

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-32-39

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ АБСОРБЦИОННОЙ И ДИФРАКЦИОННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ*

© **Виктор Евгеньевич Асадчиков, Алексей Владимирович Бузмаков,
Ирина Геннадьевна Дьячкова, Денис Александрович Золотов,
Юрий Станиславович Кривоносов, Андрей Артемьевич Русаков,
Феликс Николаевич Чуховский**

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия; e-mail: asad@crys.ras.ru

*Статья поступила 4 октября 2018 г. Поступила после доработки 21 октября 2018 г.
Принята к публикации 28 октября 2018 г.*

Приведены результаты исследований монокристаллов кремния и желчных камней с помощью лабораторного рентгеновского микротомографа с пространственным разрешением 10 мкм. Методика томографического эксперимента включала использование монохроматического «параллельного пучка» с последующей трехмерной реконструкцией на основе набора двумерных проекций. Томографические измерения проводили в режиме вращения исследуемых образцов вокруг нормали к отражающей плоскости, настроенной по геометрии дифракционного отражения Лауэ, что позволило идентифицировать и исследовать одиночные дислокации в кристаллах совершенного кремния. Моделирование дислокационных петель осуществляли на основе численного решения уравнений Такаги – Топена. Используя микротомографию, *in vitro* исследовали желчные камни человека. Установили, что камни имеют слоистые образования, которые по своему составу могут быть модификациями карбоната кальция. Внутренняя структура камней неоднородна и содержит многочисленные полости и трещины, образованные в процессе их роста. Вместе с тем оценка пористости желчных камней необходима, поскольку последняя может влиять на скорость растворения камня при лечении литолитическими методами. По результатам измерений определяли линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения холестериновых конкрементов. Хорошее совпадение экспериментально полученных коэффициентов поглощения с расчетом на основе табличных данных для чистого холестерина позволило предположить, что томографический метод можно использовать для прижизненной диагностики желчных камней холестеринового типа.

Ключевые слова: рентгеновская микротомография; томотомография; абсорбционная томография; дифракционные методы; камни желчного пузыря.

X-RAY MICROTOMOGRAPHY SETUP FOR ABSORPTION AND DIFFRACTION TOMOGRAPHY

© **Victor E. Asadchikov, Alexey V. Buzmakov, Irina G. Dyachkova, Denis A. Zolotov,
Yuri S. Krivonosov, Andrey A. Rusakov, Felix N. Chukhovskii**

FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Moscow, Russia; e-mail: asad@crys.ras.ru

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Received October 4, 2018. Revised October 21, 2018. Accepted October 28, 2018.

The results of studying silicon single crystals and gallstones on a laboratory X-ray microtomograph with a spatial resolution of 10 μm (developed at the Federal Scientific Research Centre for “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences) are reviewed. The method of tomographic experiment included the use of a monochromatic “parallel beam” with subsequent three-dimensional reconstruction based on a set of two-dimensional projections. Topotomographic measurements were performed in the mode of rotation of the samples under study around the normal to the reflecting plane adjusted to the Laue diffraction reflection geometry, which made it possible to identify and study single dislocations in perfect silicon crystals. Simulation of the dislocation loops was carried out on the basis of numerical solution of the Takagi-Taupin equations. *In-vitro* microtomographic study of human gallstones revealed the layered structure of the gallstones which are close in composition to modifications of calcium carbonate. The internal structure of the stones is heterogeneous and contains numerous cavities and cracks formed upon their growth. At the same time, the evaluation of the porosity of gallstones is necessary, since the latter can affect the rate of stone dissolution in their treatment by litholytic methods. Linear attenuation coefficients of x-ray radiation of cholesterol-type gallstones were calculated from the measurement results. The good agreement of the experimentally obtained results and calculations based on tabular data for pure cholesterol is demonstrated which proved that the tomographic method can be used for *in vivo* diagnosis of cholesterol-type gallstones.

Keywords: x-ray microtomography; topo-tomography; absorption tomography; diffraction methods; gallstones

Рентгеновская томография долгие годы развивалась как метод исследования структуры объекта, основанный на различии коэффициента поглощения рентгеновского излучения в разных частях исследуемого образца. В связи с этим метод получил название абсорбционной рентгеновской томографии. Если разрешение прибора находится на микронном уровне, то используют термин «микротомография». Во всех случаях речь идет о восстановлении трехмерной структуры объекта, полученной на основе сопоставления его двумерных изображений при разных углах поворота. Очевидно, что при такой схеме ось вращения образца может быть выбрана произвольно с учетом лишь линейных размеров объекта.

Однако при исследовании совершенных кристаллов трудно ожидать значительного различия коэффициентов поглощения. В этом случае можно использовать дифракционный контраст, на котором основаны все топографические методы. Если совместить ось вращения исследуемого кристалла с нормалью к отражающим плоскостям, то получим возможность на основе двумерных топограмм составить трехмерное изображение дефектов кристаллической структуры (дифракционная томография или топотомография) [1 – 3].

