

**Технологии
современной
Оптимизационной
Теории кодирования
для решения проблемы
Шеннона**

22.08.2022 г.



В.В. Золотарёв
ИКИ РАН

Докладчик

В.В. Золотарёв –

**ведущий научный сотрудник Института
космических исследований РАН,
доктор технических наук, профессор,
лауреат премии Правительства РФ,
Золотой медали Евросоюза
«За исключительные достижения» и
Золотой медали
Международного салона изобретений**

**Цифровая информатика
успешно работает только
с достоверными данными.**

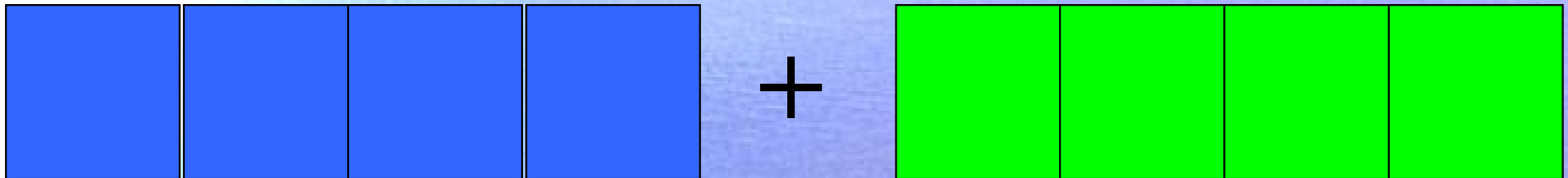
***Эта задача в каналах связи с большими
искажениями решается методами
теории информации
и её сложнейшего раздела:
Теории помехоустойчивого
кодирования***

- ОТДЕЛЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАН
- *Основные научные направления исследований*
- 1. Теория информации, научные основы информационно-вычислительных систем и сетей, информатизации общества. Квантовые методы
- 2. Когнитивные системы и технологии,
- 3. Системы автоматизации,
- 4. **Научные основы и применения информационных технологий** в медицине
- 5. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-телекоммуникационных систем и сетей. Развитие технологий и стандартов GRID
- 6. Архитектура, системные решения, программное обеспечение,
- 7. Элементная база микроэлектроники,
- 8. Опто-, радио- и акустоэлектроника, оптическая и СВЧ-связь, лазерные технологии
- 9. Локационные системы. Геоинформационные технологии и системы
- 10. **Нанотехнологии**, нанобиотехнологии, наносистемы, наноматериалы, нанодиагностика, наноэлектроника и нанофотоника
- ----- **Под эту проблему создан 60 лет назад ИППИ АН СССР** -----
- - 18.06.2019

Кодирование - это введение избыточности

k - информация

r - избыточные символы



$n=k+r$ - длина блока

$R=k/n < 1$ -

КОДОВАЯ СКОРОСТЬ

Кодирование

снижает

размеры антенн,

увеличивает

скорость, дальность

и достоверность

данных для всех типов

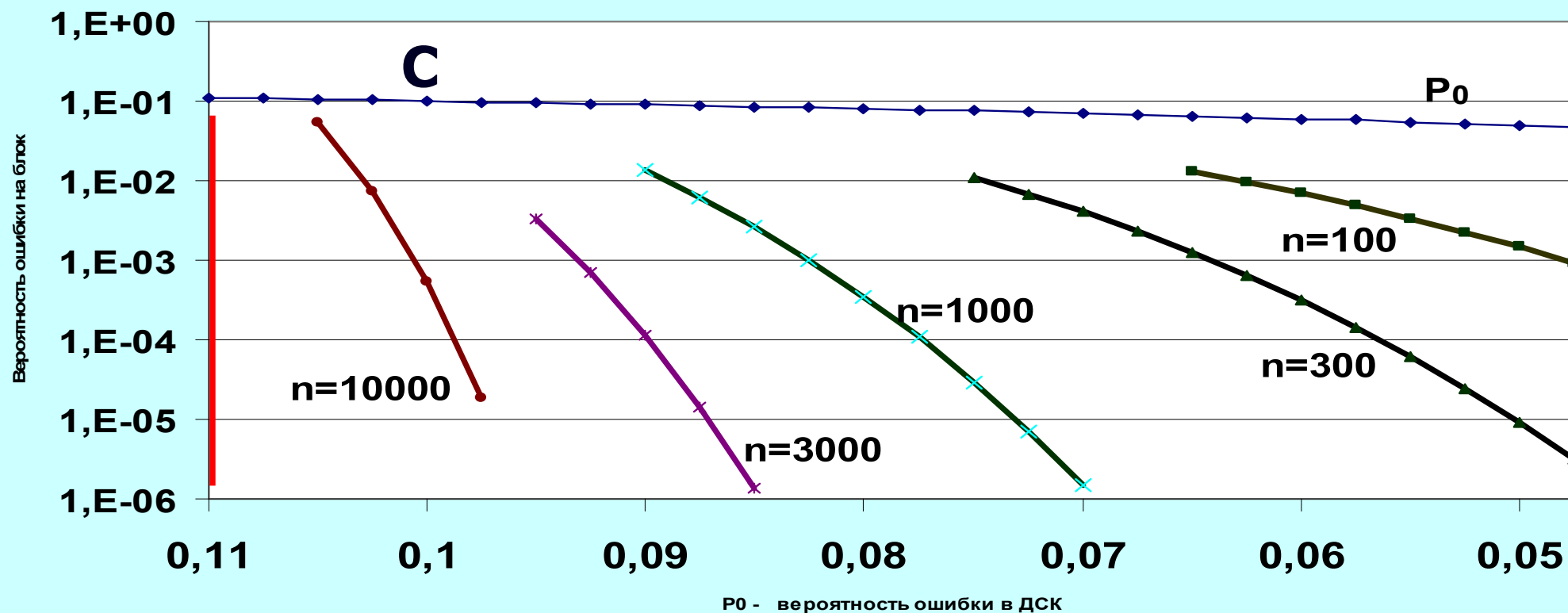
каналов связи

Нижние оценки вероятностей ошибки декодирования блоковых кодов с $R=1/2$

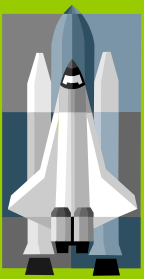
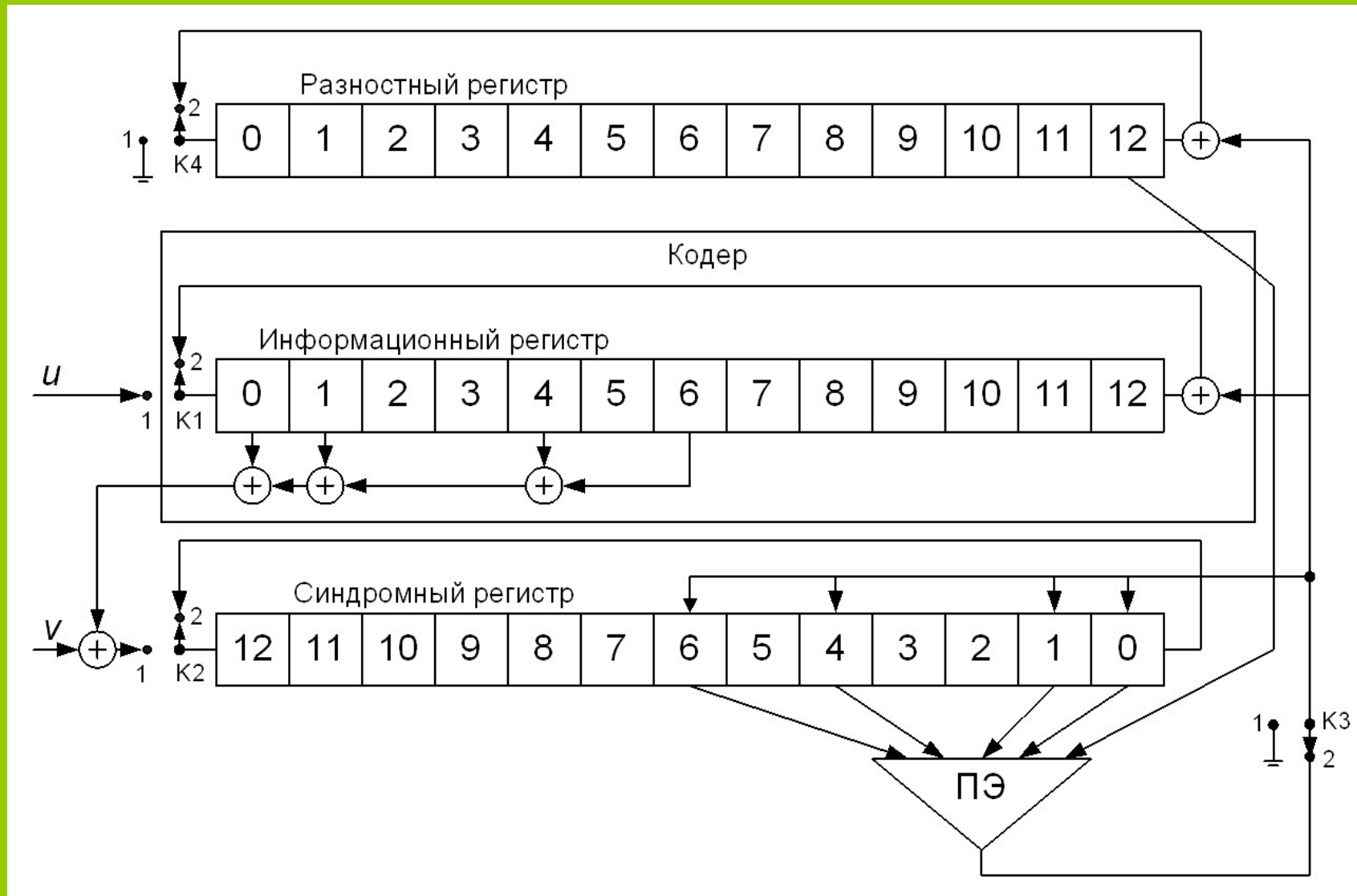
Даже коды длины $n=1000$ неэффективны при вероятности ошибки в ДСК канале $P_0 > 0.08$. А теория-то утверждает, что можно успешно работать при $P_0 < 0.11$!!!

И это при 2^{500} вариантах!

Сложность - больше числа атомов во Вселенной!



Блочный многопороговый декодер для кода с $R=1/2$, $d=5$



Оптимизационная Теория (ОТ)

Критерий выбора алгоритмов: ПДС:

Помехоустойчивость -

Достоверность -

Сложность .

