

УДК 621.396

UDC 621.396

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДА
СИНХРОНИЗАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ
СВЯЗИ С MC-CDMA**

**NOISE-IMMUNITY OF PSEUDO-NOISE
SEQUENCE ACQUISITION ALGORITHM FOR
MC-CDMA COMMUNICATION SYSTEMS**

Лойко Валерий Иванович
Заслуженный деятель науки РФ, доктор
технических наук, профессор
*Кубанский государственный аграрный
университет, Краснодар, Россия*

Loyko Valeriy Ivanovich
Honoured science worker of the Russian Federation,
Dr.Sci.Tech., professor
Kuban state agrarian university, Krasnodar, Russia

Хисамов Франгиз Гильфанетдинович
Доктор технических наук, профессор
*Краснодарское высшее военное училище,
Краснодар, Россия*

Khisamov Frangiz Gilfanetdinovich
Dr.Sci.Tech., professor
Krasnodar high military academy, Krasnodar, Russia

Золотуев Андрей Дмитриевич
Оператор научной роты
*Краснодарское высшее военное училище,
Краснодар, Россия*

Zolotuev Andrey Dmitrievich
Operator of the Scientific department
Krasnodar high military academy, Krasnodar, Russia

Целью данной работы является исследование помехоустойчивости алгоритма синхронизации псевдослучайной последовательности для систем связи с многочастотными сигналами MC-CDMA при синхронизации по сегменту ПСП. Для этого используются результаты имитационного моделирования, а также специально разработанная в Matlab программа. Анализ полученных результатов показывает, что разработанная математическая модель дает нижнюю границу вероятности приема псевдослучайной последовательности. Полученные в работе аналитические оценки могут найти применение при разработке системы синхронизации псевдослучайной последовательности систем специальной связи на базе MC-CDMA

The goal of the study is to research a noise-immunity of pseudo-noise sequence acquisition method for multicarrier communication systems MC-CDMA, using a segment of the pseudo-noise sequence. The goal was achieved by running a simulation developed in MATLAB. By analyzing the results, we can show that the developed mathematical model produces the lower bound for pseudo-noise sequence acquisition probability. The resulting analytical estimations might be used during the design phase for pseudo-noise sequence acquisition systems for MC-CDMA based military communication networks

Ключевые слова: СИНХРОНИЗАЦИЯ;
ПСЕВДОСЛУЧАЙНАЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ;
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ; MC-CDMA;
СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ СВЯЗИ

Keywords: ACQUISITION; PSEUDO-NOISE
SEQUENCE; NOISE-IMMUNITY; MC-CDMA;
MILITARY COMMUNICATION NETWORKS

Введение

В работах [1, с. 36; 2, с. 54; 3, с. 1] был предложен мажоритарный (подоптимальный) способ синхронизации ПСП для систем специальной связи с многочастотными сигналами MC-CDMA, обеспечивающий лучшие характеристики помехоустойчивости в сравнении с традиционными

методами синхронизации по «зачетному отрезку» (ЗОТ) на каналах низкого качества [1, с. 36; 2, с. 54; 3, с. 1]. Основным преимуществом в сравнении с другими мажоритарными методами синхронизации ПСП [4, с. 772] является его малая аппаратная сложность. В работах [1, с. 36; 2, с. 54] была разработана модифицированная математическая модель метода, но результаты имитационного моделирования показывают, что на коротких сегментах ПСП модель недостаточно адекватно оценивает вероятностные характеристики. Это объясняется применением в модели Гауссовой аппроксимации, использование которой фактически справедливо только при больших сегментах ПСП (порядка нескольких периодов). Отметим также, что чем быстрее система специальной связи входит в синхронизм, тем выше ее надежность, что в свою очередь можно обеспечить только при синхронизации по короткому сегменту ПСП. Поэтому в данной работе предлагается новая математическая модель, которая наиболее адекватна для коротких сегментов ПСП.