Микротомографию можно также применять при медицинских исследованиях, например, для анализа конкрементов желчного пузыря (желчных камней) различного состава. Такие исследования важны для развития консервативных методов лечения желчнокаменной болезни (ЖКБ), позволяющих растворять конкременты внутри желчного пузыря, не прибегая к хирургическому вмешательству. К таким методам относятся пероральная литолитическая терапия [4, 5] и контактный химический литолиз [6 – 20]. Отметим,

что данными методами можно успешно растворять только холестериновые камни [21]. В настоящее время ограничение в применении литолитических методов лечения ЖКБ связано с отсутствием достоверной методики прижизненной диагностики холестериновых камней.

Цель работы — топотомографические и томографические исследования единичных дефектов в кристалле кремния и желчных камнях человека с помощью лабораторного рентгеновского микротомографа.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки (рентгеновского микротомографа) со стандартной рентгеновской трубкой с молибденовым анодом (MoK α) (размер фокуса — 0,4 × 12 мм). Прибор дает возможность измерять прошедшее и дифрагированное излучения, что позволяет проводить как томографические (абсорбционный контраст), так и топо-

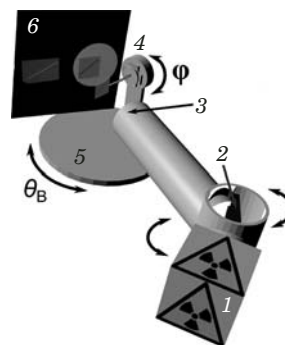


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — рентгеновская трубка; 2 — кристалл-монократор; 3 — трубчатый коллиматор; 4 — кристаллический образец, расположенный на гониометрической головке; 5 — гониометр; 6 — ПЗС-детектор

томографические (дифракционный контраст) исследования.

При топотомографических измерениях исследуемый кристалл крепили на гониометрической головке и юстировали таким образом, чтобы ось вращения гониометра была параллельна выбранному вектору дифракции ($\mathbf{h}$) [2–20]. Это достигалось путем поворота оси в горизонтальной плоскости по отношению к падающему излучению на угол, равный углу Брэгга ($\theta_B = 10,66^\circ$). Угловое перемещение гониометра осуществляли в автоматическом режиме с шагом сканирования $\varphi = 1^\circ$ в диапазоне $0 - 181^\circ$. Излучение регистрировали с помощью ПЗС-детектора прямого счета размером 2048×2048 пикселей (размер одного пикселя 9×9 мкм). Время экспозиции каждой проекции при измерении топограммы (рис. 2) составляло 20 мин.

Микротомограф также можно использовать для томографии биологических объектов в режиме абсорбционного контраста. Для этого исследуемый образец, установленный на гониометре, вращают в горизонтальной плоскости. Сканирование выполняют в диапазоне $0 - 200^\circ$ с шагом

$\varphi = 0,5^\circ$ и временем экспозиции каждой проекции 5 с.

Трехмерное изображение реконструировали по экспериментальным двумерным проекциям с использованием широко применяемого в традиционной рентгеновской абсорбционной томографии модифицированного алгебраического метода SART [22]. При такой реконструкции в случае топотомографии рентгеновские лучи считают параллельными, а ось вращения объекта наклонена к лучу под углом Брэгга (т.е. реальный пучок заменяют на виртуальный, отклоненный от реального на двойной брэгговский угол). Также важно, чтобы поглощение в кристалле μt (μ — линейный коэффициент поглощения, t — толщина кристалла вдоль хода лучей) не превышало 3 (приближение слабого поглощения). Это достигается подбором нужной энергии зондирующего рентгеновского излучения.

В монокристалл бездефектного кремния, вырезанный из слитка, выращенного методом Чохральского в направлении $\langle 111 \rangle$, искусственно вводили одиночные дислокации, для чего кристалл подвергали четырехточечному изгибу вокруг оси $\langle 112 \rangle$ [23]. Условия деформации: постоянная нагрузка — $2 - 10$ кг/мм², температура — $500 - 600$ °С.

Результат восстановления отражательной способности кристалла представлен на рис. 3. Установили, что глубина залегания дефекта составляет 150 мкм, полная длина — ~ 700 , а длина среднего участка в направлении $[0\bar{1}1]$ — ~ 350 мкм. Отметим, что для практических целей (установления пространственного расположения дефектов, их трансформации при различных внешних воздействиях) имеющегося разрешения (около 10 мкм) вполне достаточно [24].

Известно, что дефект, образующий дислокационную полупетлю, состоит из трех линейных участков. В кристалле кремния после четырехто-