Никакие декодеры никогда не имеют формул для этих параметров вблизи границы Шеннона

- **Но этого никто не захотел признать 40 лет!**
- Однако это значит,
что создание алгоритмов декодирования
– **совсем не математическая задача!**



Результат создания ОТ

- 1.. Основная теорема и её обобщения на все каналы.
- 2.. Теория размножения ошибок.
- 3. Теория поиска глобального экстремума функционалов +

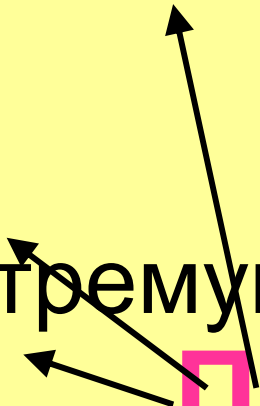
- Ни одной из этих теорий не было в прежней ТК.

ОТ создана заново.

Её девиз: теория + эксперимент!

Более 150 типов моделей декодеров – лучших по всем параметрам критерия ПДС

ПО



Многопороговый декодер (**МПД**) для спутниковых и космических каналов
Он повышает кпд их использования в 3 - 10 раз, в том числе для ДЗЗ.

МПД на ПЛИС Altera на информационную скорость >1,0 Гбит/с

The multithreshold decoder (**MTD**) for satellite and Space channels, raises efficiency of their usage in 3-10 times, including **channels up to 1Gb/s**



Книга 2004 года

МПД для космоса, оптических каналов и флеш-памяти

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ
ЗНАКАМ

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL
PROPERTY, PATENTS
AND TRADEMARKS



НАГРАЖДАЕТСЯ

ФГБУН Институт космических исследований РАН
за разработку «Многопороговый декодер
помехоустойчивых кодов для каналов спутниковой
и космической связи с большим уровнем шума»
(Золотарёв В.В.)



Руководитель

Б.П. Симонов

XV Юбилейный международный Салон
изобретений и инновационных технологий



«АРХИМЕД-2012»

ДИПЛОМ

Решением Международного Жюри
награждается

ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ

ФГБУН Институт космических исследований РАН
за разработку «Многопороговый декодер
помехоустойчивых кодов для каналов спутниковой
и космической связи с большим уровнем шума»
(Золотарёв В.В.)



Председатель
Международного Жюри,
Президент Евразийской
патентной организации

А.Н. Григорьев

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель
Федеральной службы
по интеллектуальной
собственности

Б.П. Симонов

Применение наиболее мощных систем кодирования канала и источника

- 1. Кодирование канала.

Повышает достоверность передачи данных на 2-5 десятичных порядков,

ЭВК~8-15 дБ

- 2. Кодирование источника.

Достигается сжатие данных в 2-5 и более раз.

- 3. Общий итоговый энергетический выигрыш от применения методов теории информации - **до 40 - 100 раз !**

**Золотая медаль Евросоюза (ЕС)
«За исключительные достижения»,
вручаемая за особо значимые
результаты в науке**



Теория кодирования..... – 2018г.



Золотарёв Валерий Владимирович – выпускник МФТИ, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), лауреат премии Правительства России в области науки и техники, награжден Золотой медалью Международной выставки изобретений и Золотой медалью Европейского союза (ЕС) «За исключительные достижения».

Опубликовал более 220 научных работ, в том числе 4 книги по прикладным методам теории кодирования. Международным союзом электросвязи (МСЭ/ITU) в 2015 г. издана на английском языке его монография. Обладатель 16 патентов на изобретения в РФ и за рубежом.

Золотарёв В. В. – автор Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования, которая позволила создавать простые высокоэффективные и особо достоверные методы коррекции ошибок в цифровых системах, обеспечивающие успешную работу в непосредственной окрестности пропускной способности канала связи. Сложность предложенных им алгоритмов увеличивается с длиной кода лишь в минимальной линейной степени, что стало успешным и технологичным решением проблемы Шеннона, поставленной более 70 лет назад.

На сетевых порталах научной школы В. В. Золотарёва представлены обширные материалы по ОТ и дешиграммы по многим алгоритмам декодирования.

Представлены теоретические и прикладные результаты современной теории кодирования как задачи поиска глобального экстремума функционала в дискретных пространствах. Рассмотрены различные методы простой коррекции ошибок при максимально допустимом уровне шума. Показано, что многопороговые декодеры, различные версии алгоритма Витерби и новые методы кодирования успешно решают на высоком технологическом уровне главную проблему теории информации – простое и эффективное декодирование вблизи границы Шеннона.

Для специалистов в области систем связи, инженеров, студентов старших курсов, а также аспирантов математических и радиотехнических факультетов.

Сайт издательства:

www.techbook.ru



ТЕОРИЯ КОДИРОВАНИЯ КАК ЗАДАЧА ПОИСКА ГЛОБАЛЬНОГО ЭКСТРЕМУМА

В. В. Золотарёв

ТЕОРИЯ КОДИРОВАНИЯ КАК ЗАДАЧА ПОИСКА ГЛОБАЛЬНОГО ЭКСТРЕМУМА

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО
КОДИРОВАНИЯ –
НОВАЯ «КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА»
ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ



- «....2018 год является юбилейным для теории кодирования. 70 лет назад Клод Шеннон выдвинул проблему простого и эффективного декодирования перед наукой и техникой в своей замечательной статье "Математическая теория связи". Отрадно найти её успешное решение в юбилейном году в монографии российского учёного».

- **Академик РАН
Н.А. Кузнецов**

Монография 2021 г.



От научного редактора

- История науки не знала до сих пор такого случая, чтобы небольшая научная школа полностью развернула в принципиально новом направлении столь грандиозную и инерционную, но одновременно и такую необходимую для техники связи сложнейшую отрасль науки, полностью решив сформулированные для неё прикладные научные и технологические проблемы.
- **Член-корреспондент РАН Ю.Б. Зубарев**

И далее...

... уже выходят публикации с участием членов РАН и специалистов ..., где они полагают, что алгоритмы МПД, символьные коды, а также теория размножения ошибок декодирования полностью соответствуют нобелевскому уровню исследований и вместе взятые, и в отдельности.

- А технологии настроек кодов и декодеров, алгоритмы для исправления стираний и совокупность новых парадигм ОТ, а также более 30 патентов автора —они являются выдающимися открытиями в области прикладной теории кодирования.
- **Член-корреспондент РАН Ю.Б. Зубарев**

Справочник по кодированию-2022



Золотарёв Валерий Владимирович – выпускник МФТИ, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института координатных исследований РАН, лауреат премии Правительства России в области науки и техники, Золотой медали Международной выставки изобретений и Золотой медали Европейского союза (ЕС) «За исключительные достижения». Опубликовал более 260 научных работ, в том числе 11 монографий по прикладной теории помехоустойчивого кодирования. Международным союзом электросвязи (МСЭ/ITU) в 2015 г. издана его монография на английском языке. Автор более 15 патентов на изобретения в РФ и за рубежом.

Изложены теоретические основы и описаны конкретные методы оптимального декодирования (ОД) с линейной от длины кодов сложностью для всех основных видов цифровых каналов связи с независимыми искажениями вплоть до окрестностей их пропускной способности. Все методы Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования представлены как технологии, обеспечивающие полное решение великой проблемы Шеннона. Свёрточные и блочные модификации алгоритма Витерби (АВ) и многопороговые декодеры (МПД), относящиеся к давно известным инженерам и специалистам абсолютно понятным способам коррекции ошибок, описаны как кодовые системы, проектируемые с использованием тонких методов настройки их параметров для задач поиска глобальных экстремумов функционалов.

Справочный и методический материал всесторонне поддерживается информационными и технологическими ресурсами трёх сетевых порталов научной школы ОТ.



сайт издательства:

www.techbook.ru



В. В. Золотарёв

КОДИРОВАНИЕ для ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ И СИСТЕМ ПАМЯТИ

СПРАВОЧНИК

КОДИРОВАНИЕ для ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ И СИСТЕМ ПАМЯТИ

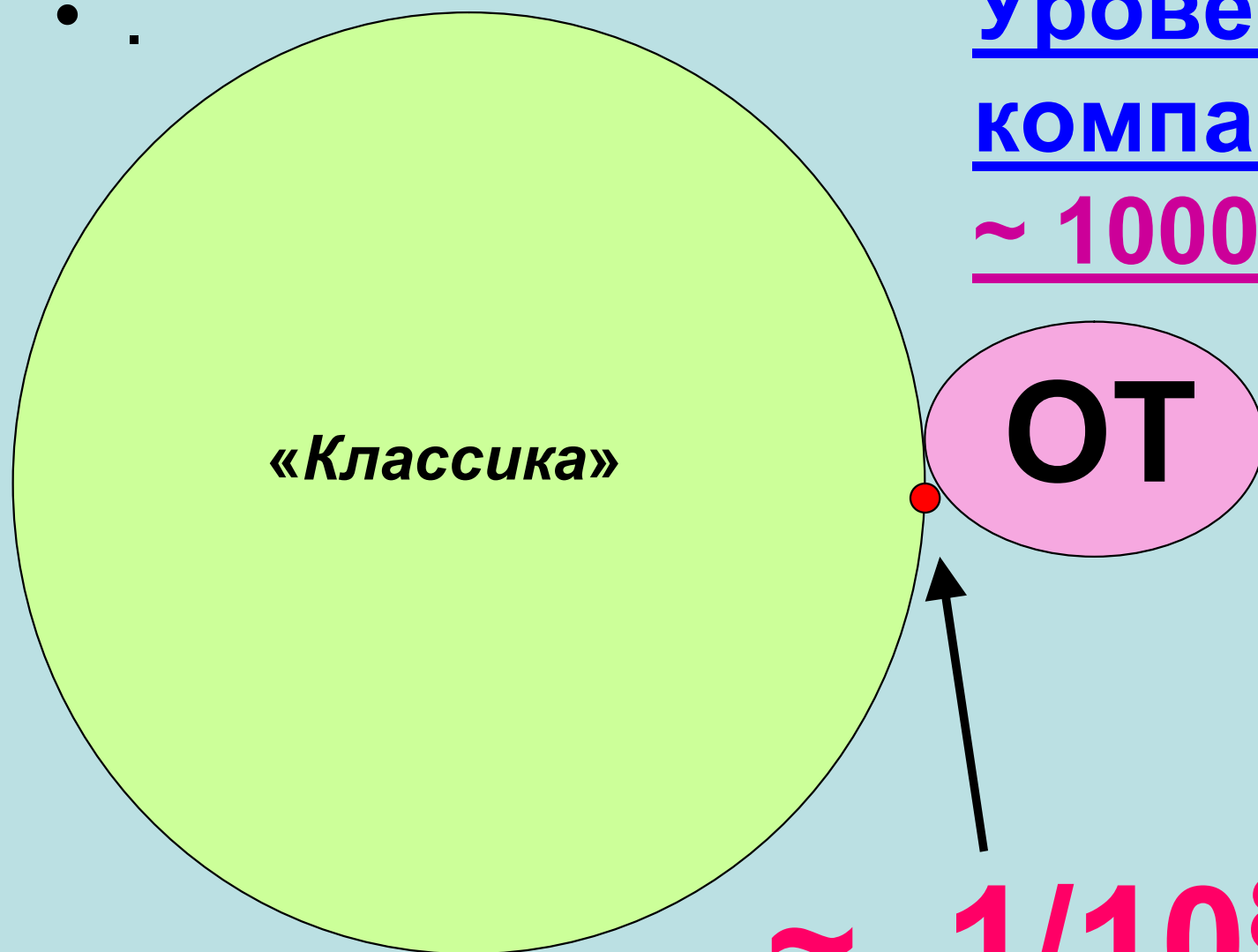
От научного редактора справочника

Новый Справочник-2 издан руководителем научной школы Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования профессором ИКИ РАН, д.т.н. В.В. Золотарёвым в соответствии с достижениями школы ОТ новейшего времени, согласно которым основные конкретные методы этой современной прикладной теории, полностью решившей проблему Шеннона, действительно имеют минимальную возможную сложность, но реально обеспечивают оптимальное декодирование используемых кодов даже при большом относительном уровне шума цифрового канала.

