

инициация, моментум, групповое обновление [6]. Эксперимент показывает, что 40–60 нейронов в скрытом слое дают лучший результат в соотношении «времени обучения – сходимости». В данной работе используются 50 скрытых нейронов.

Обсуждение результатов

Программа была реализована на языке C# 2008. Программа предоставляет возможность формирования базы данных для обучения, создания и обучения нейронной сети (многослойный перцептрон), а также имеет отдельный интерфейс для проверки и тестирования работоспособности.

На этапе обучения сеть сходится после 10000 эпох со среднеквадратической ошибкой 0,001. Программа была протестирована 50 раз с тестовой базой данных, состоящей из 18 изображений (рис. 6). Частота появления ошибок составляет 0,1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Folders A., Samet H. Content-based Image Retrieval Using Fourier Descriptors on a Logo Database // Proc. of the 16th Intern. Conf. on Pattern Recognition. – Quebec, 2002. – V. 3. – P. 521–524.
2. Zhang D., Lu G. Review of shape representation and description techniques // Pattern Recognition. – Oxford: Elsevier, 2004. – V. 37. – P. 1–19.
3. Nixon M., Aguado A. Feature Extraction & Image Processing. – Oxford: Elsevier, 2008. – 406 p.
4. Pattern Recognition Techniques, Technology and Applications / Ed. Peng-Yeng Yin. – Croatia: InTech, 2008. – 626 p.

Для проверки работоспособности алгоритма были созданы другие базы данных тренировки и тестирования (рис. 7). Полученные результаты показали, что алгоритм позволяет распознавать достаточно сложные фигуры, состоящие из простых элементов (круг, эллипс, треугольники...) с высокой точностью: для данных на рис. 7 после 30 тестов были 2 ошибки (частота ошибок – 0,15 %).

Выводы

1. Создана программа для распознавания фигур на основе анализа контура с применением Фурье-дескрипторов и нейронной сети.
2. Показано, что Фурье-дескрипторы и нейронные сети являются эффективным механизмом для решения задачи распознавания объектов.
3. Разработанная программа способна распознавать сложные фигуры с высокой точностью.
5. Ghuneim A.G. Moore-Neighbor Tracing // Contour Tracing, 2010. URL: http://www.imageprocessingplace.com/downloads_V3/root_downloads/tutorials/contour_tracing_Abeer_Ghuneim/moore.html (дата обращения: 20.07.2010).
6. Fausett L.V. Fundamentals of Neural Networks – Architectures, Algorithms, and Applications. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993. – 461 p.

Поступила 15.09.2010 г.

УДК 519.688:53.083.98

АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ РЯДОВ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ

Ю.В. Волков, В.А. Тартаковский

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск
E-mail: tv@imces.ru

На примере рядов ежегодного прироста трахеид четырех климатипов сосны рассмотрен алгоритм совместной фильтрации, изменяемый для повышения качества восстановления биоиндикационной информации.

Ключевые слова:

Биоиндикация, годовые кольца, сезонный рост, математическое моделирование, анализ сигналов.

Key words:

Bioindication, tree-ring, vegetative growth, mathematical simulation, signal analysis.

Введение

Годичные кольца, сформированные в стволе дерева рядами трахеид, являются биологическими индикаторами климатоэкологического состояния окружающей среды. Знание о биоиндикационных свойствах годовых колец может быть расширено и дополнено в результате изучения процессов роста дерева на клеточном уровне.

На поперечном сечении ствола дерева годовые слои отображаются в виде ряда клеток определенного количества (рис. 1), в которых каждая отдельная клетка формировалась в течение некоторого промежутка времени в пределах вегетационного периода под воздействием внешних и внутренних факторов, оказывавших определяющее воздействие на форму и размер клетки, а также на толщину клеточной стенки [1].