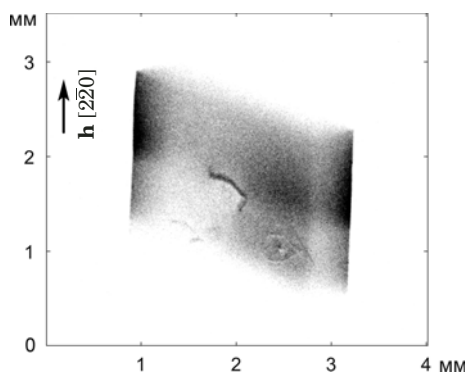


Рис. 2. Проекционная топограмма области кристалла с одиночными дислокациями

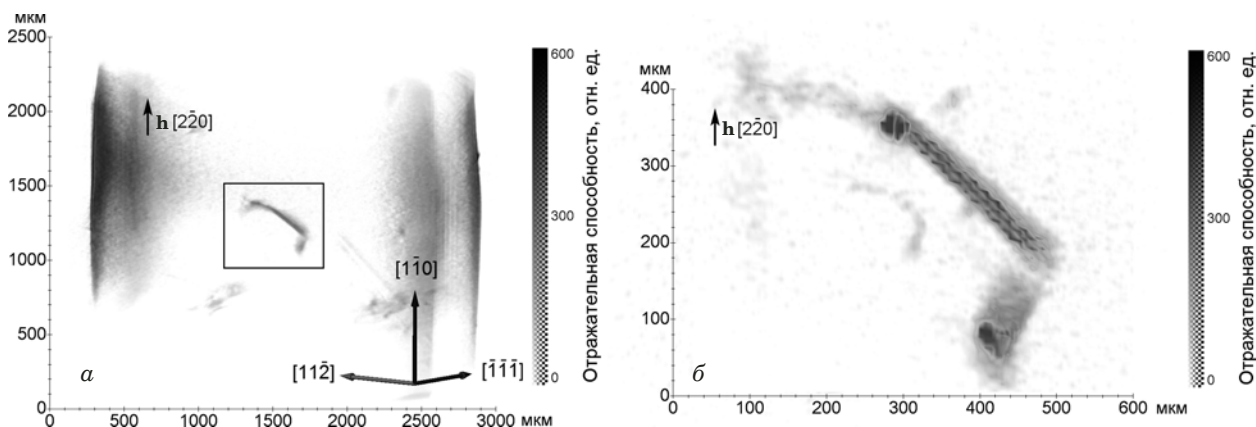


Рис. 3. Результат восстановления отражательной способности кристалла, содержащего одиночные полупетли: а — весь кристалл; б — увеличенный фрагмент

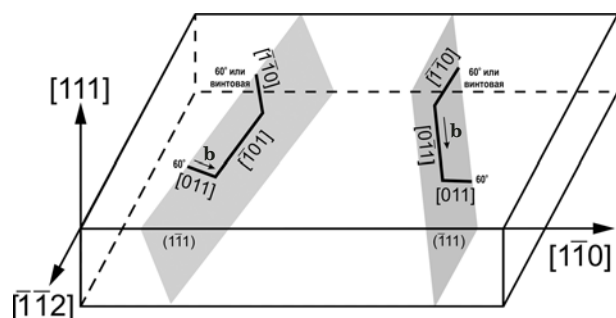


Рис. 4. Схема формирования двух типов дислокационных полупетель в кристалле кремния

чечного изгиба формируются гексагональные полупетли, векторы Бюргерса (**b**) которых могут быть направлены вдоль направлений $[10\bar{1}]$ или $[0\bar{1}1]$ [23]. При этом полупетли выходят на поверхность двумя 60-градусными либо 60-градусными и винтовым сегментами (рис. 4).

Вектор Бюргерса введенной дислокационной полупетли определяли с помощью лауэграммы исследуемого кристалла кремния, содержащей несколько дифракционных отражений от разных кристаллографических плоскостей (лауэ-пятна). Обработку полученных лауэ-пятен проводили с помощью программы LauePT [25], которая по заданным параметрам кристалла и эксперимента рассчитывала пространственное расположение возможных дифракционных отражений. Анализируя расчетные данные, определяли плоскость скольжения, в которой залегает дислокационная полупетля, а также направление вектора Бюргерса для ее трех линейных участков (рис. 5).

Кроме того, оказалось, что исследуемый дефект не единственная дислокация, а представляет собой семейство из нескольких близко расположенных друг к другу дислокаций.

На основе численного решения уравнений Такаги – Топена [26] разработали математическую модель формирования наклонных изображений, отвечающих в методе рентгеновской томотографии вращению образца вокруг вектора дифракции **h**. По экспериментальным данным рассчитывали отдельные прямолинейные участки дислокационной полупетли с пространственным разрешением 10 мкм (рис. 6). Видно, что экспериментальное и расчетное изображения хорошо согласуются друг с другом.

Далее исследовали биологические объекты — камни (конкременты) желчного пузыря человека, полученные при хирургическом лечении ЖКБ. В процессе предварительной подготовки часть образцов промывали и просушивали, некоторые хранились в желчи до начала эксперимента. Также делали томографию желчи и чистой воды. Для камней, у которых восстановленные значе-

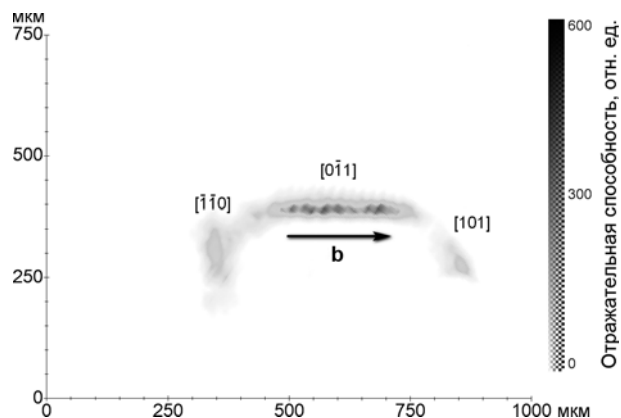


Рис. 5. Сечение плоскости скольжения $(\bar{1}11)$, в которой расположен дефект

ния коэффициентов поглощения слабо менялись в пределах объема образца, рассчитывали усредненный по объему коэффициент поглощения μ_a . Для образцов, на томограммах которых фиксировали слоистые образования с высокой рентгенооптической плотностью, коэффициенты поглощения рассчитывали отдельно для зон, составляющих основу камня, и в местах локализации неоднородностей.

