

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛИМБОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

© 2009 г. Д. Ю. Кручинин, канд. техн. наук; О. В. Анисимова; А. С. Тырышкина

Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод имени Э.С. Яламова”, г. Екатеринбург

E-mail: krudu@planet-a.ru

Рассмотрены результаты исследования влияния технологического процесса обратной фотолитографии на угловые погрешности круговых оптических шкал (лимбов).

Ключевые слова: круговая оптическая шкала, лимб, угловая погрешность, обратная фотолитография.

Коды OCIS: 110.5220

Поступила в редакцию 21.01.2009

Введение

Ранее было установлено, что круговые оптические шкалы (лимбы) наиболее целесообразно изготавливать методом контактной обратной фотолитографии [1]. Этот метод позволяет получать лимбы, имеющие высокие технические характеристики. Наиболее важной характеристикой круговых оптических шкал является угловая погрешность расположения штрихов. Различают следующие виды угловых погрешностей лимбов: погрешности расположения фронтов (фронт 1 и фронт 2) или границ штрихов, расположения осей штрихов, расположения диаметров осей штрихов, расположения диаметров фронтов штрихов. Наиболее часто встречающейся в конструкторской документации погрешностью является погрешность расположения диаметров осей штрихов. В процессе контроля лимбов на установке АС700¹ измеряются угловые погрешности расположения фронтов штрихов, а в результате их математической обработки определяются остальные виды погрешностей. Полученные угловые погрешности представляются в виде зависимости $y = F(x)$, где x – угол поворота лимба, принимающий дискретные значения в пределах от 0 до 360° (в соответствии с количеством штрихов).

Зависимость угловой погрешности $y = F(x)$ является результатом суммирования погрешностей, вносимых установкой контроля $F_k(x)$ и погрешностей лимба $F_l(x)$

$$F(x) = F_k(x) + F_l(x).$$

Использование фазостатистического метода позволяет разделить эти погрешности и полу-

чить их в виде двух отдельных зависимостей [2]. В свою очередь зависимость $F_l(x)$ является результатом суммирования погрешностей непосредственно шкалы $F_{ш}(x)$ и погрешностей, вносимых подложкой шкалы $F_{п}(x)$

$$F_l(x) = F_{ш}(x) + F_{п}(x).$$

Угловые погрешности $F_{п}(x)$ могут быть обусловлены влиянием формы подложки (клин, отклонение от плоскости рабочей стороны и др.) на результат измерения на установке АС700 и связаны с данной конкретной установкой контроля. Кроме того, при использовании специальной методики ее можно выделить [2].

Зависимость $F_{ш}(x)$ является результатом взаимодействия угловых погрешностей, вносимых лазерным генератором изображений CLWS-300 [4] через топологию фотошаблона $F_{фш}(x)$ и технологическим процессом обратной фотолитографии $F_{флг}(x)$, –

$$F_{ш}(x) = F_{фш}(x) + F_{флг}(x).$$

В технологическом процессе обратной фотолитографии основной операцией, определяющей точность формирования топологии лимбов, является операция экспонирования. Поэтому можно принять, что

$$F_{флг}(x) = F_{эксп}(x).$$

Зависимость $F_{эксп}(x)$ также может определяться разными факторами. Первым фактором является освещенность и неравномерность освещенности установки экспонирования. Вторым фактором может быть воздействие отклонений от плоскости плиты указанной установки в процессе контактного экспонирования с использованием вакуумного прижима и другое. Таким образом,

¹ Схема установки и ее метрологические характеристики рассмотрены в работах [2, 3].

$$F_{\text{экс}}(x) = F_{\text{экс}1}(x) + F_{\text{экс}2}(x).$$

В результате зависимость $F_{\text{л}}(x)$ будет иметь следующий вид:

$$F_{\text{л}}(x) = F_{\text{фш}}(x) + F_{\text{экс}1}(x) + F_{\text{экс}2}(x) + F_{\text{п}}(x). \quad (1)$$