Метод синхронизации ПСП для систем связи MC-CDMA

Предложенный в работах [1, с. 36; 2, с. 54; 3, с. 1] подоптимальный способ основывается на свойстве цикличности m -последовательности, когда ее проверочная матрица $H=[P^T I]$ приводится к виду $H'=[IP^T]$ [5, с. 52]. Если H' записать в развернутом виде, то можно заметить, что последняя строка будет задавать соотношение, связывающее фазу φ_0 с " k " символами фазы φ_1 ; предпоследняя строка будет задавать соотношение, связывающее фазу φ_0 с " k " символами φ_2 и т.д. Строки P^T просто генерируются регистром со встроенными сумматорами, соединенными в соответствии порождающим полиномом $h(x)$ и работающим в обратном

направлении. Тогда модифицированный мажоритарный алгоритм представляется в виде:

$$\varphi_0 = \varphi_l \left[\alpha^{-l} \alpha^{-l+1} \dots \alpha^{-l+k-1} \right], \quad (1)$$

где: α^{-l+i} - вектор столбца матрицы, φ_0 - начальная фаза ПСП, φ_l - l -я фаза ПСП. Тогда при поступлении очередного символа получим следующие " k " символов, определяющих фазу φ_l и т.д.

На рисунке 1 представлена схема устройства, реализующего данный алгоритм для систем с временным расширением MC-DS-CDMA [6, с. 94]. Устройство состоит из: генератора элементов поля α , приемного регистра φ_l , ключевых схем на элементах " I ", сумматора по модулю два на " K " входов, коммутатора, " K " счетчиков с пороговыми элементами, датчика ПСП, блока управления, схемы подгона, коррелятора и блока решающего устройства (РУ). За один такт работы приемного регистра φ_l генератор поля α должен проработать " k " тактов, при этом последовательно будут формироваться символы a_1, a_2, \dots, a_k и так далее при приеме очередного символа. В пороговых схемах будут накапливаться значения a_i и при превышении заданного порога параллельно выдается решение о значении фазы φ_0 . В системах с MC-CDMA на каждой поднесущей для расширения спектра сигнала используется одна и та же ПСП, поэтому в процессе синхронизации, с учетом того, что каждая поднесущая обрабатывается отдельно, целесообразно прием ПСП реализовать по мажоритарному алгоритму. Таким образом, РУ в схеме также как и декодирование ПСП в предлагаемом устройстве работает по мажоритарному алгоритму, принимая решение по большинству принятых элементов ПСП на каждой поднесущей. Синхронизация ПСП обеспечивается подгоном на величину задержки равной времени вынесения решения относительно фазы

принятого отрезка, которое всегда известно на приеме, и последующей проверкой корреляционным методом правильности синхронизации.

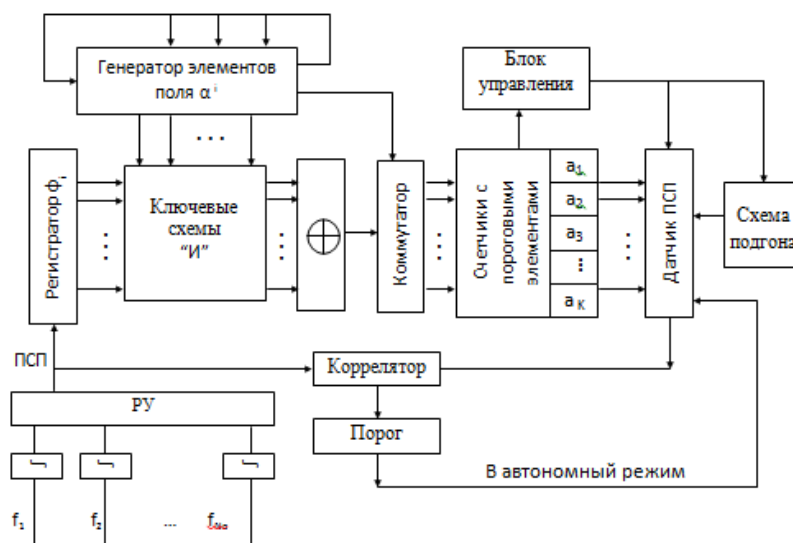


Рис. 1. Подоптимальный способ синхронизации ПСП для MC-CDMA

Для систем с частотным расширением спектра MC-CDMA [6, с. 94], данный способ синхронизации, может быть реализован без блока РУ и параллельной записью ПСП в регистратор фазы, так как в этом случае ПСП распределяется по частоте [6, с. 94].

