

С. Г. КУНДЮКОВ, канд. техн. наук, А. Б. ЛУЦЕНКО

ИЗМЕРЕНИЕ АППАРАТУРНЫХ ЗАДЕРЖЕК В РАДИОМЕТЕОРНЫХ СИСТЕМАХ СИНХРОНИЗАЦИИ

Радиометеорный метод синхронизации принадлежит к числу наиболее точных и обладает рядом преимуществ, среди которых можно отметить автономность и сравнительно низкие материальные затраты на создание и эксплуатацию аппаратуры. Теоретические и экспериментальные исследования свойств метеорного радиоканала (кратковременная нестабильность времени распространения, необратимость и др.) подтверждают возможность создания систем синхронизации с погрешностью порядка 1 нс и меньше [1]. Однако существующие в настоящее время радиометеорные системы не в полной мере используют потенциальные возможности канала.

Применение когерентных радиосигналов и фазовых методов измерения времени задержки позволяет снизить случайную помеховую погрешность радиометеорного метода до долей наносекунды. Эта составляющая погрешности может быть дополнительно уменьшена за счет накопления и усреднения результатов. В результате полная погрешность измерения сдвига шкал через метеорный радиоканал определяется в основном аппаратурной систематической погрешностью (АСП). АСП не зависит от алгоритмов синхронизации и составляет для результатов измерения фазовых сдвигов шкал в пункте А:

$$\delta t_{АП}^A = \frac{(\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A) - (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)}{2} = \Delta_{АП}^A - \Delta_{АП}^B, \quad (1)$$

где $\tau_{ПРМ}^A, \tau_{ПРМ}^B$ – задержки в приемо-измерительных трактах аппаратуры пунктов А и В; $\tau_{ПРД}^A, \tau_{ПРД}^B$ – задержки в трактах формирования и излучения сигналов; $\Delta_{АП}^A = (\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A)/2, \Delta_{АП}^B = (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)/2$ – АСП полуккомплектов аппаратуры в отдельных пунктах (А и В).

Использовавшиеся ранее способы пилотирования предполагают выполнение нескольких измерений задержек сигнала в отдельных устройствах или группах устройств с последующим вычислением оценки АСП полуккомплекта аппаратуры в целом. По мере развития методов и схем измерения АСП уменьшалось количество устройств, не охваченных пилотированием, использование измерительной антенны позволило учитывать невзаимность задержек в антенно-фидерных устройствах при приеме и передаче. Однако общий недостаток таких способов – наличие устройств коммутации, не охваченных пилотированием. Кроме того, большинство известных способов не предусматривает измерение задержек в устройствах формирования и измерения временного положения сигналов.

Одним из путей снижения погрешности синхронизации в радиометеорных системах является разработка методов измерения АСП, позволяющих измерять полную АСП полуккомплекта аппаратуры в целом без коммутации и изменения режимов трактов формирования и обработки сигналов. Такой метод может быть реализован на основе алгоритма зеркальной ретрансляции сигналов (ЗРС).

Структурная схема и временная диаграмма, поясняющие принцип измерения полной АСП комплекта аппаратуры одного пункта, приведены на рис 1. Устройство пилотирования (УП), выполняющее ЗРС, принимает радиосигнал, излученный полуккомплектом аппаратуры синхронизации, и переизлучает его, выполнив зеркальную инверсию сигнала во времени относительно опорной метки $t_{ОП}$. Аппаратура синхронизации принимает переизлученный сигнал и измеряет его положение во времени. При подключении аппаратуры и устройства

пилотирования к одному эталону, а также при условии обратимости задержек измерительной антенны (ИА) и канала передачи сигналов между антеннами (основной и измерительной), измеренная аппаратурой пункта *A* задержка сигнала $s_3(t)$ составит:

$$t_2 = (\tau^A_{ПРМ} - \tau^A_{ПРД}) + 2t_{ОП} + \Delta_{УП}, \quad (2)$$

где $t_{ОП}$ – момент времени, относительно которого производится ЗРС; $\Delta_{УП}$ – АСП устройства, выполняющего ЗРС.

