

*В.В. Трофимов, В.А. Трофимов*

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМ КРИСТАЛЛОМ<sup>1</sup>**

### **1. Введение**

Фотонные кристаллы и фотонные структуры интенсивно исследуются с момента их предсказания в 1987 г. (см. например [1-25] и содержащуюся там обширную библиографию). Это связано с возможностью реализации в них запрещенных зон, аналогичных тем, которые имеют место при воздействии рентгеновского излучения на твердое тело, как в оптическом диапазоне частот, так и других диапазонах частот электромагнитного излучения. В результате, они нашли широкое применение в задачах передачи и обработки информации в волоконно-оптических системах связи. На основе ФК предложены различные схемы реализации полностью оптических переключателей, разветвителей, частотных преобразователей и фильтров. Также большой практический интерес вызывает возможность локализации световой энергии в веществе, вызванная различными физическими механизмами, в связи с потенциальной возможностью построения на этой основе трехмерных оптических носителей информации. Они нашли широкое применение в лазерных системах, а также в последнее время их стали применять для улучшения характеристик антенн. Поэтому проблема моделирования взаимодействия лазерного излучения с фотонными кристаллами весьма актуальна.

Математически взаимодействие лазерного излучения с фотонными кристаллами описывается либо уравнениями Максвелла, либо уравнением (системой уравнений) Шредингера с периодическими коэффициентами в некоторой области по пространственным координатам. Коэффициенты уравнений описывают как линейные, так и нелинейные свойства среды. Для практики интересны задачи, имеющие как одно пространственное измерение, так и два и три пространственных измерения. При этом рассматриваются, как правило, нестационарные задачи. Визуализация результатов компьютерного моделирования нестационарного взаимодействия световых импульсов с нелинейными и линейными одно и двумерными фотонными кристаллами выполнена на основе работы [26]. Поэтому в данной работе описаны программы, которые относятся к

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 09-07-00372-а)

визуализации распространения светового импульса в трехмерном фотонном кристалле. Следовательно, построения выполняются для распределений интенсивности, зависящих от трех пространственных координат и времени. Учитывая пространственные размеры фотонного кристалла, имеющего период от 200 нм до 1 мкм, длительность фемтосекундного импульса (100-800 фс) и интервал времени, на котором проводится анализ, необходимо обрабатывать массивы, размер которых составляет несколько гигабайт. Стандартные графические пакеты для этих целей непригодны как из-за их производительности, так и из-за отсутствия ряда свойств, ориентированных на быстрый диалоговый интерфейс для анализа имеющейся информации. Созданная программа позволяет просматривать любые подобласти исходной области с разной степенью подробности и при необходимости проводить интерполяцию результатов на более частую сетку; строить поверхности интенсивности, изменяющейся в выбранном интервале ее значений и т.д. Эффект ввода четвертого измерения достигается представлением интенсивности в градации различных цветов. Для удобства пользователя построение графиков может быть выполнено для файлов, находящихся в любом месте на жёстком диске. Сюда же записываются результаты построения. Учитывая опыт предыдущих разработок и их эксплуатации для широкого круга задач нелинейной оптики, в качестве языка реализации выбран язык Delphi с использованием библиотеки OpenGL.

## 2. Описание структуры программы и её запуска

Запуск программы `x_y_z_i.exe`, может быть выполнен из любой директории, в которой должны содержаться следующие поддиректории, изображенные на Рис.1.

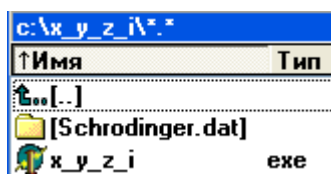


Рис.1. Директория, содержащая программу `x_y_z_i.exe` и необходимые для её работы поддиректории.

Поддиректория `Schrodinger.dat` содержит файлы (Рис.2), которые формируются в определенном формате исходной программой по моделированию взаимодействия лазерного излучения с фотонным кристаллом. Они используются для построения распределений интенсивности, как в фиксированный момент времени, так и avi-файлов, отражающих динамику их изменений. Следует подчеркнуть, что файл

Intensity.dat содержит величину интенсивности, значения трех пространственных координат и времени. Остальные файлы этой директории содержат значения соответствующих пространственных координат и моментов времени.

c:\x_y_z\Schrodinger.dat\*		
Имя	Тип	Размер
...		<DIR>
INTENSITY	DAT	30,642,693
T	dat	45
X	dat	741
Y	dat	741
Z	dat	741

Рис. 2. Содержимое директории Schrodinger.dat.

Программа состоит из перечисленных ниже модулей.

Модуль Main.pas – отображает главное меню программы. Выбором соответствующей опции предоставляется возможность построения распределения интенсивности в выбранном сечении пространственной координаты, динамики интенсивности при изменении выбранной пространственной координаты, четырехмерного распределения интенсивности в заданный момент времени.

Модуль Section.pas позволяет выбрать значение какой-либо пространственной координаты для построения трехмерного пространственного распределения интенсивности в заданный момент времени, а также координатную ось, вдоль которой по сечениям выполняется построение распределения интенсивности в заданный момент времени.

Модуль SelectInterval.pas используется при более детальном просмотре выбранной подобласти в пространстве.

Модуль Pic.pas используется для построения четырехмерного пространственного распределения интенсивности. Она представляется в градации различных цветов.