Математическая модель

Определим вероятность приема блока из "к" символов ПСП хотя бы с одной ошибкой $P_{ош}(k)$ в дискретном двоичном симметричном канале без памяти. Учитывая независимость ошибок в канале, запишем:

$$P_{ош}(k) = 1 - (1 - P_{ош}(1))^k, \quad (2)$$

где: $P_{ош}(1)$ - вероятность ошибочного приема одного символа.

Ошибка в процессе синхронизации произойдет в том случае, если количество неправильных проверок в результате накопления превысит

количество правильных или количество неправильных проверок будет больше половины всех проверок. Тогда, обозначив все проверки через J и сгруппировав их по размерностям $J_i = (J_1, J_2, \dots, J_k)$, запишем:

$$P_{\text{ош}}(1) = P\left(\sum J_{\text{нпр}i} > \sum J_{\text{пр}i}\right) = P\left(J_{\text{нпр}i} > \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m J_i\right), \quad (3)$$

где: $J_{\text{нпр}i}$ - неправильная проверка; $J_{\text{пр}i}$ - правильная проверка; $J_i = C_{k-1}^{i-1}$ - число проверок размерности i в одном периоде ПСП [1, с. 38; 2, с. 56].

Так как в отличие от известных методов, практически невозможно получить точную аналитическую оценку числа проверок на длине обрабатываемого сегмента ПСП, воспользуемся приближенной формулой [1, с. 39; 2, с. 60]:

$$J'_i = \frac{J_i \cdot N}{2^k - 1} \quad (4)$$

где: N – длина сегмента ПСП, k - длина линейного рекуррентного регистра.

Вероятность ошибки в проверке размерности i можно рассчитать по следующей формуле [7, с. 97]:

$$P_i = 0.5 - 0.5(1 - 2P)^i, \quad (5)$$

где: P – вероятность ошибки в канале.

Из (4) и (5) видно, что проверки разной размерности в процессе декодирования дадут разное количество ошибок. Тогда, предположив, что отдельные проверки независимы, можно составить L различных комбинаций количества ошибочных проверок из m размерностей $[J_{\text{нпр}1}, J_{\text{нпр}2}, \dots, J_{\text{нпр}m}]$, удовлетворяющих условию ошибочного декодирования:

$$\sum J_{нпр i} > \frac{1}{2} \sum J_i, \quad (6)$$

Результаты исследования с помощью имитационной модели [3] показали, что вероятность возникновения нескольких ошибок в проверках разной размерности на коротких сегментах ПСП с незначительной погрешностью можно аппроксимировать Пуассоновским законом распределения. Тогда, получим выражение для плотности вероятности числа ошибок в проверках размерности i с использованием распределения Пуассона:

$$P(n) = \frac{M[J_{нпр i}]^n}{n!} e^{-M[J_{нпр i}]}, \quad (7)$$

где: $M[J_{нпр i}]$ – математическое ожидание числа ошибочных проверок размерности i , равное $M[J_{нпр i}] = J_i P_i$.

С учетом (7) и условия независимости отдельных проверок вероятность ошибочного декодирования одного символа ПСП l -й комбинации можно рассчитать по следующей формуле:

$$P[J_{нпр 1}, J_{нпр 2} \dots J_{нпр m}]_l = \prod_{k=1}^m P_k^l(n) \quad (8)$$

С учетом того, что различные вероятности комбинаций ошибок $P[J_{нпр 1}, J_{нпр 2} \dots J_{нпр m}]_l$ представляют собой несовместные события, полную вероятность приема одного символа ПСП рассчитаем по формуле:

$$P_{ош}(1) = \sum_{l=1}^L P[J_{нпр 1}, J_{нпр 2} \dots J_{нпр m}]_l, \quad (9)$$

Схема приема ПСП работает по мажоритарному алгоритму, поэтому предположив, что вероятность ошибки на каждой поднесущей одинакова,

для расчета по формуле (5) вместо P будем подставлять выражение для средней вероятности ошибки в канале P_{cp} [8, с. 361]:

$$P_{cp} = \sum_{k=\frac{N_c+1}{2}}^{N_c} C_{N_c}^k P^k (1-P)^{N_c-k} \quad (10)$$

где P – вероятность ошибки на одной поднесущей, N_c – количество поднесущих.