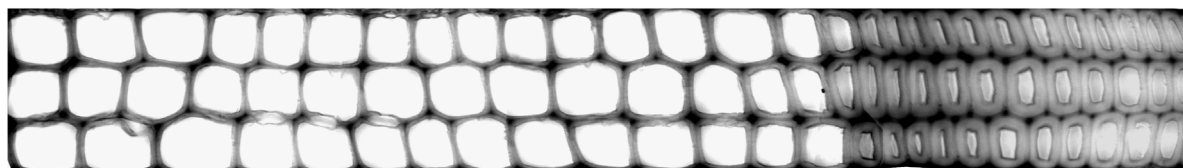


Рис. 1. Микрофотография годичного слоя сосны обыкновенной

Таким образом, каждая отдельная клетка определяет величину ежегодного прироста и несет в себе информацию об изменениях роста в течение вегетационного периода. Выделение скрытой в структуре годичного слоя информации возможно путем изучения изменений параметров клеток за вегетационный период.

С целью оценки сезонных изменений роста использованы микрофотографии рядов клеток трех климатипов сосны обыкновенной (Пинежского, Плесецкого, Чемальского), произрастающих в географических культурах Приангарья. Выбрано по 5 деревьев от каждого климатипа, у которых отобрано по два керна. В каждом керне исследовались два ряда клеток в годичных слоях, соответствующих 1994 и 2003 гг. Общий объем выборки составил 96 рядов.

Средние оценки изменений сезонного роста, восстановленные в соответствии с разработанным ранее алгоритмом [2–4] за одинаковые вегетационные периоды, рис. 2, отражают сходную закономерность и наличие малой (не более 20 % от среднего значения) величины среднего квадратического отклонения.

Полученные результаты подтверждают наличие в рядах сезонного роста общей для всех деревьев и локальных – индивидуальных для каждого дерева в отдельности закономерностей. Данное наблюдение позволяет сделать вывод о наличии внешних воздействий, оказывающих влияние на формирование и рост клеток в течение вегетационного периода. В связи с этим является актуальной задача

выделения закономерностей внешних воздействий, формирующих исходные ряды и влияющих на процессы формирования клеток. Известно, что изменчивость климатических параметров фиксируется клетками деревьев в процессе трансформации данных изменений в дереве с определенной периодичностью [1] и может являться общим определяющим рост клеток воздействием. При восстановлении хронологических данных использован сформулированный в ходе работы принцип «общности», в соответствии с которым внешнее вынуждающее воздействие проявляется в общности существенных признаков всех хронологий одного типа в пределах физико-географической единицы. Этот принцип подтверждается наличием статистической устойчивости средних значений сезонных изменений прироста клеток за вегетационный период у исследованных натуральных образцов трех различных климатипов сосны.

Постановка задачи

Для хронологических рядов, относящихся к одинаковым географическим единицам, внешнее вынуждающее воздействие обуславливает наличие естественного механизма синхронизации рядов. Следует различать глобальные, региональные, локальные и индивидуальные составляющие внешнего воздействия.

Основываясь на предположении о существовании общего вынуждающего воздействия, определяющего структуру годичного слоя, необходимо разработать алгоритм совместной фильтрации ря-