### 3. Описание главного меню программы

Иллюстрацию работы программы проведем на примере построения графиков функции для следующего распределения интенсивности

$$I(x,y,z,t) = \tau \cdot (j+1) \cdot \exp\left\{-\left(x-L_x/2\right)^2 - \left(y-L_y/2\right)^2 - \left(z-L_z/2\right)^2\right\},$$

$$j=0,1,2, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z \tag{1}$$

с параметрами

$$\tau=0.6, L_x=10, L_y=10, L_z=10. \tag{2}$$

Выше  $I(x,y,z,t)$  – безразмерная интенсивность лазерного излучения,  $t$  – время,  $\tau$  – шаг по времени,  $x, y, z$  – пространственные координаты,  $L_x, L_y, L_z$  – размер области по соответствующей координате. По пространственным координатам задается равномерная сетка с числом узлов, равным 101, что соответствует 100 интервалам.

Все рисунки и соответствующие окна меню являются цветным, однако ниже они выглядят в черно-белом изображении.

При запуске программы на экране всплывает окно (Рис. 3а), в котором необходимо выбрать момент времени, для которого будет выполняться построение графиков (Рис. 3б). После его выбора курсором мыши, появится окно, изображенное на Рис.3в. Поля меню **Min I** и **Max I**, **Min X** и **Max X**, **Min Y** и **Max Y**, **Min Z** и **Max Z** содержат соответственно минимальное и максимальное значения интенсивности и пространственных координат для текущего момента времени. При нажатии кнопки **Graph** выполняется построение графика для выбранных параметров (Рис. 4). Очевидно, что для параметров в полях координат, равных соответствующим размерам области, график функции будет представлять собой поверхность, на которой достигается минимальное значение интенсивности, указанное в поле **Min I**.

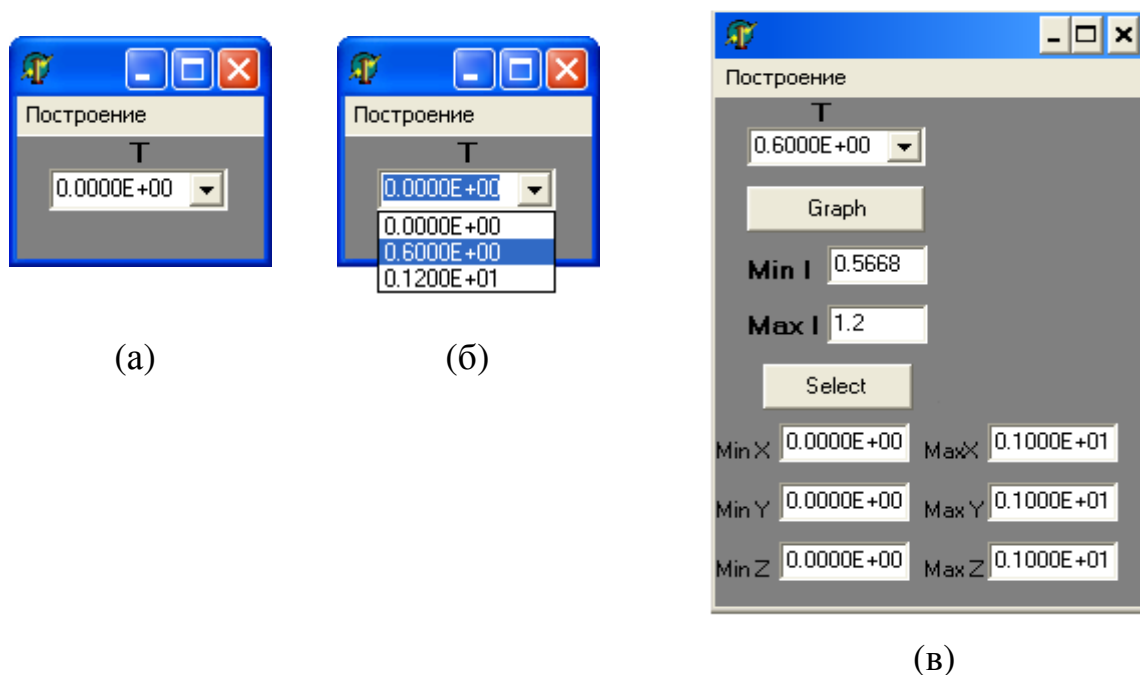


Рис. 3. Меню программы  $x\_y\_z\_i.exe$ , всплывающее после ее запуска (а), при подведении курсора мыши к полю времени (б) и после выбора момента времени (в).

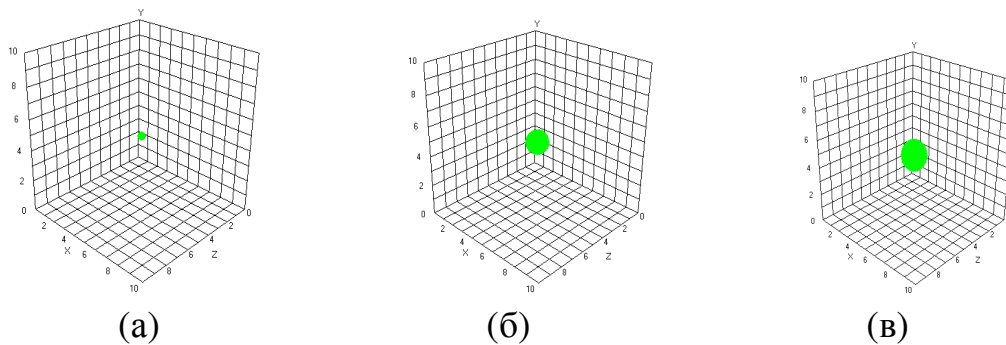


Рис. 4. График гауссовой функции, построенный для параметров Рис. 3в с измененным минимальным значением интенсивности (**Min I = 0.5668**), в моменты времени  $t=0$  (а), 0.6 (б), 1.2 (в).

