

ЄЛІЗАРЕНКО А.О., старший викладач (Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалена статистична модель для розрахунків енергетичних характеристик каналів залізничного технологічного радіозв'язку

Приведені результати експериментальних досліджень поширення ультракоротких радіохвиль на залізничних станціях і перегонах. Запропонована удосконалена модель розрахунку енергетичних характеристик радіоканалів в умовах впливу інфраструктури залізниць. Визначені параметри флуктуацій напруженості електромагнітного поля, що дозволяє проводити розрахунки каналів із заданою надійністю. Уточнені поляризаційні характеристики електромагнітного поля.

Ключові слова: залізничний технологічний радіозв'язок, поширення радіохвиль в умовах залізниць, енергетичні характеристики радіоканалів, модифікована модель Окамури-Хата, параметри флуктуацій напруженості електромагнітного поля, поляризаційні характеристики.

Вступ

Системи рухомого радіозв'язку на залізничному транспорті відіграють виключно важливу роль в підвищенні безпеки руху поїздів, поліпшенні оперативного управління перевізним процесом. Технологічний радіозв'язок є відповідальною системою спеціального призначення і повинен забезпечити високу надійність каналів зв'язку в будь-яких умовах функціонування [1]. Важливим фактором забезпечення необхідної надійності радіомереж є підвищення точності розрахунку енергетичних характеристик радіоканалів при визначенні зон обслуговування. В теперішній час для розрахунку енергетичних характеристик каналів рухомого радіозв'язку в мережах загального користування найбільш широко використовують рекомендації ITU-R P.1546, P.529 на основі моделі Окамури – Хата та формулу Введенського. Але використання методик розрахунку мереж радіозв'язку загального користування, не забезпечує необхідної точності проектних розрахунків мереж технологічного радіозв'язку на залізницях, що пов'язано з особливостями поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізничного транспорту [2].

Чинні відомчі нормативні документи передбачають розрахунки енергетичних характеристик каналів станційного, поїзного і ремонтно – оперативного технологічного радіозв'язку лише в смузі частот 150 МГц [1]. Подальший розвиток технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті пов'язаний з впровадженням сучасних транкінгових і стільникових цифрових мереж, освоєнням нових діапазонів радіохвиль в смузі частот 450 та 900 МГц відповідно до міжнародних

рекомендацій [3]. Для нових для залізничного транспорту смуг частот відсутні в доступній літературі роботи присвячені дослідженням і розрахунку енергетичних характеристик каналів в умовах впливу інфраструктури залізниць. Хоча ця задача являється актуальною.

Для проектування і впровадження таких систем на залізницях необхідно проведення комплексних досліджень умов поширення радіохвиль, що дозволить створити наукову основу методів розрахунку каналів у нових діапазонах радіохвиль із заданою надійністю.

Постановка задачі

Проведення експериментальних досліджень поширення радіохвиль в смугах частот 450 і 900 МГц в умовах залізничних станцій і перегонів. Розробка удосконаленої статистичної моделі для розрахунку енергетичних характеристик каналів технологічного радіозв'язку в умовах впливу інфраструктури залізниць із заданою надійністю.

Основні результати роботи

Особливості інфраструктури залізниць визначаються наявністю на трасах поширення радіохвиль багатьох перешкод складної конфігурації: опор, ферм, елементів контактної мережі, рухомого складу, шляхопроводів, службових будівель та інших споруд. В результаті екранування істотної області при поширенні радіохвиль перешкодами і розсіювання енергії електромагнітної хвилі значення напруженості поля в точці прийому менше ніж при поширенні на відкритій місцевості за інших однакових умов. Перешкоди на трасах поширення радіохвиль є ефективними перевипромінювачами електромагнітної енергії, що визначає багатопроменевий характер радіоканалу і інтерференційну структуру поля. При переміщенні рухомих об'єктів, в каналі виникають

глибокі просторові флуктуації напруженості поля, які можна розглядати як випадковий процес.

Об'єкти на трасах поширення радіохвиль перевипромінюють значні поля, поляризація яких відрізняється від основної компоненти, створюємої передавальною антеною, таким чином виникає деполаризація плоско поляризованих хвиль [1].