Член-корреспондент РАН Ю.Б. Зубарев

Размеры «классики» и ОТ

Уровень
компактности ОТ
~ 1000 раз!!!



~ 1/10⁸ ?

Для первого ознакомления с ОТ

•

Соавторы:

Н.А. Кузнецов,
академик РАН

и

Член-
корреспондент

РАН

Ю.Б. Зубарев

Н.А. Кузнецов, В.В. Золотарёв, Ю.Б. Зубарев,
Г.В. Овечкин, Р.Р. Назиров, С.В. Аверин



**Проблемы и открытия
Оптимизационной Теории
помехоустойчивого кодирования
(ОТ в иллюстрациях)**



Москва
ИКИ РАН
2020 г.

Наши порталы по ОТ и МПД

www.decoders-zolotarev.ru, www.mtdbest.ru

www.mtdbest.iki.rssi.ru

**За 2016 год - более 105 тыс. читателей
на наших порталах из 94 стран мира**

Россия



Rank

Country

1 United States

2 Not determined

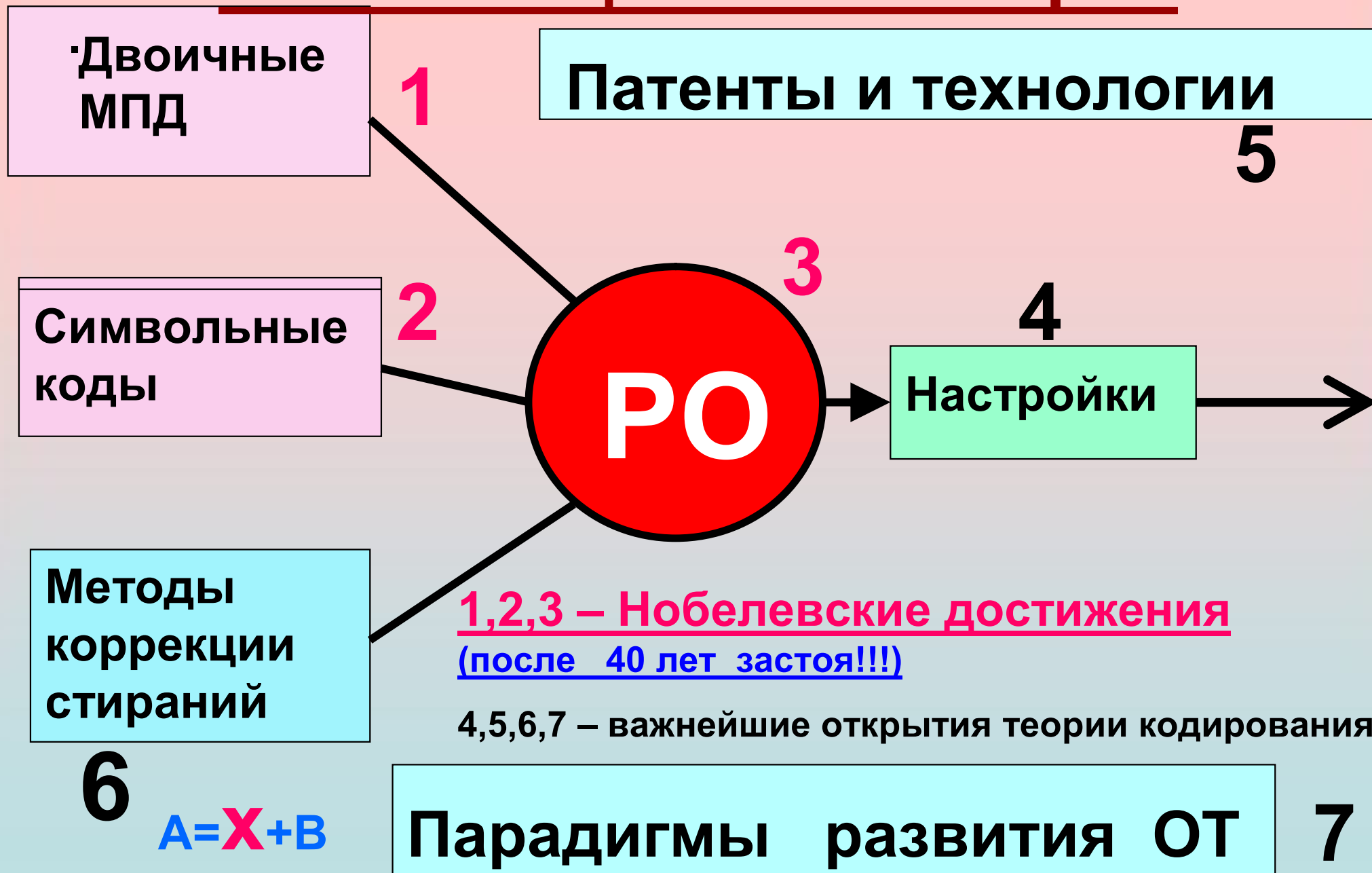
3 Germany

4 Russian Federation

5 Ukraine

сша

Открытия школы Оптимизационной Теории



Наша поддержка – всем!

Всё - в свободном доступе.

- Более **800 статей** школы ОТ за **50** лет;
 - **16** книг, из них **11 монографий** с участием **академиков и членов РАН** – системно-философские трактаты по алгоритмам
 - 3 сетевых портала;
www.decoders-zolotarev.ru, www.mtdbest.ru,
www.mtdbest.iki.rssi.ru
- с 1000 блоков данных.+ **3 вида учебных программ**
Два единственных в России справочника!!!
по кодированию с технологиями решения
проблемы Шеннона для всех типов каналов

Выводы

1. Создана Оптимизационная Теория (ОТ) .
помехоустойчивого кодирования.
2. При линейной сложности реализуются уровни достоверности оптимального (переборного!) декодирования в непосредственной близости от пропускной способности канала.
3. Решена великая проблема Шеннона, поставленная им 70 лет назад. Современная цифровая цивилизация получила технологии обеспечения произвольной достоверности информации.
4. Аналогичных разработок уникального теоретического и экспериментального уровня школы ОТ у каких-либо научных групп в мире нет!
Опережение составляет ~15-20-30(?) лет.

Общий итог!

- Российскую науку можно поздравить с выдающимся результатом: решением главной научной задачи всего современного цифрового мира – великой проблемы Шеннона.
- Классическая теория кодирования полностью завершена как проблема. Ей на смену пришли технологии ОТ создания кодеков для всех традиционных в теории кодирования цифровых каналов

Наши порталы

Our addresses

- www.decoders-zolotarev.ru
Страницы/pages «Наши книги/Books»

- www.mtdbest.ru

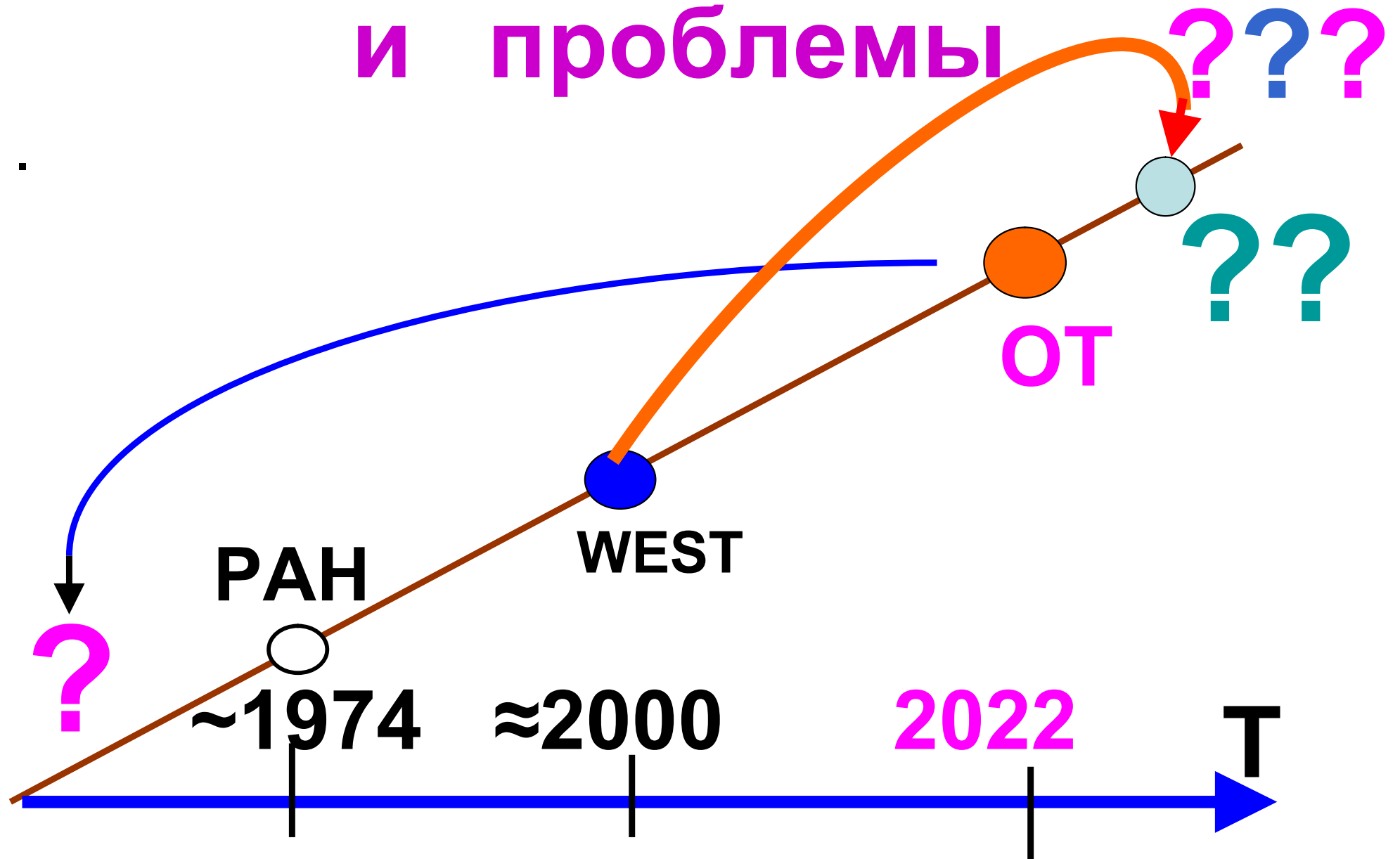
- страницы/pages «Наши книги/Books»

- www.mtdbest.iki.rssi.ru

- Теория завершена в 1985г.!