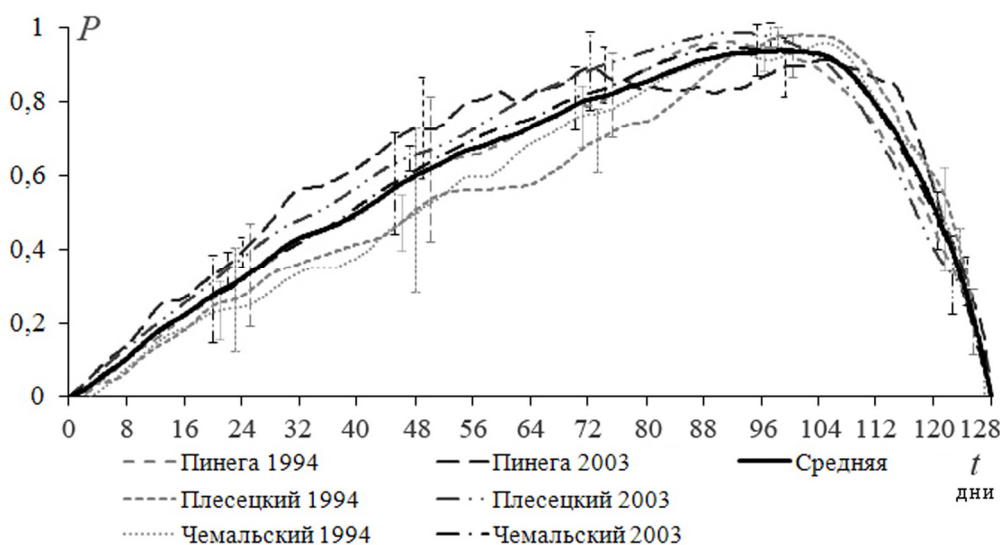


Рис. 2. Оценки средних значений сезонных изменений прироста клеток P за вегетационный период t

дов, позволяющий выделять группы общности из исследуемой выборки сигналов, соответствующих одинаковым временным периодам.

Алгоритм совместной фильтрации

Исследуемые сигналы удобно рассматривать как некоторое интегральное представление составляющих сигнал базисных функций. По определению общие части процессов, в данном случае рядов прироста, должны конструироваться только из тех элементов представляющего базиса, которые обладают некоторой инвариантностью при переходе от одного процесса к другому. Фильтр такого типа оставляет общие составляющие сигналов, ограничивая их изменчивость. Сигналы, оставаясь после совместной фильтрации различными, функционально сближаются, увеличивая коэффициент корреляции.

Исследуемые сигналы, рассматриваемые как действительные функции времени с ограниченной энергией, могут быть дополнены и продолжены на всю действительную ось периодически четным или нечетным способом. В этом случае для рассматриваемых функций существует преобразование Фурье, например, в тригонометрическом базисе. Положим, что инвариантом относительно смены хронологий является знак спектральной составляющей функций. Это означает, что спектр сигнала должен формироваться спектральными составляющими одного знака.

Полезность такого подхода следует из свойства скалярного произведения двух функций, которое пропорционально скалярному произведению преобразований Фурье этих функций. Выбирая спектральные составляющие с совпадающими знаками, мы максимизируем коэффициенты корреляции общих составляющих каждой пары сигналов для данной выборки.

Исследуемые ряды обозначим как $x_i(n)$, эти функции вещественны, а n – дискретный аргумент, принимающий целые значения из заданного интервала наблюдений N . Количество рядов обозначим индексом I , где индексы i, l определяют номера рядов. Для ограниченных функций конечной мощности $x_i(n)$ имеются прямое и обратное дискретные преобразования Фурье:

$$x_i(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_i(k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}},$$

$$X_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_i(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}},$$

где j – мнимая единица, k – номер гармоники.

Спектр $X_i(k)$ вещественный и выражает координаты ряда $x_i(n)$ в пространстве тригонометрических базисных функций.

Алгоритм совместной фильтрации обозначен символами CF . На первом этапе алгоритма реализуется прямое преобразование Фурье исходных сигналов. На втором этапе производится расчет

средних оценок спектра частот для всей выборки исследуемых сигналов. На третьем этапе производится фильтрация частотного спектра, реализуемая по правилу:

$$Y_i(k) = CF\{X_i(k)\} = \begin{cases} X_i(k), & \text{sign}X_i(k) = \text{sign}X_l(k) \\ 0, & \text{sign}X_i(k) \neq \text{sign}X_l(k) \end{cases}$$

При фиксированном k для всех возможных i и l из набора I в спектре $X_i(k)$ для частоты k остаются координаты с одинаковыми знаками, а координаты для каждого отдельного ряда со знаками, отличающимися от рассчитанного среднего для общей выборки, полагаются равными нулю, как показано на рис. 3. В результате получается новый ряд $Y_i(k)$, спектральные составляющие которого получены как результат совместной фильтрации.

На четвертом этапе, после применения обратного преобразования Фурье к преобразованному спектру $X_i(k)$ получаем общие составляющие $y_i(n)$ от исходных сигналов $x_i(n)$.

