

**Алгоритм оценки коэффициента удлинения ДКМ трассы в задаче определения дальности по лучу**

Н.Р. Исаев

АО «Марийский машиностроительный завод»  
424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 15.  
E-mail: [inekitr9711@gmail.com](mailto:inekitr9711@gmail.com)

*Представлены результаты исследований влияния протяженности трассы и частоты на коэффициент удлинения ДКМ трассы. Разработана методика определения коэффициента удлинения коротковолновых радиотрасс с использованием квазипараболической модели ионосферы.*

*Ключевые слова: ионосфера, искажения, декаметровые радиолнии, дальнометрия*

**The algorithm for estimating the coefficient of lengthening of the DKM of the route in the problem of determining the range of the beam**

N.R. Isaev

*Mari Machine Building Plant*

*The results of studies of the influence of the length of the route and frequency on the coefficient of elongation of the KM of the route are presented. A method for determining the elongation coefficient of short-wave radio paths using a quasi-parabolic ionosphere model has been developed.*

*Keywords: ionosphere, distortion, decameter radio lines, rangefinder*

**Введение**

Задача загоризонтного позиционирования путем измерения с помощью декаметровых радиосигналов координат расположенного за тысячи километров объекта, существенно отличаются от аналогичной задачи их определения с использованием сантиметровых и дециметровых радиосигналов, когда объект находится в пределах прямой видимости. К основному радиофизическому фактору, определяющему различие методов, относится влияние физических свойств ионосферы на характеристики распространяющихся в ней коротких радиоволн. Из-за того, что частоты КВ волн близки к плазменным частотам ионосферы, среда оказывает существенное влияние на их траектории и траекторные характеристики [1,4].

**Позиционные методы определения местоположения объектов и их погрешности**

Для определения МП объекта на Земле с использованием позиционных методов местоопределения, необходимо знать некоторые величины ( $W$ ), определяющие МП объекта на плоскости [1,3]. Такими величинами для определения МП загоризонтного объекта могут быть следующие траекторные характеристики сигнала: групповой путь (или абсолютное время распространения сигнала по данной траектории), угол входа и угол выхода луча в вертикальной плоскости, угол прихода луча в горизонтальной плоскости, дальность скачка луча вдоль земной поверхности, а также флуктуации указанных параметров.

Величине  $W$  соответствует семейство ЛП на плоскости или семейство поверхностей положения в пространстве. В первом случае, семейство ЛП можно рассматривать как линии уровня плоского скалярного поля, во втором - поверхности уровня скалярного поля величины  $W$ . Поскольку в определенных пределах измеряемые параметры  $W$  представляют собой непрерывные функции координат и имеют непрерывные первые производные, изменение поля параметра можно описать его градиентом  $gradW = \left(\frac{\partial W}{\partial n}\right) \vec{n}$ , где  $\vec{n}$  – единичный вектор, направленный по нормали к линии (поверхности) положения в сторону возрастания величины  $W$ ,  $\frac{\partial W}{\partial n}$  – производная поля в направлении нормали. Модуль градиента равен  $|gradW| = \partial W / \partial n$ . Заменяв дифференциалы конечным приращением, получим линейную ошибку, равную [3]:

$$\Delta n = \Delta W / |gradW|. \quad (1)$$

Таким образом, ошибка в определении линии (поверхности) положения прямо пропорциональна погрешности измерения величины  $W$  и обратно пропорциональна модулю градиента поля этой величины.

При многократных измерениях погрешности измерения величины  $W$  меняются случайным образом, поэтому ошибка  $\Delta W$  определения величины  $W$  является, в общем случае, случайной величиной. Тогда и ошибка  $\Delta n$  определения линии (поверхности) положения также будет случайной величиной с законом распределения ошибок таким же, как и ошибок  $\Delta W$ .

При нормальном законе распределения ошибок  $\Delta W$  ошибки  $\Delta n$  также распределены по нормальному закону, который вполне характеризуется среднеквадратической ошибкой (СКО). СКО определения линии (поверхности) положения определяется формулой [1]:

$$\sigma_n = \sigma_w / |gradW| \quad (2)$$

где  $\sigma_w$  – СКО определения величины  $W$ .

