

**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.**

УДК 621.391.15  
ББК 32.811.4  
О-62

А в т о р ы : Н.А. Кузнецов, В.В. Золотарёв, Ю.Б. Зубарев, Г.В. Овечкин,  
Р.Р. Назиров, С.В. Аверин .

О-62 Проблемы и открытия Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования.  
// Н.А. Кузнецов, В.В. Золотарёв, Ю.Б. Зубарев, Г.В. Овечкин, Р.Р. Назиров, С.В. Аверин.  
- М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 36 с.: ил. ISBN 978-5-9912-0854-3.

В популярной форме с использованием обширного иллюстративного материала кратко изложены теоретические и прикладные результаты современной теории помехоустойчивого кодирования как задачи поиска глобального экстремума функционала в дискретных пространствах.

Авторы предлагают простейшие, с линейной от длины кодов сложностью реализации алгоритмы декодирования для всех классов каналов с независимыми искажениями символов. При этом вероятности ошибки декодирования близки к тем наилучшим возможным уровням достоверности, которые обычно обеспечивают только оптимальные переборные методы коррекции ошибок в шумящих каналах. Кроме того, крайне важно, что высокие характеристики алгоритмов, разрабатываемых Оптимизационной Теорией, могут быть достигнуты даже в непосредственной близости от границы Шеннона.

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

Научно-популярное издание

© Авторы, 2020, ИКИ РАН.

Подписано в печать 30.12.2019. Формат 60×90/8. Уч. изд. л. 2,5. Цифровое издание. Изд. № 180854.  
ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

## К читателям

Российские читатели, сфера интересов которых лежит в цифровой обработке сигналов, получают этот очень содержательный и информативный подарок, своеобразный комикс о крайне проблемной области информатики – прикладной теории помехоустойчивого кодирования. Особо ценным является то, что этот комикс создан участниками российской научной школы Оптимизационной Теории (ОТ), разрабатывающей, причём, крайне успешно, именно главные вопросы создания алгоритмов декодирования в шумящих каналах в условиях максимально допустимого уровня шума, т. е. непосредственно вблизи границы Шеннона.

Особенностью выбранного стиля изложения такой, безусловно, исключительно сложной темы, которой за последние 70 лет занимались буквально миллионы специалистов во всех технологически развитых странах, является как бы совершенно безальтернативный формат представления крайне трудного материала, вроде бы не предполагающий наличия других мнений. Однако на самом деле авторы повествуют о тех проблемах прикладной теории кодирования, которые действительно в течение долгого времени не решались, упорно замалчивались или крайне неправильно оценивались. К ним относятся сложность, реализуемость и даже главные итоговые критерии качества алгоритмов декодирования – вероятности ошибки на выходе. И здесь очень важно, что в конце этого буклета приведены многие монографии, обзорные публикации и справочники, которые уже при их очень детальном изучении действительно строго аргументированно подтверждают все те результаты и соотношения в прикладных вопросах теории кодирования, которые вполне просто и понятно описывают авторы буклета.

Существенно, что очень многие вопросы, которые являются почему-то трудными и даже крайне проблемными для многих разработчиков сетей, давно решены научной школой ОТ. Это, например, произвольно высокая достоверность хранения цифровых данных, предельно малая энергетика передачи данных в шумящих каналах в окрестностях границы Шеннона или исключительно простое оптимальное декодирование (ОД!) блочных кодов, что для прежней уже совсем неклассической теории так и осталось нерешённой очень сложной задачей. А занимающиеся интернетом вещей специалисты, конечно, с удивлением узнают, что методы ОТ, в частности, многопороговые декодеры (МПД) потратят вообще на несколько порядков (!) меньшую энергию автономных источников питания просто потому, что они во столько же раз более быстрые, чем другие эквивалентные по достоверности методы, да к тому же ещё и обеспечивают почти всегда оптимальное, наиболее достоверное решение. И это так же важно, как и работа МПД декодеров или блочных алгоритмов Витерби (БВ), запатентованных школой ОТ, вблизи пропускной способности канала, т. е. при минимально возможной мощности сигнала передатчика, что также сильно экономит заряд батарей. Таких полезнейших свойств декодеров, предлагаемых в ОТ, очень много и все они оказываются очень кстати для широкой сферы приложений кодов.

