

УДК 535.31.593

АНАЛИЗ СПОСОБА КОМПЕНСАЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАТЧИКА ШЭКА — ГАРТМАНА КАК ЭЛЕМЕНТА АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А. В. Кудряшов, В. В. Самаркин, Ю. В. Шелдакова,
А. Г. Александров

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный открытый университет»,
129626, Москва, ул. Павла Корчагина, 22
E-mail: kud@activeoptics.ru

Рассматривается работа адаптивной оптической системы компенсации aberrаций волнового фронта лазерного излучения. В качестве корректора используются биморфные зеркала, а датчик Шэка — Гартмана является элементом, измеряющим волновой фронт. Показаны недостатки такой адаптивной системы, а также пути их преодоления.

Ключевые слова: адаптивная оптика, деформируемое зеркало, коррекция лазерного излучения, алгоритм фазового сопряжения.

Введение. Для коррекции aberrаций волнового фронта светового излучения традиционно используются адаптивные оптические системы. Структурная схема адаптивной системы представлена на рис. 1. Она состоит из корректора (гибкого зеркала), блока электронного управления, компьютера, датчика для анализа лазерного излучения и программного обеспечения для расчёта напряжений, которые необходимо подать на элементы гибкого зеркала.

В качестве корректора волнового фронта мы используем биморфные деформируемые зеркала [1, 2]. Этот тип зеркал позволяет эффективно компенсировать крупномасштабные aberrации волнового фронта лазерных пучков. Как правило, для управления корректором применяется метод фазового сопряжения [3], а aberrации измеряются датчиком Шэка —

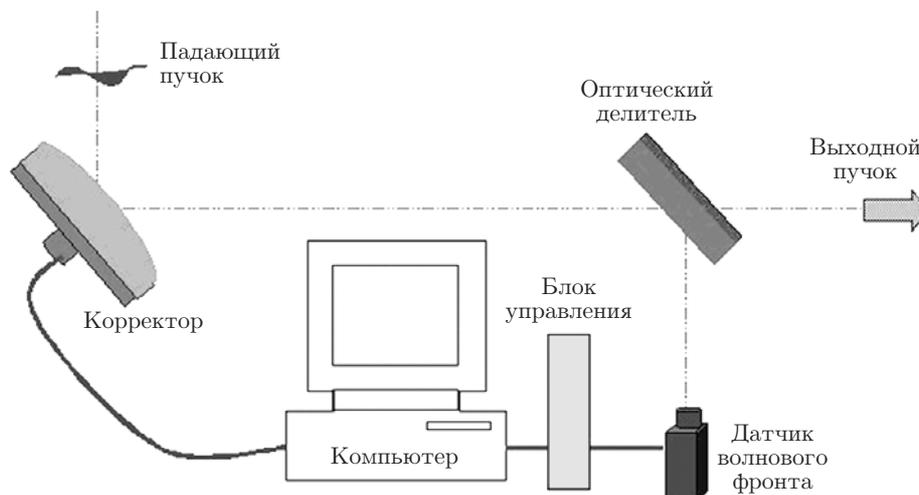


Рис. 1

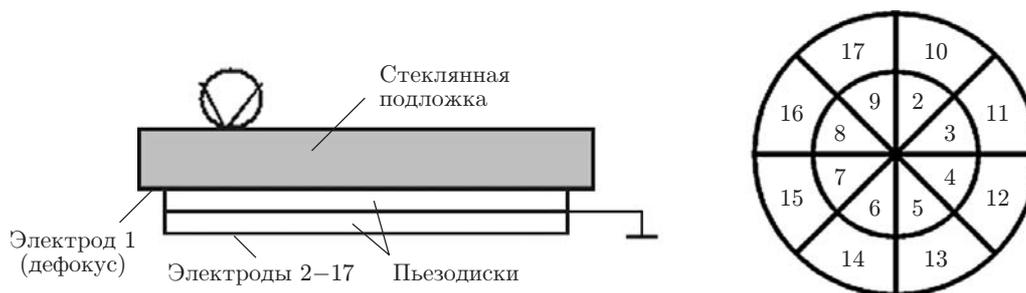


Рис. 2

Гартмана [4]. Однако в экспериментах мы обнаружили, что после окончания процесса коррекции существует возможность значительно улучшить полученный результат.