Из-за возрастания во времени рассматриваемой функции с ростом  $t$  будет увеличиваться и область, соответствующая минимальному значению интенсивности, что можно видеть на Рис.4. При этом остальные точки пространства будут закрыты этой поверхностью. Для их визуализации можно либо “вырезать” некий конус в поверхности, либо закрашивать только определенную часть пикселей внешней поверхности (тогда внутренняя часть области будет видна сквозь внешнюю часть), либо изменять пространственные размеры. Результат изменения минимальных и максимальных координат рассматриваемой области представлен на Рис. 5 при разных углах зрения на фигуру.

Если в полях **Min I** и **Max I** задать значения максимума и минимума интенсивности по всему файлу Intensity.dat, то соответствующие распределения интенсивности для рассматриваемых моментов времени будут иметь вид, представленный на Рис. 6. Как видим, из построенных рисунков нетрудно качественно восстановить пространственное распределение интенсивности лазерного излучения. Заметим, что размер разноцветных структур определяется заданием интервалов интенсивности, которым соответствует данный цвет. Их также может изменять пользователь.

Еще одна опция данного меню (кнопка  ) предназначена для построения формируемых программой поверхностей, соответствующих 10 интервалам интенсивности, которые вычисляются отдельно в каждый момент времени.

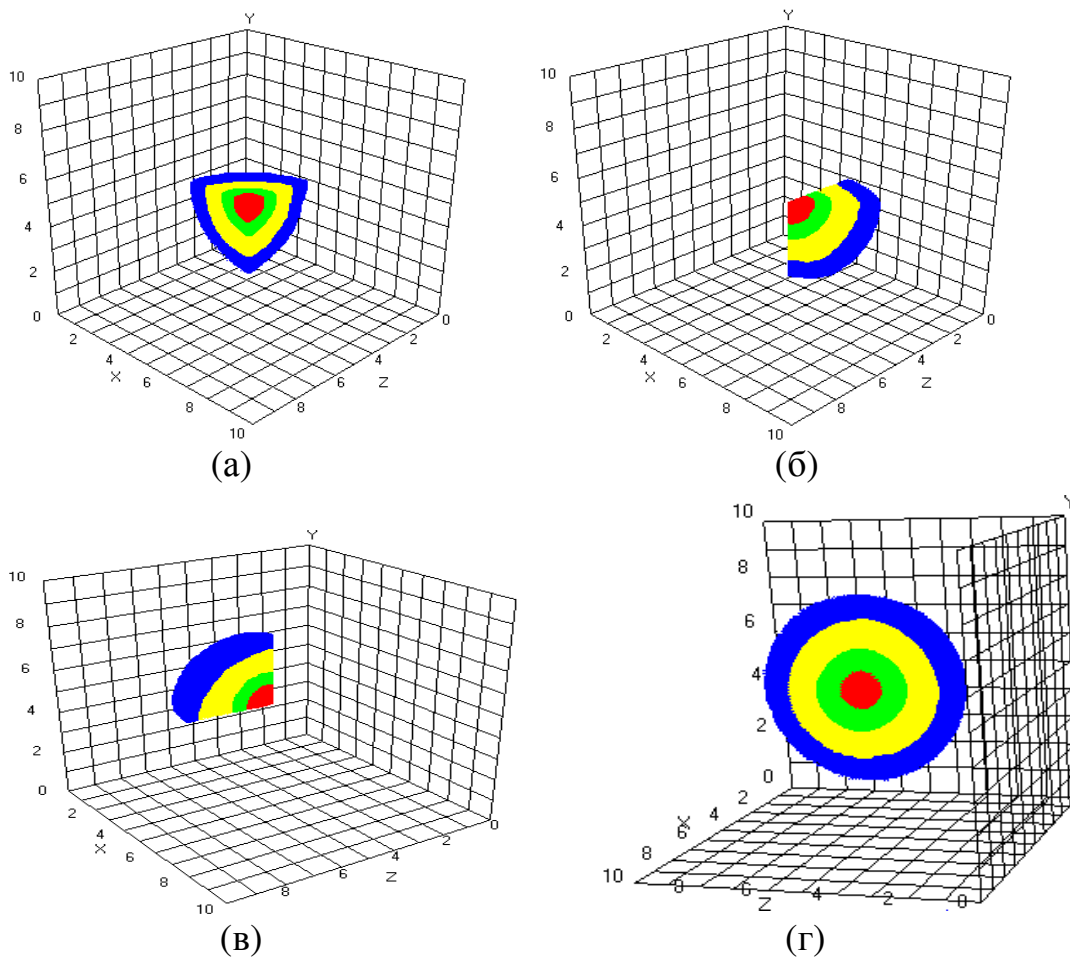


Рис.5. Пространственное распределение интенсивности в градации четырех цветов при изменении координат в полях **Min X** и **Max X**, **Min Y** и **Max Y**, **Min Z** и **Max Z**.