Для построения оценок взаимосвязей рядов, предполагая, что исследуемые процессы имеют нулевое среднее, использованы коэффициенты корреляции для исходных $r_0(k)$ и общих $r_c(k)$ частей процессов, а также относительная дисперсия исследуемых рядов $\varepsilon(k)$:

$$r_0(k) = \frac{\langle x_i(k), x_i(k) \rangle}{\sqrt{\langle x_i(k), x_i(k) \rangle \langle x_i(k), x_i(k) \rangle}},$$

$$r_c(k) = \frac{\langle y_i(k), y_i(k) \rangle}{\sqrt{\langle y_i(k), y_i(k) \rangle \langle y_i(k), y_i(k) \rangle}},$$

$$\varepsilon(k) = \frac{\langle y_i(k), y_i(k) \rangle}{\langle x_i(k), x_i(k) \rangle}.$$

Ход работы и результаты исследования

Этапы исследования были следующими: выделение функций прироста из микрофотографий годичного слоя, фильтрация исходного сигнала, восстановление функции фазы, построение общих частей и оценки вариаций сезонного роста. Исследовались образцы потомства четырех климатипов сосны обыкновенной (Пинежский, Плесецкий, Чемальский, Балгазынский Архангельской области), произрастающих в географических культурах Приангарья. Выбрано по 5 деревьев от каждого климатипа, у которых отобрано по одному керну, в каждом керне исследовались два ряда клеток в годичных слоях, соответствующих 1994 и 2003 гг. Общее количество исследованных рядов равнялось 128.

В результате применения описанного выше алгоритма совместной фильтрации к исследуемым образцам коэффициент корреляции r_0 , принимает наибольшее значение для каждой пары рядов из данной выборки. Результаты применения алгоритма на примере четырех рядов данных представлены в таблице.

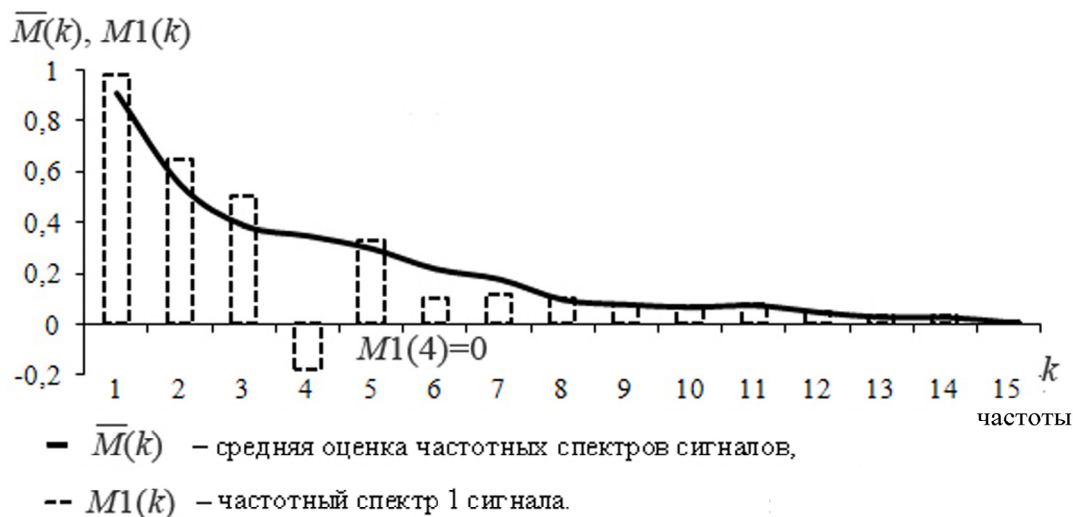


Рис. 3. Дискретные частотные спектры исследуемых сигналов

Таблица. Коэффициенты корреляции рядов климатипов сосны

Ряд	Преобразованные				
	1	2	3	4	
Один климатип					
Исходные	1	1	0,87	0,88	0,89
	2	0,71	1	0,85	0,86
	3	0,67	0,65	1	0,89
	4	0,75	0,69	0,65	1
Разные климатипы					
Исходные	1	1	0,86	0,85	0,84
	2	0,51	1	0,88	0,85
	3	0,66	0,61	1	0,83
	4	0,59	0,69	0,57	1

Анализ коэффициентов корреляции исходных рядов показывает наличие сходных реакций у деревьев одного климатипа (коэффициент корреляции изменяется от 0,65 до 0,75) и наличие индивидуальных особенностей у деревьев различных климатипов (коэффициент корреляции изменяется от 0,51 до 0,69). В результате работы алгоритма совместной фильтрации ряды функционально сближаются, минимальное значение коэффициента корреляции увеличивается до 0,83. Для всех рядов выборки, состоящей из 128 рядов, соответствующих разным климатипам, также наблюдается увеличение коэффициентов взаимной корреляции.

