построении меры близости учитывается необходимая «глубина изучения» классов ОПД при подготовке специалистов для работы с этими классами ОПД на данных этапах жизненного цикла для  $t$ -го квалификационного уровня. Для облегчения работы экспертов процедура экспертного оценивания разбивается на два шага.

На первом шаге множество этапов жизненного цикла  $S$  разбивается на два подмножества  $S_1^t$  и  $S_2^t$ . Подмножество  $S_1^t$  включает такие этапы жизненного цикла, на которых требуются специалисты с глубоким (в пределах  $t$ -го квалификационного уровня) знанием и соответственно углубленным изучением  $r$ -го класса ОПД со всеми его специфическими особенностями, подмножество  $S_2^t$  – этапы, для которых достаточно

некоторого общего представления об этом классе ОПД. Проводя указанное разбиение, эксперт руководствуется своими знаниями видов профессиональной деятельности, соответствующих этапам жизненного цикла, и соответствующих этим видам функций профессиональной деятельности для  $t$ -го квалификационного уровня. Для разных классов ОПД и разных квалификационных уровней указанные разбиения могут быть разными. Например, для класса ОПД «Корпоративная компьютерная сеть» этап изготовления – это фактически инсталляция системы, и организационно-управленческая деятельность на этом этапе требует глубокого знания данного класса объектов во всех деталях на высшем квалификационном уровне. Для класса ОПД «Электронные приборы» на этапе изготовления не требуется глубокого знания специфики работы приборов и достаточно либо общего представления на высшем квалификационном уровне, либо углубленного изучения на среднем квалификационном уровне. Поэтому разбиение множества  $S$  на подмножества имеет индексы  $r, t$ , указывающие класс ОПД и квалификационный уровень, применительно к которым проводится разбиение.

На втором шаге эксперты дают оценки коэффициентов «глубины изучения» для определения меры близости между парами  $p_{rs}$  и  $p_{uv}$ , т.е. парами « $r$ -й класс ОПД –  $s$ -й этап ЖЦ» и « $u$ -й класс ОПД –  $v$ -й этап ЖЦ». Рассмотрим три случая.

1.  $s \in C_1^{rt}, v \in C_1^{uv}$ , т.е. этапы жизненного цикла каждой пары требуют специалистов с углубленным (на  $t$ -м квалификационном уровне) изучением соответствующих классов ОПД. В этом случае соответствующая мера близости (обозначим ее через  $K_{sv}^t$ ) полагается равной 1, т.е. оценка меры близости пар  $p_{rs}$  и  $p_{uv}$  совпадает с оценкой меры близости соответствующих классов ОПД.

2.  $s \in C_1^{rt}, v \in C_2^{uv}$  или  $s \in C_2^{rt}, v \in C_1^{uv}$ , т.е. на  $t$ -м квалификационном уровне этапы жизненного цикла соответствующих классов ОПД принадлежат к разным подмножествам множества  $S$ . Поскольку разные классы ОПД требуют в этом случае еще и разной глубины изучения, естественно считать, что мера близости рассматриваемых пар меньше меры близости соответствующих классов ОПД. В этом случае эксперта просят оценить  $K_{sv}^t$  числом в интервале от 0 до 0,5.

3.  $s \in C_2^{rt}, v \in C_2^{uv}$ , т.е. этапы жизненного цикла каждой пары не требуют специалистов с углубленным (в пределах  $t$ -го квалификационного уровня) изучением соответствующих классов ОПД. Поскольку при менее углубленном изучении различие между классами ОПД в какой-то степени нивелируется, естественно считать, что мера близости рассматриваемых пар больше меры близости соответствующих классов ОПД. В этом случае от эксперта требуется оценить  $K_{sv}^t$  числом в полуинтервале  $1 < K_{sv}^t \leq 2$ .

Описанная процедура выполняется для всех квалификационных уровней и всех пар  $p_{rs}$  и  $p_{uv}$ . Заметим, что случаи  $r = u$ , т.е. случаи оценки меры близости пар с одним и тем же классом ОПД, но разными этапами жизненного цикла, не требуют специального рассмотрения, поскольку мера близости класса к самому себе вычисляется по общим правилам.