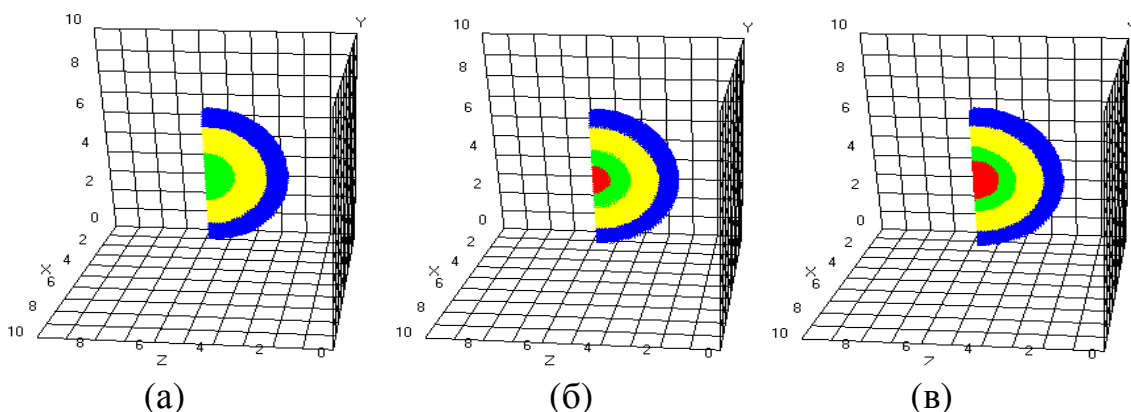


Рис. 6. График гауссовой функции, построенный для **Min X=0** и **Max X=5**, **Min Y=0** и **Max Y=10**, **Min Z=0** и **Max Z=5**, максимального значения интенсивности, вычисленного по всему файлу Intensity.dat, ее минимальным значением (**Min I = 10<sup>-6</sup>**), в моменты времени t=0 (а), 0.6 (б), 1.2 (в).

Пример всплывающего в этом случае окна изображен на Рис.7. При выборе одного из интервалов интенсивности и нажатия кнопки Close окно закрывается, а в полях **Min I** и **Max I** формы появляются выбранные значения. Далее, при нажатии кнопки  построится поверхность, соответствующая данному значению интервала интенсивности.

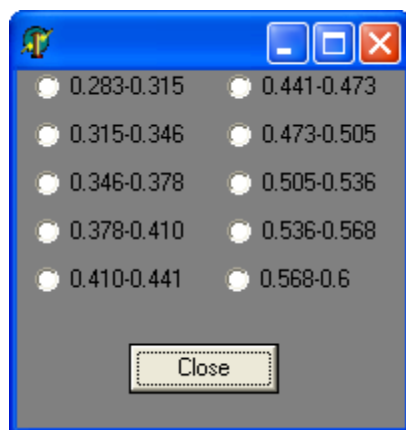
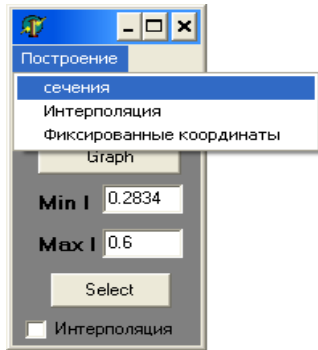


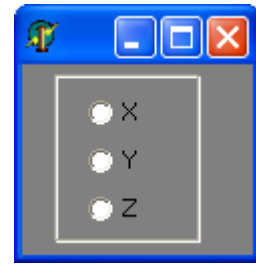
Рис. 7. Окно выбора интервала интенсивности, всплывающее при нажатии кнопки .

После построения графика имеется возможность управления точкой, с которой происходит обзор поверхности. Для этого предусмотрен поворот изображения вокруг каждой из трёх осей. При однократном нажатии соответствующих клавиш (они описаны в [26]) осуществляется поворот на 5 градусов вокруг выбранной оси. Следует, однако, подчеркнуть, что при построении новой поверхности (без перезагрузки программы) используется последний угол обзора, имевший место для предыдущего рисунка. При новом запуске программы реализуется угол обзора, установленный в программе по умолчанию.

Для построения сечения четырехмерной поверхности по одной из координатных осей, необходимо выбрать пункт меню “Построение” и далее пункт меню “сечение” (Рис.8а). В результате этого на экране появится окно (Рис.8б), в котором необходимо активировать пространственную координату для дальнейшего построения графика. После ее выбора становится активным поле, в котором содержатся значения координат, доступные для данного момента времени (Рис.9). Выбор координаты (Рис.10) позволяет перейти к полю нового уровня: всплывает на экране кнопка  (Рис.11). При ее нажатии получим один из графиков, изображенных на Рис.12 или Рис.13.

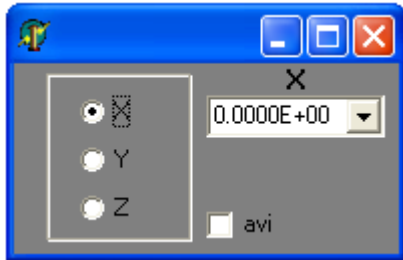


(a)

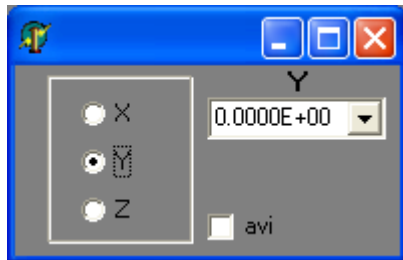


(б)

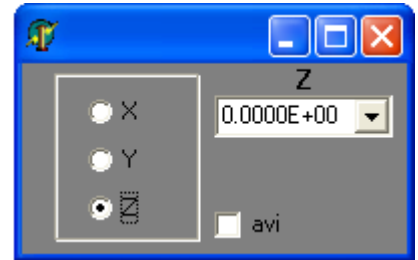
Рис. 8. Всплывающее окно при выборе пункта меню “Построение” (a) и после выбора в нем пункта меню “сечение” (б).