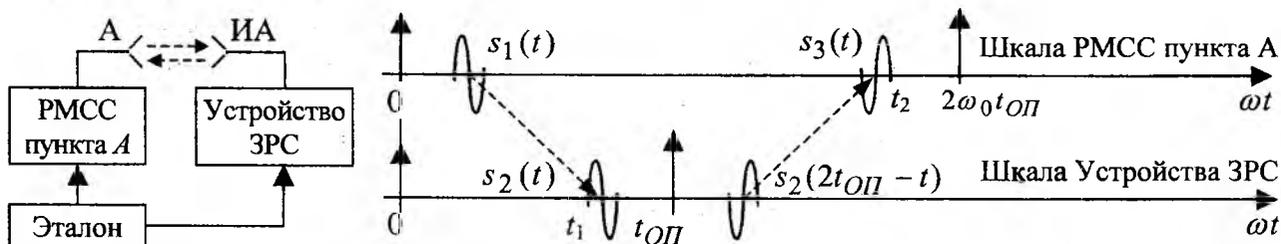


Рис. 1

Из выражения (2) следует, что АСП полукомплекта аппаратуры синхронизации

$$\Delta^A_{АП} = t_2/2 - t_{ОП} - \Delta_{УП}/2 \quad (3)$$

можно определить, если известны и стабильны параметры $t_{ОП}$ и $\Delta_{УП}$.

Поскольку измерительная антенна располагается в одном пункте с основной, уровень сигнала на входе УП достаточно велик, чтобы сделать УП полностью цифровым устройством, соединив антенный вход с АЦП и ЦАП через широкополосные пассивные цепи, хорошо согласованные с антенным входом, и без коммутатора прием/передача. Это позволяет существенно уменьшить необратимость задержки сигнала в тракте измерительной антенны. Высокая стабильность цифрового УП обеспечивается за счет формирования всех необходимых тактирующих сигналов и временных интервалов с использованием сигналов эталона и применения быстродействующих АЦП и ЦАП (апертурная неопределенность современных АЦП составляет десятки пикосекунд).

Предложенный способ измерения АСП имеет недостаток, ограничивающий его применимость в уже существующих радиометеорологических системах. Аппаратура синхронизации может без переделки обрабатывать сигналы, переизлученные устройством ЗРС, только в случае, если сигналы синхронизации, применяемые в системе, симметричны во времени. Этому условию удовлетворяет аппаратура МЕТКА-6 [2], разработанная и изготовленная в ХНУРЭ и эксплуатируемая в пунктах Госстандарта Украины и России.

Рассмотренные принципы реализованы в имитаторе метеорологического канала синхронизации (ИМКС), разработанном для отладки макетов МЕТКА-6 и исследования их АСП. Его структурная схема приведена на рис. 2. Диапазон рабочих частот имитатора при нелинейности ФЧХ $0,4^\circ$ и неравномерности АЧХ 3 дБ составляет 56,5 – 58,5 МГц (центральная частота $f_0 = 57,5$ МГц). ИМКС для МЕТКИ-6 может работать как в режиме задержки, так и в режиме зеркальной ретрансляции сигналов.

Дискретизация и восстановление выполняются непосредственно на несущей частоте. Частота дискретизации $f_D = 10$ МГц. Для восстановления аналогового сигнала используется последовательность радиоимпульсов с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ),

формируемая быстродействующим ЦАП. Спектр такой последовательности равен произведению спектра восстанавливающего импульса $S_H(\omega)$ на спектр дискретного сигнала [3]:

$$S_{АИМ}(\omega) = \frac{1}{T_D} S_H(\omega) \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_H(\omega + 2\pi n f_D), \quad (4)$$

где $S_H(\omega)$ – спектр исходного непрерывного сигнала.