Первый фактор $F_{\text{экс}1}(x)$, особенно неравномерность освещенности, может вносить существенный вклад в погрешности расположения фронтов штрихов (фронтов, диаметров фронтов и др.), а вклад в погрешности расположения осей штрихов и диаметров осей штрихов близок к нулю, так как при изменении освещенности уширение или сужение штриха происходит по обоим фронтам, а положение оси остается неизменным (изменение освещенности в пределах одного штриха является очень малой величиной и может составлять около 0,0005%). Если рассматривать погрешности расположения осей штрихов и диаметров осей штрихов, то уравнение (1) примет вид

$$F_{\text{л}}(x) = F_{\text{фш}}(x) + F_{\text{экс}2}(x) + F_{\text{п}}(x). \quad (2)$$

В уравнении (2) зависимость $F_{\text{фш}}(x)$ является неизменной и привязана к нулевому штриху определенным образом. Она определяется в первую очередь генератором изображений и является одинаковой для всех лимбов, отпечатанных с конкретного фотошаблона. Зависимость $F_{\text{п}}(x)$ является характеристикой конкретной подложки и может складываться с другими зависимостями произвольным образом.

Задача исследования состоит в том, чтобы установить существование $F_{\text{экс}2}(x)$, определить вид зависимости $F_{\text{экс}2}(x)$, ее характеристики и возможность влияния на $F_{\text{л}}(x)$ и $F_{\text{п}}(x)$ с помощью $F_{\text{экс}1}(x)$.

Методика проведения эксперимента

С помощью лазерного генератора изображений CLWS-300 был изготовлен фотошаблон, представляющий собой замкнутую круговую шкалу диаметром 90 мм, состоящую из 1080 прозрачных штрихов шириной 8 мкм. Один из штрихов увеличен в одну сторону на 0,5 мкм. Методом обратной фотолитографии с использованием хромового маскирующего покрытия изготовлены два лимба на полированных подложках, имеющих отклонение от плоскости $N = 5$ и $\Delta N = 1$. Для каждого лимба проведено 18 измерений на установке контроля лимбов

АС700. Измерения проводились с поворотом шкалы относительно оси шпинделя установки на 20° . Положение уширенного штриха определялось по характерному единичному выбросу на зависимости угловой погрешности расположения фронта 1. Далее в соответствии с фазостатистическим методом было проведено усреднение всех полученных угловых зависимостей, причем за нулевой штрих принимался каждый раз уширенный штрих. В результате для каждого лимба были получены зависимости $F_{\text{л}}(x)_1$. Затем на каждой подложке было отмечено положение уширенного штриха, после чего шкала была удалена химическим способом. На этих же подложках повторно была нанесена шкала с помощью того же фотошаблона таким образом, что уширенные штрихи оказались в тех же местах, что и в первом случае. В процессе повторного нанесения шкалы методом обратной фотолитографии при экспонировании фотошаблон на плите был повернут на 90° . Для новых лимбов также было проведено 18 измерений угловых погрешностей и были получены зависимости $F_{\text{л}}(x)_2$.

Результаты эксперимента и обсуждение

В результате проведения эксперимента для каждой подложки получены зависимости угловых погрешностей расположения осей и диаметров осей штрихов, которые можно представить в следующем виде:

$$F_{\text{л}}(x)_1 = F_{\text{фш}}(x) + F_{\text{экс}2}(x)_1 + F_{\text{п}}(x),$$

$$F_{\text{л}}(x)_2 = F_{\text{фш}}(x) + F_{\text{экс}2}(x)_2 + F_{\text{п}}(x).$$

Можно предположить, что зависимости $F_{\text{фш}}(x)$ и $F_{\text{п}}(x)$ в обоих уравнениях одинаковы и имеют одинаковую фазу, так как использовались один и тот же фотошаблон и одна и та же подложка, которая размещалась при экспонировании на фотошаблоне оба раза одинаковым образом. Тогда, если из первого уравнения вычесть второе, получим

$$F_{\text{л}}(x)_1 - F_{\text{л}}(x)_2 = F_{\text{экс}2}(x)_1 - F_{\text{экс}2}(x)_2. \quad (3)$$