*Процедура 2. Кластеризация пар «класс ОПД – этап ЖЦ».* Кластеризация (агрегирование) проводится независимо для каждого квалификационного уровня. Алгоритм агрегирования представляет собой итерационную человеко-машинную процедуру, в которой на каждой итерации обрабатывается построенное к этому шагу текущее множество агрегатов.

На первой итерации в качестве текущего множества агрегатов берется множество, в котором агрегатами являются отдельные пары «класс ОПД – этап ЖЦ».

На  $k$ -й итерации два наиболее близких агрегата объединяются в один агрегат в соответствии с оценками близости. При этом эксперт оценивает объем учебного времени, требуемого для обучения по всем классам ОПД и этапам ЖЦ, включенным в новый агрегат, и сравнивает его с общим объемом часов на подготовку специалиста данного квалификационного уровня. Если эксперт считает, что данный предел еще не достигнут, начинается следующая итерация. Если эксперт считает, что дальнейшее укрупнение нового агрегата приведет к выходу за пределы общего объема часов на подготовку специалиста данного квалификационного уровня, этот агрегат принимается в качестве предварительного варианта модели специалиста, он удаляется из текущего множества агрегатов, и начинается следующая итерация. Алгоритм прекращает работу, когда текущее множество агрегатов оказывается пустым. Таким образом, идет построение для каждого квалификационного уровня множества агрегатов, где каждый агрегат представляется набором векторов определенных объектов профессиональной деятельности, этапов жизненного цикла, видов деятельности, функций и компетенций специалиста (формальное определение этих векторов приведено в [6] и из-за своей громоздкости не приводится в настоящей работе). По окончании выполнения этой процедуры на выходе получаются множества моделей специалистов, характерных для данной области профессиональной деятельности.

### Построение модели содержания подготовки специалиста

Под моделью содержания подготовки специалиста будем понимать образовательную программу подготовки специалиста, которая должна соответствовать полученной на предыдущем этапе модели специалиста. При формировании модели содержания стоит задача формирования структуры образовательной программы, т.е. совокупности дисциплин (модулей), обеспечивающих формирование компетенций в соответствующей области профессиональной деятельности.

Предположим, что для каждой области профессиональной деятельности существует свое множество дидактических единиц (ДЕ), обеспечивающих усвоение знаний, умений и навыков и формирующих универсальные и профессиональные компетенции. Для каждой образовательной программы, по которой осуществляется подготовка специалиста, существует свое подмножество ДЕ, причем для каждой пары ДЕ можно указать число, характеризующее силу связи между этими дидактическими единицами. Покажем выделение такого подмножества из всего множества ДЕ и группирование их в виде дисциплин. Группировку (агрегирование) ДЕ необходимо проводить таким образом, чтобы сильно связанные между собой ДЕ попали в одну дисциплину, а слабо связанные – в разные дисциплины, и чтобы сумма учебного времени ДЕ каждой дисциплины не превышала заданной величины<sup>2</sup>.

*Постановка задачи.* Пусть заданы:

$D_k^t = \{d_{kx}^t | x^{kt} = 1, \dots, L_{kt}\}$  – множество кодов (имен) ДЕ по  $k$ -й области профессиональной деятельности для  $t$ -й образовательной программы;

$A_{kx}^t = \{\alpha_{kx}^t\}, x^{kt} = 1, \dots, L_{tk}$  – вектор содержания ДЕ по  $k$ -й области профессиональной деятельности для  $t$ -й образовательной программы, где  $\alpha_{kx}^t$  – компонент вектора (текст, описывающий содержание ДЕ с кодом  $d_{kx}^t$  по  $k$ -й области профессиональной деятельности для  $t$ -й образовательной программы);

<sup>2</sup> Как известно, в образовательной практике принято формировать дисциплины кратно семестру или модулю с определенной академической недельной нагрузкой.

$B_{kx}^t = \{\beta_{kx}^t\}, x^{kt} = 1, \dots, L_{tk}$  – вектор объема учебного времени ДЕ по  $k$ -й области профессиональной деятельности для  $t$ -й образовательной программы, где  $\beta_{kx}^t$  – компонента вектора (время на изучение ДЕ с кодом  $d_{kx}$ ).