Поле в точці прийому можна розглядати як суму декількох складових. Основна компоненти E_1 , яка відповідає поляризації поля передавальної антени, складається із регулярної компоненти E_0 та численних перевипромінених полів цієї ж поляризації E_i . Неосновна компонента іншої поляризації E_2 створюється сумою перевипромінених полів. Таким чином,

$$E_1 = E_0 \cos \omega t + \sum_{i=1}^n E_i \sin \theta_i \cos(\omega t + \Delta \varphi), \quad (1)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^n E_i \cos \theta_i \cos \varphi_i \cos(\omega t + \Delta \varphi), \quad (2)$$

де E_0 – регулярна компонента напруженості поля;

$\sum_{i=1}^n E_i$ – сума перевипромінених хвиль

вертикальної поляризації.

Результуюче електричне поле буде еліптично поляризованим.

В таких умовах ортогональні проекції сумарного вектора перевипромінених полів $\bar{E}_s$ будуть розподілені по нормальному закону. На цій підставі можна обґрунтовано вважати, що амплітуда результуючого вектора перевипромінених полів розподілена по закону Релея

$$W(E) = \frac{2 \cdot E}{E_s^2} \exp\left(-\frac{E^2}{E_s^2}\right). \quad (3)$$

У випадку інтерференції хвиль постійної амплітуди і фази (регулярна компонента напруженості поля основної поляризації) з сукупністю n коливань з довільними амплітудами і фазами (перевипромінені поля) щільність розподілу ймовірностей амплітуд напруженості поля у цьому випадку описується узагальненим законом Релея або законом Релея–Райса [4]

$$W(E) = \int_0^{2\pi} W(E, \varphi) d\varphi = \frac{2 \cdot E}{E_s^2} \exp\left(-\frac{E^2 + E_0^2}{E_s^2}\right) J_0\left(\frac{2 \cdot E \cdot E_0}{E_s^2}\right), \quad (4)$$

де $J_0\left(\frac{2EE_0}{E_s^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{2EE_0}{E_s^2} \cos \varphi\right) d\varphi$ – функція

Бесселя першого роду нульового порядку.

Процеси, які виникають внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль, називають швидкими флуктуаціями. Їх характеристики цілком визначаються особливостями перевипромінювання полів внаслідок впливу інфраструктури залізниць. В каналах рухомого радіозв'язку діють і так звані повільні флуктуації. Повільні просторові флуктуації напруженості поля визначаються загальними змінами рельєфу місцевості, а часові флуктуації – змінами градієнта діелектричної проникності атмосфери і практично не залежать від впливу інфраструктури залізниць. Характеристики таких змін напруженості поля можна визначити за загальними рекомендаціями ІТУ – R з прогнозування поширення радіохвиль на наземних трасах.

Процес флуктуацій напруженості поля сигналів в умовах залізниць на відносно короткому інтервалі спостережень можна вважати стаціонарним ергодичним випадковим процесом. За такої умови оцінки середнього значення напруженості поля m_E і

дисперсію D_E , можна визначити по одній конкретній

реалізації процесу $E(l)$ на заданому інтервалі аналізу шляхом статистичної обробки окремих дискретних значень [5]. Для некорельованої дискретної виборки можна наближено визначити необхідний обсяг виборки дискретних значень, виходячи з допустимої похибки при визначенні статистичних оцінок досліджуваних параметрів. Для довірчої імовірності 0,9 похибка 10% при оцінці середнього значення досягається при числі вимірів $N > 140$. При більшому обсязі вимірювань, за умови збереження стаціонарності процесу, можна досягти більшої точності статистичних оцінок. При статистичних дослідженнях окрім точкових оцінок параметрів середнього значення і дисперсії необхідно визначати диференціальні та інтегральні функції розподілу амплітуд та проводити аналіз законів розподілу флуктуацій амплітуд напруженості поля.

В роботі приведені результати експериментальних досліджень поширення радіохвиль в нових для залізничного транспорту смугах частот 450 і 900 МГц.