Целью данной работы является исследование причин неоптимальной коррекции аберраций светового излучения методом фазового сопряжения и повышение степени их компенсации с помощью различных алгоритмов адаптивной оптики.

Биморфные гибкие зеркала. В наших экспериментах мы использовали стандартные биморфные зеркала, состоящие из стеклянной подложки толщиной порядка 3 мм и приклеенных к ней двух пьезокерамических дисков (рис. 2). На первый (внутренний) диск нанесены два круглых электрода. Они применяются для коррекции общей кривизны зеркала. На внешнюю сторону второго диска нанесена сетка управляющих электродов в виде частей сектора.

При подаче управляющего напряжения на электроды за счёт обратного пьезоэффекта происходит сжатие или расширение (в зависимости от полярности напряжения) части пьезокерамики, расположенной под электродом. А так как пьезодиск приклеен к подложке, это приводит к общей деформации поверхности зеркала. Функции отклика (деформация поверхности при подаче управляющего напряжения на выделенный электрод) отдельных электродов приведены на рис. 3. Биморфное зеркало является модальным корректором, т. е. подача напряжения на выделенный электрод приводит к общей деформации поверхности зеркала. С одной стороны, это — преимущество данного типа корректоров: можно легко воспроизводить низшие аберрации, такие как кома, астигматизм, сферическая аберрация. С другой стороны, модальность функций отклика осложняет систему управления биморфным зеркалом.

Датчик Шэка — Гартмана как элемент замкнутой адаптивной системы. Устройство датчика Шэка — Гартмана показано на рис. 4. Измерение волнового фронта основывается на определении локальных наклонов $\Delta\varphi$ искажённой фазы относительно так называемой эталонной (плоской) фазы. Двумерная решётка из микролинз (микролинзового раstra) делит падающее световое излучение на отдельные пучки. Излучение от отдельной микролинзы фокусируется на детекторе (ПЗС-камере). Смещение каждой фокальной

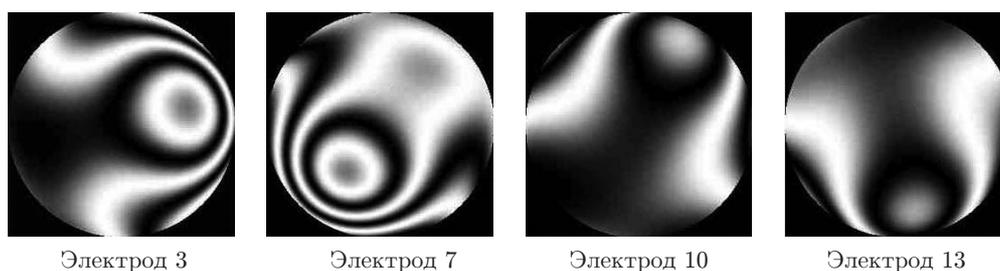


Рис. 3

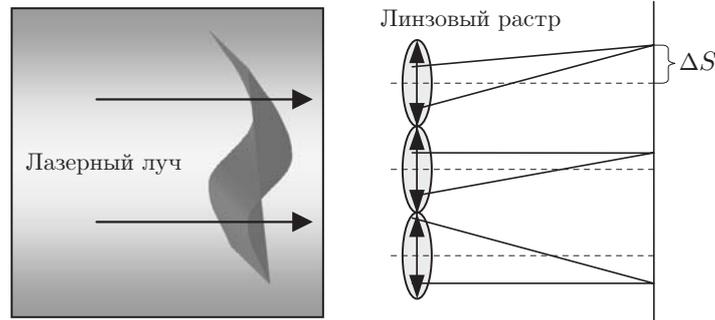


Рис. 4

точки определяет локальный наклон волнового фронта и, соответственно, изменение локальной фазы пучка $\Delta\varphi$, которое пропорционально этому смещению ΔS .

Принцип работы системы фазового сопряжения с датчиком Шэка — Гартмана состоит в минимизации отклонений фокальных пятен реального пучка (чёрные пятна) от эталонного (серые) (рис. 5). Функционал качества коррекции может быть записан в виде

$$\Phi = \min \left\{ \sum_i \Delta S^2 \right\},$$

где i — количество субапертур линзового растра.