$R_k^t = \{r_{kn}^t | n^t = 1, \dots, N_k^t\}$  – множество связей между ДЕ для  $k$ -й области профессиональной деятельности для  $t$ -й образовательной программы;

$|c_{kxm}^t| x^{kt} = 1, \dots, L_{tk}, m^{kt} = 1, \dots, L_{tk}$  – матрица связей между ДЕ для  $k$ -й области профессиональной деятельности и  $t$ -й образовательной программы. Элемент матрицы  $c_{kxm}$  принимает значение в интервале  $(0, 1]$ , равно силе связи между  $x^k$ -й и  $m^k$ -й ДЕ, если между ними существует связь, и равен 0, если связь между ними отсутствует.

Требуется определить:

$A_k^t = \{a_n^{tk} | n^{tk} = 1, \dots, N_k^t\}$  – множество дисциплин  $t$ -й образовательной программы  $k$ -й области профессиональной деятельности;

$T_k^t = \{\tau_n^{tk}\}, n^{tk} = 1, \dots, N_k^t$  – вектор объемов дисциплин  $t$ -й образовательной программы  $k$ -й области профессиональной деятельности; компонент вектора  $\tau_n^{tk}$  представляет собой объем в часах на изучение дисциплины;

$B^{n(tk)} = \{b_{j(n(tk))}^{n(tk)} | j^{n(tk)} = 1, \dots, L^{n(tk)}\}$  – множество кодов ДЕ для  $n^{tk}$ -й дисциплины по  $k$ -й области профессиональной деятельности для  $t$ -й образовательной программы,  $B^{n(tk)} \in D_{kx}^t$ .

$|c_{i(n(tk))j(n(tk))}^{n(tk)}|, i^{n(tk)} = 1, \dots, L^{n(tk)}$  – матрица связей между ДЕ  $n^{tk}$ -й дисциплины для  $k$ -й области профессиональной деятельности и  $t$ -й образовательной программы. Элемент матрицы  $c_{i(n(tk))j(n(tk))}^{n(tk)}$  принимает значение в интервале  $(0, 1]$ , равно силе связи между  $i^{n(tk)}$ -й и  $j^{n(tk)}$ -й ДЕ, если между ними существует связь, и равен 0, если связь между ними отсутствует.

*Описание алгоритма.* Поскольку в этой задаче матрица связей между ДЕ каждой образовательной программы по каждой области профессиональной деятельности задана, для группирования ДЕ в дисциплины можно непосредственно использовать алгоритмы агрегирования [3, 5]. При построении классов ОПД специалиста в [3] и в задаче формирования актуальных пар <ОПД специалиста> – <этап жизненного цикла> [6] правило останова алгоритма было задано. Так, в задаче агрегирования ОПД алгоритм останавливался после формирования заданного числа классов, а в задаче агрегирования пар «класс ОПД – элемент ЖЦ» – после достижения граничного значения объема профессионального обучения, т.е. объема часов на подготовку специалиста данного квалификационного уровня. Специфика агрегирования ДЕ в предлагаемом подходе состоит в том, что информация о том, может ли некоторый агрегат ДЕ рассматриваться как самостоятельная дисциплина, устанавливается на основе опроса мнений специалистов-экспертов. Здесь невозможно указать какой-либо формальный критерий, основанный только на численной оценке связей входящих в агрегат ДЕ. В основу предлагаемого алгоритма положен алгоритм «объединение», итерационная реализация которого описана в [7].

Пусть каждый из анализируемых объектов (в данном случае каждый объект – это некоторая ДЕ из имеющегося множества ДЕ) описывается набором параметров  $\{y^{(1)}, \dots, y^{(k)}\}$ . Вводится в рассмотрение пространство параметров  $Y$ , в котором каждому конкретному объекту  $y_j = \{y_j^{(1)}, \dots, y_j^{(k)}\}$  отвечает точка  $y_j \in Y$ . Для работы алгоритма необходимо ввести меру близости двух точек (объектов)  $y$  и  $z$  в работе для этой цели ис-

пользуется значение потенциальной функции  $K(y, z)$  [5], которая задается в виде следующей функции от евклидова расстояния  $R(y, z)$  между точками  $y$  и  $z$ :

$$K(y, z) = \frac{1}{1 - \alpha R^2(y, z)}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – настраиваемая константа алгоритма. Экспертно-компьютерная процедура выбора  $\alpha$  описана в [7]. Введем также меру близости двух конечных множеств точек  $B$  и  $D$ :

$$K(B, D) = \frac{1}{N_B N_D} \sum_{y_i \in B} \sum_{y_j \in D} K(y_i, y_j), \quad (2)$$