Вимірювання проводились на ряді станцій і перегонів залізниць в умовах електрифікованих і неелектрифікованих ділянок. Вимірювалась напруженість поля основних і неосновних поляризаційних компонент при вертикальній поляризації поля передавальної антени. Зразки записів флуктуацій напруженості поля ортогональних поляризаційних компонент при вертикальній поляризації поля передавальної антени на короткому відрізку шляху в умовах електрифікованих залізничних станцій наведені на рис. 1. Просторові

флуктуації напруженості поля мають випадковий характер, проте спостерігається регулярне чергування

суміжних максимумів і мінімумів, що підтверджує їх інтерференційне походження.

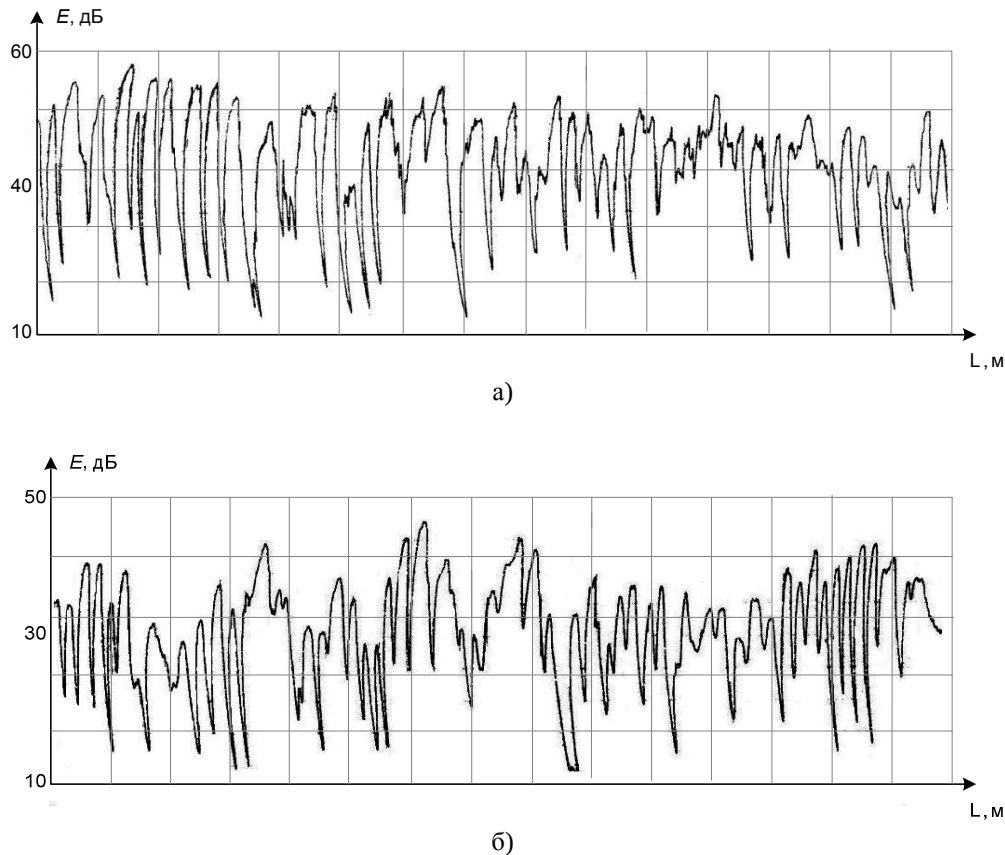


Рис. 1. Флуктуації напруженості поля основної (а) і не основної (б) поляризаційних компонент на електрифікованих ділянках

Вимірювання виконувались за допомогою сертифікованої апаратури для виміру напруженості поля FSM-8 та аналізатора спектру типу Anritsu MS 2724B з сертифікованими вимірювальними антенами, апаратні похибки якої задовольняють умовам метрологічного забезпечення досліджень [6]. В якості джерел випромінювання використовувались типові радіозасоби у відповідних полосах частот, вихідна потужність яких контролювалась.