- Теперь – только технологии!

Перспективы и проблемы



Срочные проблемы!

1. РАН следует признать своё **нобелевское** великое достижение – **ОТ** ещё в 1985г.
2. Армии, СПСБ, Роскосмосу и т.д. : принять ОТ в разработку. Революционные технологии многократно снизят наши потери.
3. Полностью переориентировать ИППИ РАН
4. Ввести курс ОТ в ВУЗах и для спец-тов.
5. Отменить ~50 защит в теории кодирования.
6. Напечатать и распределить в ВУЗы и НИИ 5 книг и 2 справочника по кодированию.

www.mtdbest.ru www.decoders-zolotarev.ru

СПАСИБО !

ИКИ РАН

т.(495)-333-24-12

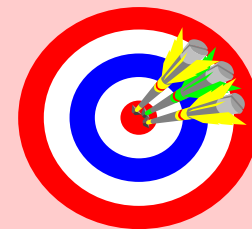
www.mtdbest.iki.rssi.ru

e-mail: zolotasd@yandex.ru

МОБ.: +7-916-518-86-28

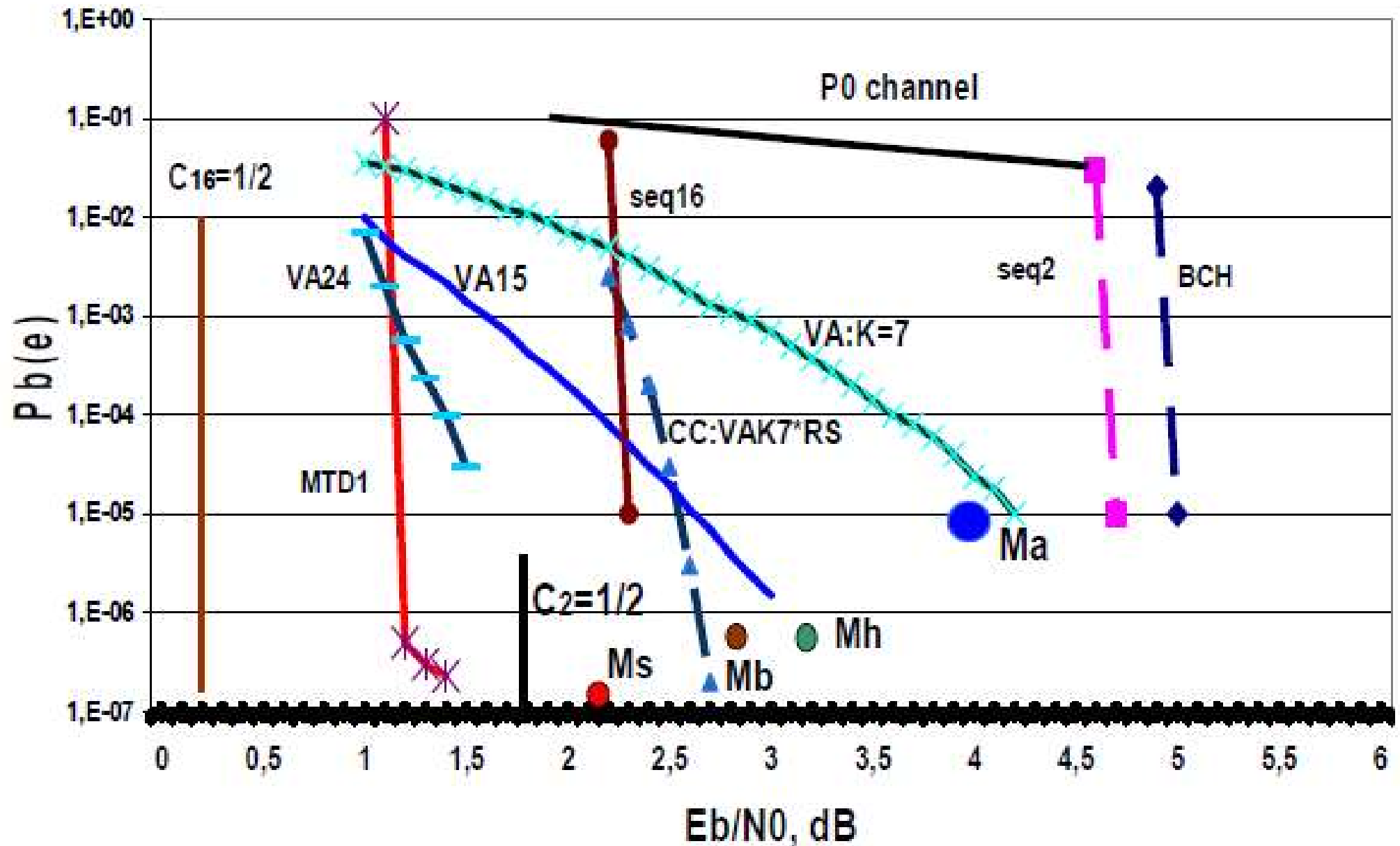
22.08.2022 г.