Использование монохроматического излучения при измерении томограммы позволяет восстановить истинное значение коэффициента линейного ослабления μ , что важно при исследовании элементного состава изучаемого объекта [27]. Применение SART-метода при обработке томографических данных уменьшает дисперсию восстанавливаемого значения линейного коэффициента поглощения [28].

Экспериментальные значения линейных коэффициентов поглощения желчных камней представлены в таблице. Видно, что величины коэффициентов для большинства образцов лежат в узких диапазонах значений, мм^{-1} : 0,049 – 0,063 — для предварительно просушенных конкрементов и 0,068 – 0,074 — для конкрементов, хранившихся в желчи.

Полученные коэффициенты очень близки к расчетным на основе табличных данных для чистого холестерина ($\mu = 0,061 \text{ мм}^{-1}$). При этом существенных различий между коэффициентами поглощения холестериновых и смешанных конкрементов не наблюдается. В то же время выявили небольшое количество образцов с большим поглощением. Доля желчных камней с линейным коэффициентом поглощения, не превышающим $0,074 \text{ мм}^{-1}$, составила более 90, а конкрементов со слоистыми образованиями, внутри которых коэффициент поглощения превышал $0,15 \text{ мм}^{-1}$, — менее 10 %.

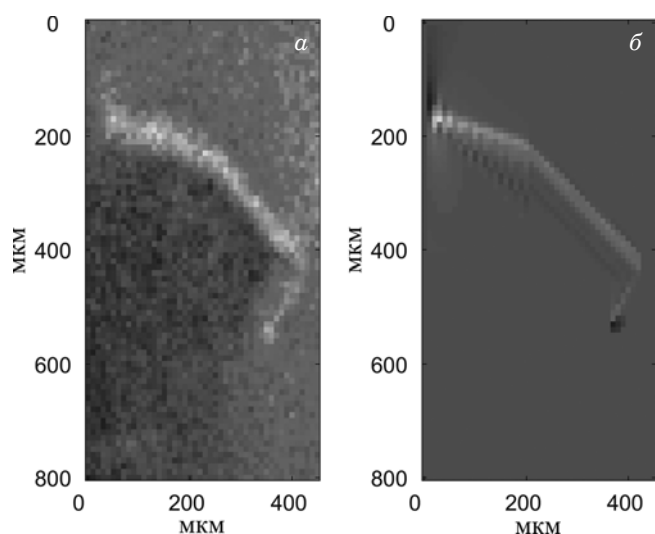


Рис. 6. Экспериментальная (а) и расчетная (б) топограммы

Образцы конкрементов (GS-8 – GS-16), до начала эксперимента находившиеся в желчи, имеют более высокий усредненный по объему коэффициент поглощения в сравнении с образцами, просушенными до начала исследований (см. таблицу). Это можно объяснить тем, что внутри конкрементов присутствуют полости, заполненные желчью, линейный коэффициент поглощения которой в данном диапазоне длин волн оказывается выше коэффициента поглощения камня. Для подтверждения данного предположения образцы GS-14 – GS-16 просушивали и исследовали повторно. Значения коэффициентов поглощения составили $0,05 - 0,055 \text{ мм}^{-1}$, что соответствует диапазону поглощения у «сухих» камней.

Экспериментальные значения усредненных линейных коэффициентов поглощения

Образец	Размер камня, мм	Состав образца	Подготовка образца	$\mu_a, \text{мм}^{-1}$
BL-1		Желчь	—	0,106
W-2		Вода	—	0,103
GS-3	4 – 6	Холестериновый	Просушен	0,051
GS-4	4 – 6	Холестериновый	Просушен	0,050
GS-5	4 – 6	Холестериновый	Просушен	0,053
GS-6	4 – 6	Холестериновый	Просушен	0,049
GS-7	20 – 26	Холестериновый с плотными образованиями	Просушен	0,059 (0,37*)
GS-8	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,073
GS-9	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,074
GS-10	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,072
GS-11	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,068
GS-12	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,069
GS-13	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,070
GS-14	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,069
			Просушен	0,055
GS-15	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,070
			Просушен	0,053
GS-16	4 – 7	Смешанный	В желчи	0,068
			Просушен	0,051
GS-17	6 – 9	Холестериновый	Просушен	0,050
GS-18	6 – 9	Холестериновый	Просушен	0,049
GS-19	6 – 12	Холестериновый с плотными образованиями	Просушен	0,052 (0,152*)
GS-20	6 – 9	Холестериновый	Просушен	0,055
GS-21	6 – 9	Холестериновый	Просушен	0,054
GS-22	6 – 9	Холестериновый	Просушен	0,054
GS-23	12 – 17	Холестериновый	Просушен	0,058
GS-24	12 – 17	Холестериновый	Просушен	0,063
GS-25	12 – 17	Холестериновый	Просушен	0,059

* Значение дано для зоны конкремента с плотным слоистым образованием.