При виконанні досліджень за результатами вимірів напруженості поля для заданих відстаней на кожній із трас поширення радіохвиль визначались середні значення для певних висот установки передавальної і приймальної антен. Для визначення статистичних характеристик використовувалися некорельовані дискретні значення обсягом 150 відліків. При проведенні досліджень враховувались особливості умов поширення радіохвиль на території залізничних станцій і вузлів, на перегонах залізниць, і оцінка впливу місцевих особливостей траси на величину напруженості поля сигналу. Проводилось порівняння

результатів середніх значень напруженості поля на однаковій відстані від передавача для різних трас. На території станцій середні значення напруженості поля відрізнялись мало. Це свідчить про те, що в цілому на залізничних станціях умови поширення радіохвиль досить однорідні. На перегонах значення напруженості поля можуть відрізнятися більше в залежності від місцевих особливостей трас. Для окремих трас результати вимірів напруженості поля відрізнялись в 1,2 – 1,5 рази. В той же час усереднені апроксимуючі криві відрізняються мало. Для визначення апроксимуючих залежностей були усереднені результати вимірів для трас, які були найбільш типовими.

На рис. 2 за результатами статистичної обробки вимірів побудовані криві залежності медіанних значень напруженості поля від відстані для типових умов станцій (крива 1) і перегонів (крива 2) на не електрифікованих ділянках залізниць. Експериментальні криві поширення радіохвиль для залізничних станцій і перегонів порівнювались з

даними, які визначені за моделлю Окамури – Хата (рекомендація ITU-R P.529) [7]. Криві 3, 4, 5, розраховані за моделлю Окамури – Хата для різних умов поширення радіохвиль: місто, приміська зона, відкритий простір. Всі криві побудовані для однакових умов передачі на частоті 900 МГц – при потужності передавача 1 Вт і використанні напівхвильового вібратора в якості антени, висот установки антен

стаціонарної $h_1=20$ м і антени приймальної (локомотивної) радіостанції $h_2=5$ м.

Експериментальні результати відрізняються від результатів визначених за моделлю Окамури – Хата. Підвищити точність розрахунків напруженості поля можна використовуючи експериментально визначені параметри моделі. Такий підхід відповідає рекомендаціям ITU-R.

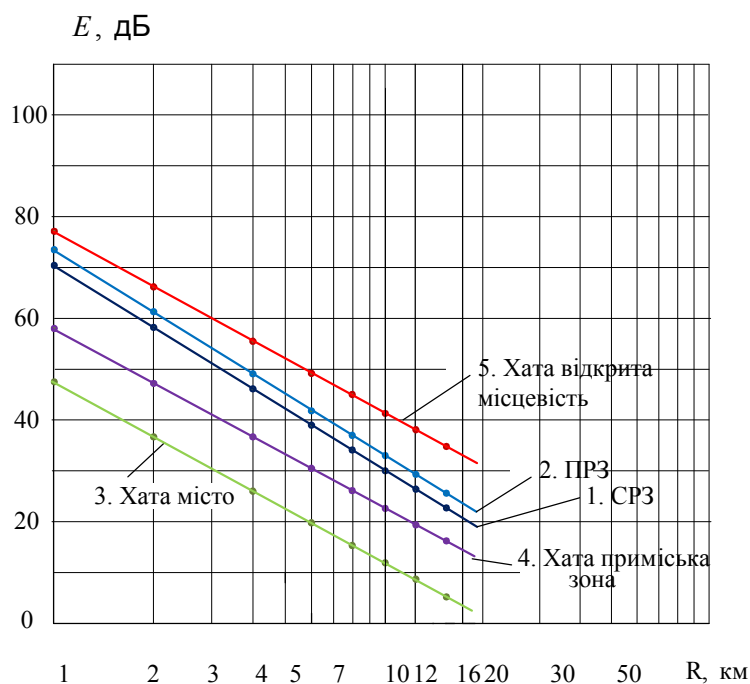


Рис. 2. Залежність напруженості поля від відстані для різних моделей поширення радіохвиль