ИКИ РАН

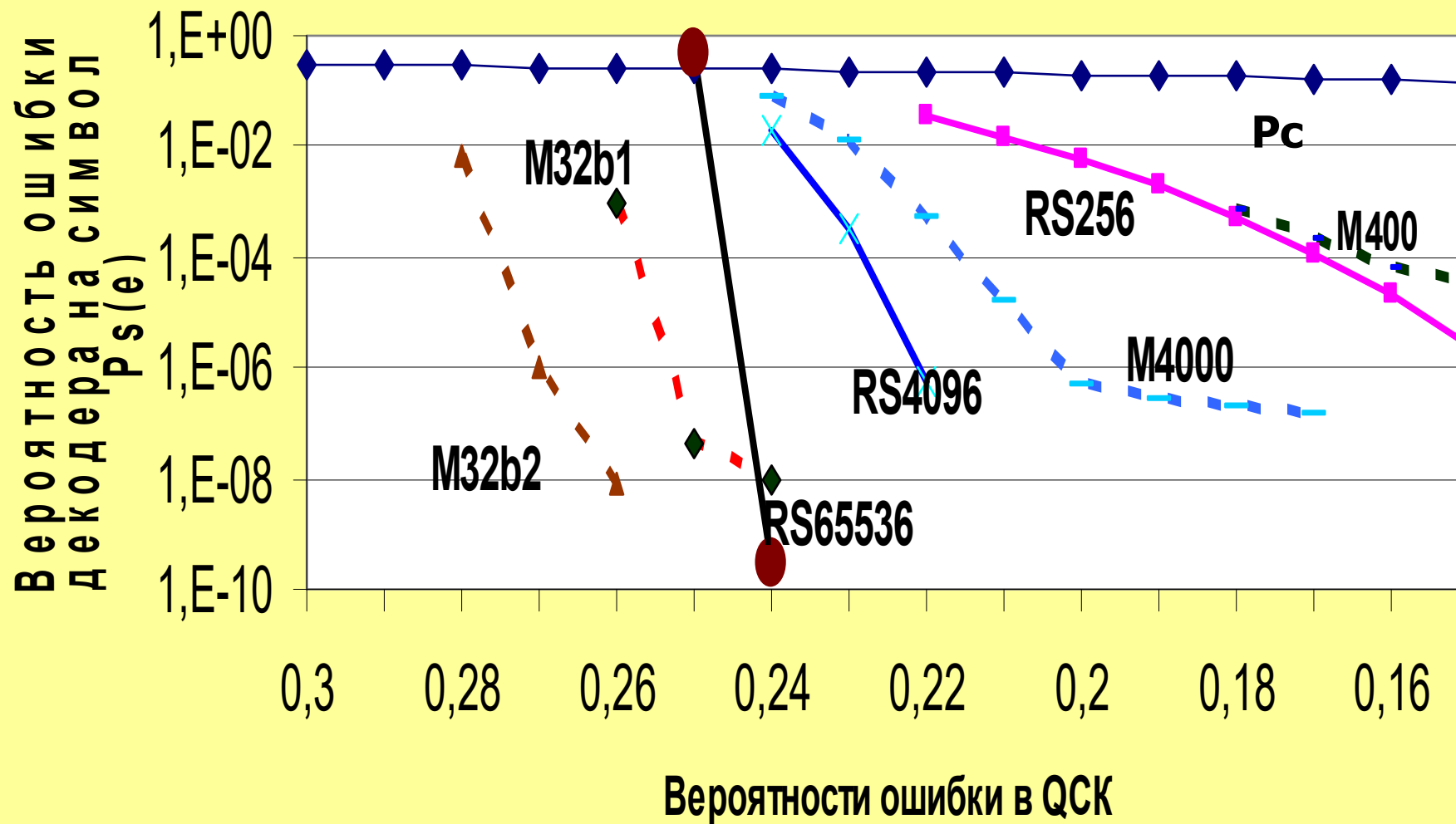


Гауссовский канал

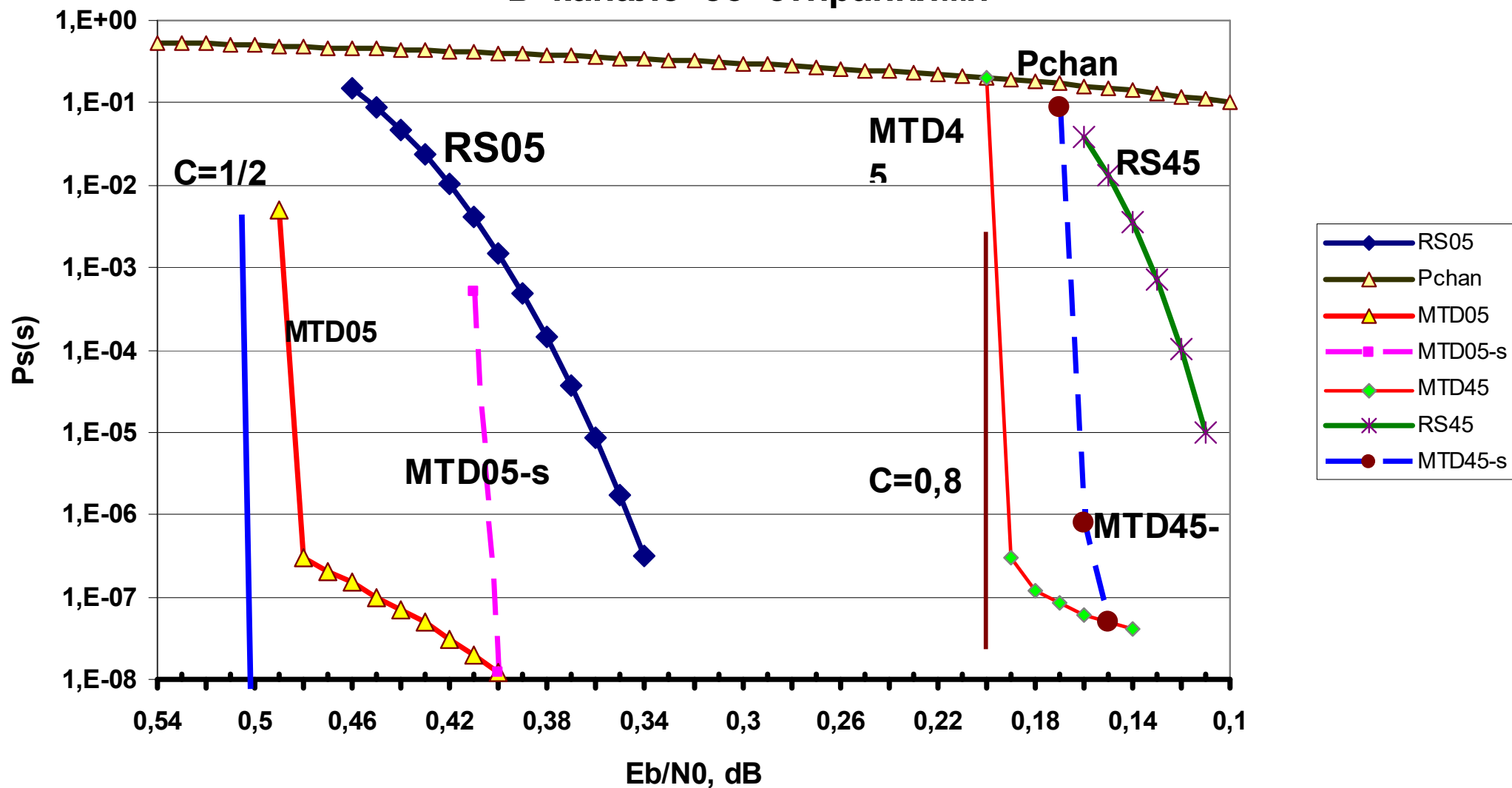
ОТ: приём эстафеты от алгебраической теории



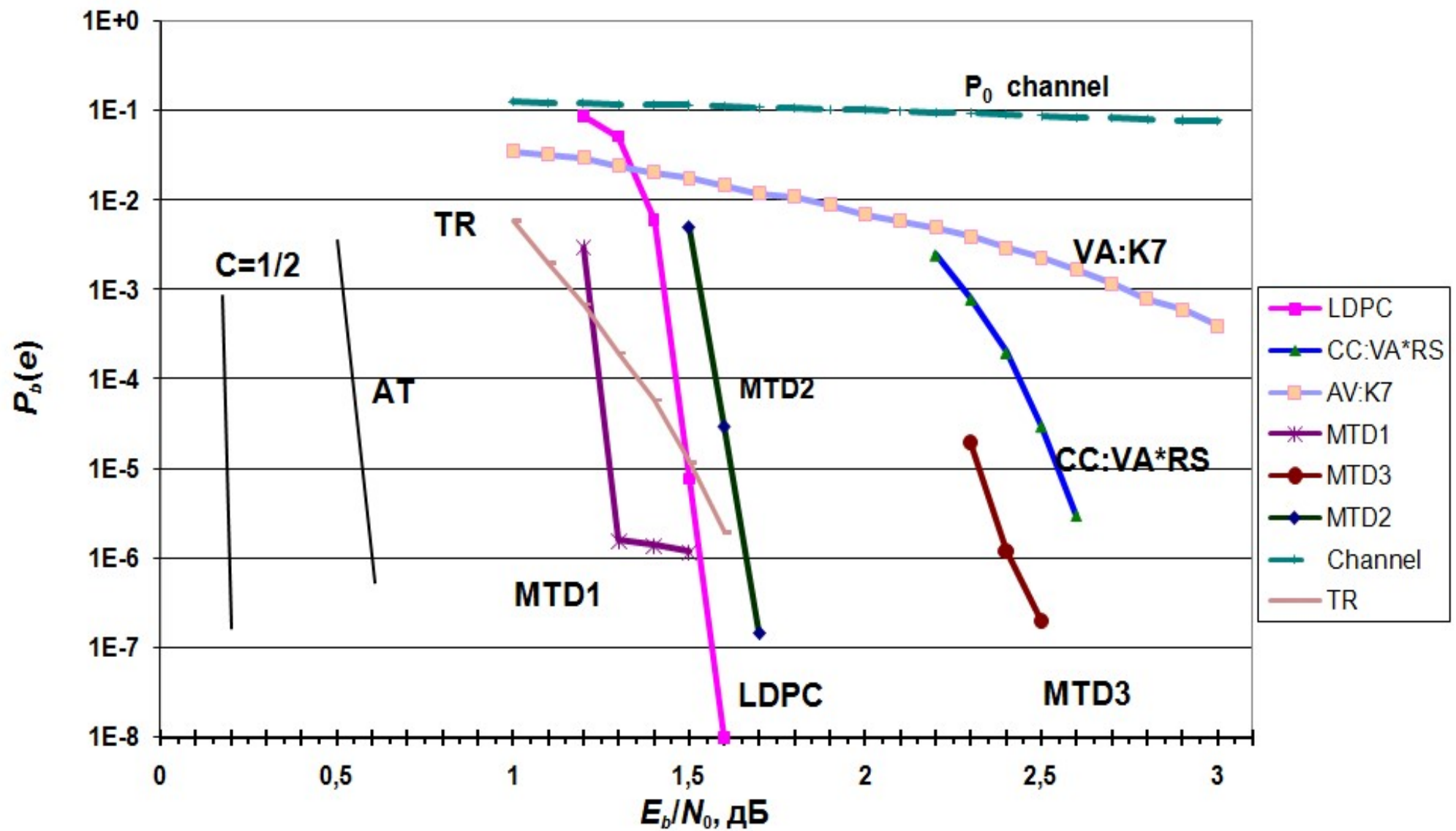
Характеристики недвоичных блоковых МПД и кодов РС с $R=1/2$



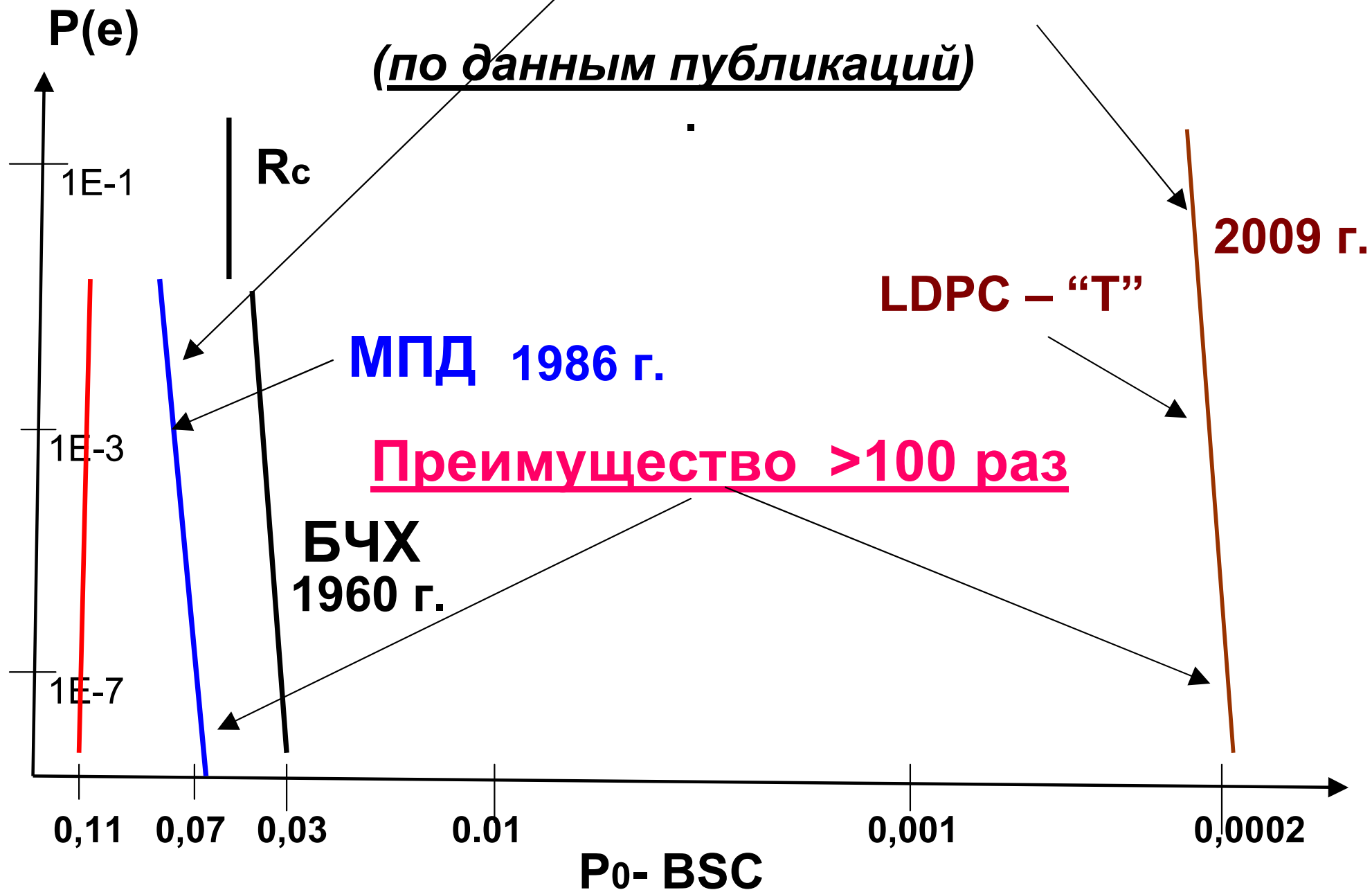
Характеристики МПД и РС при R=1/2 в канале со стираниями



Performance MTD,LDPC,turbo,VA,CC



Сравнение **ОТ** и «*теоретиков*»



Наши порталы

Our addresses

- www.decoders-zolotarev.ru
Страницы/pages «Наши книги/Books»