На рис. 7 представлены изображения поперечного среза образцов GS-14 и GS-15 после

извлечения из желчи и просушки. Видно, что полости, отчетливо проявившиеся после выпарива-

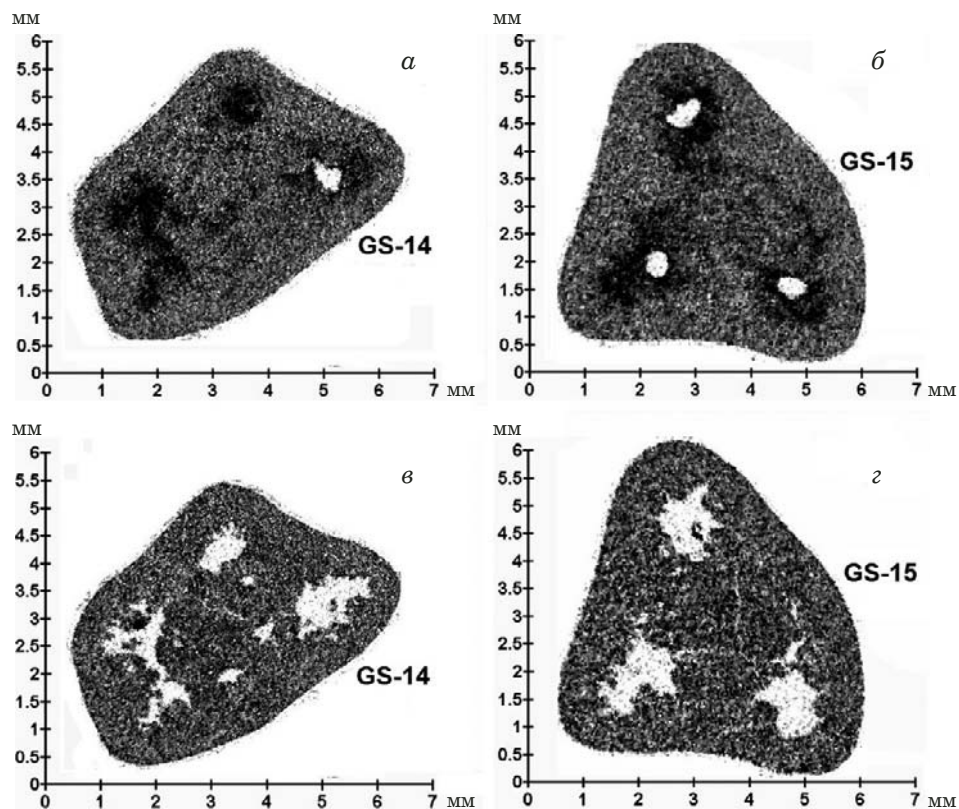


Рис. 7. Сечения томографических реконструкций конкрементов GS-14 и GS-15 после извлечения из желчи (а, б) и просушки в течение 90 ч при температуре 50 – 60 °C (в, з)

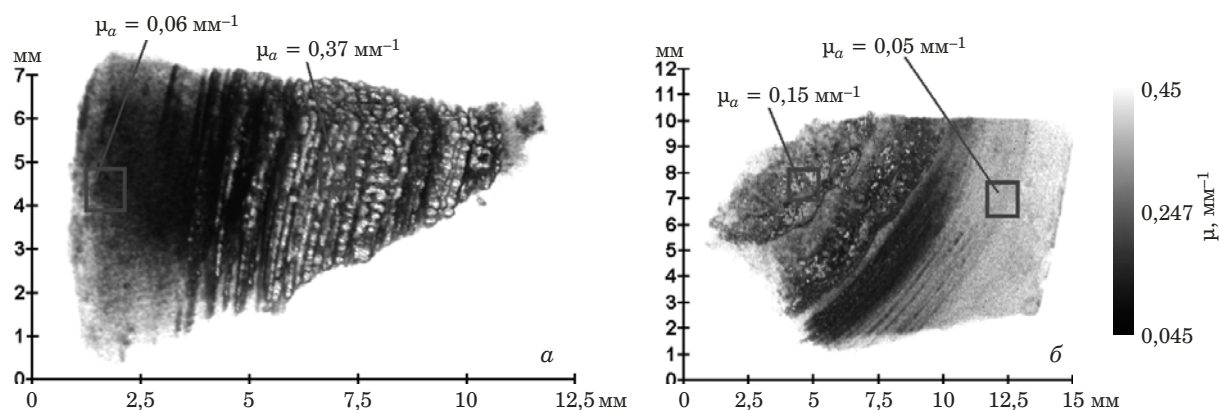


Рис. 8. Томографические реконструкции фрагментов желчных камней GS-7 (а) и GS-19 (б)