Визначені апроксимації залежностей напруженості поля від відстані для умов перегонів (формула 5) і станцій (формула 6) на основі модифікованої моделі Окамури – Хата:

$$E_{ПРС} = 79,248 - 26,05 \cdot \lg f + 13,82 \cdot \lg h_1 + (1,1 \cdot \lg f - 0,7) \cdot h_2 - (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} + 4,78 \cdot (\lg f)^2 ; \quad (5)$$

$$E_{СРС} = 57,008 - 7,22 \cdot \lg f + 13,82 \cdot \lg h_1 + (1,1 \cdot \lg f - 0,7) \cdot h_2 - (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} + 2 \cdot \left(\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 . \quad (6)$$

Результати вимірів на різних частотах підтвердили частотну універсальність запропонованої моделі. Використання удосконаленої моделі підвищує точність визначення енергетичних характеристик радіоканалів на 8-11 дБ на станціях і перегонах залізниць порівняно з рекомендаціями Міжнародного союзу залізниць [3].

Вести розрахунки енергетичних характеристик каналів зручніше на основі значень втрат сигналів. Формули для розрахунку основних втрат потужності сигналів для умов поширення радіохвиль на станціях $L_{осн.ст}$ і перегонах $L_{осн.пер}$:

$$L_{осн.ст} = 5235 + 2722 \cdot \lg f - 1382 \cdot \lg(h_1) - (11 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (449 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} - 2 \cdot \left(\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2, \text{ дБ}; \quad (7)$$

$$L_{осн.пер} = 3011 + 4605 \cdot \lg f - 1382 \cdot \lg(h_1) - (11 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (449 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} - 4,78 (\lg(f))^2, \text{ дБ}. \quad (8)$$

Такий підхід зручніший для автоматизації розрахунків, оскільки замість базових кривих поширення радіохвиль використовуються емпіричні рівняння, універсальні для різних діапазонів частот і висот установки антен радіостанцій.

Додаткові особливості конкретних трас: рельєф місцевості, вплив рефракційних змін, вплив лісових насаджень, електрифікація можуть бути враховані окремими додатковими показниками відповідно до рекомендацій ITU-R та відомчих документів.

Надійність радіозв'язку по полю $p, \%$ характеризують, як відсоток точок прийому, в яких просторово флюктууючий сигнал перевищує мінімально необхідний рівень прийому в межах відносно короткого відрізка шляху на максимальній заданій відстані. Інтегральні функції розподілу флюктуацій амплітуд напруженості поля дозволяють визначити імовірність перевищення певних рівнів сигналів і таким чином проводити розрахунки каналів із заданою надійністю по полю.

В роботі визначені експериментальні функції розподілу амплітуд для різних умов організації каналів радіозв'язку. Для забезпечення надійності радіоканалів 90% за інтерференційними флюктуаціями необхідна поправка для неелектрифікованих ділянок залізниць складає $B_i = 1,3$ дБ для перегонів, а на станціях – $B_i = 3,5$ дБ. На електрифікованих ділянках залізниць глибина інтерференційних флюктуацій на перегонах і станціях відрізняється не суттєво, а необхідна поправка складає $B_i = 5,0 \div 5,5$ дБ. Для інших значень надійності по полю побудовані відповідні інтегральні функції розподілу.

Для того, щоб порівняти емпіричні функції розподілу флюктуацій напруженості поля з відповідними теоретичними, необхідно знати величини E_0 і E_s , які є параметрами закону Релея – Райса. Величини регулярної складової E_0 і середньоквадратичного значення напруженості перевипромінених полів E_s безпосередньо в процесі вимірювань отримати неможливо, проте відомі непрямі методи визначення цих параметрів [4].

За результати вимірів для електрифікованих залізничних станцій це співвідношення складає $\gamma = \frac{E_0}{E_s} = 1,7 \div 1,8$ і є єдиним параметром функцій розподілу Релея – Райса, що визначає глибину замирань. Аналіз показав, що результати експериментальних досліджень флюктуацій напруженості поля в умовах впливу інфраструктури залізниць не протирічать гіпотезі про розподіл амплітуд основних поляризаційних компонент за законом Релея – Райса; розподіл амплітуд неосновних компонент вторинного випромінювання – описується простим законом Релея.