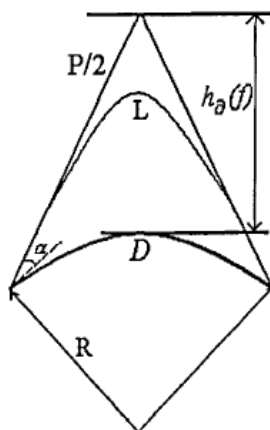
При дальнометрическом методе определяемый параметр, расстояние  $D$  искомой точки относительно излучателя, в прямоугольной системе координат выражается, как  $W = D = \sqrt{x^2 + y^2}$  и линии положения (ЛП) представляют собой окружности с центром в точке установки радиодальномера. Тогда  $|gradW| = |gradD| = 1$ , следовательно,  $\Delta n = \Delta D$ ,  $\sigma_n = \sigma_D$ , где  $\Delta D$  и  $\sigma_D$  – погрешность и СКО определения расстояния (дальности). Таким образом, при известной погрешности определения дальности  $\sigma_D$  погрешность определения ЛП  $\sigma_n$ , постоянна и не зависит от дальности.

При местоопределении неизвестного объекта на основе дальнометрии в первую очередь необходимо знать расстояние до объекта по Земле, т.е. длину скачка луча. Причем точность определения МП объекта в этом случае зависит от точности определения дальности по Земле и так называемого геометрического фактора. Поэтому остановимся более подробно, на решении проблемы определения дальности по Земле по известному значению группового пути сигнала на определенной рабочей частоте либо до объекта отражения, либо до источника радиоизлучения.

При одночастотном режиме зондирования (облучения) объекта в загоризонтных радиосистемах измеряемой величиной  $W$  является групповой путь (действующий путь)  $P$ . Действующий путь отличается от истинного ( $L$ ), поскольку групповая скорость отличается от скорости света и претерпевает изменения вдоль луча [1,2]. Для радиотехнических систем дальней навигации (РСДН) существуют технические

сложности измерения абсолютного времени распространения сигнала между пунктами приема и передачи. Поэтому решение вопроса об определении дальности до объекта по земной поверхности (длины скачка луча)  $D$  необходимо искать при существующих проблемах нахождения действующего пути.

Ограничиваясь рассмотрением односкачковых трасс и дальностей  $D \sim 1,0 - 3,5$  Мм заметим, что проекция траектории луча на поверхность земного шара, является частью дуги большого круга и равна дальности до объекта по Земле. Очевидно, что в ЗГРТС основные ошибки в определении дальности по Земле связаны с недостаточным знанием среды распространения вдоль траектории луча, его нелинейностью, отличием групповой скорости распространения радиоволн в ионосфере от скорости света и рядом других факторов. Поскольку радиоволны не могут отражаться от высот больших высоты максимума  $F$  слоя ионосферы, то различия между действующим путем и длиной проекции луча (длиной трассы) будут уменьшаться с увеличением последней. Различия в значениях  $D$  и  $P$  можно рассматривать как эффект "удлинения" трассы [2].



**Рис. 1. Иллюстрация эффекта удлинения трассы.**

Рисунок 1 позволяет высказать гипотезу о том, что задачу определения дальности по Земле, можно связать с созданием процедуры пересчета  $P$  в  $D$ .

При распространении радиоволн за счет однократного отражения от ионосферного слоя  $F2$ , расчет дальности по Земле с использованием времени распространения сигнала, связан с решением одноточечной траекторной задачи. Как следует из выше сказанного, для ее однозначного решения необходимо знать, угол выхода луча (задать начальные условия) и параметры регулярной модели ионосферы. Так как на самом деле параметры ионосферы неизвестны, то расчет дальности связан с решением так называемых обратных задач, когда из данных зондирования ионосферы определяются ее параметры, например, действующая высота отражения сигнала или восстанавливается модельный профиль в средней точке односкачковой трассы. Как правило, при этом в роли измеряемых траекторных характеристик выступают абсолютные задержки зондирующего сигнала. Как известно, подобные задачи в общем случае относятся к некорректно поставленным задачам. Поэтому для определения дальности по Земле в одночастотном режиме используют методы расчета, основанные на теоремах эквивалентности в предположении простых моделей траектории распространения. В принятом приближении расстояние по земной поверхности между пунктами приема и излучения сигнала рассчитывается по измеренным величинам вертикального угла

выхода (прихода луча) или действующей высоты отражения и абсолютного времени запаздывания.