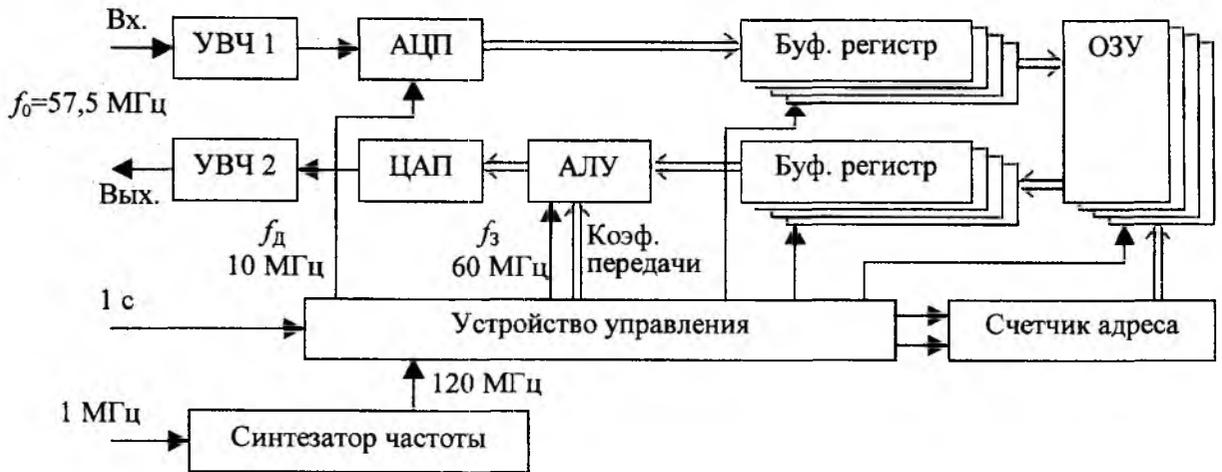


Рис. 2

Для формирования последовательности восстанавливающих радиоимпульсов длительностью $1/f_D$ знак цифровых отсчетов в АЛУ модулируется меандром с частотой $f_3 = 60$ МГц. Частота заполнения выбрана кратной частоте дискретизации, чтобы использовать для модуляции непрерывное колебание (без скачков фазы). Соответствующие спектры дискретного сигнала (1) и восстанавливающего радиоимпульса (2) показаны на рис. 3. В качестве восстанавливающего фильтра используются фильтры приемника аппаратуры МЕТКА-11 (и частично фильтр в УВЧ2 имитатора), выделяющие участок спектра в области f_0 .

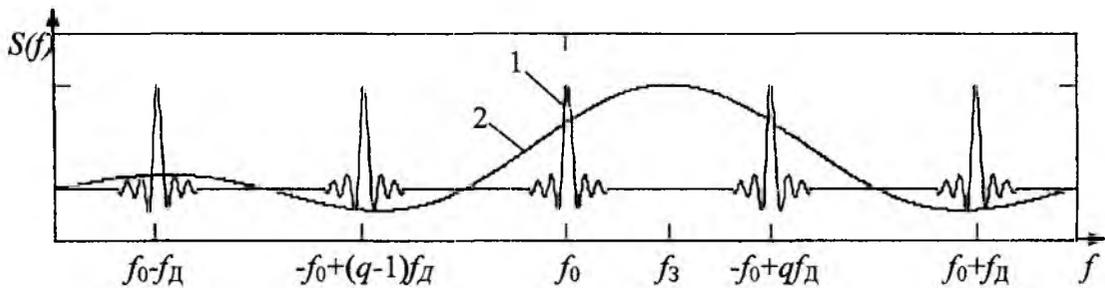


Рис. 3

Коэффициент передачи ИМКС регулируется цифровым аттенюатором (цифровые отсчеты умножаются на задаваемый коэффициент). Синтезатор и устройство управления имитатора синхронизируются сигналами 1 МГц и 1 с, подаваемыми от сличаемого эталона. Для реализации зеркальной инверсии во времени при восстановлении сигнала последовательность цифровых отсчетов считывается из ОЗУ в обратном порядке.

Введен дополнительный режим задержки, в котором, как и при ЗРС, прием и переизлучение сигнала разделены во времени. Преимуществом такого режима является возможность

регулировать время начала считывания данных, сохраненных при приеме зонда МЕТКИ-6, а значит, размещать переизлучаемый сигнал в любом месте в пределах периода зондирования. Максимальная длительность сигнала ограничена величиной $t_{3/C}$, которая составляет приблизительно 3,4 мс. Этого достаточно для работы через ИМКС двух полукомплектов аппаратуры сличения, со сдвигом шкал, обеспечивающим отсутствие перекрытия сигналов во времени.