(a)

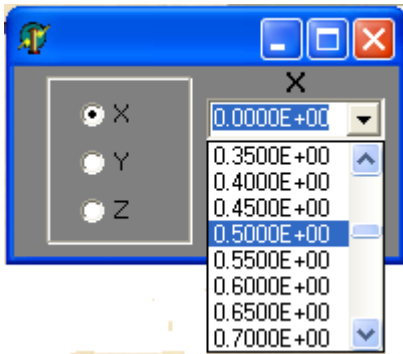


(б)

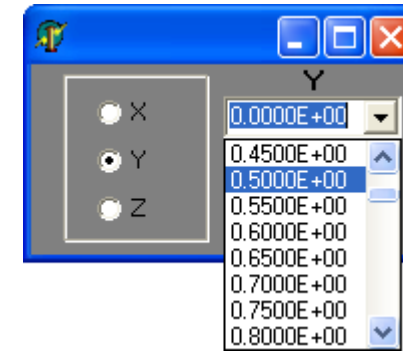


(в)

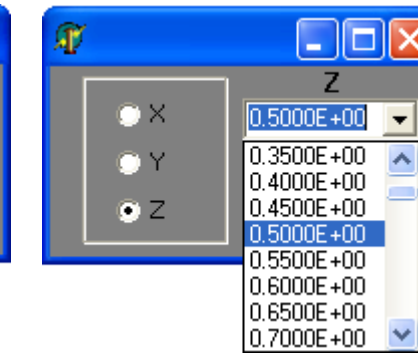
Рис.9. Активация окна следующего уровня после выбора пространственной координаты X (a), Y (б), Z (в).



(a)



(б)

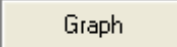


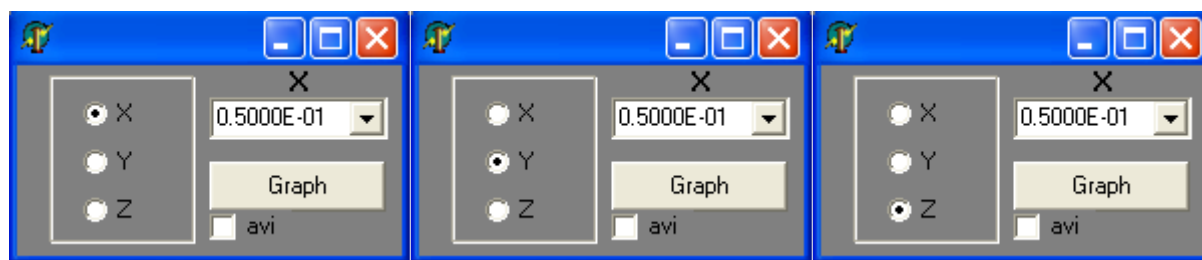
(в)

Рис.10. Выбор сечения по пространственной координате X (a), Y (б), Z (в).

Эти графики представляют собой проекцию распределения интенсивности на соответствующую плоскость. На Рис.13 хорошо видно изменение пространственного масштаба распределения интенсивности из-за ее роста и появление области высокой интенсивности при приближении плоскости к центральной части пучка ( $Y=5$ ).



Активацией надписи avi на одном из окон Рис.9 посредством установления “галочки” в соответствующем поле достигается переход к созданию avi-файла эволюции интенсивности в сечениях по выбранной координате. Формирование avi-файла начинается, после нажатия кнопки  и затем латинской буквы “a”.

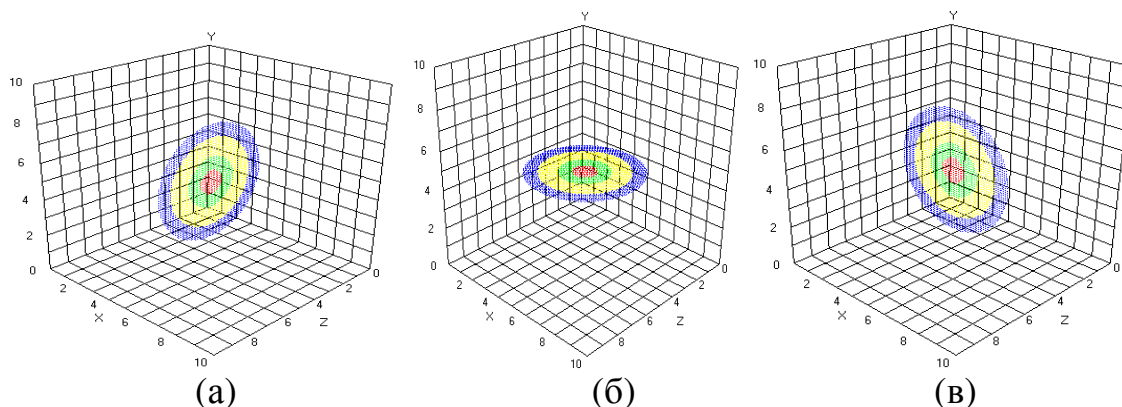


(a)

(б)

(в)

Рис.11. Активация поля  после выбора значения пространственной координаты.




(a)

(б)

(в)

Рис.12. Распределение интенсивности оптического излучения в плоскости  $X=5$  (a),  $Y=5$  (б),  $Z=5$  (в). Вид сверху.

