

УДК 551.466.88

© Е.Г.Морозов, 2013

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва
egmorozov@mail.ru

ВНУТРЕННИЕ ПРИЛИВЫ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА МЕГАПОЛИГОНЕ

Характеристики внутренних приливных волн в северо-западной части Мегполигона рассчитаны по данным измерений течений и температуры на большом количестве буйев. Выделяются две системы внутренних приливных волн. Одна система волн генерируется к востоку и юго-востоку от полигона, предположительно на возвышенности Шатского и Императорских горах. Вторая система генерируется в районе Курильских островов. Осреднением большого количества данных измерений рассчитаны эллипсы течений баротропного прилива, которые оказались близки к оценкам по спутниковым альтиметрическим данным. Течения баротропного прилива использованы для расчета характеристик внутренних приливных волн после вычитания приливных течений баротропного прилива из данных измерений.

Ключевые слова: внутренние приливные волны, пространственно-временной спектр, буйковые станции.

Полигонные исследования с помощью долговременных буйковых станций дают возможность получить ценный материал для исследования внутренних волн, в частности, наиболее энергонесущих внутренних волн с полусуточной частотой. Как правило, полигоны прошлых лет были нацелены на изучение синоптических вихрей, но близость горизонтальных масштабов синоптических вихрей и приливных внутренних волн позволяет использовать полученные данные и для расчетов параметров последних.

Исследования, проводимые Институтом океанологии, значительно расширили наши знания о внутренних волнах приливного периода в океане [1]. Полигонные исследования начали проводиться с 1967 г., когда в Аравийском море был выполнен первый океанологический полигон. Затем были проведены измерения на Атлантическом Полигоне-70 и Мезополигоне-85. После этого было принято решение провести исследования на крупномасштабном полигоне в 1987 г.

Известно, что внутренний прилив в океане генерируется при обтекании неровностей топографии течениями баротропного прилива. Вертикальные составляющие течений, которые при этом возникают, вызывают периодические вертикальные смещения изопикнических поверхностей. Основной энергонесущей частотой внутреннего прилива является компонента, соответствующая баротропному приливу M_2 с периодом 12.4 ч [2].

В августе–октябре 1987 г. к северу от струи течения Куроисио в северо-западной части Тихого океана проведен эксперимент Мегполигон [3]. Район исследования был ограничен координатами 38°05' с.ш., 42°30' с.ш., 151°32' в.д. и 157°36' в.д. Глубина океана на полигоне изменялась от 5200 до 5800 м. Наличие больших перепадов глубин на возвышенности Шатского, к юго-востоку от полигона, а также расположенный в 600 милях к востоку подводный хр. Императорских гор создают условия для генерации бароклинного прилива. Можно ожидать, что полусуточные внутренние волны возбуждаются в нескольких районах и, приходя на акваторию полигона, интерферируют, приспособившись к рельефу, а именно длина волн изменяется в соответствии со стратификацией и глубиной океана. Поэтому на полигоне антенный метод Барбера позволяет регистрировать несколько волновых систем.

На полигоне было выставлено 173 буя с измерителями течений на горизонтах 120 и 1200 м. На отдельных станциях измерители ставились также на горизонтах 400 и 4500 м (отсчет глубин – от поверхности океана). Часть измерителей течений была снабжена датчиками температуры. Буи ставились по треугольной сетке с расстоянием между буями 23 мили. Дискретность измерений равнялась 30 мин. Продолжительность работы полигона была около двух месяцев. В работе было задействовано три судна Института океанологии и несколько судов других организаций. Работу с буями выполняли суда Института океанологии.

Постановка буев началась в западной части полигона 31 июля и постепенно смещалась на восток. Весь полигон был установлен к 23 августа. Подъем буев начался 6 октября, закончился 24 октября. Во время совместной работы часть буев была смещена и потеряна. За это время через полигон прошло четыре урагана. Работе буев мешала активная рыбная ловля – буи запутывались в сетях. Потери требовали постоянной замены и возвращения на место буев, сорвавшихся с якорей. В результате общая потеря данных, в том числе и за счет поломок приборов, оценивается в 50 %. Более подробно эксперимент изложен в работах [3, 4].