где  $N_B$  и  $N_D$  – число точек в множествах  $B$  и  $D$  соответственно. Из выражения (2) непосредственно следует, что  $K(B, D)$  – величина средней (по всем парам точек) близости пары точек  $y_i$  и  $y_j$ , когда одна точка этой пары принадлежит одному множеству точек (классу), а другая точка этой пары – другому множеству (классу).

Алгоритм «Объединение» – иерархический, т.е. на каждом его шаге происходит объединение двух наиболее близких классов (агрегатов) среди всех классов, рассматриваемых на этом шаге. В качестве начального в работе берется разбиение, для которого  $r_{\text{нач}} = N$ , т.е. каждая точка является единственным представителем в соответствующем классе (агрегате). Тогда на первом шаге находятся ближайшие, согласно выражению (1), точки (объекты)  $y_i$  и  $y_j$ , для которых справедливо выражение

$$K(y_i, y_j) = \max_{l, p, l \neq p} K(y_l, y_p), \quad l, p = 1 \div N.$$

Эти точки объединяются в один класс (агрегат), который обозначается через  $A_l$ . Точки  $y_i$  и  $y_j$  исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Пусть к  $l$ -му шагу исходное множество точек за счет последовательного объединения на предыдущих шагах разбито на  $r_l$  непересекающихся классов (агрегатов)  $A_1, \dots, A_{r_l}$ . Заметим, что некоторые классы могут состоять из одной точки. На  $l$ -м шаге получают разбиение исходного множества точек на  $r_l - 1$  классов, для которых справедливо выражение

$$K(A_i, A_j) = \max_{p, q, p \neq q} K(A_p, A_q),$$

т.е. производится объединение двух ближайших, согласно выражению (2), классов  $A_i$  и  $A_j$ . Новый (объединенный) класс обозначается через  $A_i$ , а классы  $A_i$  (старый) и  $A_j$  исключаются из дальнейшего рассмотрения.

На каждом шаге (итерации) алгоритма эксперт оценивает не столько объем учебного материала, сколько логическую завершенность класса ДЕ  $A_i$ , полученного в результате объединения на этом шаге. Если эксперт считает, что этот класс еще не составляет законченной дисциплины, то алгоритм переходит на следующий шаг (итерацию). Если же эксперт считает, что сформированный на этом шаге класс  $A_i$  составляет законченную дисциплину, то эта дисциплина пополняет список уже сформированных дисциплин, класс  $A_i$  удаляется из текущего множества классов (агрегатов), и начинается следующая итерация алгоритма.

### Заключение

Рассмотренные методы формализации задач проектирования образовательных стандартов профессионального образования используют экспертно-статистические ме-

тоды принятия решений при последовательном построении модели области профессиональной деятельности, модели специалиста и модели содержания его подготовки.

Практической основой для разработки методов формализации сквозного процесса проектирования стандартов профессионального образования послужили проводившиеся в период 2004–2006 г.г. под руководством автора работы в рамках Федеральной целевой программы «Образование» по оптимизации перечня направлений подготовки и специальностей высшего профессионального образования в области информатики, информационных технологий и информационных систем в соответствии с потребностями рынка труда, а также по разработке структуры и содержания среднего и высшего профессионального образования в области информационно-коммуникационных технологий. Обобщение данных методов применительно к профессиональным стандартам нашло отражение при разработке в 2006–2007 г.г. по заказу Мининформсвязи РФ профессиональных стандартов для отрасли информационных технологий.

Разработанные методы, алгоритмы и процедуры послужили теоретической базой создаваемой под руководством автора автоматизированной системы проектирования образовательных стандартов высшего профессионального образования.