Улучшение качества изображения поверхности интенсивности, соответствующей заданному интервалу ее изменений, в пространстве трех переменных достигается с помощью опции “Интерполяция” (Рис.14а). После ее активизации появляется форма, изображённая на Рис.14б. В соответствующей строке задается требуемое число узлов сетки, в которых вычисляется интенсивность оптического излучения. Затем для построения графика необходимо нажать кнопку  .

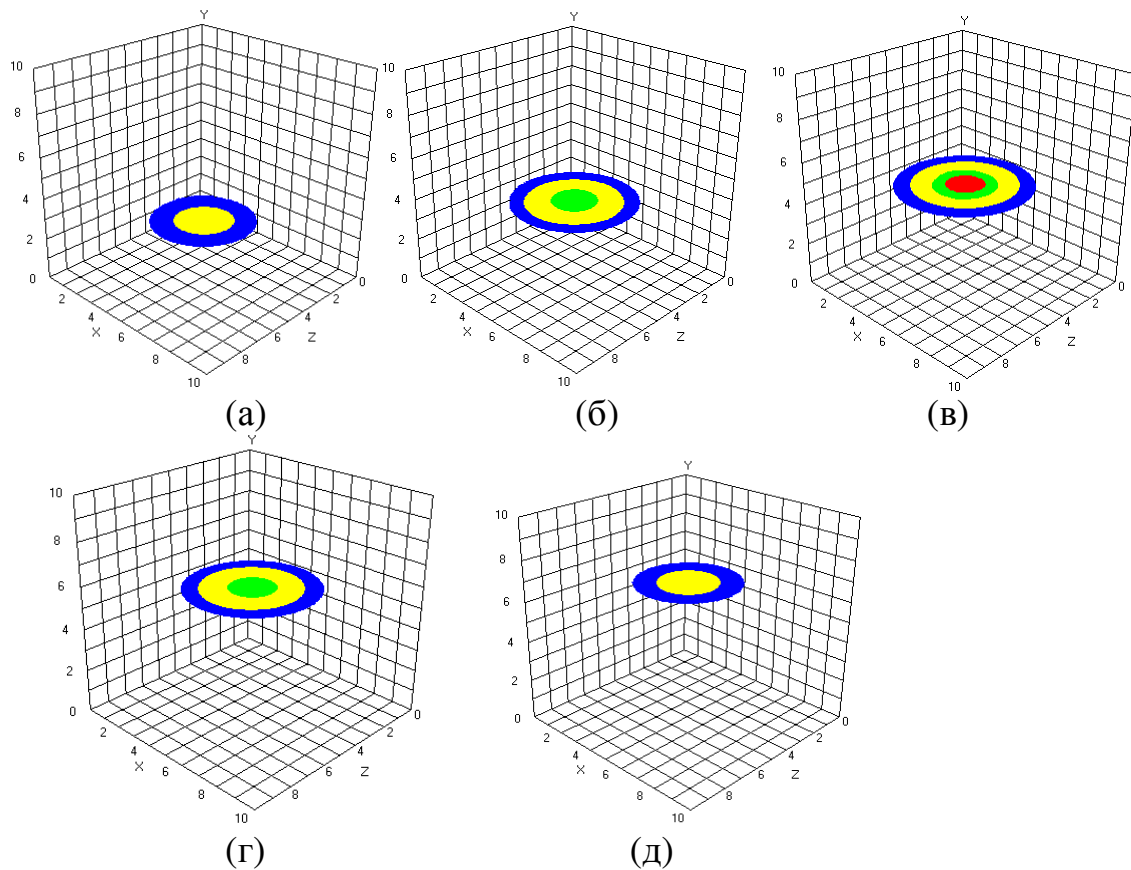


Рис.13. Распределение интенсивности оптического излучения в плоскости  $Y=3$  (а), 4 (б), 5 (в), 6 (г), 7(д). Вид сверху.

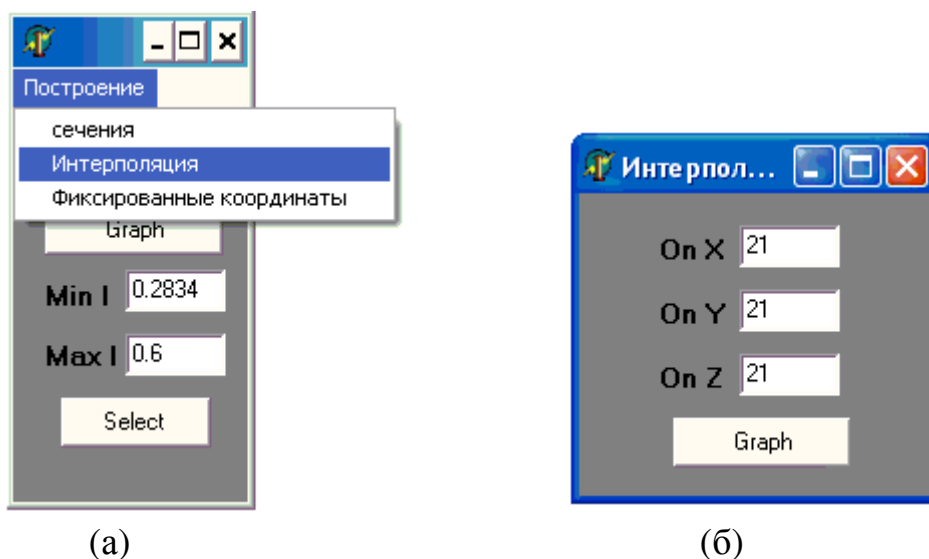


Рис. 14. Активация опции меню "Интерполяция", задание число узлов сетки, в которых вычисляется распределение интенсивности, (б) и запуск программы с новым числом узлов (кнопка  на Рис. 14 б).