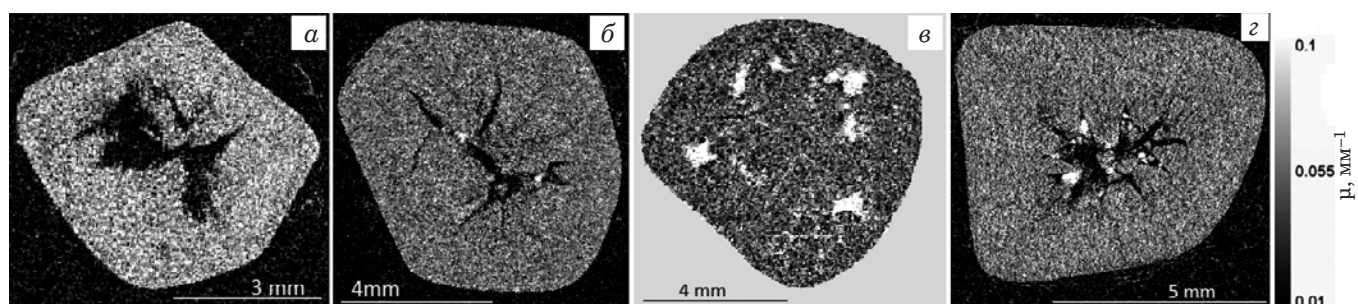


Рис. 9. Поперечные сечения, полученные томографическим методом, желчных камней GS-3 (а), GS-17 (б), GS-16 (в) и GS-21 (з)

ния желчи, образовались в процессе роста конкремента и не являются следствием растрескивания при высыхании. Кроме того, в некоторых образцах (рис. 9) фиксировали наличие пор и трещин различной геометрии.

Изучение пористости желчных камней необходимо, поскольку может быть напрямую связано со скоростью растворения конкремента при лечении ЖКБ литолитическими методами.

Изображения трехмерных реконструкций для образцов GS-7 и GS-19 с многочисленными слоистыми образованиями приведены на рис. 8. Линейный коэффициент поглощения, измеренный внутри образований (см. таблицу), в 3–7 раз выше, чем у остальных конкрементов. Возможно, слоистые образования — различные модификации карбоната кальция. Характерно, что внутренняя структура образцов отчетливо разделена на области: основу камня с поглощением на уровне $\mu = 0,052 - 0,06 \text{ мм}^{-1}$ и зону сосредоточения более плотных отложений, расположенную в центральной части конкремента ($\mu = 0,15 - 0,37 \text{ мм}^{-1}$).

Таким образом, представленный новый рентгеновский лабораторный микротомограф с разрешением на уровне 10 мкм позволяет проводить топотомографические и томографические исследования как кристаллов кремния, так и биологических объектов (камней желчного пузыря). Полученные результаты микротомографических исследований конкрементов желчного пузыря показали хорошее соответствие экспериментальных линейных коэффициентов поглощения желчных камней с расчетными на основе табличных данных для чистого холестерина. Это дает возможность предполагать, что микротомография может быть с успехом использована при диагностике камней холестеринового типа.