Необходимо также напомнить нашим читателям и о том, что проблемы переориентации специалистов с прежних методов на технологии ОТ вообще не существует. МПД методы представляют собой простейшие общеизвестные мажоритарные схемы, процессы коррекции в которых очень понятны, но повторяются несколько раз для особых кодов, которые тоже легко строятся. И при этом декодеры МПД настолько просты, что даже при повторных итерациях коррекции они всё равно на несколько порядков (!) проще и быстрее прочих. А их предельные характеристики определяются по биномиальным или близким к ним распределениям, с которыми знаком каждый инженер. Но вот вероятности ошибки любых конкретных алгоритмов декодирования, и не только в ОТ (!), могут быть получены лишь при полноценном моделировании. Это школа ОТ поняла 50 лет назад, что вместе с другими оригинальнейшими результатами и позволило ей стать мировым лидером в разработках алгоритмов декодирования. Теория ОТ очень тесно взаимодействует с тонким изощрённым экспериментальным моделированием, что придаёт им обоим очень мощное синергетическое ускорение.

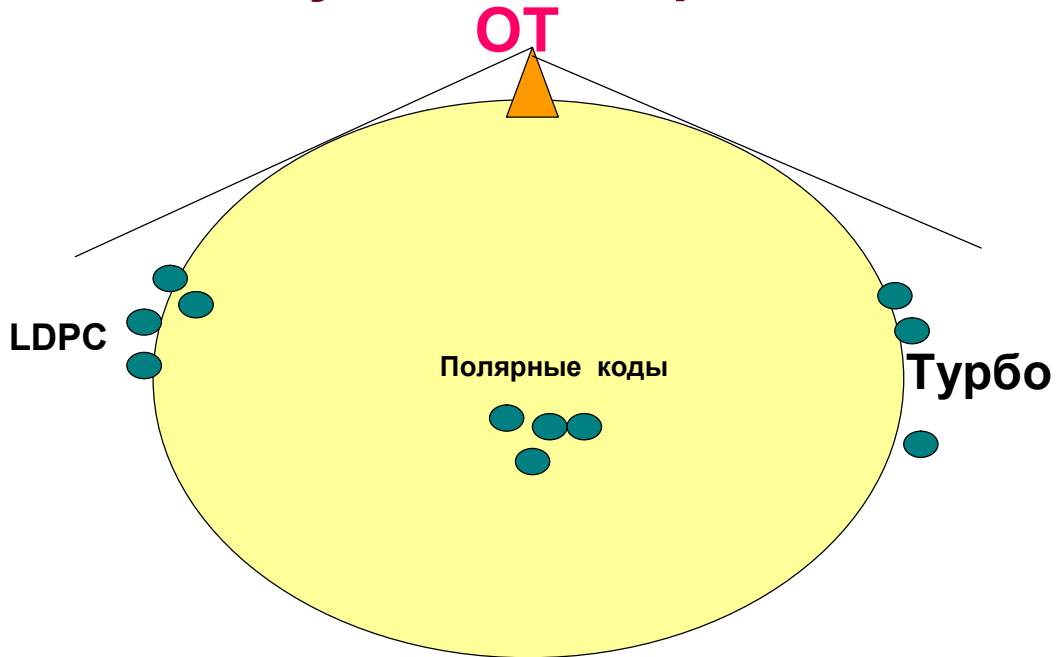
И наконец, укажем, что «квантовая механика» теории информации, как научная школа ОТ называет свою теорию, крайне компактна, что подчёркивает её совершенство. Она содержит очень небольшое число формул, но включает все необходимые математические выражения при описании возможностей ОТ для всех классических каналов, рассматриваемых в теории кодирования. Это сильно облегчает чтение всех монографий по ОТ, которые являются строгими, логичными и понятными системно-философскими трактатами в области прикладной теории информации.

Совершенно грандиозна и роль, несомненно, самых больших в мире сетевых порталов школы ОТ. Там можно найти сотни книг и обзоров по ОТ, компьютерные мультфильмы по кодам, а также программные платформы, которые после ознакомления с данным буклетом можно практически сразу использовать для изучения ОТ, МПД и различных типов АВ, а также для разнообразных исследований в этой интереснейшей сфере, в которой российская научная школа ОТ обогнала весь мир на несколько десятилетий именно благодаря созданным ею уникальным программным комплексам для исследований и разработок в прикладной теории кодирования.