На рис.1 показана схема расположения буев Мегполигона. Точками показаны плановые положения буев, данные с которых были получены. Пропуски в регулярной сетке соответствуют положениям буев, которые были поставлены, но потеряны, или буев, которые не принесли никаких результатов.

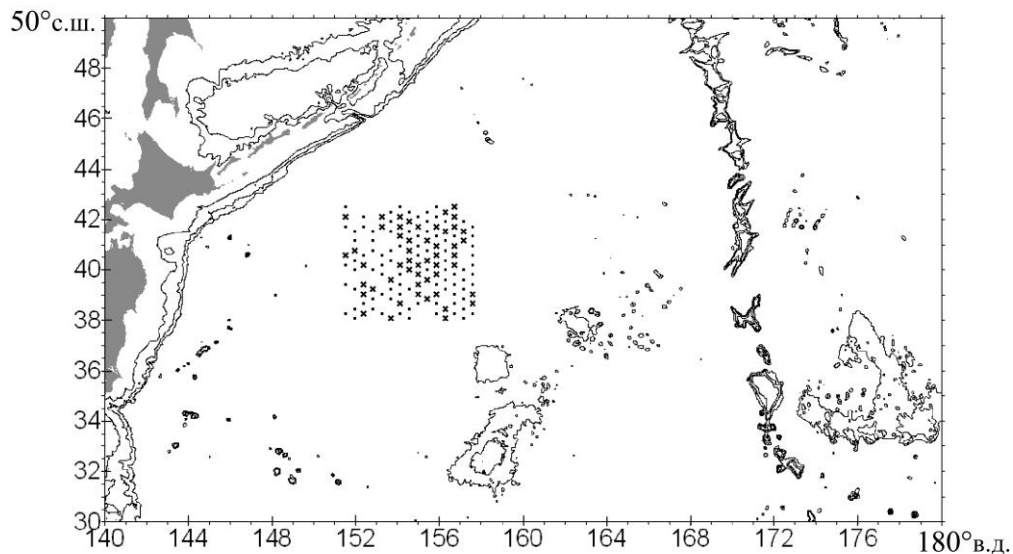


Рис.1. Топография района исследований. Показаны изобаты 1500, 2000, 3000, 3500 и 4000 м.

Точки – плановое положение буев Мегполигона, крестики – точки с данными течений на горизонте 120 м, по которым проводилось осреднение.

Анализ данных. Расчеты спектральных функций по данным измерений температуры и течений на буйковых станциях показали, что спектры характеризуются четко выраженным пиком на полусуточной частоте. На горизонте 1200 м средние вертикальные смещения с полусуточным периодом находились в диапазоне 15–25 м. Горизонтальная когерентность между реализациями температуры не всегда была выше доверительного уровня, что указывает на не очень сильную взаимосвязь колебаний. Это может быть вызвано присутствием нескольких интерферирующих систем полусуточных внутренних волн. Вертикальная когерентность полусуточных колебаний не превышает доверительного уровня при увеличении расстояния между датчиками более 400 м. Столь быстрое уменьшение когерентности возможно при взаимодействии нескольких мод колебаний, близких к источнику их генерации.

Полигонные измерения на таком большом количестве буйковых станций можно использовать для определения длины волны и направления распространения приливных внутренних волн. Весь полигон в целом можно рассматривать как антенну для определения волновых характеристик.

Для оценки параметров полусуточных приливных волн использовался метод Барбера, который был разработан для сейсмологии и применен к океанским волнам [5]. Предполагается произвольное расположение датчиков. Метод основан на расчете взаимных спектров для каждой пары возможных комбинаций датчиков с последующей сверткой на частоте изучаемой волны. Амплитуды и фазы взаимных характеристик используются для расчета пространственно-временного спектра на частоте изучаемой волны для оценки горизонтального волнового числа. Метод основан на статистической разности фаз между каждыми двумя парами датчиков. Для наших расчетов использовались датчики температуры, которые отражают вертикальные движения, связанные с внутренними волнами. Развитием этой обработки явилась обработка данных течений, в которых присутствует сумма сигналов баротропного прилива и внутренних волн. При таком анализе важно, чтобы расстояние между датчиками было сравнимо с длиной волны изучаемых волн, но расстояние между соседними датчиками не было больше длины волны. Качество данных значительно возрастает, если расстояние между датчиками меньше длины волны. Иначе возникает неопределенность в интерпретации разностей фаз. Если расстояние между датчиками слишком мало, а размах антенны буев также мал (менее полудлины волны), то определения длины волны будут неточными. В силу ограниченного числа датчиков спектр получается не дельтообразный, а пик спектра, соответствующий волновому числу, оказывается размытым. Поэтому обычно двухмерные пространственно-временные спектры для определенной частоты представляют в виде изолиний от максимума спектра (в %). Чем больше датчиков используется для оценки параметров, тем характеристики волн получаются точнее, поскольку спектральные пики становятся менее размытыми.