Измерение временного положения принятого сигнала в аппаратуре МЕТКА-6 выполняется по огибающей радиоимпульсов без внутриимпульсной модуляции. Вследствие нелинейности передающего устройства форма радиоимпульсов искажается таким образом, что передний и задний фронты получаются неидентичными. Вызванная этим несимметричность сигнала во времени приводит к некоторому увеличению погрешности измерения АСП аппаратуры синхронизации с использованием ЗРС.

Более полная реализация возможностей предложенного метода измерения АСП возможна в фазовых радиометеорных системах синхронизации, где для точного измерения временного положения сигнала используется фаза несущей частоты. С учетом этого при разработке фазовой аппаратуры МЕТКА-11 предложен новый способ обработки сигналов при сличении шкал времени и устройство для его реализации [4]. Структурная схема сличения двух эталонов времени с использованием ЗРС и измерительной антенны для пилотирования АСП в каждом пункте приведена на рис 4.

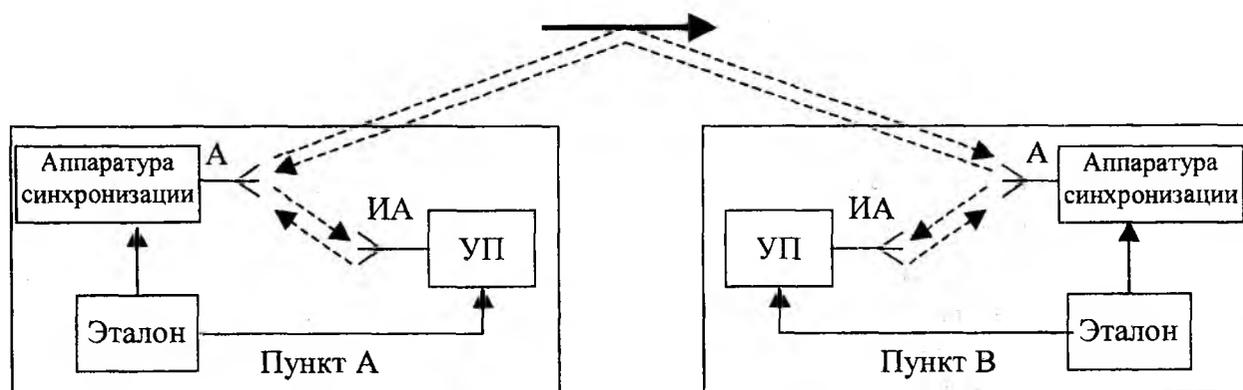


Рис. 4

Временная диаграмма встречного алгоритма измерения сдвига шкал с пилотированием АСП посредством ЗРС приведена на рис. 5. При пилотировании каждого полукомплекта сигнал сличения излучается аппаратурой синхронизации и через измерительную антенну поступает в устройство пилотирования (УП), которое выполняет ЗРС относительно опорной метки времени t_{OP} , сформированной из сигналов эталона. Полукомплект аппаратуры принимает ретранслированный сигнал и измеряет его временное положение:

$$t_{1П}^A = (\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A) + 2t_{OP} + \Delta_{УП}^A; \quad t_{1П}^B = (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B) + 2t_{OP} + \Delta_{УП}^B, \quad (5)$$

где $\Delta_{УП}^A$ и $\Delta_{УП}^B$ – АСП устройств пилотирования в пунктах А и В.

При сличении измеряется временное положение t_1^A и t_1^B сигналов, полученных через метеорный радиоканал, выполняется обмен между пунктами скорректированными результатами ($t_1 - t_{1П}$) и вычисляется оценка сдвига шкал эталонов:

$$\Delta \hat{T}^{AB} = (t_1^A - t_{1П}^A) - (t_1^B - t_{1П}^B) - \hat{\Delta}_{УП}^{AB}, \quad (6)$$

где $\hat{\Delta}_{УП}^{AB}$ – поправка, равная предварительно измеряемой оценке разности $\Delta_{УП}^A - \Delta_{УП}^B$.