Середнє значення напруженості поля перевипромінених полів вертикальної поляризації і горизонтальної поляризації відрізняються не істотно, що підтверджує наше припущення про симетричність формування поляризаційних складових перевипромінених полів.

При вертикальній поляризації поля передавальної антени напруженість перевипромінених полів горизонтальної поляризації на електрифікованих залізничних станціях в середньому на $5,1 \div 5,8$ дБ менше відповідних основних компонент. В горизонтальній площині перевипромінені поля не мають суттєвої спрямованості, хоча напруженість поля дещо більша при орієнтації вздовж залізничної станції. На неелектрифікованих ділянках залізниць перевипромінені поля мають меншу інтенсивність і відповідно змінюються поляризаційні характеристики.

Висновки

В результаті впливу інфраструктури залізниць за рахунок інтерференції, відбиття, дифракції, розсіювання та деполяризації радіохвиль створюється багатоприменева інтерференційна структура електромагнітного поля та виникають глибокі просторові флюктуації.

Проведені експериментальні дослідження поширення радіохвиль на частотах 450 і 900 МГц в різних умовах організації радіомереж на території залізничних станцій і перегонів. Запропонована удосконалена статистична модель розрахунку енергетичних характеристик каналів рухомого радіозв'язку з необхідною надійністю, яка підвищує точність визначення енергетичних характеристик радіоканалів на $8 \div 11$ дБ порівняно з рекомендаціями Міжнародного союзу залізниць.

Для умов поширення радіохвиль на території залізничних станцій і перегонів експериментально уточнені параметри флюктуацій та поляризаційні характеристики електромагнітного поля, які викликані впливом інфраструктури залізниць.

Література

1. Радиотехнические системы железнодорожного транспорта: учебник для вузов железнодорожного транспорта [Текст] / Ю.В. Ваванов, А.В. Елизаренко, А.А. Танцюра и др. – М.: Транспорт, 1991. – 303 с.
2. Єлізаренко А.О. Особливості розрахунку енергетичних характеристик каналів рухомого радіозв'язку [Текст] / А.О. Єлізаренко // Матеріали 4-ї Міжнародної науково – практичної конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» // Одеса, ОНАЗ, 2014 р. – С. 35-38
3. GSM-R. Procurement & Implementation Guide [Текст] / International Union of Railways-Paris, 2009. – 246 с.
4. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн [Текст] / М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1971. – 184 с.
5. Венцель Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Венцель. – М.: Издательство «Наука», 1969. – 576 с.

6. МСЕ-R SM.1708. Измерения напряжённости поля вдоль маршрута с регистрацией географических координат [Текст]. 2005. – 7 с.
7. Recommendation ITU-R P.529-3. Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands [Текст]. 1999. – 25 с.

Елизаренко А.А. Усовершенствованная статистическая модель для расчётов энергетических характеристик каналов железнодорожной технологической радиосвязи. Приведены результаты экспериментальных исследований распространения ультракоротких радиоволн на железнодорожных станциях и перегонах. Предложена усовершенствованная модель расчета энергетических характеристик радиоканалов в условиях влияния инфраструктуры железных дорог. Определены параметры флуктуаций напряженности электромагнитного поля, что позволяет проводить расчеты каналов с заданной надежностью. Уточнены поляризационные характеристики электромагнитного поля.

Ключевые слова: железнодорожная технологическая радиосвязь, распространение радиоволн в условиях железных дорог, модифицированная модель Окамури-Хата, расчет зон обслуживания радиосетей.

Yelizarenko Andrii. An improved statistical model for the calculation of energy characteristics of railway technology radio communication channels. The results of experimental studies of ultrashort radio waves propagation at railway stations and stages have been presented. An improved model for calculating energy characteristic of radio channels in the conditions of railway infrastructure influence has been proposed. The parameters of electromagnetic field intensity fluctuations that allow calculating channels with a given reliability have been determined. Electromagnetic field polarization patterns have been specified.

Key words: railway technology radio communication, radio wave propagation in the conditions of the railways, a modified Okumura-Hata model, the calculation of radio networks service areas.

Рецензент д.т.н., професор Бойнік А.Б.
(УкрДУЗТ)

Поступила 30.03.2015г.