

Визуализация деталей сложной внутренней структуры модельных объектов методом диффузионной оптической томографии

Е.В.Третьяков, В.В.Шувалов, И.В.Шутов

Проведено тестирование приближенного алгоритма решения задачи диффузионной оптической томографии в экспериментах по визуализации деталей внутренней структуры сильнорассеивающих модельных объектов с рассеивающими и полупрозрачными включениями, а также с поглощающими включениями, расположенными внутри других оптических неоднородностей. Показана устойчивость использованного алгоритма к погрешностям, позволяющая использовать его для быстрого (2–3 мин) восстановления изображений деталей объектов со сложной внутренней структурой.

Ключевые слова: оптическая томография, распространение света в рассеивающей среде, визуализация изображения.

1. Диффузионная оптическая томография

В активно развивающемся в последние годы новом направлении диагностики – оптической томографии (ОТ) – объект многократно (для разных положений излучателя i и приемника j) просвечивается входным излучением ближнего ИК диапазона. Для всех комбинаций i, j измеряются характеристики выходного излучения (мощность излучения, энергия и форма импульса, задержка последнего относительно момента входа в объект и т. д.). Результатом является матрица $\{\Phi_{i,j}\}$ выходных данных, число элементов которой определяется количеством используемых положений излучателя и приемника. Далее по этой матрице восстанавливается внутренняя структура объекта, т. е. решается так называемая обратная задача. Роль физических параметров, пространственные распределения которых определяются на этом этапе, играют коэффициенты поглощения (μ_a) и рассеяния (μ'_s), параметр анизотропии γ индикатрисы рассеяния и другие.

Даже в условиях многократного малоуглового рассеяния [1, 2] из полного потока выходного излучения можно выделить вклад фотонов, распространяющихся от точки i к точке j (далее – в i, j -измерении) по почти прямолинейным траекториям [3, 4]. В этом случае обратную задачу можно решать, используя алгоритмы, отработанные для проекционной рентгеновской томографии [5, 6]. Большинство методов ОТ (например, времяпролетная [7–9], когерентная [10–12] и модуляционная [13–15] ОТ) и различаются способами такого выделения. Особенностью диффузионной ОТ (ДОТ) является использование всего потока выходного излучения. В результате этого при прочих равных условиях возможна диагностика объектов существенно больших размеров, что является основным достоинством данного метода. Тем не менее появляется и серьезная проблема. Регистрируемые в i, j -измерениях фотоны распространяются по

случайным траекториям, и их приходится описывать статистически, вводя трехмерные (3D) пространственные распределения вероятности $f_{i,j}(\mathbf{r})$ прохождения фотонов через разные (координата \mathbf{r}) точки объекта. Однако, поскольку ширина этих распределений конечна, восстановление внутренней структуры объекта в ДОТ оказывается возможным [16–21].

2. Приближенный алгоритм решения задачи ДОТ

В [22–24] описан быстрый приближенный алгоритм решения задачи ДОТ, в котором полагается, что $\Delta\Phi_{i,j} = \Phi_{i,j}^{(1)} - \Phi_{i,j}$ – разность потоков выходного излучения (далее «тень») в отсутствие непрозрачных неоднородностей (включений, $\Phi_{i,j}^{(1)}$) и при наличии последних ($\Phi_{i,j}$) связана с появлением неоднородностей. Считается, что вероятность найти включения по данным каждого i, j -измерения $P_{i,j}^{(1)} \propto \Delta\Phi_{i,j}^{(1)}$, а пространственное распределение $P_{i,j}^{(1)}$ определяется как $p_{i,j}^{(1)}(\mathbf{r}) \propto P_{i,j}^{(1)} f_{i,j}^{(1)}(\mathbf{r})$, где $f_{i,j}^{(1)}(\mathbf{r})$ – распределение вероятности прохождения регистрируемых в i, j -измерении фотонов через объект без включений ($\mu_a, \mu'_s = \text{const}$).