### Метод расчета дальности

Метод расчёта дальности, основан на использовании коэффициента удлинения трассы ( $K_T$ ), то есть отношения дальности, рассчитанной по измеренному значению временного запаздывания при прямолинейном распространении сигналов в вакууме, фактической дальности до объекта по дуге большого круга [1,3]. Таким образом, для коэффициента удлинения трассы выполняется отношение:

$$P = K_T D. \quad (3)$$

Ясно, что точность определения  $D$  зависит от точности задания  $K_T$ . В случае использования для нахождения  $K_T$  радиолучевых расчетов по некоторой модели ионосферы точность расчета определяется степенью соответствия использованной модели  $N(h)$  и реального распределения  $N(h)$ .

Проблема определения по измеренному времени распространения сигнала дальности по Земле, либо до объекта отражения, либо до передатчика сигнала сводится к исследованию этого коэффициента, называемого коэффициентом удлинения трассы. Очевидно, что он будет функцией  $D$  рабочей частоты сигнала и параметров модели ионосферы.

В работе использовалась международная модель ионосферы IRI и ее квазипараболическое приближение (КПП) для слоя  $F2$  в средней точке трассы, а нижележащие слои не учитывались [3]. При этом траектория луча считалась симметричной. Это позволяло представить  $K$  в аналитическом виде:

$$K = P(r_0, y_m, a, f_k) / D(r_0, y_m, a, f_k), \quad (4)$$

где  $P = P(r_0, y_m, a, f_k)$  и  $D = D(r_0, y_m, a, f_k)$ .

Коэффициент  $K$  является функцией геометрических параметров ионосферного слоя, угла излучения и рабочей частоты сигнала. Параметры слоя  $f_{кр}$ ,  $r_m$  задаются моделью IRI, а  $y_m$  и углы излучения  $a_k$ , соответствующие рабочим частотам  $f_k$ , определяются из решения задачи оптимальной аппроксимации  $N(h)$  квазипараболой для модели IRI в средней точке трассы [1,2,3]. Для этого рассматривается система уравнений:

$$\begin{cases} D\left(r_0, y_m, a_k, \frac{f_k}{f_{кр}}\right) = D_0 \\ \frac{\partial D}{\partial a}\left(r_0, y_m, a_{МПЧ}, M\right) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

где  $0 \leq k \leq n$ ,  $D_0$  – истинная дальность по Земле,  $a_{МПЧ}$  – угол излучения, соответствующий максимально применимой частоте (МПЧ),  $M = МПЧ / f_{кр}$  – М-фактор радиолинии.

Для сравнения двух подходов определения  $K$  было проведено численное моделирование параметра  $K$  для трасс  $D = 1000; 1500; 2000; 2552; 3000; 3500$  км, которые имели меридианную и широтную ориентации. Рассматривалась зависимость  $K$  от времени суток и сезонов для различных геофизических условий, для рабочих частот  $f = 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 1,0$  – МПЧ.

В качестве оценки различий в оценке  $K$ , полученных двумя методами, рассматривались: разность  $\Delta K$ , между полученными значениями  $K$  двух методов, отклонение  $|\Delta K|$  и относительное отклонение  $\delta(K) = |\Delta K|/K$  [3].

На рисунке 2, а, б соответственно изображены суточные ходы  $K$ , рассчитанные с использованием траекторного подхода для модели IRI и в КПП для трассы протяженностью 2552 км меридионального направления. Из рисунка 2 видно, что закономерности поведения  $K$ , для обоих методов расчета аналогичны. Коэффициент корреляции  $r$  между значениями  $K$ , рассчитанными этими методами, оказался не хуже 0,93 для всех рассматриваемых рабочих частот. Особенности их суточного хода, очевидно, следует связать с изменениями  $r_m$  и  $f_{кр}$  в восходно-заходные часы. Исследования корреляционных зависимостей между значениями  $K$  и параметрами  $r_m$  и  $f_{кр}$  на данной трассе показали, что  $|r|$  для них оказались не хуже соответственно 0,93;  $|-0,73|$  для первого метода и не хуже 0,99;  $|-0,84|$  для второго на рассматриваемых частотах. Видно, что  $|r|$  для первого метода меньше, чем для второго. На трассах других протяженностей закономерности такие же.