В ходе исследования на примере рядов различных климатипов сосны проведена оценка эффек-

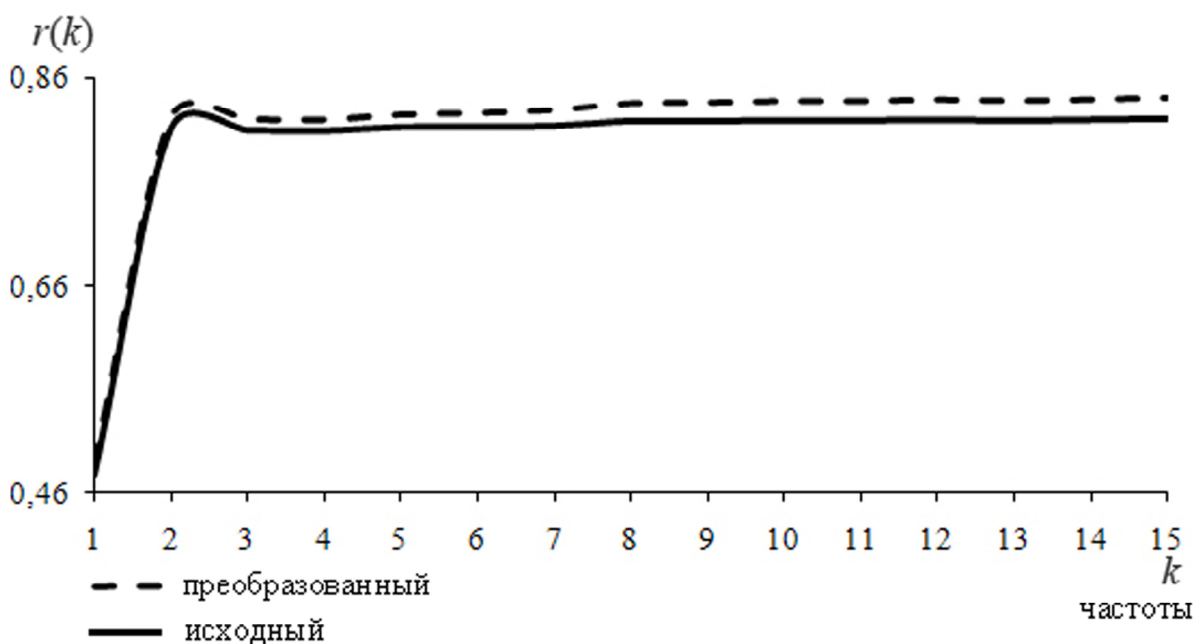


Рис. 4. Оценки средних значений коэффициентов корреляции в зависимости от ширины окна спектрального фильтра для исходных и преобразованных сигналов