Пространственно-временной спектр рассчитывался по формуле [5]:

$$E(k_x, k_y, f_0) = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [P_{ij}(f_0) \cos 2\pi(k_x x_{ij} + k_y y_{ij}) - Q_{ij}(f_0) \sin 2\pi(k_x x_{ij} + k_y y_{ij})],$$

где $k_x^2 + k_y^2 = k^2$ пространственное волновое число; длина волны $L = 1/k$; i, j – номера датчиков; n – общее число датчиков; P_{ij} и Q_{ij} – реальная и мнимая части взаимного спектра между датчиками с номерами i и j ; $x_{ij} = X_i - X_j$; $y_{ij} = Y_i - Y_j$ – проекции расстояний между датчиками на горизонтальные оси x и y .

Рассмотрим результаты обработки данных измерений температуры для оценок параметров внутренних приливов на горизонте 1200 м. Датчики температуры были установлены на северо-западной группе (14 буев) и юго-восточной группе (15 буев). Период совместной работы каждого кластера был около месяца. На рис.2 показано сечение пространственно-временного спектра для полусуточной частоты M_2 по температурным данным северо-западной группы буев на горизонте 1200 м.

Выделяются два значимых пика на пространственно-временном спектре. Первый пик соответствует направлению волн на северо-запад (300°) и длине волны 160 км ($k = 0.00000625$ цикл/м). Второй пик (менее значимый – 60 % от главного) говорит о присутствии второй волновой системы с направлением на юго-восток (140°) и длине волны 150 км ($k = 0.00000666$ цикл/м).

Аналогичный пространственно-временной спектр был рассчитан и для юго-восточной группы буев. На спектре отмечается один главный пик, соответствующий длине волны 150 км, направленной на северо-запад (290°). Оба спектра нанесены на кар-

ту топографии (рис.3). Нулевые значения волнового числа установлены примерно в центре каждого из двух кластеров буев.

Главные пики на двух спектрах соответствуют волновым векторам, направленным на северо-запад. Их величина приблизительно соответствует длине волны 150 км. Можно предположить, что эти волны генерируются на склонах возвышенности Шатского (32–34°N, 157–164°E) или Императорского хребта. Второй пик соответствует юго-восточному направлению волн, генерированных на континентальном склоне Курильских островов. Этот пик уже не различим на спектре юго-восточной группы буев. Вторая волновая система – более слабая, и амплитуда волн затухает до незначимого уровня по мере распространения по обширному полигону буев.

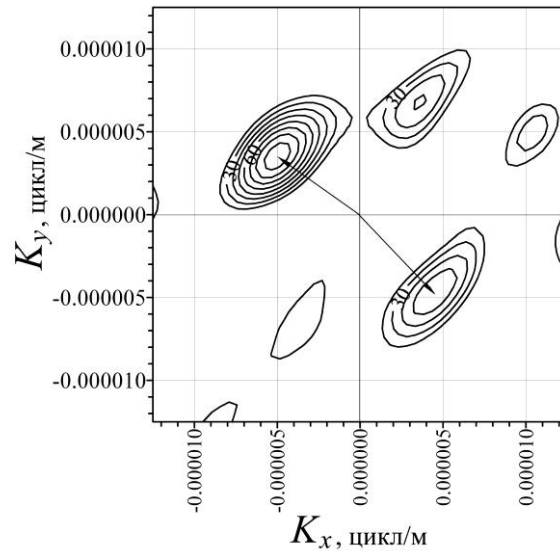


Рис.2. Сечение пространственно-временного спектра для полусуточной частоты M_2 по данным измерений температуры на горизонте 1200 м на 14 буях.