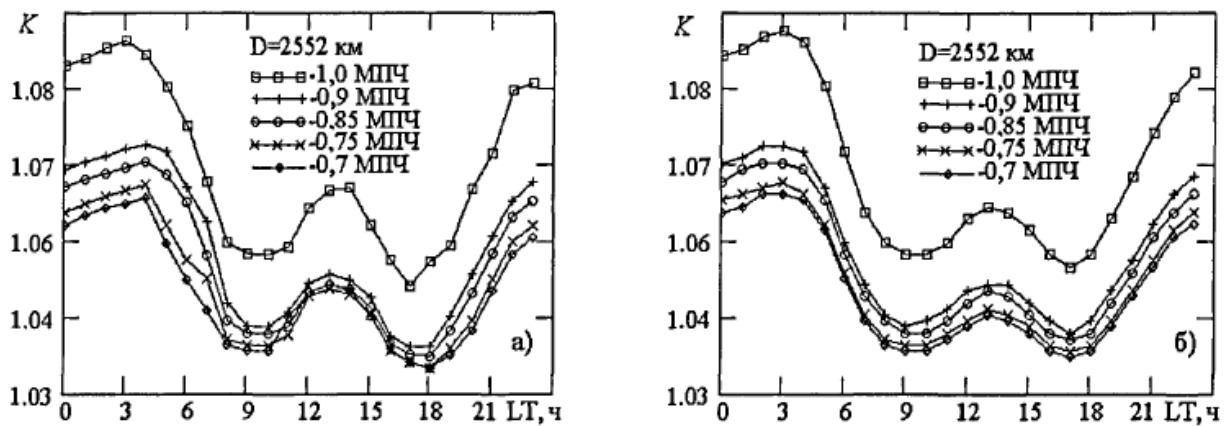


Рис. 2. Суточные ходы  $K$ , рассчитанные для модели IRI и в КПП.

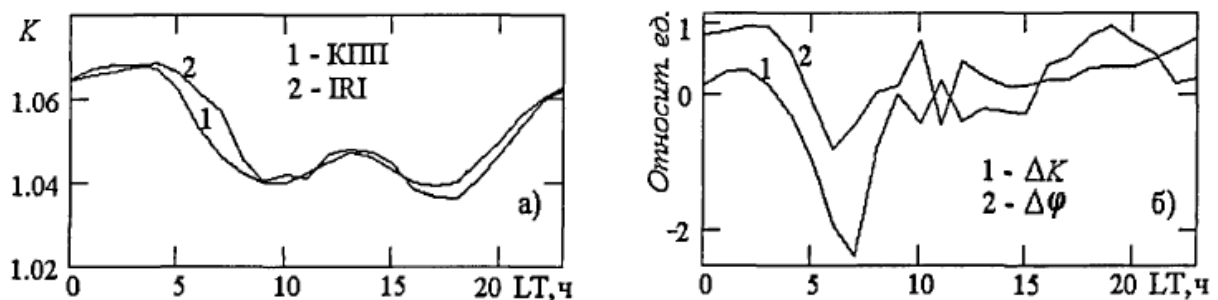


Рис. 3. – Суточные ходы  $K$ ,  $\Delta K$  и  $\Delta\varphi$

Наблюдаемые отклонения  $\Delta K$  связаны с тем, что второй метод не учитывает горизонтальных градиентов электронной концентрации по трассе, которые можно оценить по разности углов входа и выхода лучей  $\Delta\varphi$ . На рисунке 3, а изображены суточные ходы АГ для частоты  $f=0,85$  МПЧ, а на рисунке 3, б цифрами 1, 2 соответственно обозначены суточные ходы  $\Delta K$  и  $\Delta\varphi$  в относительных (к максимальным значениям) единицах для этой же частоты.

Исследования зависимостей между  $\Delta K$  и  $\Delta\varphi$  выявили слабую корреляционную зависимость на низких рабочих частотах и среднюю на более высоких. Это следует связать с тем, что сигналы низкой частоты при малых углах излучения мало проникают в слой, отражаясь от его нижней части. Поэтому, на этих частотах изменение горизонтальных градиентов мало влияет на  $K$ .