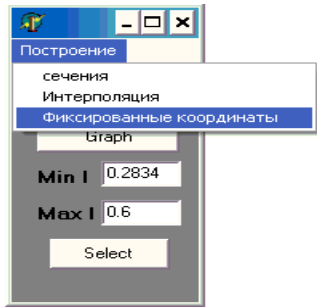


Рис.15. Опции меню “Построение” и выбор опции “Фиксированные координаты”.

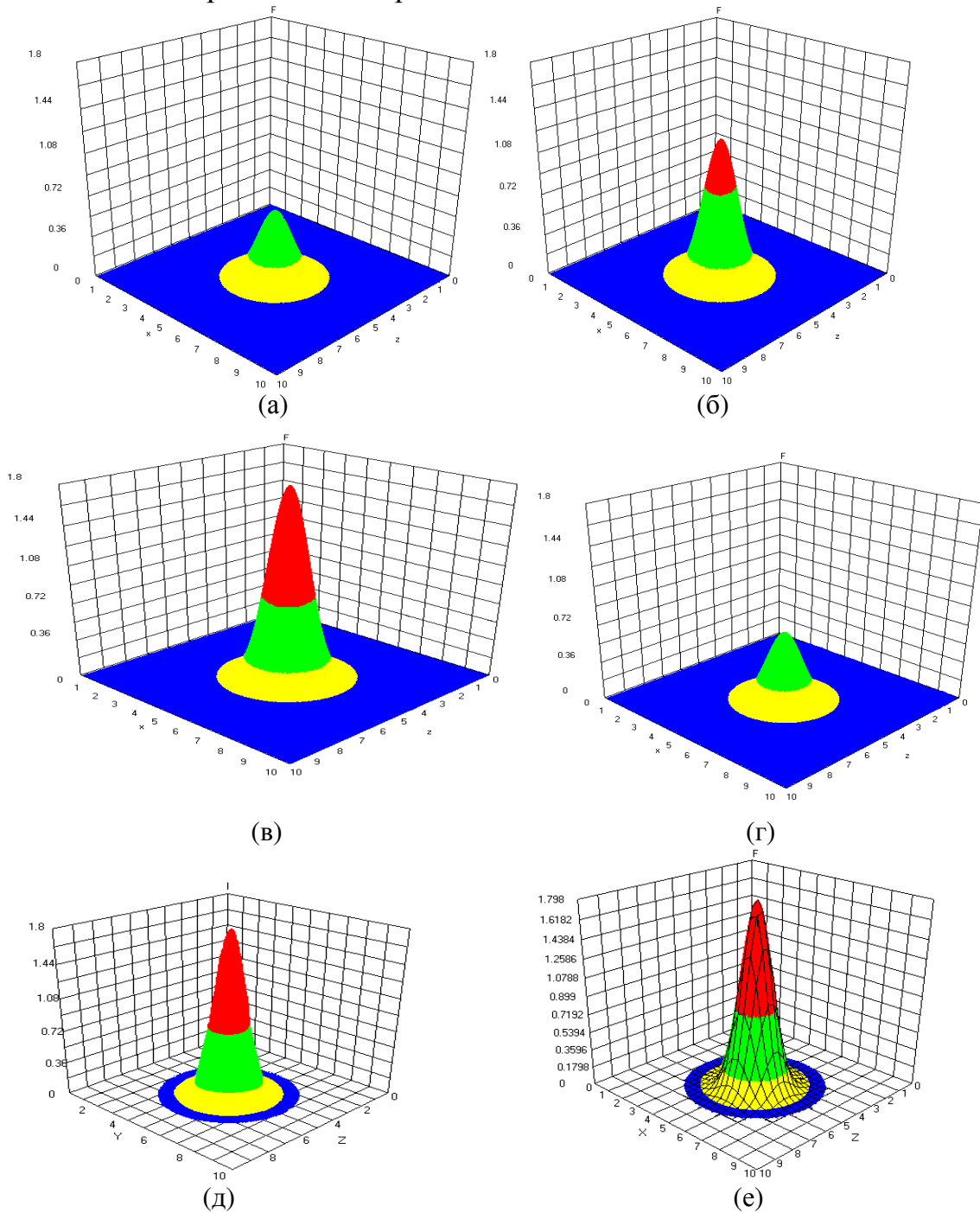



Рис. 16. Пространственное распределение интенсивности оптического излучения при фиксированной координате  $Y=5$  (а-в,д,е), б(г) и времени  $t=0$  (а),  $0.6$  (б),  $1.2$  (в-е) для  $\text{Min } I = 0$  (а-г),  $10^{-6}$  (д,е).

Еще один пункт меню “Построение” позволяет нарисовать трехмерный график функции двух переменных, то есть распределение интенсивности в фиксированный момент времени и для выбранного значения одной из пространственных координат. Для этого необходимо выбрать в меню “Построение” пункт “Фиксированные координаты” (Рис.15). В результате, появится окно (Рис.8б), в котором необходимо активировать одну из пространственных координат (Рис.9), затем выбрать значение координаты. После этого на экране появится форма с полем нового уровня: всплывает на экране кнопка  (Рис.11). При ее нажатии получим один из графиков, изображенных на Рис.16. Заметим, что они построены при выборе максимального значения интенсивности по всему файлу Intensity.dat. Однако минимальные значения интенсивности для них отличаются.