Поскольку и при сличении и при пилотировании сигналы точного времени проходят через одни и те же тракты полукомплекта аппаратуры, работающие в идентичных режимах, их АСП исключается при вычитании $(t_1 - t_{1П})$ и не содержится в получаемой оценке $\Delta\hat{T}^{AB}$. В результате АСП оценки сдвига шкал определяется величиной неисключенной составляющей АСП блоков пилотирования.

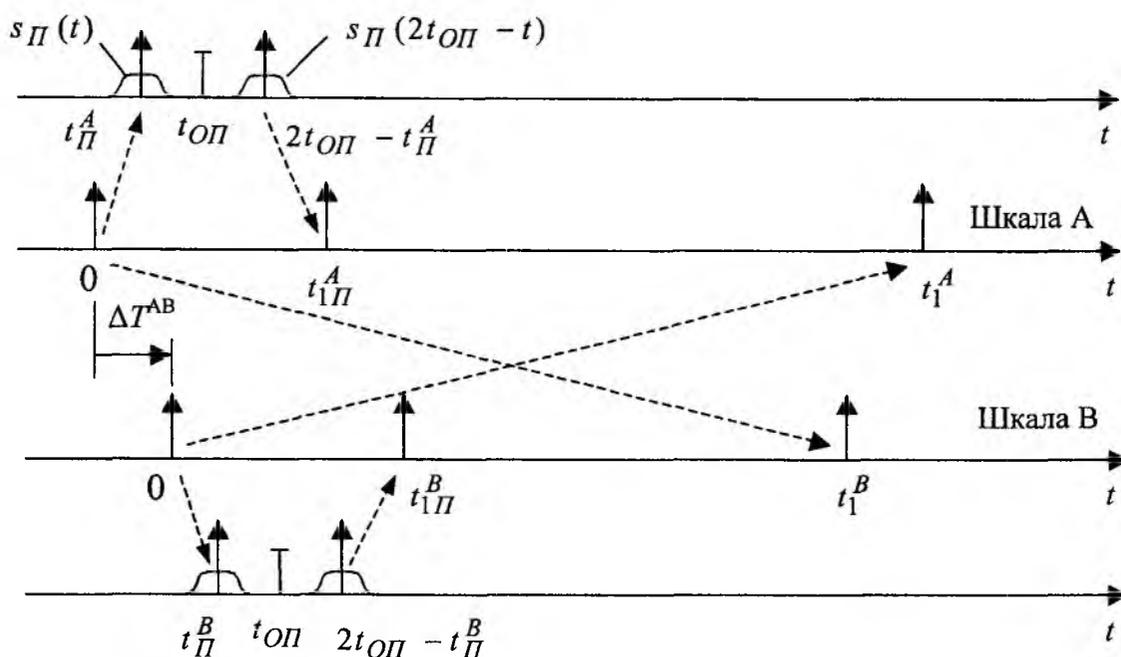


Рис. 5

Величина $\hat{\Delta}_{УП}^{AB}$ может быть непосредственно измерена без привлечения дополнительного измерительного оборудования, если оба УП свезены в один пункт. Такая ситуация обычно имеет место на этапе изготовления и отладки системы. В дальнейшем для периодического контроля $\hat{\Delta}_{УП}^{AB}$ может использоваться дополнительное УП, поочередно размещаемое во всех сличаемых пунктах.

Структурная схема устройства пилотирования, входящего в состав полукомплекта аппаратуры МЕТКА-11, приведена на рис. 6. В отличие от имитатора, УП является неотъемлемой составной частью макета МЕТКА-11, необходимой для реализации используемого алгоритма сличения. При этом АСП измерения сдвига шкал определяется нестабильностью величины $\Delta_{УП}$.

Несущая частота сигналов аппаратуры МЕТКА-11 45,5 МГц. Входной и выходной фильтры УП сделаны широкополосными. Основное ограничение ширины спектра входного сигнала происходит в радиопередающем устройстве аппаратуры синхронизации, а в качестве восстанавливающего фильтра для сигнала, формируемого УП, используются фильтры приемника. Это приводит к уменьшению задержки в аналоговой части самого УП и повышению его стабильности. Высокая частота дискретизации (60 МГц) позволяет использовать для восстановления аналогового радиосигнала видеоимпульсы с АИМ, формируемые в ЦАП. Длительность восстанавливающих импульсов $1/f_D$ приблизительно равна 3/4 периода несущей частоты.