Восстановленная внутренняя структура описывается распределением вероятности $p_{\Sigma}^{(1)}(\mathbf{r})$ нахождения включений в разных точках объекта, которое по результатам всех i, j -измерений пропорционально $\prod_{i,j} P_{i,j}^{(1)} f_{i,j}^{(1)}(\mathbf{r})$. Необходимая для алгоритма априорная информация о функциях $f_{i,j}^{(1)}(\mathbf{r})$ и $\Phi_{i,j}^{(1)}$ рассчитывается приближенно. Для этого единственное расчетное «эталонное» распределение $f_L^{(1)}(\mathbf{r})$ для объекта без включений аппроксимируется гладкой функцией \mathbf{r} с гауссовыми поперечными сечениями, которая последовательно преобразуется (масштабируется, «изгибается») и нормируется: $f_L^{(1)}(\mathbf{r}) \rightarrow f_{L_{i,j}}^{(1)}(\mathbf{r}) \rightarrow f_{i,j}^{(1)}(\mathbf{r})$ с учетом изменения расстояния между излучателем и приемником ($L \rightarrow L_{i,j}$) и их конкретных положений i и j . При изгибе образующие (осевые линии) распределений $f_{i,j}^{(1)}(\mathbf{r})$ задаются параболой, а процедура расчета полного массива из 1024 ($0 \leq i, j \leq 31$) таких распределений занимает менее 30 с. Элементы матрицы $\{\Phi_{i,j}^{(1)}\}$ также рассчитываются приближенно на основе эмпирических закономерностей, описанных в [22].

При апробации этого алгоритма выяснилось [23], что при наличии в объекте нескольких непрозрачных включений разного размера в восстановленной внутренней структуре реконструируются лишь ее наиболее крупномасштабные детали. Решить эту проблему удается за счет включения в алгоритм второй итерации, в которой априорная информация рассчитывается с учетом восстановленных на первой итерации деталей внутренней структуры [23, 24]. Предполагается, что $\Delta\Phi_{i,j}^{(2)} = \Phi_{i,j}^{(2)} - \Phi_{i,j}^{(1)}$ – разность потоков излучения в присутствии восстановленных деталей, информация о которых содержится в $p_{\Sigma}^{(1)}(\mathbf{r})$, и потоков, полученных из эксперимента, обусловлена погрешностями восстановления, и полная вероятность нахождения погрешности в i, j -измерении $P_{i,j}^{(2)} \propto \Delta\Phi_{i,j}^{(2)}$. Считается также, что пространственное распределение $P_{i,j}^{(2)}$ определяется 3D-плотностью вероятности $p_{i,j}^{(2)}(\mathbf{r}) \propto P_{i,j}^{(2)} f_{i,j}^{(2)}(\mathbf{r})$, где $f_{i,j}^{(2)}(\mathbf{r})$ – распределение вероятности прохождения фотонов, зарегистрированных в i, j -измерении, через объект со структурой, заданной функцией $p_{\Sigma}^{(1)}(\mathbf{r})$. Восстановленные на второй итерации детали внутренней структуры описываются плотностью вероятности $p_{\Sigma}^{(2)}(\mathbf{r})$, которая по результатам всех i, j -измерений определяется как $p_{\Sigma}^{(2)}(\mathbf{r}) \propto \prod_{i,j} P_{i,j}^{(2)} f_{i,j}^{(2)}(\mathbf{r})$.