Отметим, что данный подход к оценке вероятности неприема ПСП требует больших вычислительных мощностей, так как при увеличении длины сегмента ПСП и длины ЛРР количество комбинаций ошибок, удовлетворяющих (6), увеличивается геометрически, в особенности для апериодических ПСП. В связи с этим для проведения расчетов в среде Matlab была разработана программа, реализующая предложенный алгоритм вычисления.

Расчет вероятности неприема ПСП

Для расчетов по разработанной математической модели использовалась программа, написанная в среде Matlab, функциональный алгоритм которой представлен на рисунке 2. В основе формирования различных комбинаций ошибочных проверок лежит применение функции «combvec», которая генерирует массив сочетаний ошибок, после чего из него выбираются все комбинации, удовлетворяющие условию (6).

В таблице 1 представлены параметры системы, которые использовались при математическом и имитационном моделировании. В таблице 2 представлены результаты сравнительного анализа. Так анализ показывает, что разработанная математическая модель дает наиболее

точную оценку вероятности ошибки на каналах низкого качества в сравнении с моделью на основе Гауссовой аппроксимации при синхронизации по короткому сегменту ПСП. Также видно, что принятые в модели допущения приводят к оценке нижней границы вероятности ошибки.

Таблица 1 – Параметры системы

Параметры системы	Значение
Количество поднесущих, N_c	3
Вероятность ошибки на одной поднесущей, P	0.1-0.2
Длина ЛРР, k	10
Длина сегмента ПСП, N	31

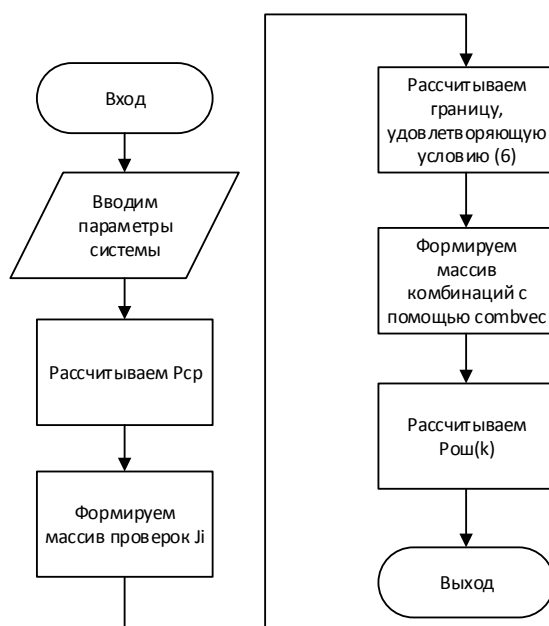


Рис. 2. Функциональный алгоритм программы

На рисунке 3 представлены графики зависимости вероятности неприема ПСП, полученные для подоптимального метода синхронизации и метода синхронизации по «зачетному отрезку». Расчет вероятности неприема ПСП для метода ЗОТ проводился с использованием формулы (2)

с подстановкой вместо $P_{\text{ош}}(1)$ вероятности ошибки $P_{\text{ср}}$, так как в случае ЗОТ для синхронизации достаточно принять неискаженный отрезок из k символов ПСП. Анализ графиков показывает, что разработанный метод синхронизации дает значительный выигрыш в сравнении с традиционным методом синхронизации по «зачетному отрезку». Данные результаты совпадают с результатами полученными с помощью имитационного моделирования [3].