В УП применены быстродействующие преобразователи фирмы Analog Devices: 8-разрядный АЦП AD9057 и 10-разрядный ЦАП AD9760. В устройстве управления, выполняющем и счет адреса ОЗУ, используется сигнальный процессор ADSP2181. ОЗУ содержит две микросхемы памяти по 64К со временем выборки 16 нс, которые опрашиваются поочередно. При этом частота счета адреса составляет 30 МГц.

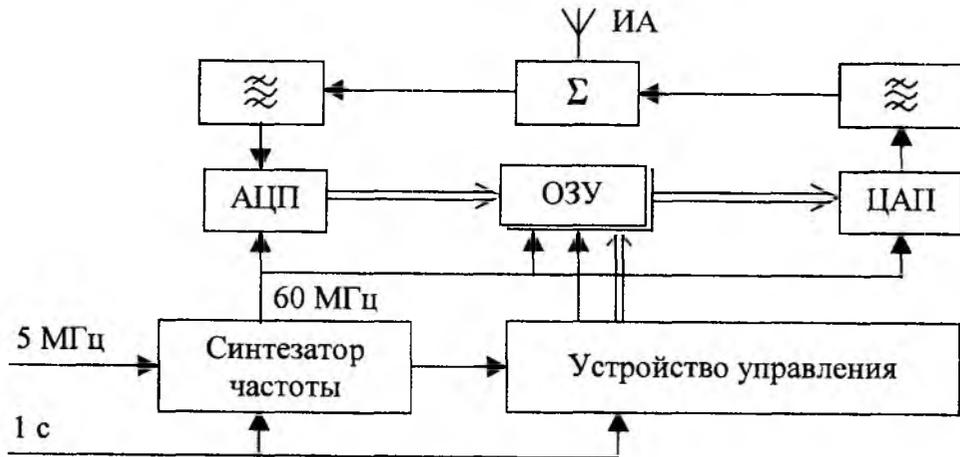


Рис. 6

Продолжительность $t_{3/C}$ приема (и переизлучения) сигналов в УП составляет $\sim 2,2$ мс. В режиме пилотирования аппаратура МЕТКА-11 в начале периода зондирования излучает импульс ДЧС. УП сохраняет принятую реализацию и, выполнив зеркальное обращение во времени, переизлучает ее 4 раза в течение того же периода зондирования. Это позволяет аппаратуре МЕТКА-11 выполнить 4 единичных измерения $t_{1П}$ за период зондирования с последующим усреднением. Временной сдвиг между переизлучаемыми сигналами выбран так, чтобы аппаратура синхронизации принимала их с разной начальной фазой.

Для экспериментальной проверки использованного способа компенсации АСП проведено два сеанса измерений с использованием двух полукомплектов аппаратуры МЕТКА-11, расположенных в одном пункте и работающих друг на друга через метеорный радиоканал (локационный режим или режим с нулевой базой). Поскольку оба полукомплекта использовали общую шкалу времени, формируемую стандартом частоты, измеряемый сдвиг шкал априорно известен и равен нулю. Таким образом, результаты измерений характеризуют погрешность измерения сдвига шкал аппаратурой МЕТКА-11. Получены средние за сеанс оценки сдвига шкал 1,35 нс и 1,22 нс (для первого и второго сеансов), что подтверждает эффективность разработанного способа компенсации АСП.

Список литературы: 1. Оценка кратковременной нестабильности времени задержки сигналов при метеорном распространении радиоволн / В. В. Бавыкина, Б. Л. Кашеев и др. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 120. С. 25 – 32. 2. Новый комплекс аппаратуры для сличения эталонов времени и частоты по радиометеорному каналу / Б. С. Дудник, Б. Л. Кашеев и др // Измерительная техника. 1986. № 4. С.15 – 16. 3. Цикин И. А. Дискретно-аналоговая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1982. 160 с. 4. Патент України 20380 А, G 04 С 11/02. Спосіб обробки сигналів при зв'язанні шкал часу та пристрій для його реалізації / Б. С. Дудник, Б. Л. Кашеев та ін. № 95094289; Заявл. 26.09.95; Опубл. 15.07.97.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.10.2002