- www.mtdbest.ru

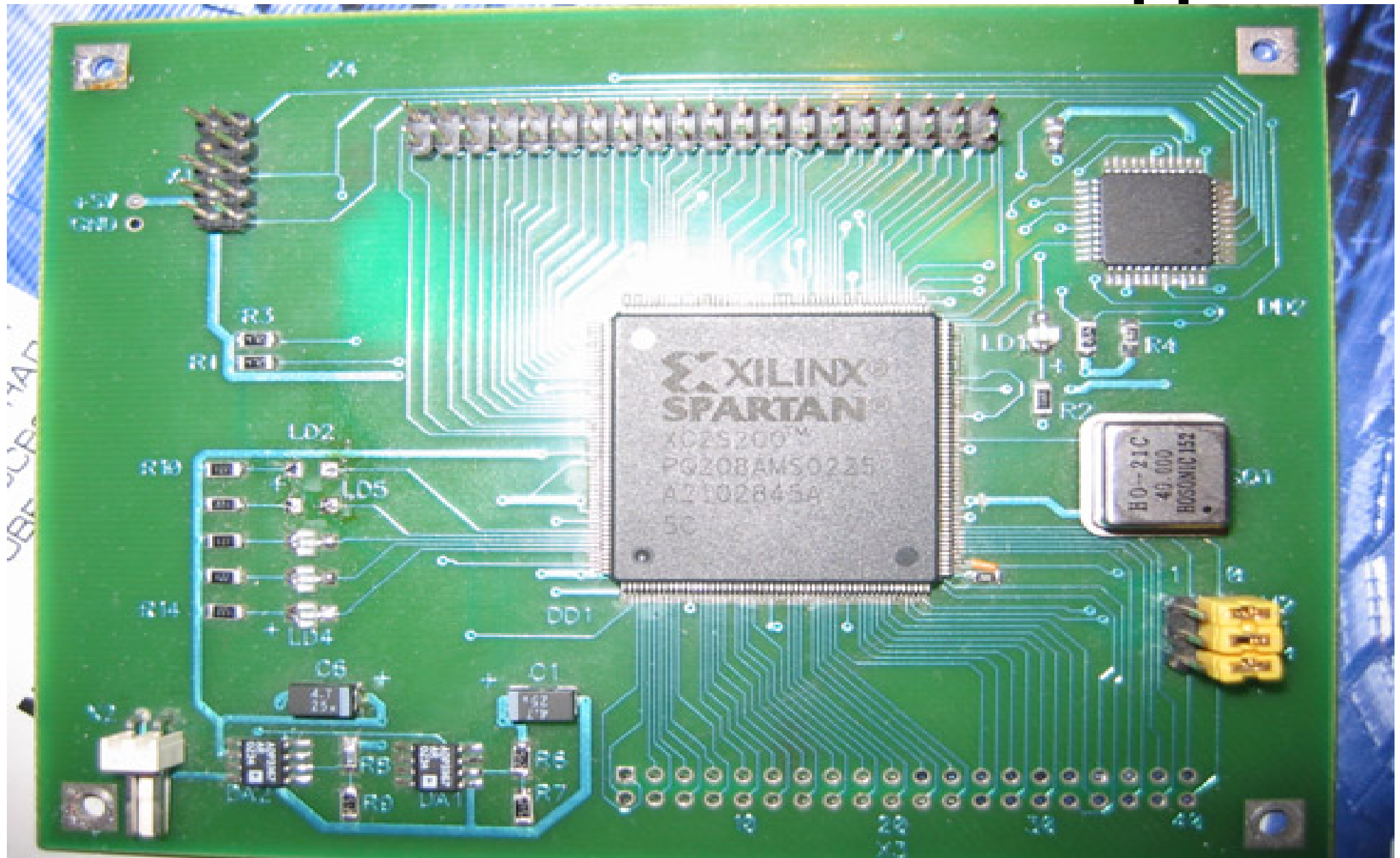
- страницы/pages «Наши книги/Books»

- www.mtdbest.iki.rssi.ru

- Теория завершена в 1985г.!

- Теперь – только технологии!

Чипсет МПД декодера 2003г. на ПЛИС Xilinx - НИИ Радио



Первый патент по оптимизации

Союз Советских
Социалистических
Республик



Государственный комитет
Совета Министров СССР
по делам изобретений
и открытий

О П И С А Н И Е ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(11) 492878

(61) Дополнительное к авт. свид-ву —

(22) Заявлено 31.07.72 (21) 1816498/18-24

с присоединением заявки № —

(51) М. Кл. G 06 f 11/08

(23) Приоритет —

(43) Опубликовано 25.11.75, Бюллетень № 43

(53) УДК 681.325.7
(088.8)

(45) Дата опубликования описания 11.03.76

(72) Автор
изобретения

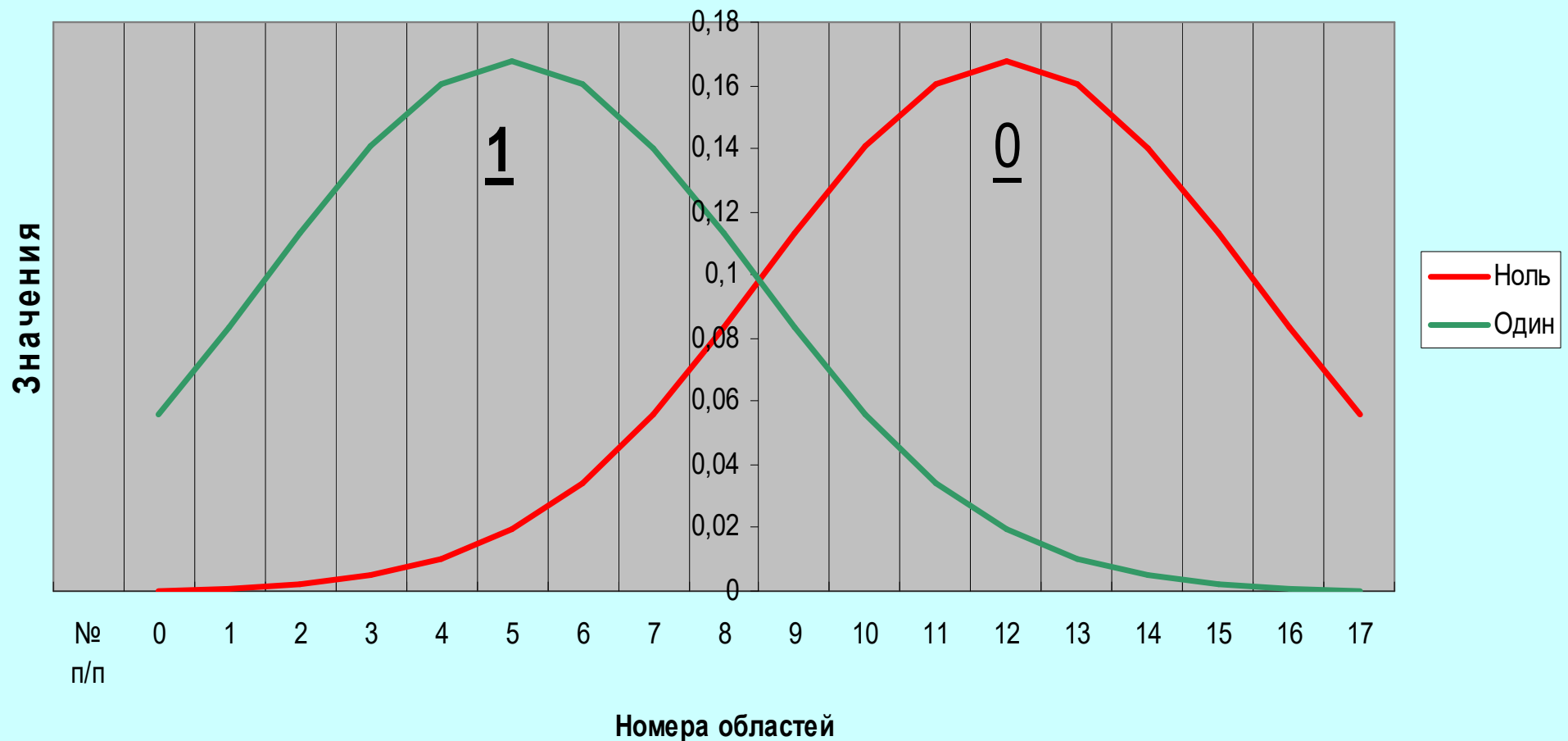
В. В. Золотарев

(71) Заявитель Московский ордена Трудового Красного Знамени физико-технический институт

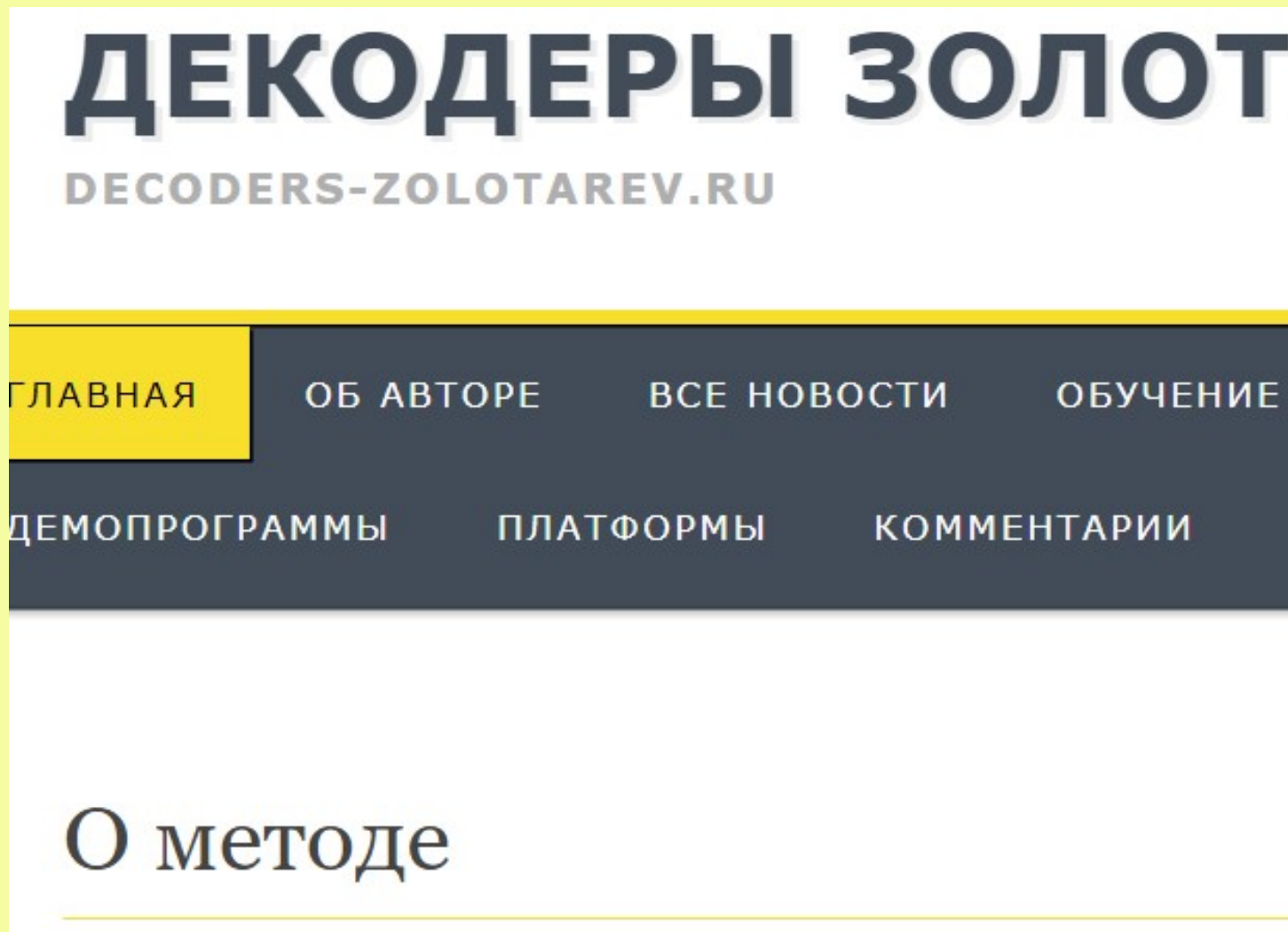
(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДЕКОДИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СВЕРТОЧНЫХ
КОДОВ