Необходимая априорная информация о функциях $f_{i,j}^{(2)}(\mathbf{r})$ и $\Phi_{i,j}^{(2)}$ также рассчитывается приближенно, с использованием описанных выше процедур последовательных преобразований «эталонного» распределения $f_{\Sigma}^{(1)}(\mathbf{r})$ и «вырезания» (возможного за счет линейности задачи распространения) поглощенной части потока проходящих фотонов $\Phi_{i,j}^{(1)}$ уже восстановленными после первой итерации включениями $p_{\Sigma}^{(1)}(\mathbf{r})$ [23, 24]. Результирующая внутренняя структура описывается суперпозицией $p_{\Sigma}(\mathbf{r}) = p_{\Sigma}^{(1)}(\mathbf{r}) + p_{\Sigma}^{(2)}(\mathbf{r})$, расчет которой для двух поглощающих включений с использованием полного массива из 1024 ($0 \leq i, j \leq 31$) распределений $f_{\Sigma}^{(2)}(\mathbf{r})$ и потоков $\Phi_{i,j}^{(2)}$ занимает менее 2 мин. При необходимости в описанный алгоритм могут быть добавлены и следующие итерации.

3. Постановка задачи

Работоспособность описанной выше процедуры восстановления внутренней структуры сильнорассеивающих объектов методом ДОТ в нескольких простейших экспериментальных ситуациях с непрозрачными включениями была показана в [22–24]. Ниже представлены результаты применения этого алгоритма в экспериментах по визуализации внутренней структуры сильнорассеивающих объектов с более сложными типами включений (сильнорассеивающие и полупрозрачные включения, системы включений, часть из которых либо неразрешима в ДОТ, либо расположена внутри других полупрозрачных оптических неоднородностей). Фактически будет показано, что при внесении определенных корректив описанный алгоритм позволяет методом ДОТ восстанавливать внутреннюю структуру сильнорассеивающих объектов с поглощающими и рассеивающими включениями.

4. Эксперимент

В ходе экспериментов излучение непрерывного полупроводникового лазера ($\lambda = 820$ нм, мощность ~ 30 мВт) по одному из 31 оптоволоконных выходов оптического «переключателя» поступало в диагностируемый объект, представляющий собой черный цилиндрический сосуд

диаметром 140 мм и высотой 170 мм. Оптические волокна (31 вход и 1 выход для регистрации сигнала) были вклеены в боковые стенки сосуда на уровне его полувысоты. В сосуд заливалась двухкомпонентная (водная жировая эмульсия с добавлением чернил) сильнорассеивающая и слабопоглощающая ($\mu'_s \simeq 1.4$ мм⁻¹ и $\mu_a = 0.005$ мм⁻¹) среда и помещались включения. Роль последних играли черные непрозрачные цилиндры диаметром 9 мм, тефлоновый стержень диаметром 8 мм и куриные кости диаметром 8 и 10 мм. Помимо включений в сосуд мог помещаться имитирующий систему капилляров комок (диаметром 110 мм) тонкой металлической проволоки (диаметр проволоки был меньше пространственного разрешения) или тонкостенный (толщина стенки 1 мм) полый сильнорассеивающий пластиковый цилиндр диаметром 81 мм (имитация черепной коробки). Выходное излучение по оптическому волокну подавалось в систему регистрации, реализованную на базе работающего в режиме счета фотонов фотоэлектронного умножителя Hamamtsu R-636-10. Поскольку положение выходного волокна было неизменным, при сканировании объекта соответствующим образом менялись положения включений. Для этого последние крепились на подвижной крышке сосуда, которая в процессе сканирования вращалась вокруг своей оси. Сбор данных, управление и обработка результатов измерений осуществлялись персональным компьютером. В результате измерений получали матрицу входных данных $\{\Phi_{i,j}\}$ размерностью 31×32 .

5. Результаты эксперимента

Все измерения проводились по единой схеме. Сначала для сосуда с сильнорассеивающей и слабопоглощающей средой в отсутствие включений при произвольном фиксированном положении крышки ($j = j_0$) измерялась зависимость скорости фотоотчетов $\Phi_{i,j_0}^{(1)}$ от положения точки ввода излучения $1 \leq i \leq 31$. С учетом аксиальной симметрии объекта все остальные ($1 \leq j \leq 32$) элементы матрицы $\{\Phi_{i,j}^{(1)}\}$ находились циклической перестановкой элементов столбца $\{\Phi_{i,j_0}^{(1)}\}$. Затем осуществлялось полное ($1 \leq i \leq 31, 1 \leq j \leq 32$) сканирование объекта с включениями и находилась матрица $\{\Phi_{i,j}\}$. По данным этих двух измерений рассчитывались элементы матрицы $\{\Delta\Phi_{i,j}^{(1)}\}$, которые в дальнейшем и использовались в качестве набора входных данных для алгоритма визуализации, описанного выше.