Здесь и на рис.6 изолинии даны в процентах от главного максимума. Стрелки показывают волновые векторы двух систем полусуточных приливных волн.

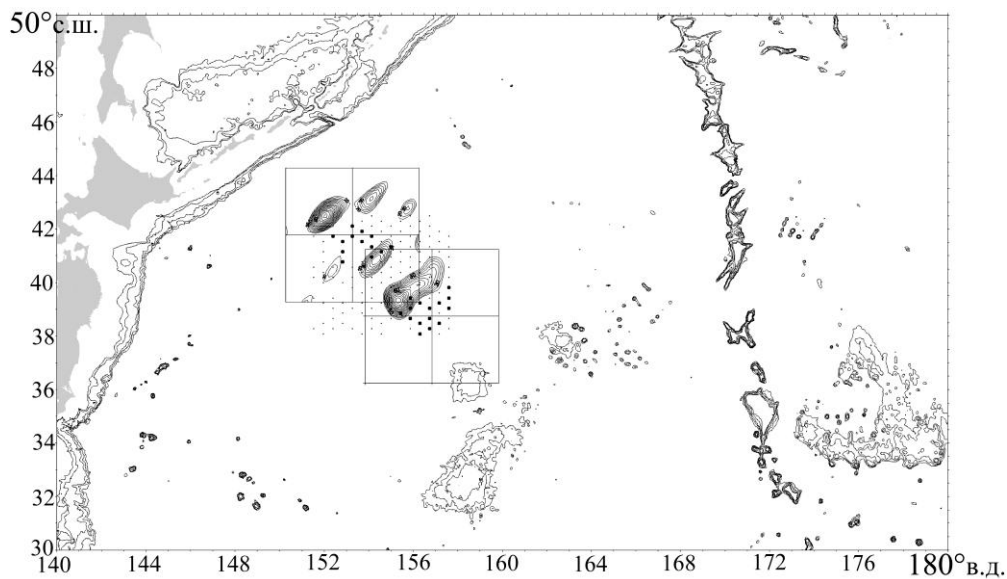


Рис.3. Два пространственно-временных спектра для полусуточной частоты M_2 , рассчитанные по данным температуры на северо-западном и юго-восточном кластерах буев.

Спектры нанесены на карту топографии (см. рис.1). Мелкие точки – плановое положение буев, большие – буи, по данным с которых рассчитывались спектры; крестики – положение буев.

Аналогичные пики обнаруживаются и по данным измерений на горизонте 120 м. Однако они не так хорошо выражены. Если рассчитывать спектры по группе близко расположенных буюв, то пики лучше выражены, чем при расчете по большой группе.

Длина приливной внутренней волны может быть также рассчитана по дисперсионному соотношению при условии плоского дна и отсутствия генерации вне склонов подводной топографии, расположенных далеко от района исследований. Длину волны можно оценить численным интегрированием уравнения для вертикальной скорости (w) во внутренних волнах при нулевых граничных условиях на поверхности и дне океана:

$$\frac{d^2w}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{g} \frac{dw}{dz} + \frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f^2} wk^2 = 0;$$

здесь $N^2(z)$ – частота Вьясяла–Брента, рассчитанная по данным STD-зондирования; ω – полусуточная частота; f – параметр Кориолиса; k – горизонтальное волновое число. Это уравнение интегрировалось с вертикальным шагом в 10 м для типичной стратификации в районе исследований. Волновые числа, полученные при решении данной задачи на собственные значения, соответствуют модам внутренних приливов. Номер моды можно получить, подсчитав число пересечений нуля собственной функции. У первой моды нет пересечений, а значения на дне и поверхности нулевые. Данные расчеты при реальном распределении плотности по вертикали показывают, что длина полусуточной внутренней волны равняется 146 км.