В качестве первого шага коррекции измеряются функции отклика электродов b . Они представляются в виде смещений фокальных пятен гартманограммы: $b_{jx}^i = \Delta x_i / u_{0j}$ и $b_{jy}^i = \Delta y_i / u_{0j}$. Здесь u_{0j} — управляющее напряжение, которое используется для измерения функций отклика, а j — число электродов зеркала.

Далее измеряется реальный волновой фронт, который необходимо корректировать. В результате можно записать следующую систему уравнений:

$$S_i = \begin{vmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^N u_j b_j^i,$$

где u — массив управляющих напряжений.

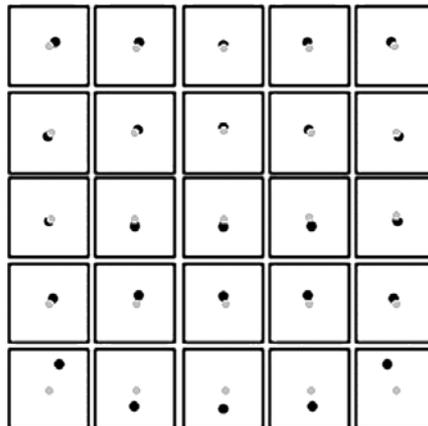


Рис. 5

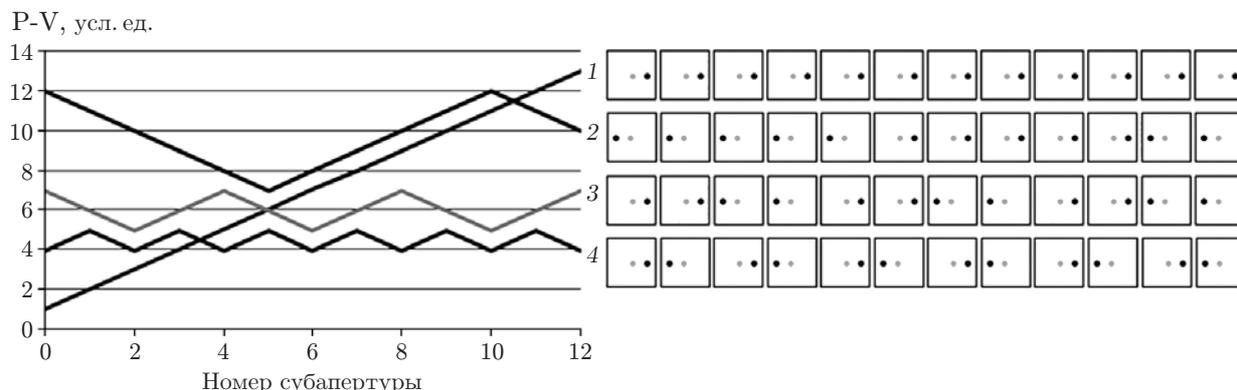


Рис. 6

На последнем шаге напряжения, которые необходимо подать на зеркало, рассчитываются по методу наименьших квадратов:

$$\min \|S - b \cdot \mathbf{u}\|^2, \quad u = \|B\| \bullet S, \quad B = (b^T b)^{-1} b^T.$$

Проблема минимизации смещений фокальных пятен гартманогаммы состоит в том, что минимум функционала $\Phi = \min \left\{ \sum_i \Delta S^2 \right\}$ не всегда соответствует оптимальному волновому фронту (например, наиболее приближённому к плоскому). Вполне понятно, что адаптивная система может компенсировать аберрации волнового фронта только с определённой точностью. Отсюда и появляются основные ошибки коррекции. Одна из причин — соответствие различных комбинаций смещений фокальных пятен гартманогаммы одному и тому же значению функционала Φ , но различным амплитудам искажения волнового фронта. На рис. 6 представлены четыре примера различных гартманогамм. Функционал Φ в каждом случае один и тот же. Во всех случаях смещения пятен одинаковы, различаются только лишь направления смещений. Амплитуда волнового фронта P-V в первом случае равна 12 (кривая 1), а в четвёртом случае P-V = 1 (кривая 4) (для кривых 2 и 3 значения P-V составляют 7 и 2 усл. ед. соответственно). Таким образом, с точки зрения алгоритма минимизации все случаи идентичны, в то время как восстановленные волновые фронты отличаются и по форме, и по амплитуде. Это означает, что предлагаемый функционал минимизации Φ является неоптимальным. Однако на сегодня не предложено ничего более совершенного.