При сложной структуре включений второе измерение разбивалось на два-три этапа. Помимо измерений элементов матрицы $\{\Phi_{i,j}\}$ для объекта с «полным» набором включений распределения скоростей фотоотчетов определялись и для «неполных» наборов. Например, в том случае, когда в объекте внутри рассеивающего цилиндра находились два непрозрачных включения, измерения проводились как для объекта с двумя включениями без цилиндра, так и для объекта с цилиндром, но без включений. В дальнейшем результат таких измерений использовался при второй итерации либо для тестирования возможности применения описанного выше алгоритма быстрого приближенного расчета $\{\Phi_{i,j}^{(2)}\}$ при наличии в объекте полупрозрачных или рассеивающих включений, либо непосредственно в качестве априорной информации о матрице $\{\Phi_{i,j}^{(2)}\}$.

Как уже указывалось, при быстром приближенном решении прямой задачи ДОТ (расчет $\Phi_{i,j}^{(2)}$) для объектов

с непрозрачными включениями часть потока фотонов $\Phi_{i,j}^{(1)}$, проходящая через точки объекта, занятые включениями, полностью «вырезается» из соответствующих поперечных сечений распределений $f_{i,j}^{(1)}(r)$. Для полупрозрачных (поглощающих часть проходящих фотонов) включений, благодаря линейности задачи распространения, эту часть потока фотонов можно «вырезать» из $f_{i,j}^{(1)}(r)$ частично, введя дополнительный весовой множитель – коэффициент прозрачности включения. На рис.1 показан результат восстановления после первой и второй итераций внутренней структуры объекта с двумя включениями – куриными костями диаметром 10 и 8 мм, полученный с использованием рассмотренной выше модификации алгоритма. Геометрические положения и размеры восстановленных изображений включений практически точно отражают геометрию реального эксперимента.

При восстановлении внутренней структуры объектов с сильнорассеивающими включениями можно использовать полностью аналогичный подход. Дело в том, что и в этом случае скорость фотоотчетов в области «тени» будет меньше, чем для объекта без включений. Однако поскольку теперь включение лишь рассеивает, а не поглощает проходящие через него фотоны, часть этих «недостающих» фотонов будет все-таки регистрироваться, правда, теперь уже за пределами области «тени». Это значит, что, в отличие от рассмотренной выше ситуации объекта с частично поглощающим включением, для остальных (боковых) положений приемника скорость фотоотчетов должна расти. В условиях сильного рассеяния (в большой телесный угол) рост потока регистрируемых фотонов для боковых положений будет достаточно мал, и им в ходе последующей обработки можно пренебречь. Поэтому, хотя геометрическое положение и размеры изображения (рис.1,а,б,з) сильнорассеивающего включе-