Таблица 2 – Сравнительный анализ

Р	Разработанная модель	Гауссова аппроксимация	Имитационное моделирование
0.05	$1.07 \cdot 10^{-7}$	0	0.0039
0.1	0.0021	$5.634 \cdot 10^{-5}$	0.059
0.15	0.1024	0.075	0.2412
0.2	0.4338	0.605	0.4722

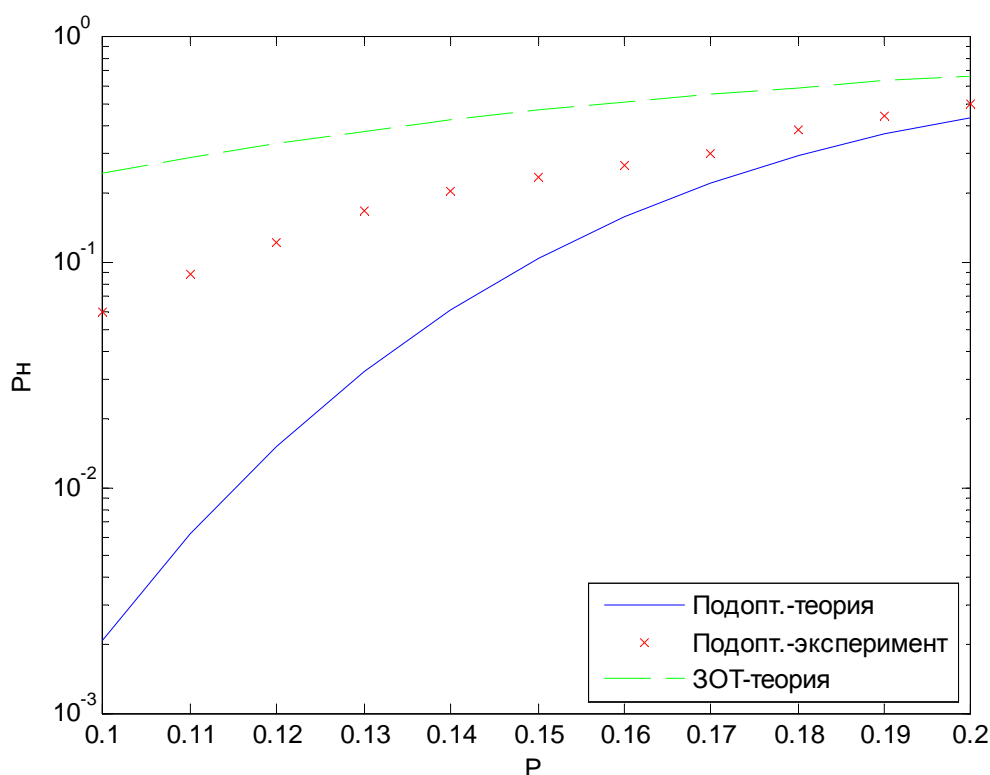


Рис. 3. Графики зависимости вероятности неприема ПСП от вероятности ошибки на одной поднесущей

Заключение

В работе предложена математическая модель метода синхронизации ПСП для систем специальной связи на базе MC-CDMA, которая позволяет наиболее точно оценить нижнюю границу вероятности неприема ПСП на каналах низкого качества при синхронизации по сегменту ПСП в сравнении с предложенной в работе [1, с. 36] оценкой на основе Гауссовой аппроксимации. Полученные результаты могут быть использованы при разработке MC-CDMA-систем специальной связи [9, с. 1], а также при разработке ПСП-ориентированных протоколов множественного доступа [10, с. 259].