Организация работы мягкого модема в АБГШ канале

Distribution of voltage output of a binary signal in the modem
Распределение выходного напряжения двоичного сигнала в модеме



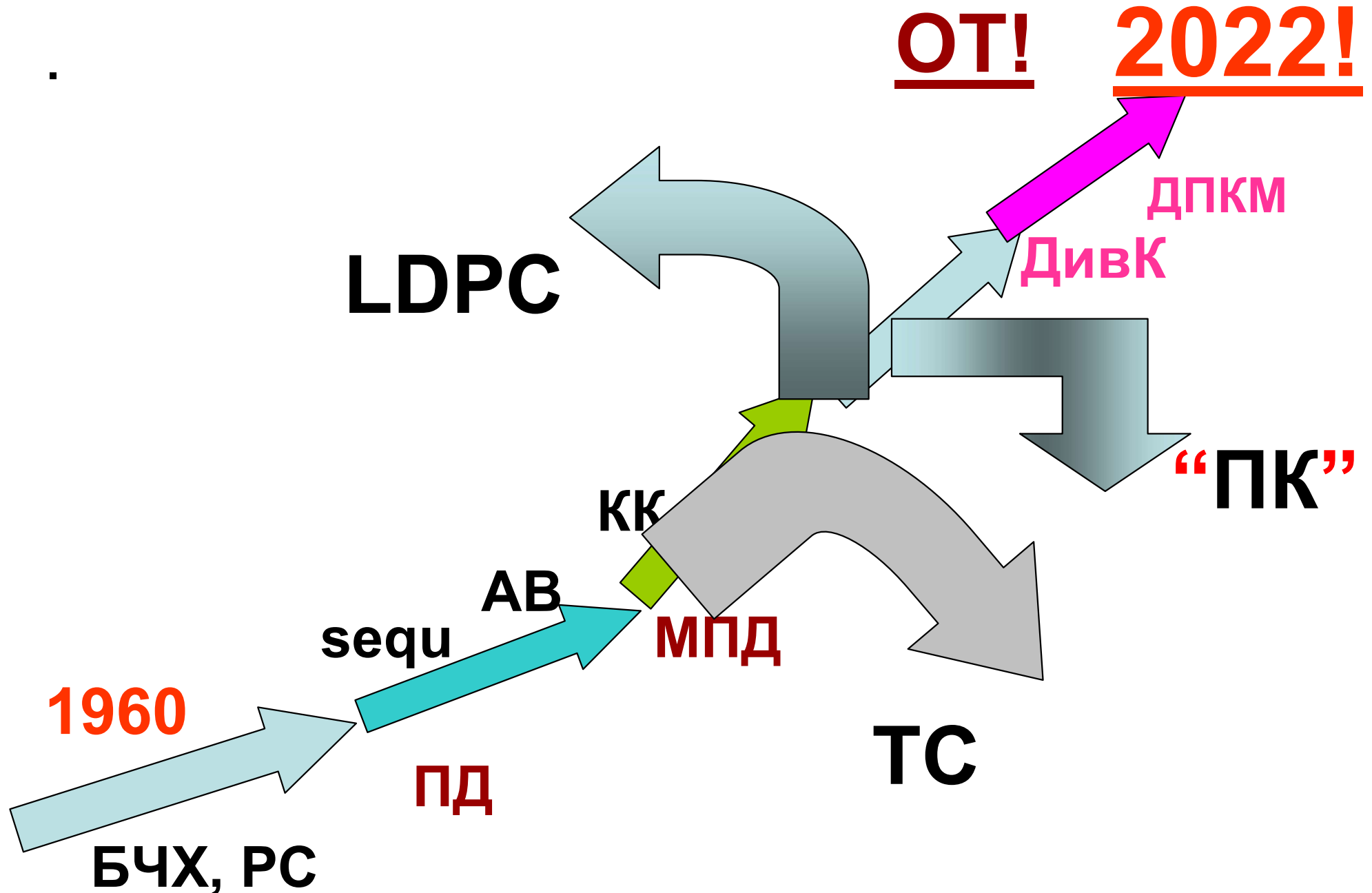
Наши порталы



Юбилейная книга МСЭ/ITU



Динамика развития теории кодирования



Общий результат - единственный

Вероятность ошибки порогового декодера
в первом символе кода $P_1(e)$ (1963г.).

Так как проверка неправильна с вероятностью
 $p_J = 0,5[1 - (1 - 2p_0)^J]$.

Тогда через ПФВ вида

$$A(x) = (p_0 x + q_0)(p_J x + q_J)^J = \sum_{m=0}^d a_m x^m$$

получаем вероятность ошибки
в первом символе

$$P_1(e) = \sum_{m = \lceil (d+1)/2 \rceil}^d a_m$$

И ЭТО ВСЁ!

Цифровая информатика успешно работает
только с достоверными, неискажёнными данными.

Простое обеспечение достоверности
дискретных данных при очень больших
уровнях шума крайне дорогих каналов связи -
крайне важная проблема всей нашей
цифровой информационной цивилизации .

Это сфера исследований
теории информации
и её сложнейшего раздела:

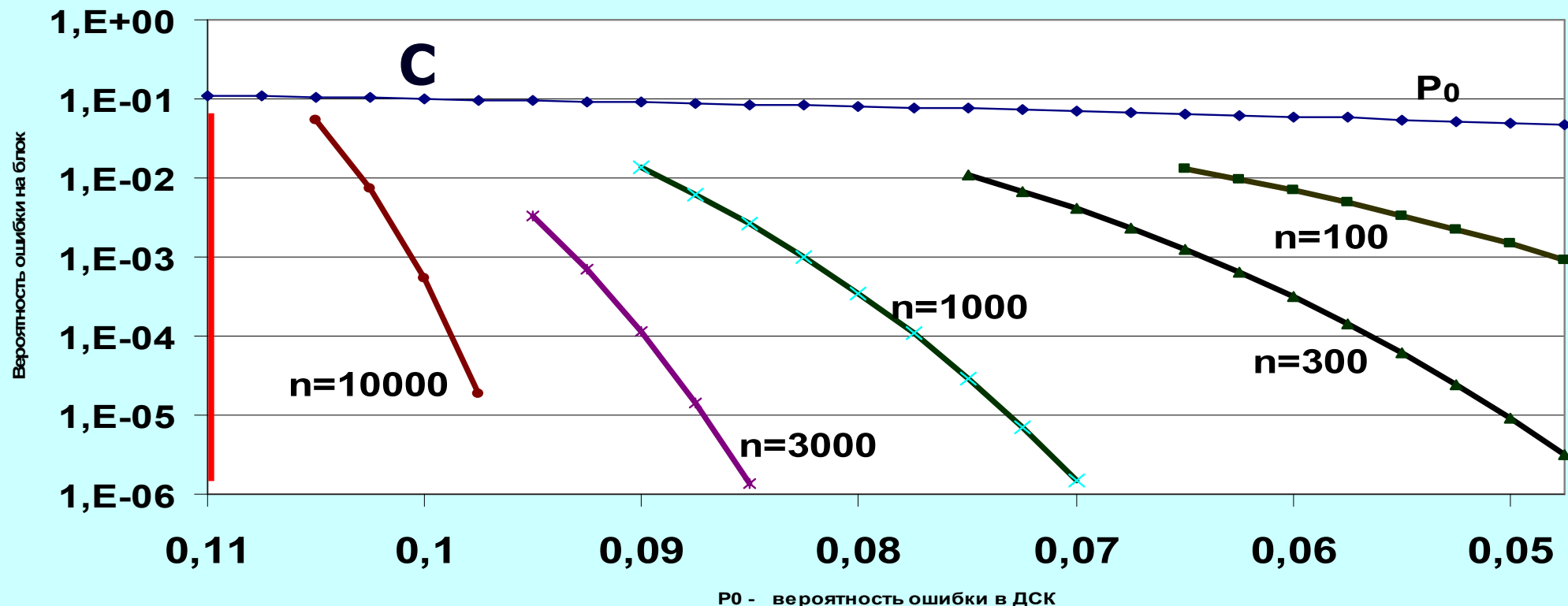
Теории помехоустойчивого
кодирования

Нижние оценки вероятностей ошибки декодирования блоковых кодов с $R=1/2$

Даже коды длины $n=1000$ неэффективны при вероятности ошибки в ДСК канале $P_0 > 0.08$. А теория-то утверждает, что можно успешно работать при $P_0 < 0.11$!!!

И это при 2^{500} вариантах!

Сложность - больше числа атомов во Вселенной!