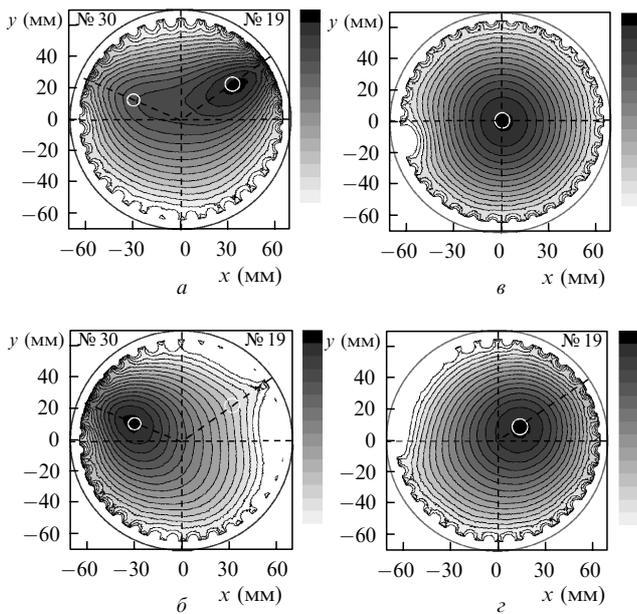


Рис.1. Визуализация двух полупрозрачных включений (куриные кости диаметром 10 и 8 мм) после первой (а) и второй (б) итераций, а также визуализация рассеивающего включения (тефлоновый стержень, диаметр 8 мм) для двух геометрий эксперимента (в, г). Здесь и на остальных рисунках белые окружности – реальные положения включений, номер на поле рисунка соответствует номеру световода на модельном объекте.

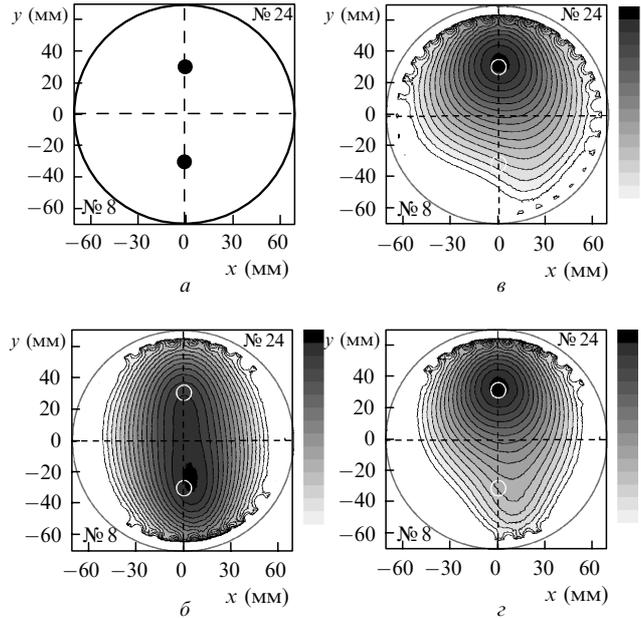


Рис.2. Геометрия эксперимента (а) и визуализация двух непрозрачных включений (диаметр 9 мм) после первой (б) и второй (в, г) итерации, учитывающей результаты первой итерации.

ния (тефлоновый стержень диаметром 8 мм), восстановленные с использованием описанного выше алгоритма, практически точно отражают геометрию реального эксперимента, само это изображение получается таким, как будто включение является частично поглощающим.

Универсальность и устойчивость описанного выше приближенного алгоритма восстановления внутренней структуры доказали эксперименты, выполненные для более сложной системы включений. На рис.2, 3 иллюстрируются геометрия размещения двух непрозрачных включений диаметром 9 мм в объекте и результат последовательного (первая и вторая итерации) восстановления внутренней структуры последнего в отсутствие (рис.2) и при наличии (рис.3) неразрешимой в ДОТ сис-