### Литература

1. Профессиональные стандарты в области информационных технологий. – М.: АПКИТ, 2008. – 616 с.
2. Никитин В.В. Информационно-методическое обеспечение формирования перечня направлений и специальностей в области информационно-коммуникационных технологий. – М.: МАКС Пресс, 2006. – 272 с.
3. Классификация объектов профессиональной деятельности специалиста при проектировании профессиональных и образовательных стандартов / В.В. Никитин, С.В. Мальцева, А.А. Дорофеюк, А.С. Мандель // Проблемы управления. – 2007. – № 4. – С. 51–55.
4. Никитин В.В. Проектирование онтологии объектов профессиональной деятельности при разработке профессиональных и образовательных стандартов // Вестник УГАТУ. – 2008. – Том 11. – №1 (27). – С. 32–39.
5. Life Cycle Management – System Life Cycle Processes, Committee Draft, ISO/IEC ISO/IEC 15288.
6. Формирование номенклатуры направлений подготовки специалистов на основе многопараметрической модели профессиональной деятельности / В.В. Никитин, С.В. Мальцева, А.А. Дорофеюк, А.С. Мандель // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 5. – С. 38–44.
7. Дорофеюк А.А. Алгоритмы обучения машины распознаванию образов без учителя, основанные на методе потенциальных функций // Автоматика и телемеханика. – 1966. – № 10. – С. 37–49.

**Никитин Виктор Васильевич** – Государственный университет – Высшая школа экономики, г. Москва, проректор, кандидат технических наук, доцент, vnikitin@hse.ru

## SUMMARY

## OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

EFFECT OF HALOGENS ON SPECTRAL AND PHOTSENSITIVE PROPERTIES  
OF PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES

E. Akishina, K. Lazareva, N. Nikonorov, A. Sidorov, V. Tsekhomsky

**Keywords:** photo-thermo-refractive glass, photo-thermo-induced crystallization, 3D phase hologram, plasmonic resonance, silver nanoparticles.

Effect of bromine and fluorine on spectral and photosensitive properties of photo-thermo-refractive glasses has been investigated. Mechanism of photo-thermo-induced glass crystallization has been proposed. According to experimental results it has been suggested that colloid silver particles are nucleation centers under the temperature close to the glass transformation temperature. Liquid phase consisted of silver bromide with attenuated sodium fluoride forms around these particles. Nanocrystals with the complicated structure of AgBr-NaF exude on the colloid silver surface during the cooling.

*Ekaterina Akishina* – State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Student, k\_eight@mail.ru

*Kseniya Lazareva* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Student, riwik87@mail.ru

*Nikolay Nikonorov* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Department Head, D. Sc., Professor, Nikonorov@oi.ifmo.ru

*Alexander Sidorov* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, D. Sc., Professor, Sidorov@oi.ifmo.ru

*Victor Tsekhomsky* – State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Principal scientific associate, D. Sc., Professor, tsekomsky@oi.ifmo.ru

FRACTAL DIMENSION CALCULATING OF REGULAR FRACTALS BY FRAUNHOFER  
DIFFRACTION

A. Zinchik, Y. Muzychenko, A. Smirnov, S. Stafeev

**Keywords:** fractal, Fraunhofer diffraction, Fourier transform, fractal dimension, self-similarity, power-law.

The numerical simulation of Fraunhofer diffraction of geometric fractals was made and the original algorithm for calculating the fractal dimension of the regular fractal on the diffraction pattern was suggested. As an example, the diffraction patterns from the following geometrical fractals were used: Sierpinski carpet, Vishek fractal, Koch snowflake. A comparison of the fractal dimension values derived from the numerical experiment with the theoretical values was made. For the generation of fractals with the level  $m = 6$  the difference between these values does not exceed 1.5%.

*Alexander Zinchik* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Associate professor, PhD, Associate professor, zinchik@phd.ifmo.ru

*Yana Muzychenko* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Assistant, myb@rambler.ru

*Alexander Smirnov* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Associate professor, PhD, Associate professor, smirnav@phd.ifmo.ru

*Sergey Stafeev* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Professor, Dean, D. Sc., Professor, stafeev@phd.ifmo.ru

RESEARCH OF THE MICROSCOPE OBJECTIVE  
BY THE COMPUTER IZOPHOTOMETRY METHOD WITH ACCUMULATION

Le Zuy Tuan, V. Kirillovsky

**Keywords:** a micro objective, the image quality testing, computer izophotometry.

The article is devoted to the computer izophotometry method of PSF and the corresponding equipment for testing the image quality of a micro objective by measurement PSF by a direct method with subsequent calculation of MTF and energy concentration function. From the optical system user's point of view, the major problem of the testing and certification is measuring of the image real structure and comparison of the received result to the calculated characteristics. Data processing is made in real time that allows receiving results in the shortest time, thus PSF of the test-object is defined with transfer of the image thin diffraction structures, and the three-dimensional graph of PSF, that raises results reliability, is displayed.