Расчет длин волн и направлений распространения внутреннего прилива по алгоритму Барбера был проведен также по данным течений на 51 бую. Течения на полусуточном периоде складываются из течений баротропного прилива и течений, вызываемых внутренними приливными волнами. Для расчета спектров внутренних волн следует исключить баротропный прилив. Последний рассчитывается осреднением фильтрованных данных по 51 бую на горизонте 120 м, поскольку самый сильный сигнал от внутренних волн в поле течений наблюдается в верхнем слое. Карта топографии и положение 51 бую (крестики) показаны на рис.1. После полосовой фильтрации каждой компоненты (u и v) на каждом из 51 буюв мы осреднили 51 ряд по каждому моменту измерений (каждые 30 мин). Получали простое осреднение путем сложения 51 значения и делением на 51. Таким образом, мы получили временной ряд баротропного прилива длиной 348 ч, который показывает изменчивость баротропного прилива. Эллипсы течений показаны ниже (рис.4).

Мы проделали аналогичную процедуру, осредняя четыре временных ряда на одной из буйковых станций – ст.2019 (38°49'с.ш., 155°22'в.д.), где измерения проводились на горизонтах 120, 1200, 2600 и 4600 м. После простого осреднения путем деления суммы на 4, а также осреднения с весом 0.1 для 120 м, 0.22 для 1200 м, 0.33 для 2600 м и 0.35 для 4600 м стало ясно, что различие между двумя способами осреднения невелико.

Таким образом, мы получили эллипсы течений баротропного прилива путем осреднения реализаций на большом количестве буюв по горизонтали и осреднения четырех реализаций на одном буюе по вертикали. Приливные эллипсы можно также рассчитать по данным спутниковых альтиметрических измерений по программе TOPEX/POSEIDON из базы данных NASA в Университете шт.Орегон (США). Использована глобальная обратная модель приливов TPXO.5.1 (<http://www.oce.orst.edu/po/research/tide/>) с усвоением спутниковых данных. Модель получена с помощью пакета прикладных программ OTIS (Oregon State University Tidal Inversion Software Model) [6]. На рис.5 приведены эллипсы по данным спутниковых наблюдений, горизонтального и вертикального осреднений. Все эллипсы рассчитаны к 25 сентября 1987 г. Они немного отличаются друг от друга, но в целом характеризуются общими чертами: амплитудой скоростей, равной около 1 см/с, и вытянутостью в широтном направлении с отклонением к оси северо-запад–юго-восток.

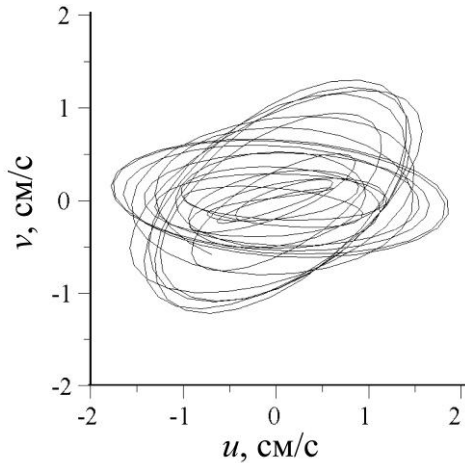


Рис.4. Эллипсы течений баротропного прилива, полученные осреднением по 51 буйковой станции на горизонте 120 м.

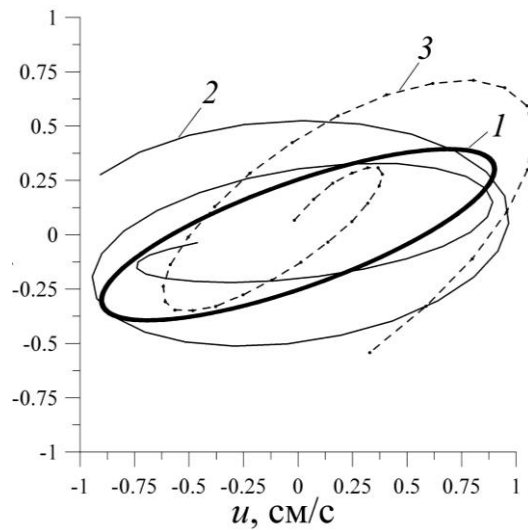


Рис.5. Эллипсы течений баротропного прилива, рассчитанные по данным спутниковых наблюдений (1), горизонтального (2) и вертикального (3) осреднений.