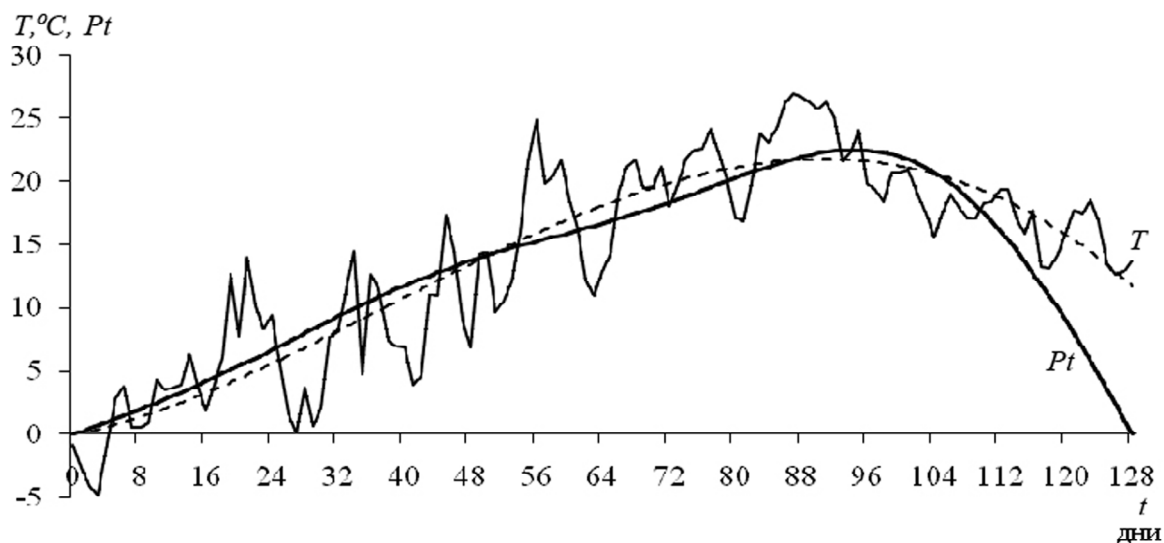


Рис. 5. Средняя оценка нормированного прироста Pt и температура за вегетационный период T

тивности работы алгоритма в зависимости от размеров спектрального окна и определен вклад каждой отдельной частоты (рис. 3).

Исходя из полученных результатов определено, что наиболее значимыми являются три первых частоты дискретного частотного спектра исследованных сигналов. Эти частоты являются определяющими при формировании «общих» составляющих сигналов, все остальные частоты суммарно увеличивают коэффициент корреляции не более чем на 10 % от среднего значения и соответственно характеризуют многочисленные локальные особенности, влияющие на рост клеток за вегетационный период.

В ходе данной работы проведено сопоставление средних значений сезонных изменений прироста клеток с климатическими данными. Построена средняя оценка функции прироста для исследуемой выборки из 128 рядов четырех климатипов сосны с использованием алгоритма совместной фильтрации, применяемого в пределах первых трех полос частотных спектров сигналов.

Наибольший коэффициент взаимной корреляции, равный 0,97, определен для температурных данных. На рис. 4 представлена средняя оценка функции сезонного роста и температурного тренда в пределах вегетационного периода.

Таким образом, функция значений сезонных изменений прироста исследованных натуральных об-

разцов характеризует сезонную динамику усредненных (по декадам) значений температуры.

Заключение

Разработан алгоритм совместной фильтрации рядов данных, применяемый для исследования клеточных структуры годичных колец деревьев, позволяющий выделить общие части из каждого отдельного ряда, характеризующиеся высокими уровнями коэффициентов взаимной корреляции.

В результате применения алгоритма совместной фильтрации достигнуто увеличение коэффициентов взаимной корреляции отфильтрованных рядов данных, соответствующих клеточным структурам годичных колец четырех климатипов сосны, на 20 % относительно значений коэффициентов корреляции, рассчитанных для исходных рядов.

Применение алгоритма совместной фильтрации для рядов, соответствующих клеточным структурам годичных колец четырех климатипов сосны, позволило определить наличие в функциях роста составляющих, обусловленных влиянием температуры.

В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод о наличии общей закономерности сезонного роста у деревьев различных климатипов сосны, обусловленных климатическими процессами, что подтверждает гипотезу о существовании общего вынуждающего воздействия, влияющего на структуру годичных колец на клеточном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
2. Тартаковский В.А., Исаев Ю.Н., Несветайло В.Д., Волков Ю.В., Попов В.Н. Математическая модель радиального сечения годичных колец деревьев // Автометрия. – 2003. – Т. 38. – № 5. – С. 118–127.
3. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель микроструктуры годичных слоев деревьев // Известия Томского

политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 117–120.

4. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель годичных колец деревьев на микро- и макроуровне // Новые методы в дендрэкологии / под ред. В.И. Воронина. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 150–152.

Поступила 31.08.2010 г.