*Vladimir Kirillovsky* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Professor, D. Sc., Professor, vkkir@yandex.ru  
*Le Zuy Tuan* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate, DuyTuan@mail.ru

### IMITATING MODEL OF AN OPTICAL-ELECTRONIC CEILOMETER

**A. Dyomin, K. Konstantinov**

**Keywords:** simulation model, cloud base height.

The article deals with the simulation method of an optic-electronic complex for measuring the cloud base height by scanning activities. The simulation model of measuring the cloud base height is developed and approved.

*Anatoliy Dyomin* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", D. Sc., Professor, dav\_60@mail.ru

*Konstantin Konstantinov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate student, const\_cv@mail.ru

### LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES

#### FORMATION OF METAL SILICIDES FILM COVERINGS BY METHODS OF LOCAL LASER TRANSFER AND ANNEALING

**V. Veiko, V. Kasatkin, V. Matyzhonok, A. Petrov, E. Shakhno**

**Keywords:** local laser transfer, laser annealing, film, metal silicide, substrate layer.

Films of metal silicides, being low-energy-gap semiconductors, represent rather perspective material for creation of termogauges. The possibility of film coverings reception from silicides of chrome and iron by methods of local laser transfer and laser annealing is investigated in the paper. Film coverings of metal silicides on various substrates are received and their electric parameters are investigated. Dependence of film coverings properties on their drawing conditions is defined.

*Vadim Veiko* – State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Department Head, D. Sc., Professor, veiko@lastech.ifmo.ru

*Vasily Kasatkin* – State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate, kas\_vasya@mail.ru

*Victor Matyzhonok* – State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Master, VictoorM@GMail.com

*Andrei Petrov* – State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Associate professor, PhD., Associate professor, aa\_petrov@lastech.ifmo.ru

*Elena Shakhno* – State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Professor, D. Sc., Professor, shakhno@lastech.ifmo.ru

#### LASER-INDUCED FORMATION OF MICRO-ELEMENTS ON THE BASE OF GLASS-CERAMICS

**B. Novikov, M. Shadchin**

**Keywords:** micro-elements, micro-units, glass-ceramics, photosensitive glass, pyroceramics, laser modification. Local modification of glass-ceramics phase statement is perspective technique for micro-elements formation. Concepts of laser-induced phase-structure modification of two glass-ceramics types - photosensitive glasses and pyroceramics – are described. Realization of this technology by laser irradiation of different wavelength is reported. Possibility of various micro-elements formation at wide range of their parameters is demonstrated.

*Boris Novikov* – State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Assistant, PhD., novikov-bu@yandex.ru

*Maxim Shadchin* – State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Student, Maximshadchin@gmail.com

#### INVESTIGATION OF HUMAN TOOTH ENAMEL REMOVAL EFFICIENCY BY SINGLE MODE RADIATION OF YAG: ER LASER

**A. Belikov, E. Zholobova, A. Skripnik, T. Strunina**

**Keywords:** laser, mode structure, removal efficiency, enamel, human tooth, aspect ratio.

Dynamics of human tooth enamel removal efficiency by TEM<sub>00</sub> radiation of YAG: Er laser is investigated. The spatial–power parameters of single mode radiation of free–running YAG: Er laser able to form craters in a tooth with aspect ratio higher than 10:1 are experimentally determined.

*Andrei Belikov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", PhD, Associate professor, meddv@grv.ifmo.ru

*Ekaterina Zholobova* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", engineer, ktr-pavl@mail.ru

*Alexei Skripnik* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", PhD, Associate professor, skrypnik@mail.ru

*Tat'yana Strunina* - State Educational Establishment of High Professional Education Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, struninatiana@mail.ru

## MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

### SMALL-ANGLE X-RAY DIFFUSE SCATTERING RESEARCH OF MINERAL FINE-DISPERSED FRACTIONS

**A. Simakov, A. Smirnov, B. Fyodorov**

**Keywords:** small-angle X-ray diffuse scattering, roughness of surface, fractal dimensions, Guinier-plot, mechanical destruction of minerals, malleable, fragile, cleavage.