ЛИТЕРАТУРА

- Ludwig W., Cloetens P., Härtwig J., et al. Three-dimensional imaging of crystal defects by 'topo-tomography' / *J. Appl. Cryst.* 2001. Vol. 34. P. 602 – 607.
- Hänschke D., Danilewsky A., Helfen L., et al. Correlated Three-Dimensional Imaging of Dislocations: Insights into the Onset of Thermal Slip in Semiconductor Wafers / *Phys. Rev. Lett.* 2017. Vol. 119. P. 215504(1 – 6).
- Золотов Д. А., Бузмаков А. В., Асадчиков В. Е. и др. Исследование внутренней структуры монокристалла фторида лития методом рентгеновской топотомографии в лабораторных условиях / *Кристаллография*. 2011. Т. 56. № 3. С. 426 – 430.
- Barbara L. A comparative study of chenodeoxycholic acid and ursodeoxycholic acid as cholelithol gallstone dissolving agents / *MTP Press*. 1983. P. 367 – 370.
- Roda E., Liva S., Ferrara F., et al. The UDCA dosage deficit: a fate shared with CDCA / *Eur. J. Gastroenterol. Hepatol.* 2002. N 14(3). P. 213 – 216.
- Bouchifr I. Non-surgical treatment of gall stones: many contenders but who will win the crown? / *Gut*. 1988. N 29. P. 137 – 142.
- Helmstadter A. Ether and the chemical-contact dissolution of gallstones / *Lancet*. 1999. N 354(9187). P. 1376 – 1387.
- Padova C., Padova F., Montorsi W., et al. Methyl tert-butyl ether fails to dissolve retained radiolucent common bile duct stones / *Gastroenterology*. 1986. N 91. P. 1296 – 1300.
- Tritapepe R., Rovagnati P., Da Pozzo L., et al. Rapid dissolution of residual biliary calculi with tert-butyl methyl ether / *Minerva Med.* 1986. N 77 (12). P. 483 – 485.
- Nelson P. E., Moyer T. P., Thistle J. L. Gallstone dissolution in vitro with methyl tert-butyl ether: radiologic selection criteria / *Gastroenterology*. 1990. Vol. 98. P. 1345 – 1350.
- Kelly E., Williams J., Organ C. A history of the dissolution of retained choledocholithiasis. / *Am J. Surg.* 2000. N 180(2). P. 86 – 98.
- Petroni M., Jazrawi R., Pazzi P., et al. Risk factors for the development of gallstone recurrence following medical dissolution. The British-Italian Gallstone Study Group. / *Eur. J. Gastroenterol. Hepatol.* 2000. N 12(6). P. 695 – 700.
- Hetzer F., Baumann M., Simmen H. Contact litholysis of gallstones with methyl tert-butyl ether in risk patients — a case report / *Swiss Surg.* 2001. N 7(1). P. 39 – 42.
- Lim M. Y., Chou T. C., Lin X. Z., et al. Enhanced dissolution of gallstone by combining ethanol with two commonly used cholelitholytic solvents / *Hepatogastroenterology*. 1999. N 46(26). P. 758 – 761.
- Cheng J. S., Lai K. H., Lo G. H., et al. In vitro dissolution of cholesterol and brown pigmented gallstones: a comparison of MTBE, DMSO and BA-EDTA / *Zhonghua Yi Xue Za Zhi (Taipei)*. 2000. N 63(9). P. 667 – 672.
- Тюрюмин Я. Л., Мальцев А. Б., Шантуров В. А. и др. Химический литолиз холестериновых желчных камней в лечении острого холецистита / *Актуальные вопросы современной клинической медицины: сб. материалов / ИГМУ*. — Иркутск, 1995. С. 191 – 193.
- Тюрюмин Я. Л., Шантуров В. А., Мальцев А. Б. и др. Первый опыт литолиза холестериновых желчных камней с использованием метил-tert-бутилового эфира в лечении острого холецистита / *Актуальные вопросы реконструктивной и восстановительной хирургии: сб. тез. итог. работ*. — Иркутск, 1995. С. 185 – 186.
- Сайфутдинов Р. Г., Рыжкова О. В., Шантуров В. А. и др. Тактика ведения пациентов с камнями в желчном пузыре. — Казань, 2003. — 29 с.
- Рыжкова О. В. Растворяющая способность метил-трет-бутилового эфира камней желчного пузыря in vitro / *Научно-практическая конференции молодых ученых: сб. тез. докл.* — Казань, 2003. С. 69 – 70.
- Рыжкова О. В., Сайфутдинов Р. Г. Химический литолиз метил-трет-бутиловым эфиром (МТБЭ) камней желчного пузыря in vitro. / *Сибирский журнал гастроэнтерологии и гепатологии*. 2003. № 16, 17. С. 129 – 130.
- Downling R. H. Cholelithiasis: medical treatment. / *Clinics Gastroenterology*. 1983. Vol. 12. P. 125 – 178.
- Andersen A. H., Kak A. C. Simultaneous algebraic reconstruction technique (sart): a superior implementation of the art algorithm / *Ultrasonic. Imag.* 1984. Vol. 6. P. 81 – 94.
- Ерофеев В. Н., Никитенко В. И., Половинкина В. И. и др. Исследование особенностей рентгенодифракционного контраста и геометрии дислокационных полупетель в кремнии / *Кристаллография*. 1971. Т. 16. № 1. С. 191 – 197.
- Золотов Д. А., Бузмаков А. В., Елфимов Д. А. и др. Возможность выявления пространственного расположения одиночных дислокаций методом топотомографии на лабораторных установках / *Кристаллография*. 2017. Т. 62. № 1. С. 12 – 16.
- Huang X., Laue P. A graphical-user-interface program for simulating and analyzing white-beam X-ray diffraction Laue patterns / *J. Appl. Cryst.* 2010. Vol. 43. P. 926 – 928.
- Беседин И. С., Чуховский Ф. Н., Асадчиков В. Е. Исследование дифракционного контраста дислокаций в рентгеновской топотомографии. Компьютерное моделирование и анализ изображений / *Кристаллография*. 2014. Т. 59. № 3. С. 365 – 373.
- Бузмаков А. В., Благоев А. Е., Гулимова В. И. и др. Сопоставление данных рентгеновской микротомографии и флюо-

ресцентного анализа при изучении структурной организации костной ткани / Кристаллография. 2012. Т. 57. № 5. С. 782 – 790.

28. **Prun V. E., Nikolaev D. P., Buzmakov A. V., et al.** Effective Regularized Algebraic Reconstruction Technique for Computed Tomography / Crystallography Reports December. 2013. Vol. 58. Is. 7. P. 1063 – 1066.