Зависимость угловой погрешности расположения осей штрихов $F_{\text{л}}(x)_1$ для первой подложки представлена на рис. 1а, а ее спектральный состав – на рис. 1б. Зависимость угловой погрешности расположения диаметров осей штрихов $F_{\text{л}}(x)_1$ для первой подложки представлена на рис. 1в, а ее спектральный состав – на рис. 1г. Как видно из рисунка 1б, наибольший вклад в угловые погрешности вносят гармоники от 2-й до

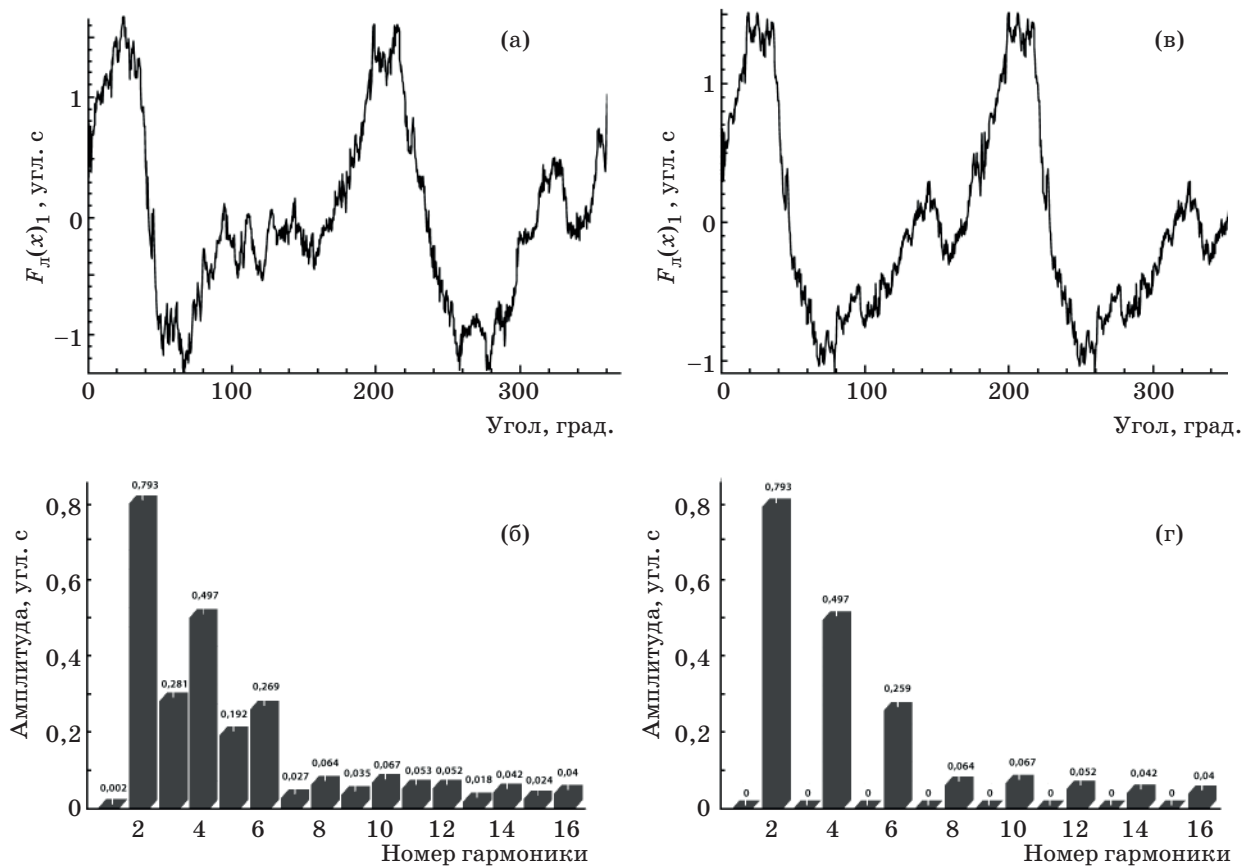


Рис. 1. Угловые погрешности $F_d(x)_1$ и спектральный состав угловых погрешностей для первой подложки (пояснения в тексте).