Система апертурного зондирования управления адаптивным зеркалом. В качестве критерия оптимальной коррекции аберраций волнового фронта можно использовать значение амплитуды P-V: $\Phi = \min\{P-V\}$. Для минимизации Φ мы предлагаем применять традиционные алгоритмы «восхождение на холм» и «генетический».

Блок-схема алгоритма восхождения на холм приведена на рис. 7. Сначала подаётся пробный сигнал на выбранный электрод зеркала. Далее, если значение функционала Φ становится лучше (в нашем случае Φ уменьшается), то продолжаем изменять напряжение в том же направлении, например увеличивать. Изменение происходит до момента, пока значение Φ не становится хуже (начнёт увеличиваться). После этого подаём пробный сигнал на следующий электрод и проделываем аналогичную операцию. И так со всеми актюаторами зеркала. Это достаточно простая процедура, однако она занимает длительное время. Плюс ко всему можно столкнуться с так называемыми «ложными» минимумами, что значительно тормозит весь процесс коррекции или даже приводит к неправильному результату.

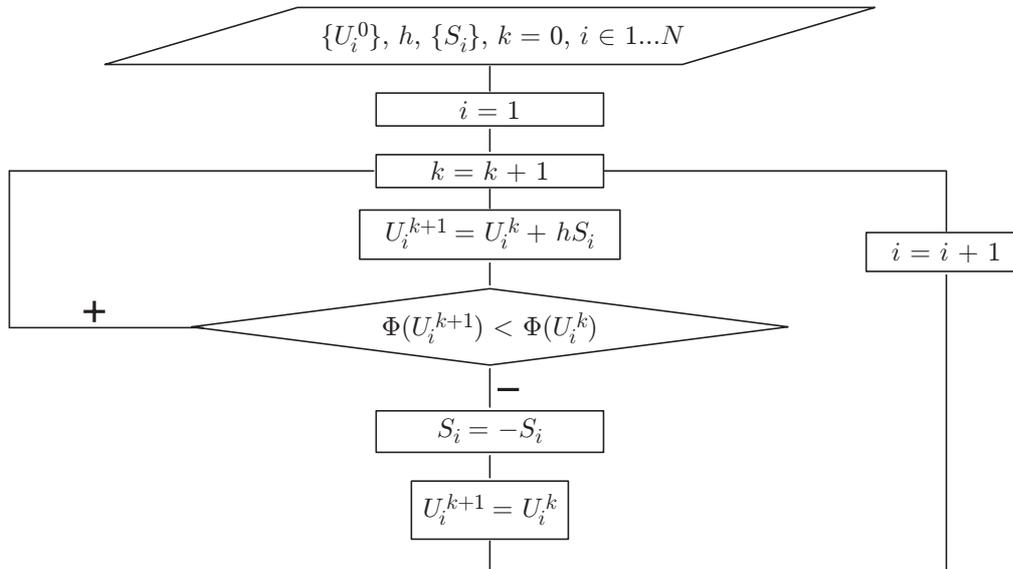


Рис. 7

Генетические алгоритмы основаны на методе случайного поиска [5]. Они всегда приводят к глобальному минимуму оптимизируемого функционала. Для адаптивной оптики в качестве «индивидов» можно рассматривать набор напряжений $A_j = \{U_1, U_2, \dots, U_{17}\}$, которые необходимо подать на электроды зеркала. Наиболее подходящие индивиды содержат информацию о напряжениях, при которых происходит наилучшая коррекция. Весь алгоритм начинается с подачи случайного набора напряжений $B_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ (рис. 8). Каждому значению A_i соответствует некоторая величина функционала Φ . После чего происходит селекция наборов напряжений и только наилучшие индивиды остаются, а все остальные отбрасываются. Далее из оставшихся наборов и их «мутантов» формируется новое поколение B_1 . Таким образом, одно поколение сменяет другое и функционал постепенно улучшается (минимизируется). В конце достигается оптимум, а в нашем случае — наилучшая коррекция волнового фронта.