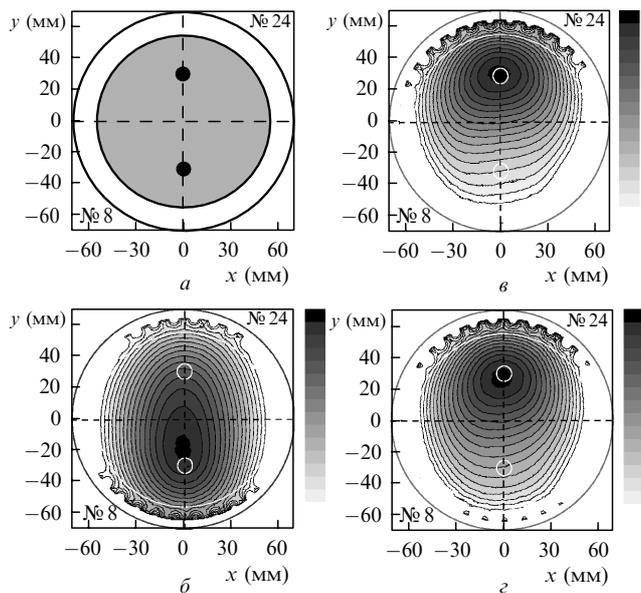


Рис.3. Геометрия эксперимента (а) и визуализация двух непрозрачных включений (диаметр 9 мм) в модели системы капилляров после первой (б) и второй (в, г) итераций для двух положений и размеров включения, восстановленного на первой итерации.

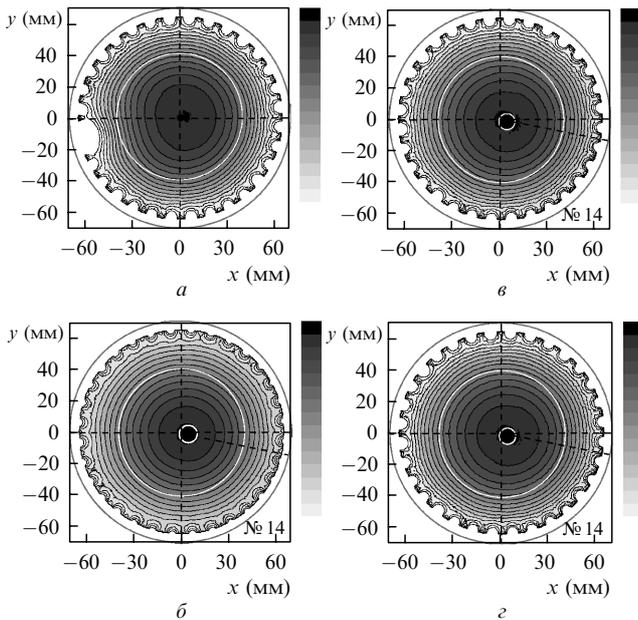


Рис.4. Визуализация полого рассеивающего цилиндра (диаметр 81 мм) после первой итерации в отсутствие (а) и при наличии (б) непрозрачного включения (диаметр 9 мм); то же для входной матрицы (в), сформированной как разность матриц для случаев а и б, а также вторая итерация (г) с «вырезанием» фотонов полупрозрачным включением (коэффициент пропускания 0.8, диаметр 81 мм).

темы капилляров (комков из тонкой проволоки). Легко убедиться, что положение и размер визуализированного уже на первой итерации включения явно восстановлены с погрешностями (рис.2,б и 3,б), поэтому на второй итерации это включение учитывалось при небольших вариациях его размеров и положения: диаметр 9 мм, расстояние от оси 30 мм (рис.2,в и 3,в) и диаметр 12 мм, расстояние от оси 20 мм (рис.2,г и 3,г). Эксперимент показал, что используемый алгоритм восстановления малочувствителен по отношению к погрешностям, вносимым на первой итерации, и после проведения второй итерации изображение второго включения восстанавливается практически точно. Легко видеть, что появление во внутренней структуре объекта неразрешимой в ДОТ поглощающей системы капилляров (рис.3) никоим образом не препятствует успешной реализации процедуры восстановления изображений непрозрачных включений.