6-й. Первая гармоника удаляется программным способом, так как предполагается, что она может быть устранена в конечном изделии при юстировке. При переходе от погрешностей расположения осей штрихов к погрешностям расположения диаметров осей штрихов все нечетные гармоники исчезают (рис. 1г). Зависимость $F_d(x)_2$ для первой подложки представлена на рис. 2, зависимость $F_d(x)_1$ для второй подложки – на рис. 3, зависимость $F_d(x)_2$ для второй подложки – на рис. 4. На основании исследования можно утверждать, что основной вклад в погрешности расположения диаметров осей штрихов вносят вторая, четвертая и шестая гармоники. Тогда для зависимости угловой погрешности расположения диаметров осей штрихов $F_{\text{эксп2}}(x)_1$ и $F_{\text{эксп2}}(x)_2$ можно представить в виде

$$F_{\text{эксп2}}(x)_1 = A_{1,2}\sin(2x + B_{1,2}) + A_{1,4}\sin(4x + B_{1,4}) + A_{1,6}\sin(6x + B_{1,6}), \quad (4)$$

$$F_{\text{эксп2}}(x)_2 = A_{2,2}\sin(2x + B_{2,2}) + A_{2,4}\sin(4x + B_{2,4}) + A_{2,6}\sin(6x + B_{2,6}), \quad (5)$$

где A – амплитуда соответствующей гармоники, B – постоянная величина.

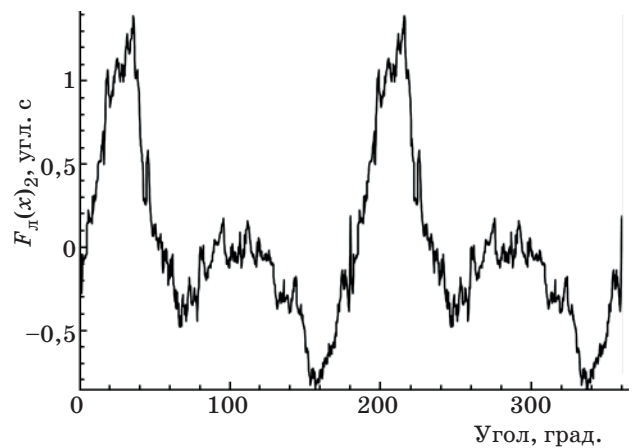


Рис. 2. Угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов $F_d(x)_2$ для первой подложки.

Если предположить, что $F_{\text{эксп2}}(x)_1$ и $F_{\text{эксп2}}(x)_2$ являются выражением одной и той же функции, то (с учетом того, что фотошаблон был повернут на плите на 90° при втором экспонировании) они связаны между собой уравнением

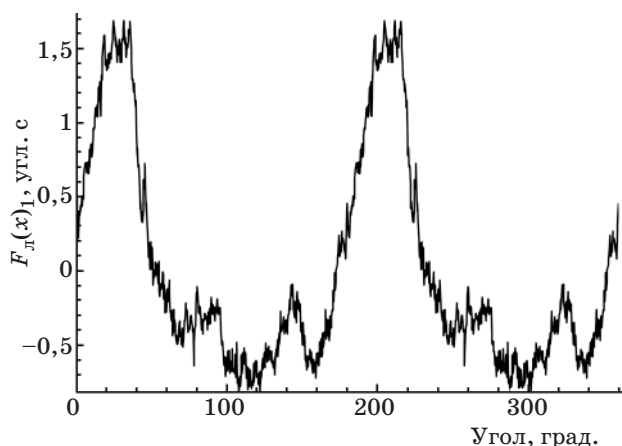


Рис. 3. Угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов $F_d(x)_1$ для второй подложки.

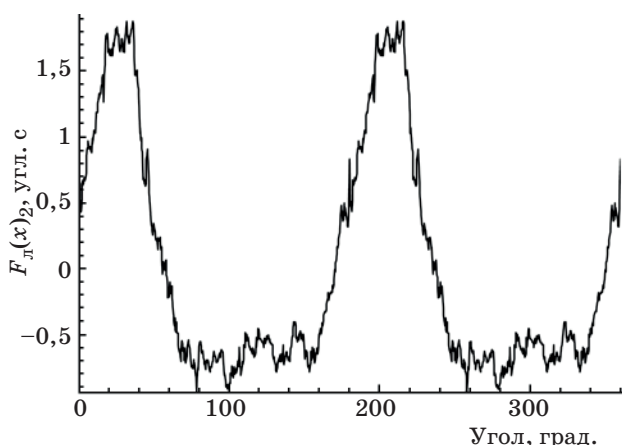


Рис. 4. Угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов $F_d(x)_2$ для второй подложки.