На рисунке 4, а, б представлены примеры зависимости  $K$  и  $|\Delta K|$  от дальности и частоты, полученные с применением второго метода.

Видно, что с увеличением дальности и с уменьшением частоты  $K$  монотонно уменьшаются. Указанные закономерности, наблюдаются на всем временном интервале за сутки. Для первого метода результаты аналогичны. Коэффициенты корреляции между значениями  $K$ , рассчитанными двумя методами, для всех рассматриваемых трасс и частот, оказались не хуже 0,93;  $|p|$  между  $K$  и параметрами  $r_m$  и  $f_{кр}$  не хуже соответственно 0,93;  $|-0,71|$  для первого метода и не хуже 0,99;  $|-0,82|$  для второго.

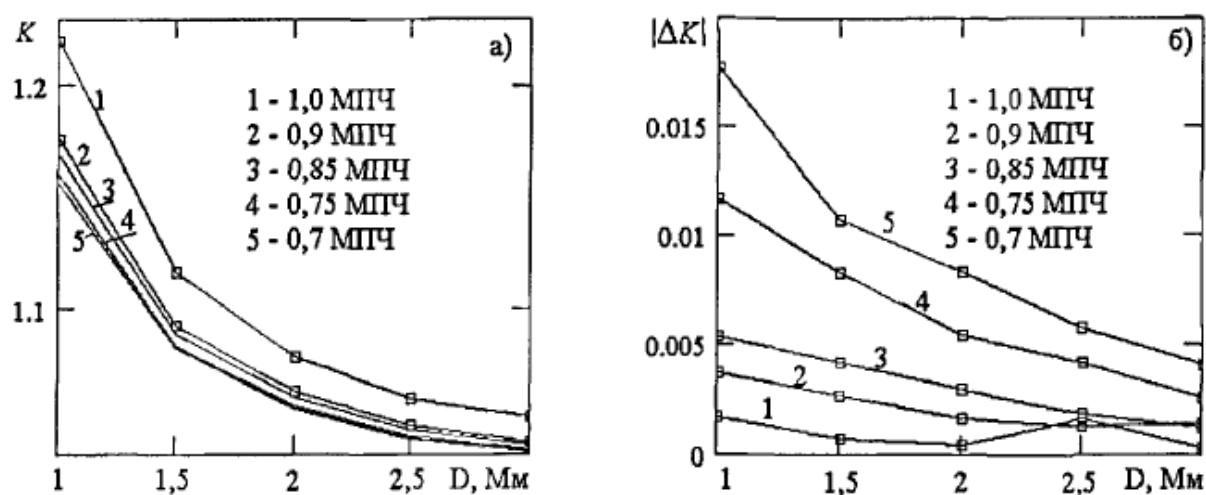


Рис. 4. Зависимости  $K$  и  $\Delta K$  от дальности и частоты.

Исследования показали, что отклонения  $|\Delta K|$  уменьшаются с увеличением протяженности трассы практически на всех частотах для любого времени суток, за исключением восходно-заходных часов. Результаты исследования среднесуточного отклонения  $|\Delta K|$  в зависимости от длины трассы для частоты  $f=0,85$  МПЧ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследования среднесуточного отклонения  $|\Delta K|$  в зависимости от длины трассы для частоты  $f=0,85$  МПЧ

Дальность по Земле, км	1000	1500	2000	2552	3000
СКО	0,014	0,007	0,004	0,0025	0,0018
Среднее абсолютное отклонение	0,013	0,0066	0,0038	0,0026	0,002
Среднее относительное отклонение (%)	1,00	0,60	0,35	0,24	0,14

Корреляция между  $\Delta K$  и  $\Delta\varphi$  для всех рассматриваемых трасс оказались не хуже 0,5 для высоких частот и не больше 0,15 для низких частот.

Зависимость отклонений  $\Delta K$  от частоты иллюстрирует рисунок 4, б, из которого видно, что для спокойной ионосферы отклонения  $|\Delta K|$  на низких частотах больше, чем на высоких. Поскольку низкочастотные лучи мало проникают в слой, отражаясь от нижней части слоя  $F2$ , то отклонения здесь связаны с тем, что второй метод расчета  $K$  не учитывает слои, лежащие ниже слоя  $F2$ . При этом наибольшие отклонения наблюдаются для коротких трасс.