We investigated surface mechanical destruction of six minerals: albite, labradorite, quartz, diamond, galena and copper-glance. Small-angle X-ray scattering curves have been obtained for the minerals. It was shown that the surfaces of fragile minerals were absolutely plane in the wide range of dimensions (from 10 nm to 150 nm). At the same time the surface of the malleable minerals (galena and copper-glance) is much rougher in the same range of dimensions. The Guinier - plot gives the particle radius of galena ~ 48 nm.

*Alexander Smirnov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Associate professor, PhD, Associate professor, smirnav@ifmo.ru

*Boris Fyodorov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Professor, D. Sc., Professor, borfedorov@rambler.ru

*Anton Simakov* - Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University), Master of Technique and Technology, Postgraduate, simakov@spmi.ru

### DISTRIBUTION FUNCTION COMPUTATION FOR SPHERICAL PARTICLES SIZE ON THE BASIS OF SMALL ANGLE X-RAY SCATTERING

**E. Ukhanova, A. Smirnov, B. Fyodorov**

**Keywords:** function of size distribution, nanosized diamond particles in pyrocarbon matrix, small angle X-ray scattering.

The method for distribution function computation of the spherical particles size is evaluated on the model curves. This method is based on the direct integral transformation of the entire small angle X-ray scattering indicatrix. The efficiency of the method is confirmed, its resistance to the statistical noise is tested and the distortion caused by the limitation of the experimental scattering curve is estimated. Experimental curves of small angle scattering are obtained for the composite materials formed by nanosized diamond particles in pyrocarbon matrix. The distribution function of nanoparticles size is calculated by means of this method. The correlation between the distribution function and the thickness of the pyrocarbon layer is found.

*Ekaterina Ukhanova* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate, cathrin\_k80@mail.ru

*Alexander Smirnov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Associate professor, PhD, Associate professor, smirnav@ifmo.ru

*Boris Fyodorov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Professor, D. Sc., Professor, borfedorov@rambler.ru

### CHOICE AND JUSTIFICATION OF EFFECTIVENESS CRITERION IN DISTRIBUTED DATABASES DESIGN

**V. Novoselsky, T. Pavlovskaya**

**Keywords:** distributed databases, fragmentation, allocation, distributed query execution.

Distributed database design lifecycle is considered, design phases are described. Problem of distributed database design is formulated based on the mutual interdependency between fragmentation phases, allocation phase and query execution plan of each request. Choice and justification of effectiveness criterion in distributed database design is done. Authors consider criterion components and explore the dependence on various parameters.

*Veniamin Novoselsky* - "TietoEnator", Ltd., Engineering Group Manager, veniaminn@gmail.com

*Tat'yana Pavlovskaya* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Associate professor, PhD, Professor, mux@tp2055.spb.edu

## THE CONVERTER OF LINEAR MOVINGS WITH PSEUDORANDOM CODE SCALES ON THE BASIS OF RECALCULATION SCHEME

A. Ozhiganov, Zhuan Chzhipehn

**Keywords:** code scale, M-sequence, reading element.

Principles of construction of single-track pseudorandom code scales are examined in the article for the transformers of the linear moving, and also the structure of transformer of pseudorandom code is offered in an usual binary code.

*Alexander Ozhiganov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Professor, D.Sc., Professor, ojiganov@mail.ifmo.ru

*Zhuan Chzhipehn* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate, zhipeng\_ruan@mail.ru

## AUTOMATIC TIME CALIBRATION AND SYNCHRONIZATION IN EMBEDDED COMPUTER SYSTEMS

D. Kovyazina

**Keywords:** time calibration, clock calibration, frequency calibration, time synchronization, embedded systems.

Two approaches of precise time provision in embedded systems with low-precise time requirements are considered in this article: time calibration and synchronization. The first approach offers exact technical decision, the second approach offers method of time synchronization. Much attention is given to automation of time adjustment process within offered decisions.