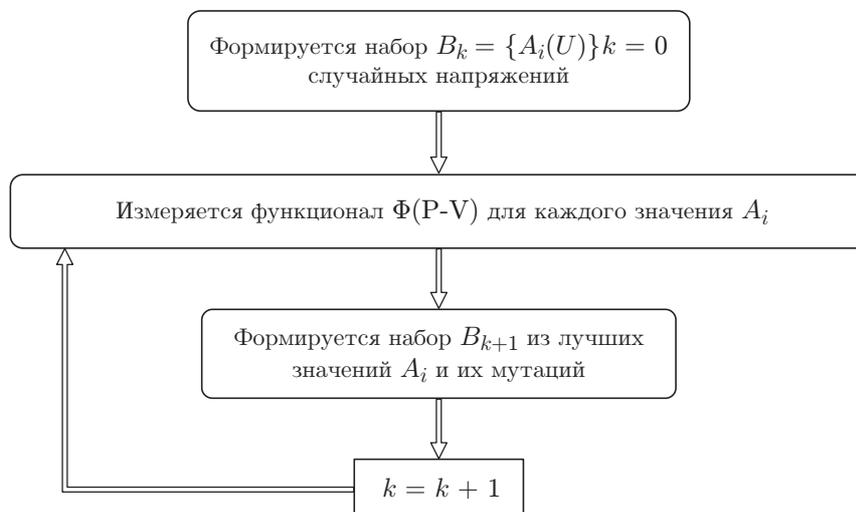


Рис. 8

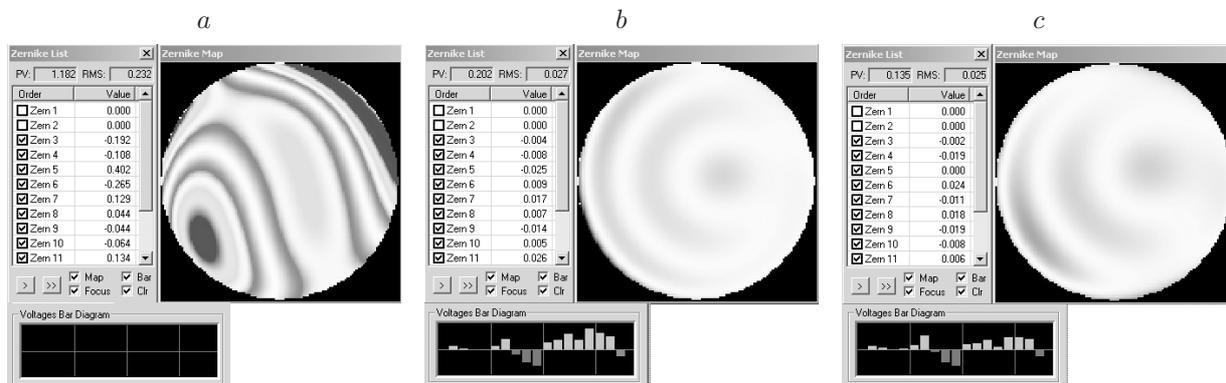


Рис. 9

Для ускорения процесса сходимости возможна комбинация этих двух методов: на первом этапе применяется генетический алгоритм в качестве начального приближения для алгоритма восхождения на холм, а на втором окончательная коррекция доводится уже традиционным итерационным способом.

Основные результаты. Проведём сравнение результатов коррекции излучения диодного лазера с искусственно введёнными фазовыми искажениями методами фазового сопряжения и апертурного зондирования. В эксперименте луч лазера с длиной волны 635 нм расширялся телескопом до размера адаптивного зеркала (30 мм). Затем с помощью фазового экрана волновой фронт модулировался и излучение направлялось на датчик Шэка — Гартмана для дальнейшего анализа.

Начальное значение амплитуды искажений фазы составляло 1,182 мкм (рис. 9, *a*). Применение метода фазового сопряжения позволило снизить это значение до 0,202 мкм (рис. 9, *b*). Далее мы использовали полученный волновой фронт в качестве начального для применения алгоритма восхождения на холм и было достигнуто значение 0,135 мкм (рис. 9, *c*). Гистограммы распределения управляющих напряжений на электродах зеркала представлены на рисунке внизу.