$$F_{\text{эксп2}}(x)_2 = F_{\text{эксп2}}(x + 90)_1.$$

Тогда уравнение (5) будет иметь вид

$$F_{\text{эксп2}}(x)_2 = A_{1,2}\sin(2x + B_{1,2} + 180) + A_{1,4}\sin(4x + B_{1,4} + 360) + A_{1,6}\sin(6x + B_{1,6} + 540). \quad (6)$$

Если в уравнение (3) подставить уравнения (4) и (6), то получим

$$F_{\text{эксп2}}(x)_1 - F_{\text{эксп2}}(x)_2 = 2A_{1,2}\sin(2x + B_{1,2}) + 2A_{1,6}\sin(6x + B_{1,6}). \quad (7)$$

Для первой подложки для погрешности расположения диаметров осей штрихов результат вычитания $F_d(x)_1$ (рис. 1в) – $F_d(x)_2$ (рис. 2) представлен на рис. 5 (кривая 1). Для второй подложки для погрешности расположения диаметров осей штрихов результат вычитания $F_d(x)_1$ (рис. 3) – $F_d(x)_2$ (рис. 4) представлен на рис. 5 (кривая 2). На основании полученных зависимостей можно сказать, что для первой подложки основной вклад в результат вычитания вносит вторая гармоника, для второй подложки – вторая и шестая гармоники, в обоих случаях четвертая гармоника отсутствует, что говорит о справедливости сделанного ранее предположения о том, что $F_{\text{эксп2}}(x)_1$ и $F_{\text{эксп2}}(x)_2$ являются выражением одной и той же функции. Разделив зависимости, представленные кривыми 1 и 2 на рис. 5, на 2, получим зависимости $F(x) = A_{1,2}\sin(2x + B_{1,2}) + A_{1,6}\sin(6x + B_{1,6})$, которые представляют собой зависимости $F_{\text{эксп2}}(x)$, из которых вычли вклады, вносимые четвертой гармоникой. Результаты представлены кривыми 3 и 4 на рис. 5.

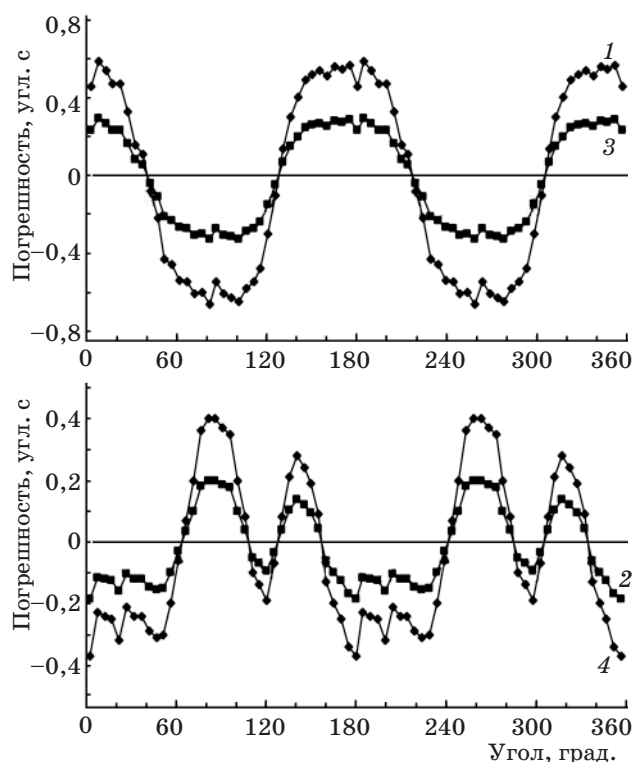


Рис. 5. Результат вычитания $F_d(x)_1 - F_d(x)_2$ для первой (1) и второй (2) подложек и зависимости $F(x) = A_{1,2}\sin(2x + B_{1,2}) + A_{1,6}\sin(6x + B_{1,6})$ для первой (3) и второй (4) подложек.