Основное ограничение теории информации для кодирования (К.Шеннон)

- Всегда должно выполняться условие

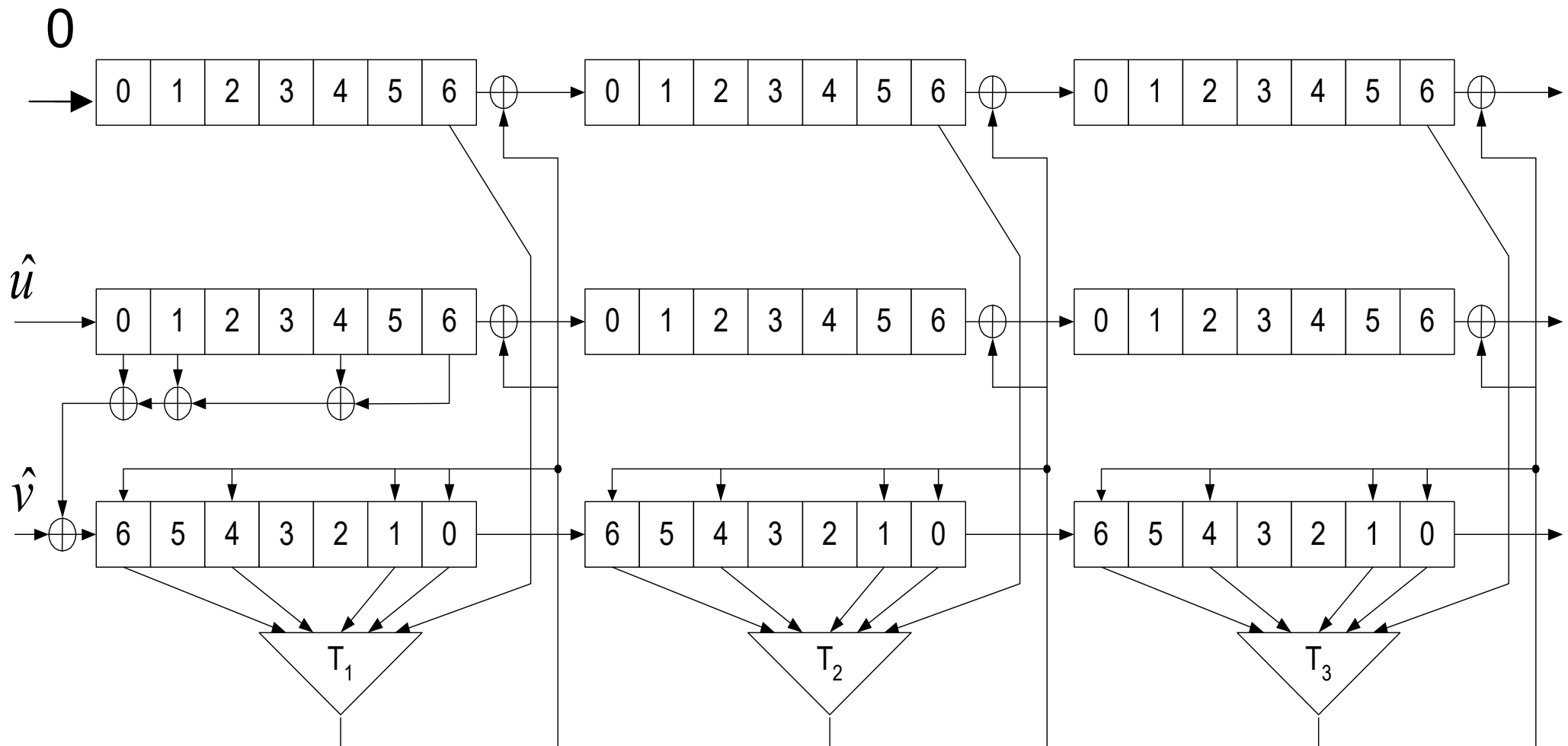
$$\underline{R < C !}$$

- - Кодовая скорость меньше пропускной способности канала
- Тогда возможна передача цифровой информации со сколь угодно малой вероятностью ошибки, если длина блока данных будет достаточно велика.
 - Именно это - начало теории помехоустойчивого кодирования

Какой исходный шаг создания ОТ?

- Постепенно искать всё более правдоподобные решения и запоминать только их последовательно по одному.
- Но даже после публикации полвека назад этой привлекательной идеи, уменьшающей сложность N таких декодеров до линейной, пропорциональной длине кодов n , т. е. сразу до минимально возможной, реализовала её лишь наша школа ОТ

Свёрточный многопороговый декодер для кода с $R=1/2$, $d=5$ и 3 итерациями



→ **Основа оптимизационной теории**

1.. Сложность - Основная теорема многопорогового декодирования

- При каждом изменении декодируемых символов кода решения МПД строго приближаются к принятому сообщению, т.е. правдоподобие решений МПД строго возрастает. (А. С. 1972 г.)
- Следствие. МПД может при линейной от длины кода сложности декодирования достичь наиболее вероятного решения, которое ранее требовало экспоненциальной от длины кода сложности. Но достигнет ли?
- Как добиться? Убрать главную причину – пакетирование решений!

2.. Достоверность - создана теория размножения ошибок (РО)

Эта задача была оставлена, брошена
в мире теории кодирования 60 лет назад.

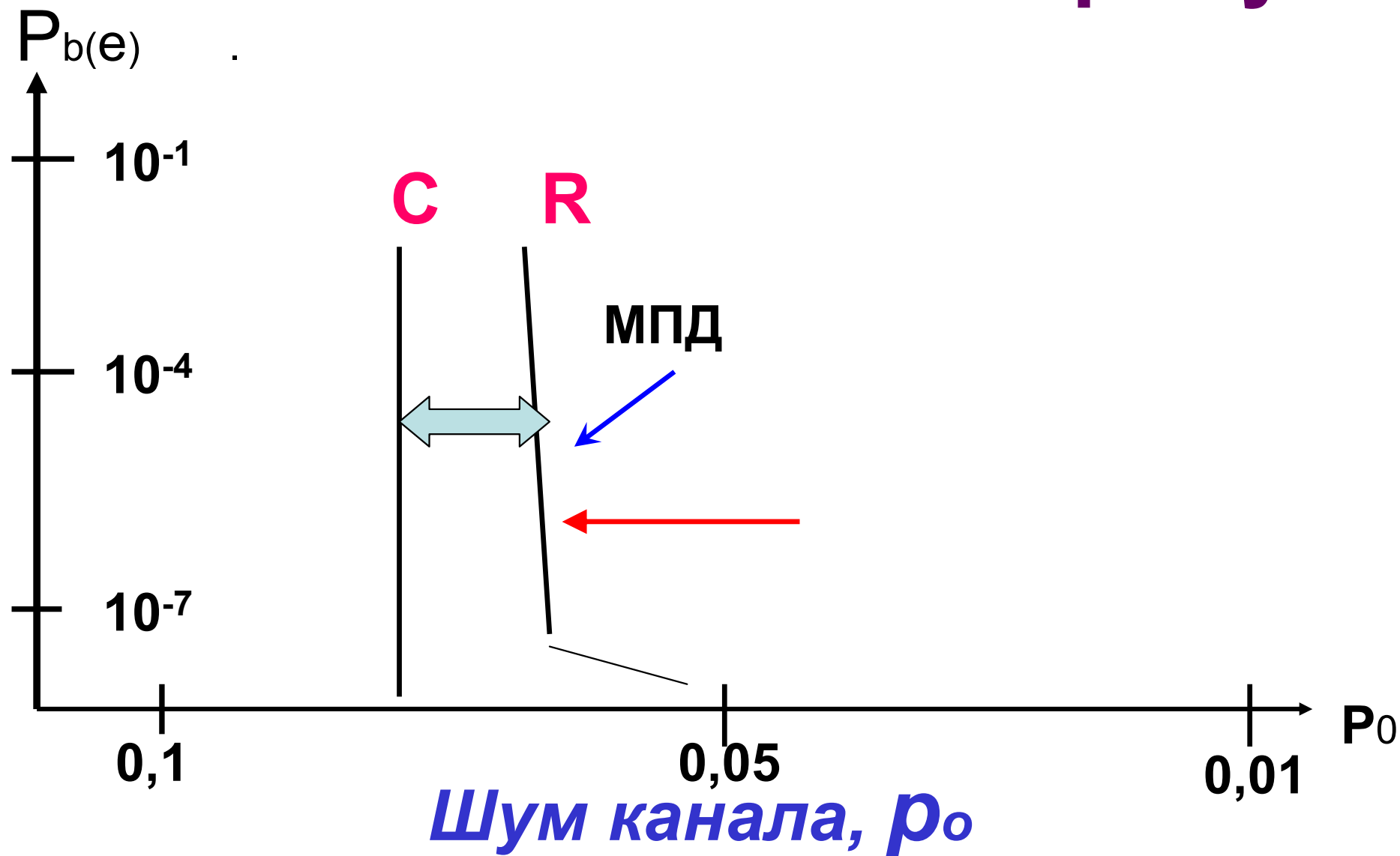
* * *

А мы нашли её решение, создали
полную теорию РО для разных класси-
ческих каналов и разработали методы
построения таких кодов, декодируемых
с теоретически **минимально возможной**
линейной по длине **n** сложностью,
НО, главное (!), оптимально, как и при
экспоненциально сложном
полном переборе.

3.. **Помехоустойчивость** – поиск глобальных экстремумов функционалов

- **НО!** – проблема: никакие задачи этого типа почти никогда не имеют решений, представленных в виде формул!
- Это – начало кризиса ТК 50 лет назад
- А мы давно поняли, что ТК – вовсе не математическая проблема.
- Мы 50 лет в ОТ развивали и теорию, и программное обеспечение (ПО) для задач поиска экстремумов ~20 типов!
- Теория ОТ - 1985г., комплекс ПО - 2001 г.

Стремление алгоритмов ОТ к границе Шеннона - методы поиска глобального экстремума



Что нужно от кодов для сетей связи?

**“Это - энергетический выигрыш!
- ЭВК”.**

**Коды создают эффект
увеличения энергии сигнала.**

**Это очень дорогой эффект -
В СОТНИ МИЛЛИОНОВ
и более долларов!**

Скопировано с портала РАН

09.09.2009 - «Независимая газета»

«Число, возведенное в абсолют»

Ю.Магаршак - профессор, исполнительный вице-президент Международного комитета интеллектуального сотрудничества

- ***Теория и эксперимент должны взаимно ускорять, контролировать и поддерживать друг друга***
У теоретиков кодирования они
в глубоком конфликте.

О тупиковом направлении движения классической теории кодирования

- «.....Теоретик, работающий в любой научной области, знает, что не все задачи можно решить аналитически

А для подавляющего большинства масштабных проблем

даже приближенные аналитические выражения найти не удаётся.

ИХ НИКОГДА НЕТ !

{[Портал РАН](#)}

-работы российской научной школы преодолели долговременный кризис теории кодирования и на основе научно-идеологической революции, сменившей значительную часть основных парадигм прежней теории кодирования, создали условия для её развития на совершенно новых основах. Можно сказать, что в теории кодирования сформировалась своя особая **"квантовая механика"**. Она трудна, но плодотворна. **Других путей пока нет!!!**.

- Член-корреспондент РАН Ю.Б. Зубарев
- Журнал «Наукоёмкие технологии» 2016 г.

Варианты стремления решений МПД к оптимальному