Для следующего эксперимента был взят фазовый экран с $P-V = 0,593$ мкм (рис. 10). В данном случае метод фазового сопряжения позволил улучшить волновой фронт до значения $P-V = 0,166$ мкм (рис. 10, *a*). Применение же метода восхождения на холм привело к аналогичному значению $P-V$ (рис. 10, *b*). Комбинация методов (генетического и восхождения на холм) привела к небольшому улучшению результата коррекции: $P-V = 0,140$ мкм (рис. 10, *c*). Интересно отметить, что, хотя результаты коррекции в этих трёх случаях сла-

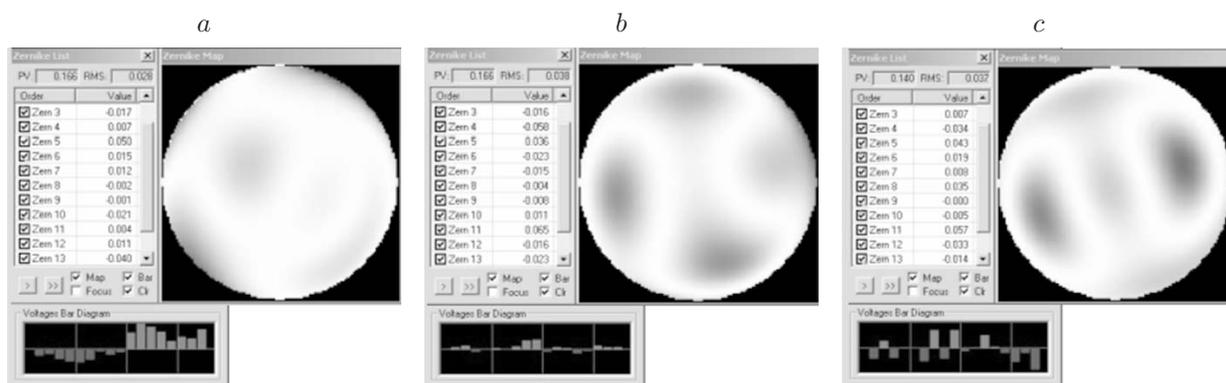


Рис. 10

бо отличаются друг от друга, значения управляющих напряжений на электродах зеркала существенно различны.

Основным преимуществом использования метода фазового сопряжения является то, что для достижения коррекции требуется всего 3–4 итерации, а в случае применения методов апертурного зондирования необходимо сделать значительное количество шагов, что в конечном счёте приводит к увеличению времени достижения оптимальной коррекции.

Заключение. В данной работе предложены методы апертурного зондирования для коррекции статических или медленно меняющихся aberrаций волнового фронта. Для измерения фазовых искажений использовался датчик Шэка — Гартмана. Наиболее быстрый способ компенсации aberrаций волнового фронта — метод фазового сопряжения — не всегда приводит к наилучшему результату коррекции. Метод же восхождения на холм эффективен при условии, что начальное приближение распределения фазы достаточно близко к оптимальному. Генетический алгоритм является чрезвычайно медленным и должен применяться совместно с другими методами оптимизации фазы пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kudryashov A. V., Shmalhausen V. I.** Semipassive bimorph flexible mirrors for atmospheric adaptive optics applications // Opt. Eng. 1996. **35**, N 11. P. 3064–3073.
2. **Kudryashov A. V., Samarkin V. V., Aleksandrov A.** Adaptive optical elements for laser beam control // Proc. SPIE. 2001. **4457**. P. 170–178.
3. **Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И.** Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
4. **Zavalova V. Ye., Kudryashov A. V.** Shack-Hartmann wavefront sensor for laser beam analyses // Proc. SPIE. 2002. **4493**. P. 277–284.
5. **Baumert T., Brixner T., Seyfried V. et al.** Femtosecond pulse shaping by an evolutionary algorithm with feedback // Appl. Phys. B: Lasers and Optics. 1997. **65**, N 6. P. 779–782.

Поступила в редакцию 5 декабря 2011 г.