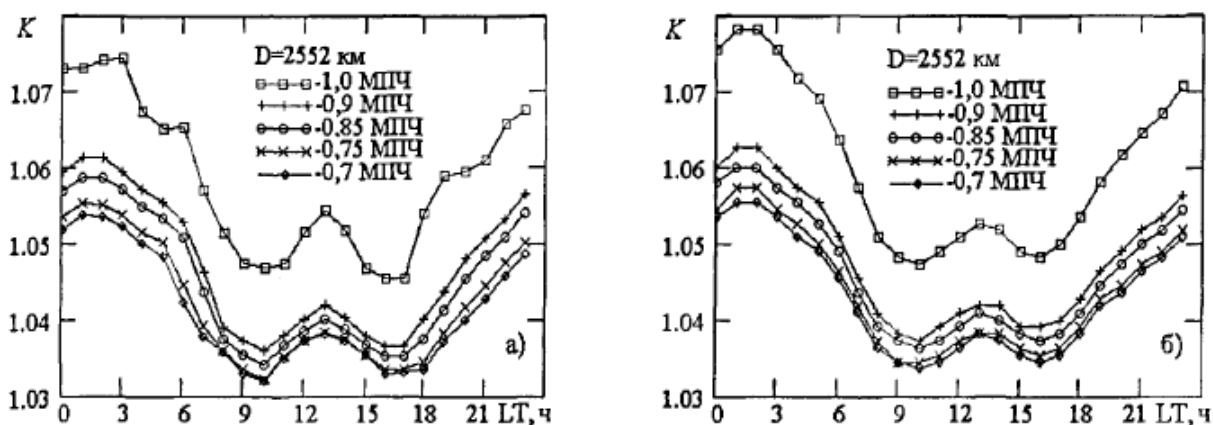


Рис. 5. – Суточные ходы  $K$ , рассчитанные с использованием траекторного подхода для модели IRI и в КПП

Для других сезонов и направлений установлены аналогичные закономерности. На рисунке 5, а, б в качестве иллюстрации соответственно изображены суточные ходы  $K$ , рассчитанные с использованием траекторного подхода для модели IRI и в КПП для трассы протяженностью 2552 км меридионального направления.

Таким образом, в рамках квазипараболической модели ионосферы разработана методика определения коэффициента удлинения трассы. В результате численного моделирования установлено, что для трасс протяженностью 1000-3500 км, имеющих меридианную и широтную ориентацию, максимальные значения  $\sigma(K)$  и  $\delta(K)$  не превышают соответственно 0,014 и 1%. Установлено, что отклонения в оценках  $K$  уменьшаются с увеличением протяженности трассы. Отклонения обусловлены не учетом горизонтальных градиентов электронной концентрации по трассе и слоев, лежащих ниже слоя  $F2$  в квазипараболической модели  $N(h)$ .

### Выводы

1. Разработана методика определения коэффициента удлинения коротковолновых радиотрасс  $K$  с использованием квазипараболической модели ионосферы.
2. Проведено исследование, в ходе которого установлено, что для трасс протяженностью 1000-3500 км максимальные значения среднего квадратичного отклонения коэффициента удлинения  $\sigma(K)$  и относительное отклонение коэффициента удлинения  $\delta(K)$  не превышают соответственно 0,014 и 1%.

### Литература

1. Гуревич, А.В. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн / А.В. Гуревич, Е.Е. Цедилина. – М.: Наука, 1979.-245 с.
2. Гусев В.Д. Решение лучевого уравнения для неоднородной рассеивающей среды методом возмущений / В.Д. Гусев, Н.А. Махмутов, А. Хури // Радиотехника и электроника, 1974. Т.19, №9. -С.1809 – 1816

3. Катков, Е. В. Загоризонтное позиционирование с использованием многочастотного наклонного зондирования ионосферных радиолиний: специальность 01.04.03 «Радиофизика»: Диссертация на соискание кандидата технических наук / Катков, Е. В. ; Марийский государственный технический университет. — Йошкар-Ола, 2007. — 208 с.
4. Патент РФ 2444749 Способ определения дальности до источника радиоизлучения с направленной антенной / Верхогляд Д.Г., Червинский С.В., Четвергов В.В., Шик В.А. Заявл. 26.07.2010, Оpubл. 10.03.2012