Из фильтрованных рядов измерений течений на каждом бье были вычтены ряды, определяемые баротропным приливом. В результате получены полусуточные флуктуации течений, определяемые внутренними волнами. Заметим, что горизонтальная когерентность между такими реализациями оказалась значительно выше, чем когерентность между исходными данными. По рядам флуктуаций компонент течений, определяемых внутренними полусуточными волнами, был рассчитан пространственно-временной спектр. Различные варианты расчета показали, что на спектрах, рассчитанных по большому количеству точек, пики расположены хаотическим образом. Это связано с тем, что на многих буях отсутствуют измерения, поэтому расстояния между соседними буями уже равны не 23 милям, а, по крайней мере, увеличены вдвое. В таком случае расстояние в 56 миль превосходит половину длины приливной внутренней волны, и при расчете спектра возникает неопределенность, что приводит к неправильному расположению пиков.

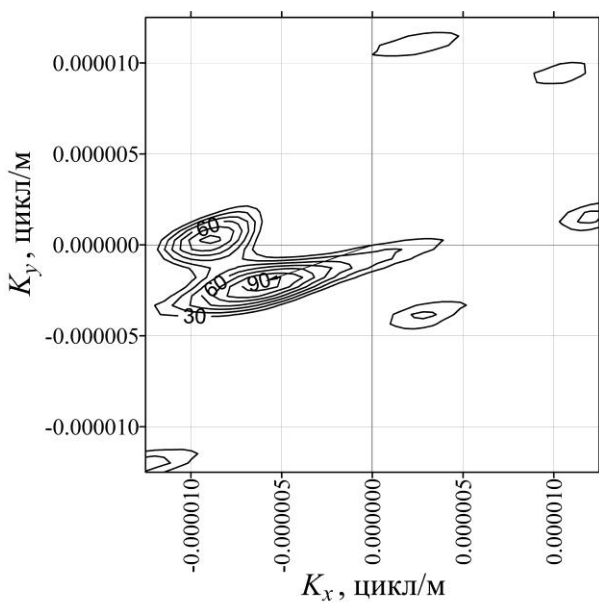


Рис.6. Сечение пространственно-временного спектра для полусуточной частоты M_2 по данным измерений течений на горизонте 120 м на 17 буях в северо-западной части полигона.

Для того чтобы получить однозначный результат, мы выбрали участки полигона, где не было буев с отсутствующими данными. Такой участок был найден в северо-западной части полигона с измерениями на 17 буйах. Сечение пространственно-временного спектра показано на рис.6.

Выделяется пик, соответствующий длине волны 160 км с направлением 250° , что несколько отличается от результатов, полученных по температурным данным. Тем не менее длина волны оказалась такой же, а направление западных румбов в целом подтверждает вывод о генерации приливных внутренних волн в районе возвышенности Шатского и Императорского хребтов.

По данным измерений температуры и течений на большом количестве буев рассчитаны характеристики внутренних приливных волн в северо-западной части Мегполигона.

Выделено две системы внутренних приливных волн. Одна генерирована к востоку и юго-востоку от полигона – предположительно на возвышенности Шатского и на Императорских горах. Вторая система генерируется в районе Курильских островов.

Путем осреднения большого количества данных измерений рассчитаны эллипсы течений баротропного прилива, которые оказались близки к оценкам по спутниковым альтиметрическим данным.

Литература

1. *Morozov E.G.* Semidiurnal internal wave global field // *Deep-Sea Res.* 1995. V.42, N 1. P.135–148.
2. *Garrett C., Kunze E.* Internal tide generation in the deep ocean // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2007. V.39. P.57–87.
3. Эксперимент Мегполигон. М.: Наука, 1992. 352 с.
4. *Maximenko N.A., Koshlyakov M.N., Ivanov Yu.A., Yaremchuk M.I., Panteleev G.G.* Hydrophysical experiment «Megapolygon-87» in the northwestern Pacific Subarctic frontal zone // *J. Geophys. Res.* 2001. V.106. P.14143–14163.
5. *Barber N.F.* The directional resolving power of an array of wave detectors // *Ocean wave spectra.* 1963. New York: Engelwood Cliffs, Prentice Hall. P.137–150.
6. *Egbert, G.D., Erofeeva S.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. Atmos. Ocean Tech.* 2002. V.19. P.183–204.

Статья поступила в редакцию 22.08.2012 г.