REFERENCES

1. **Ludwig W., Cloetens P., Härtwig J., et al.** Three-dimensional imaging of crystal defects by 'topo-tomography' / J. Appl. Cryst. 2001. Vol. 34. P. 602 – 607.
2. **Hänschke D., Danilewsky A., Helfen L., et al.** Correlated Three-Dimensional Imaging of Dislocations: Insights into the Onset of Thermal Slip in Semiconductor Wafers / Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 119. P. 215504(1 – 6).
3. **Zolotov D. A., Buzmakov A. V., Asadchikov V. E., et al.** Study of the internal structure of lithium fluoride single crystal by laboratory X-ray topo-tomography / Crystallography Reports. 2011. Vol. 56. N 3. P. 393 – 396.
4. **Barbara L.** A comparative study of chenodeoxycholic acid and ursodeoxycholic acid as choledterol gallstone dissolving agents / MTP Press. 1983. P. 367 – 370.
5. **Roda E., Liva S., Ferrara F., et al.** The UDCA dosage deficit: a fate shared with CDCA / Eur. J. Gastroenterol. Hepatol. 2002. N 14(3). P. 213 – 216.
6. **Bouchifr I.** Non-surgical treatment of gall stones: many contenders but who will win the crown? / Gut. 1988. N 29. P. 137 – 142.
7. **Helmstadter A.** Ether and the chemical-contact dissolution of gallstones / Lancet. 1999. N 354(9187). P. 1376 – 1387.
8. **Rodova C., Padova C., Montorsi W., et al.** Methyl tert-butyl ether fails to dissolve retained radiolucent common bile duct stones / Gastroenterology. 1986. N 91. P. 1296 – 1300.
9. **Tritapepe R., Rovagnati P., Da Pozzo L., et al.** Rapid dissolution of residual biliary calculi with tert-butyl methyl ether / Minerva Med. 1986. N 77 (12). P. 483 – 485.
10. **Nelson P. E., Moyer T. P., Thistle J. L.** Gallstone dissolution in vitro with methyl tert-butyl ether: radiologic selection criteria / Gastroenterology. 1990. Vol. 98. P. 1345 – 1350.
11. **Kelly E., Williams J., Organ C.** A history of the dissolution of retained choledocholithiasis. / Am J. Surg. 2000. N 180(2). P. 86 – 98.
12. **Petroni M., Jazrawi R., Pazzi P., et al.** Risk factors for the development of gallstone recurrence following medical dissolution. The British-Italian Gallstone Study Group. / Eur. J. Gastroenterol Hepatol. 2000. N 12(6). P. 695 – 700.
13. **Hetzer F., Baumann M., Simmen H.** Contact litholysis of gallstones with methyl tert-butyl ether in risk patients — a case report / Swiss Surg. 2001. N 7(1). P. 39 – 42.
14. **Lim M. Y., Chou T. C., Lin X. Z., et al.** Enhanced dissolution of gallstone by combining ethanol with two commonly used cholelitholytic solvents / Hepatogastroenterology. 1999. N 46(26). P. 758 – 761.
15. **Cheng J. S., Lai K. H., Lo G. H., et al.** In vitro dissolution of cholesterol and brown pigmented gallstones: a comparison of MTBE, DMSO and BA-EDTA / Zhonghua Yi/Xue Za Zhi (Taipei). 2000. N 63(9). P. 667 – 672.
16. **Turyumin Ya. L., Shanturov V. A., Malcev A. B., et al.** Chemical litholysis of cholesterol gallstones in the treatment of acute cholecystitis / Current issues of modern clinical medicine: a collection of materials / IGMU. — Irkutsk, 1995. P. 191 – 193. [in Russian]
17. **Turyumin Ya. L., Shanturov V. A., Malcev A. B., et al.** The first experience of litholysis of cholesterol gallstones using methyl-tert-butyl ether in the treatment of acute cholecystitis / Actual issues of reconstructive and reconstructive surgery: a collection of abstracts of the final work. — Irkutsk, 1995. P. 185 – 186 [in Russian].
18. **Saifutdinov R. G., Rizhkova O. V., Shanturov V. A., et al.** The tactics of treatment of patients with gallbladder stones. — Kazan, 2003. — 29 p. [in Russian].
19. **Ryzhkova O. V.** Solvent capacity of methyl tert-butyl ether of gallbladder stones in vitro / Scientific-practical conference of young scientists: a collection of abstracts. — Kazan, 2003. P. 69 – 70 [in Russian].
20. **Ryzhkova O. V., Saifutdinov R. G.** Chemical litholysis by methyl tert-butyl ether (MTBE) of gallbladder stones in vitro / Sib. Zh. Gastroenterol. Gepatol. 2003. N 16, 17. P. 129 – 130 [in Russian].
21. **Downling R. H.** Cholelithiasis: medical treatment. / Clinics Gastroenterology. 1983. Vol. 12. P. 125 – 178.
22. **Andersen A. H., Kak A. C.** Simultaneous algebraic reconstruction technique (sart): a superior implementation of the art algorithm / Ultrasonic. Imag. 1984. Vol. 6. P. 81 – 94.
23. **Erofeev V. N., Nikitenko V. I., Polovinkina V. I., et al.** Investigation of the features of x-ray diffraction contrast and geometry of dislocation half-grids in silicon / Crystallography Reports. 1971. Vol. 16. N 1. P. 191 – 197.
24. **Zolotov D. A., Buzmakov A. V., Elfimov D. A., et al.** The possibility of identifying the spatial location of single dislocations by topo-tomography on laboratory setups / Crystallography Reports. 2017. Vol. 62. N 1. P. 20 – 24.
25. **Huang X., Laue P.** A graphical-user-interface program for simulating and analyzing white-beam X-ray diffraction Laue patterns / J. Appl. Cryst. 2010. Vol. 43. P. 926 – 928.
26. **Besedin I. S., Chukhovskii F. N., Asadchikov V. E.** Study of the diffraction contrast of dislocations in X-ray topo-tomography: a computer simulation and image analysis / Crystallography Reports. 2014. Vol. 59. N 3. P. 323 – 330.
27. **Buzmakov A. V., Blagov A. E., Gulimova V. I., et al.** Comparison of the data of x-ray microtomography and fluorescence analysis in the study of bone-tissue structure / Crystallography. 2012. Vol. 57. N 5. P. 732 – 790.
28. **Prun V. E., Nikolaev D. P., Buzmakov A. V., et al.** Effective Regularized Algebraic Reconstruction Technique for Computed Tomography / Crystallography Reports December. 2013. Vol. 58. Is. 7. P. 1063 – 1066.