Список литературы

1. Золотуев А. Д. Мажоритарный алгоритм синхронизации псевдослучайных последовательностей в системах связи с многочастотными сигналами MC-DSSS. Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство» # V (9), 2015 с. 36-39
2. Золотуев А. Д. Подоптимальный метод синхронизации ПСП для когнитивных систем специальной связи, Перспективы развития информационных технологий: сборник мате-риалов XXV Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2015. – с. 54-62
3. Лойко В. И. Исследование алгоритма синхронизации ПСП для систем связи с многочастотными сигналами с помощью компьютерного моделирования / В. И. Лойко, Ф. Г. Хисамов, М. В. Милованов, А. Д. Золотуев. // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2015. - №111(07). - Шифр Информрегистра: 0420900012. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/07/pdf/110.pdf>
4. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding // IEEE Trans. on Communication, COM-21, 1973, № 6, С. 772-774.
5. Новиков И. А., Номоконов В. Н., Шебанов А. А. и др., К вопросу о мажоритарном декодировании M-последовательностей / Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. - 1976. вып. 5. – С. 50-55.
6. Fazel K., Kaiser S. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. – second edition. – Wiley, 2008. – 360 p.
7. Месси Д., Пороговое декодирование. – М.: Мир, 1966. – 207 с.
8. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. - М.: Советское радио, 1971. - 408 с.
9. Wang H. Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system / H. Wang, Y-D. Yao, R. Wang, L. Shen, Stevens Institute of Technology [Электронный ресурс]. – Hoboken. – Режим доступа : <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf>
10. Золотуев А.Д., Применение высотных платформ НАР для построения беспроводных мультисервисных сетей 4G на удаленных и труднодоступных территориях,

Российская научно-техническая конференция “Информатика и проблемы телекоммуникаций”, Новосибирск, 2011. С. 259-261.

References

1. Zolotuev A. D. Mazhoritarniy algoritm sinkhronizatsii psevdosluchaynykh posledovatel'nostey v sistemakh svyazi s mnogochastotnymi signalami MC-DSSS. *Mezhdunarodniy sojuz uchjonikh «Nauka. Tekhnologii Proizvodstvo» # V (9)*, 2015 s. 36-39
2. Zolotuev A. D. Podoptimal'niy metod sinkhronizatsii PSP dlya kognitivnykh system spetsial'noy svyazi, *Perspektivi razvitiya informatsionnykh tekhnologiy: sbornik materialov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Pod obsch. red. S.S. Chernova.* – Novosibirsk: Izdatel'stvo TSRNS, 2015. – s. 54-62
3. Loyko V. I. Issledovaniye algoritma sinkhronozatsii PSP dlja system svyazi s mnogochastotnymi signalami s pomoshchju komp'yuternogo modelirovaniya / V. I. Loyko, F. G. Khisamov, M. V. Milovanov, A. D. Zolotuev. // *Nauchniy zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]*. - Krasnodar: KubGAU, 2015. - №111(07). - Shifr Informregistra: 0420900012. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2015/07/pdf/110.pdf>
4. Kilgus C. Pseudonoise code acquisition majority logic decoding // *IEEE Trans. on Communication, COM-21*, 1973, № 6, С. 772-774.
5. Novikov I. A., Nomokonov V. N., Shebanov A. A. i dr., *K voprosu o mazhoritarnom dekodirovanii M-posledovatel'nostej / Voprosy radiojelektroniki. Ser. OT.* - 1976. vyp. 5. – S. 50-55.
6. Fazel K., Kaiser S. *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX.* – second edition. – Wiley, 2008. – 360 p.
7. Messi D., *Porogovoe dekodirovanie.* – M.: Mir, 1966. – 207 s.
8. Andronov I. S., Fink L. M. *Peredacha diskretnykh soobscheniy po parallel'nim kanalom.* - M.: Sovetskoje radio, 1971. - 408 s.
9. Wang H. *Coordinated jamming and communications in an MC-CDMA system / H. Wang, Y-D. Yao, R. Wang, L. Shen, Stevens Institute of Technology [Jelektronnyj resurs]*. – Hoboken. – Rezhim dostupa: <http://www.personal.stevens.edu/~hwang38/paper/CJamCom.pdf>
10. Zolotuev A.D., *Primenenie visotnykh platform HAP dlja postroenija besprovodnykh multiservisnykh setey 4G na udal'jonnnykh i trudnodostupnykh territorijakh, Rossiyskaja nauchno-tehnicheskaya konferentsija “Informatika i problem telekommunikatsiy”, Novosibirsk, 2011. S. 259-261.*