Как и в описанном выше эксперименте с тефлоновым стержнем, изображение сильно рассеивающего полого цилиндра диаметром 81 мм восстанавливалось используемым алгоритмом как слабопоглощающее включение соответствующего размера (рис.4,а). Более того, при восстановлении внутренней структуры модельного объекта с полым рассеивающим цилиндром и непрозрачным включением диаметром 9 мм изображение последнего успешно восстанавливалось уже на первой итерации (рис.4,б). При этом вторая итерация алгоритма, построенная с учетом вырезания части потока регистрируемых фотонов «полупрозрачным» (коэффициент прозрачности 0.8) включением диаметром 81 мм (рис.4,в) либо с формированием входной матрицы $\{\Delta\Phi_{i,j}^{(2)}\}$ как разности двух реальных матриц, полученных в экспериментах с объектом в отсутствие сильнопоглощающего включения

и при его наличии, успешно восстанавливала изображение последнего.

6. Заключение

Приведенные в настоящей работе результаты экспериментального тестирования быстрого приближенного алгоритма восстановления методом ДОТ внутренней структуры сильно рассеивающих объектов в экспериментах по визуализации внутренней структуры сильно рассеивающих модельных объектов с несколькими сложными системами включений (сильно рассеивающие и полупрозрачные включения, системы включений, часть из которых либо неразрешима в ДОТ, либо расположена внутри других оптических неоднородностей) доказывают, что при внесении определенных корректив этот алгоритм не только вполне работоспособен и устойчив к погрешностям, но и позволяет восстанавливать внутреннюю структуру объектов с полупрозрачными и сильно рассеивающими включениями. Ошибки, возникающие на первой итерации алгоритма за счет его нелинейности, по-видимому, могут быть скорректированы аналогичной третьей итерацией, проведенной с учетом восстановленных на второй итерации, описываемой функцией $P_{\Sigma}^{(2)}(\mathbf{r})$, деталей внутренней структуры. Затраты времени на реализацию соответствующих процедур при этом вырастут незначительно. Немаловажную роль с точки зрения практики играет и то обстоятельство, что во всех экспериментальных реализациях нами было использовано непрерывное излучение достаточно дешевых маломощных (входная мощность до 30 мВт) полупроводниковых лазеров ближнего ИК диапазона.

Авторы искренне благодарны РФФИ (гранты № 00-15-96726 и 01-02-17305) за финансовую поддержку настоящей работы.

1. Chance B. (Ed.) *Photon migration in tissues* (New York: Plenum Press, 1989).
2. Тучин В.В. *УФН*, **167**, 541 (1997).
3. Ho P.P., et al. *Opt. and Photon. News*, **4**, 23 (1993).
4. Feng S.C., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1888**, 78 (1993).
5. Herman G.T. *Image reconstruction from projections: the fundamentals of computerized tomography* (San Francisco: Academic Press, 1980).
6. Sabatier P.C. *Basic methods of tomography and inverse problems: a set of lectures* (Bristol: Hilger, 1987).
7. Wang L., et al. *Science*, **253**, 769 (1991).
8. Proskurin S.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2389**, 157 (1995).
9. Wells K., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2979**, 599 (1997).
10. Tearney G.J., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2389**, 29 (1995).
11. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2732** (1996).
12. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3915** (2000).
13. Sevcik-Muraca E.M., et al. *SPIE Institutes for Advanced Optical Technologies* (Bellingham, 1993, v. 11, p. 485).
14. O'Leary M.A., et al. *Opt. Lett.*, **20**, 426 (1995).
15. Papaioannou D.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2626**, 218 (1995).
16. Lyubimov V.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3566**, 57 (1998).
17. Lyubimov V.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3816**, 183 (1999).
18. Gryazin Y.A., et al. *Inverse Problems*, **15**, 373 (1999).
19. Jong C., et al. *J. Opt. Soc. Am. A*, **16**, 2400 (1999).
20. Millane R.P., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **34123**, 295 (2000).
21. Markel V.A., Schotland J.C. *J. Opt. Soc. Am. A*, **18**, 1336 (2001).
22. Shuvalov V.V., et al. *Laser Phys.*, **11**, 636 (2001).
23. Третьяков Е.В. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 1095 (2001).
24. Shuvalov V.V., et al. *Laser Phys.*, **12**, 627 (2002).