Конечно, для $F_{\text{эксп}2}(x)$ не определена четвертая гармоника, но очевидно существование $F_{\text{эксп}2}(x)$, которая вносит свой вклад в угловые погрешности лимбов. Полученные накопленные значения $F_{\text{эксп}2}(x)$, входящие в угловую погрешность расположения диаметров осей штрихов, составляют 0,63" и 0,39" для первого и второго лимбов соответственно. В то же время накопленная погрешность расположения диаметров осей штрихов составляет 2,3"—2,6" и 2,5"—2,8" для первого и второго лимбов соответственно. Из этого следует, что за счет $F_{\text{эксп}2}(x)$ разброс значений накопленных погрешностей расположения диаметров осей штрихов лимба может достигать 1,2", что может составлять до 50% от самих значений погрешностей. С учетом того, что $F_{\text{эксп}2}(x)$ имеет тот же спектральный состав, что и погрешности лимбов, в результате проведения процесса обратной фотолитографии при их изготовлении возможно как увеличение погрешностей, так и уменьшение. Это означает, что можно получать круговые оптические шкалы, угловые погрешности которых меньше угловых погрешностей фотошаблонов, полученных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300. Такую возможность можно использовать при изготовлении рабочих фотошаблонов лимбов с использованием фотошаблонов-оригиналов, синтезированных с помощью генератора, а также при изготовлении небольших серий прецизионных лимбов. Факт уменьшения угловых погрешностей круговых оптических шкал был обнаружен ранее [3]. Если обратиться к формуле (2), то в ней $F_{\text{фш}}(x)$ является неизменной зависимостью, по крайней мере для конкретного фотошаблона $F_{\text{ш}}(x)$ является характеристикой конкретной подложки, которую можно выделить из общей зависимости $F_{\text{л}}(x)$ и получить $F_{\text{ш}}(x)$. В этом случае зависимость $F_{\text{ш}}(x)$, которая является характеристикой угловых погрешностей шкалы, будет определяться фазой между зависимостями $F_{\text{фш}}(x)$ и $F_{\text{эксп}2}(x)$. Величину фазы можно регулировать расположением фотошаблона и подложки лимба относительно плиты установки экспонирования при проведении технологического процесса нанесения круговой шкалы методом обратной фотолитографии.

Заключение

Результаты измерений угловых погрешностей круговых оптических шкал зависят от погрешностей, вносимых установкой контроля, погрешностей, вносимых генератором изображений через фотошаблон, погрешностей, вносимых подложкой, и погрешностей, вносимых операцией экспонирования технологического процесса обратной фотолитографии. Собственная погрешность шкалы определяется погрешностями, вносимыми генератором изображений через фотошаблон, и погрешностями, вносимыми операцией экспонирования. Зависимости этих погрешностей определяются одинаковыми гармониками, поэтому при изготовлении оптических шкал возможно как увеличение, так и уменьшение угловых погрешностей. Влияние операции экспонирования необходимо учитывать как при изготовлении самих прецизионных круговых оптических шкал, так и при изготовлении их рабочих фотошаблонов методом обратной фотолитографии с использованием фотошаблона-оригинала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кручинин Д.Ю. Фотолитография в производстве круговых оптических шкал на Уральском оптико-механическом заводе // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 4. С. 92–94.
2. Bartik S.A., Frizin S.E., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Kruchinin D.Y., Nikitin V.G., Yakovlev O.B. Development of a technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesis of high precision angular measuring structures // 10 th IMEKO TC7 International Symposium. Saint-Petersburg, 2004. P. 316–320.
3. Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б. Фотошаблоны для производства оптических шкал // Труды 7 Междунар. конф. "Прикладная оптика-2006". Т. 2. Оптические материалы и технологии. СПб., 2006. С. 111–114.
4. Абрамов Ю.Ф., Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кокарев С.А., Кручинин Д.Ю., Чугуй Ю.В., Яковлев О.Б. Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 8. С. 61–65.