*Dinara Kovyazina* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate, dinara\_k@list.ru, dinara@d1.ifmo.ru

## INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS CONSTRUCTION PRINCIPLES APPLICATION OF EFFECTIVE USER INTERFACES OF ELECTRONIC DOCUMENT CIRCULATION SYSTEMS

D. Korablyov

**Keywords:** user interface, electronic document circulation, construction principles.

Main construction principles of the effective user interface of electronic document circulation systems are described in the article. Application techniques of principles are given. Positive embodiment of designing principles in existing electronic document circulation systems is considered.

*Dmitriy Korablyov* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate, dmitriikorablev@inbox.ru

## ROBUSTNESS INCREASE OF DISCRETE COSINE TRANSFORM ALGORITHMS AGAINST FREQUENCY DOMAIN ATTACKS

N. Prokhozhev, O. Mikhailichenko, A. Korobeinikov

**Keywords:** steganography, JPEG compression, DCT-base algorithms.

This article describes a way to increase a robustness of discrete cosine transform (DCT-based) algorithms. The Koch algorithm is used to show robustness against frequency domain attacks. The article illustrates a relationship between robustness and area of used DCT coefficients. JPEG compression, white noise, filters and resizing are used as external attacks. The ways of robustness increase are considered by optimal decision of embedding domains.

*Nikolai Prokhozhev* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", Postgraduate, karaja2@yandex.ru

*Olga Mikhailichenko* - State Educational Establishment of High Professional Education "Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics", senior lecturer, 19791109@list.ru

*Anatoliy Korobeinikov* - Institute of Geomagnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences, Deputy Director, D. Sc., Professor, korobeynikov\_a\_g@mail.ru

## NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

### CREATING OF THE ACTIVE LEARNING TECHNOLOGY ON THE BASIS OF ONTOLOGY MODELING

V. Gorovoy, D. Mouromtsev

**Keywords:** distance education, active learning, ontology engineering, wiki.

The theoretical approaches and an example of the practical realization of a new method of education for e-learning system and self education are given in the article. The principles of active type educational process are defined from the e-learning point of view. The possibilities of ontological modeling and the WEB 2.0 network

---

technologies for creating a new generation of e-learning systems are considered. Scenario of educational process based on the described approach is given.

*Vladimir Gorovoy* – Saint-Petersburg State University. Management High School, Assistant, vladimir.gorovoy@gmail.com

*Dmitry Mouromtsev* - State Educational Establishment of High Professional Education “Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics”, Associate Professor, PhD, Associate Professor, Mouromtsev@mail.ifmo.ru

#### FORMAL FRAMEWORK OF PROFESSIONAL EDUCATIONAL STANDARDS DESIGN

V. Nikitin

**Keywords:** professional and educational standards, standard design problems, professional occupation area model, specialist’s model, model of specialist’ training content, classification methods.

The article deals with the methods, algorithms and procedures of educational standards design in the field of professional education. Complex multidimensional data analysis methods are considered at the main stages of professional educational standards design.

*Victor Nikitin* – Moscow State University – The Higher School of Economics, PhD, Vice Rector, Dean, vnikitin@hse.ru

## Обращение к подписчикам

Уважаемые подписчики научно-технической литературы!

«Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики» издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание (до 11 выпуска, издание называлось «Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета)»). Издатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (ГОУ ВПО «СПбГУ ИТМО»).

Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска 120 листов.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN: 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-33466 от 10 октября 2008 года.

*Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».*

Все публикации в журнале проходят рецензирование ведущих специалистов по научным направлениям.

### *Примерная тематика журнала*

Публикация материалов, отражающих достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оптотехника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Журнал может быть полезен для учреждений высшего профессионального образования, научных учреждений и производственных предприятий, а также для отдельных научных работников, студентов, аспирантов и соискателей ученой степени доктора и кандидата наук.

Подписку можно оформить во всех отделениях печати. Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать (газеты и журналы).

Главный редактор журнала,  
доктор технических наук, профессор  В.О.Никифоров

Адрес редакции: 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49, E-mail:  
[karmanov@mail.ifmo.ru](mailto:karmanov@mail.ifmo.ru) Сайт журнала <http://books.ifmo.ru/ntv>

---

Подписано к печати 31.03.2009 Тираж 350 экз. Заказ № 8(60)

---

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

---

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи  
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.

Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать  
(Газеты. Журналы)

© Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики, 2009