Как видим, программа позволяет использовать дополнительные инструменты в виде сетки (Рис.16е) для наглядности визуализации результатов компьютерного моделирования.

#### **4. Заключение**

Разработанная и описанная выше программа для визуализации результатов обработки компьютерного эксперимента по нестационарному взаимодействию лазерного излучения с фотонными кристаллами в пространстве трех измерений позволяет эффективно проводить их анализ. Она обладает широким спектром возможностей для просмотра пространства, в котором задана функция, выполнять построения в различных плоскостях и создавать avi-файлы. Изображение четвертого измерения, как это принято, достигается за счет использования цветовой гаммы, каждый цвет которой соответствует определенному интервалу интенсивности лазерного излучения. Все рисунки выполняются в цветном формате.

#### **Литература**

1. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2059-2062.
2. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices.// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2486-2489.
3. Joannopoulos J. D., Meade R. D. and Winn J. N. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. NY: Princeton.1995. 152 p.
4. Photonic Crystals: Physics, Fabrication, and Applications. / Edited by Inoue K. and Ohtaka K. Berlin: Springer. 2004. 320 p.

5. Kivshar Yu. S. and Agrawal G. P. Optical Solitons: From fibers to photonic crystals. San Diego: Academic Press. 2003. 540 p.
6. Jin Liu et al. All-optical switching using controlled formation of large volume three-dimensional optical matter. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. N23. 233108.
7. Lidorikis E. and Soukoulis C. M. Pulse-driven switching in one-dimensional nonlinear photonic band gap materials: a numerical study. // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 61. P. 5825 - 5829.
8. Yanik M. F., Fan S., Soljčić M. and Joannopoulos J. D. All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry. // Optics Letters. 2003. Vol. 28. N 24. P. 2506 - 2508.
9. Yanik M. F., Fan S. and Soljacic M. High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 2739 - 2741.
10. Yannopoulos V., Modinos A. and Stefanou N. Anderson localization of light in inverted opals. // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 68. 193205.
11. Sheng P. Introduction to Wave Scattering, Localization, and Mesoscopic Phenomena. Boston: Academic Press. 1995. 339 p.
12. Kivshar Yu. S., Kevrekidis P.G. and Takeno S. Nonlinear localized modes in waveguide bends. // Phys. Lett. A. 2003. Vol. 307. P. 281 - 283.
13. Goodman R. H., Holmes Ph. J. and Weinstein M. I. Strong NLS soliton-defect interactions. // Physica D. 2004. Vol. 192. P. 215 - 242.
14. Tcherniega N. V. and Kudryavtseva A. D. Photonic flame effect. // Journal of Russian Laser Research. 2006. Vol. 27. N5. P. 450 - 456.
15. Tcherniega N. V. Some new characteristics of experimental observation of the photonics flame effect. // Journal of Russian Laser Research. 2007. Vol. 28. N3. P. 236 - 243.
16. Xianyu A. and Sailing H. Three-dimensional photonic crystal of negative refraction achieved by interference lithography. // Optics Letters. 2004. Vol. 29. N 21. P. 2542 - 2544.
17. Markowicz P.P. and et al. Dramatic Enhancement of Third-Harmonic Generation in Three-Dimensional Photonic Crystals. // Physical Review Letters. // 2004. Vol. 92. N 8. 083903(4).
18. Markowicz P.P. and et al. Electrically switchable third-harmonic generation in photonic crystals. // Journal of applied physics. 2005. Vol. 97. N 8. 083512(4).

19. Braginsky L. and Shklover V. Light propagation in an imperfect photonic crystal. // *Physical Review B*. 2006. Vol. 73. 085107(11).
20. Trofimov V.A., Tereshin E.B. and Fedotov M.V. Fast and slow localized sub-pulses in photonic crystal. Abstract of International Conference Laser Optics'03. St-Petersburg. Russia 2003. TuR5-138.
21. Trofimov V.A., Tereshin E.B. and Fedotov M.V. Soliton-Like Propagation of Light Pulses in a Nonlinear Photonic Crystal. // *Optics and Spectroscopy*. 2004. Vol. 97. N 5. P. 773 - 781.
22. Trofimov V.A. and Tereshin E.B. Soliton Self-formation in Nonlinear Photonic Crystal. Technical Digest on CD-ROM of ICONO/LAT 2005. St.-Petersburg. Russia. 2005. ISM12.
23. Trofimov V.A. and Tereshin E.B. Influence of Anderson localization on nonlinear light localization in 1D photonic crystal. // *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 5949. P. 59490L-1 - 59490L-7.
24. Trofimov V.A. and Tereshin E.B. Localization of Light Energy of a Femtosecond Laser Pulse upon Generation of the Second Harmonic in a One-Dimensional Nonlinear Photonic Crystal with Alternating Nonlinear Response. // *Optics and Spectroscopy*. 2008. Vol. 104. N 5. P. 737 - 743.
25. Trofimov V.A., Volkov A.G., Sheng Lan. Two-waves optical switching element based on layered nonlinear structure. // *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 740. P. 7420-37 (12p).
26. Трофимов В.В. Пакет программ для компьютерного моделирования процесса генерации второй гармоники в трехмерном случае и визуализации его результатов в среде Windows. / Прикладная математика и информатика. М. : изд-во факультета ВМиК МГУ. 2007. N25. С. 5 - 55.