Предлагаемый российским читателям буклет по кодам фактически излагает историю развития главной ветви прикладной теории кодирования в РФ по версии научной школы ОТ. Он весьма неожиданно совпал по форме со ставшими популярными у читателей и издателей комиксами, что придаёт ей особое полезное своеобразие. Уверен, что этот буклет послужит ускорению разработок в области помехоустойчивого кодирования и подготовке нового поколения специалистов по технологиям кодирования, которые обеспечат сохранение мирового лидерства отечественной школы ОТ и её дальнейшего быстрого развития на базе самых современных научных теорий и уникальных инновационных компьютерных технологий.

## Введение в новую теорию кодирования.

### Судьба лидеров



Мы одинокие лидеры. Все остальные - за горизонтом!

Рис.1.

Наша книжка с картинками появилась как результат интенсивной работы в течение многих десятилетий научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования над проблемой простого и эффективного декодирования вблизи пропускной способности канала, которую поставил 70 лет назад великий Клод Шеннон.

#### И мы решили эту грандиозную задачу!

Иногда нам сопутствовала достаточно быстрая удача. Но обычно мы шли к своей цели весьма медленно и с большими остановками. Причиной этого были наша немногочисленность и огромная сложность задачи, за которую мы взялись. Кроме того, нам нельзя было делать ошибок. Так сложились наши дела, что нам бы этого не простили.

Первая наша картинка показывает, что "на вершине мира теории кодирования" мы, увы, одиноки. Мы очень сожалеем об отсутствии коллег, с которыми можно обсуждать результаты ОТ, которая очень далеко впереди всех.

Мы предлагаем вам ознакомиться с нашей ОТ в формате, ну, скажем так, комиксов, т. е. очень кратко. Но минимум ссылок на серьёзные работы мы дадим в конце. И вот их уже нужно читать вдумчиво и, как мы уже убедились из опыта общения с коллегами, даже по несколько раз. Причина этого просто в том, что наши развороты в исследованиях, направленных на решение проблемы Шеннона, были просты и логичны, но часто очень необычны.

Так что читайте, удивляйтесь, сомневайтесь, соглашайтесь (или нет!) и присоединяйтесь к исследованиям в ОТ. Будьте реальными лидерами науки!

## Наши порталы по ОТ и МПД

[www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru)

[www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru)

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

**Россия**

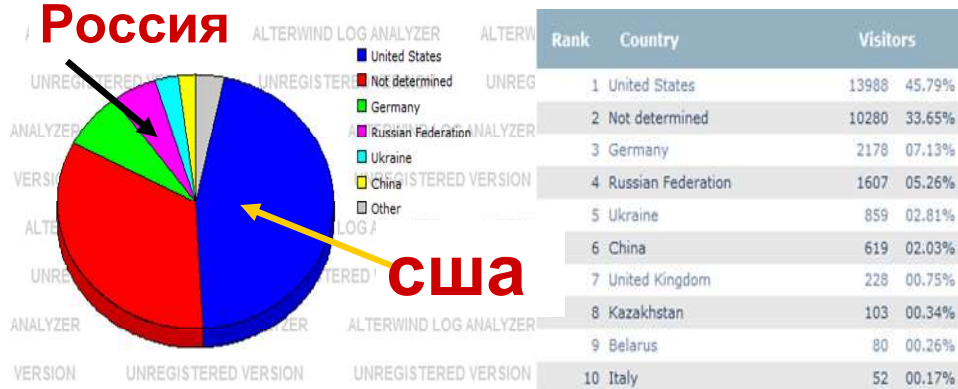


Рис.2.

**Ключевым рисунком** к правильному восприятию ситуации с развитием теории кодирования в нашей стране и в мире **является эта диаграмма**. Она показывает, что **весь мир**, пусть и не абсолютно всё, но уже **очень многое понимает вОТ**. Однако эта постановка задачи оказалась совсем чуждой российской как бы "классической" группе специалистов по теории кодирования.

Мы с глубоким сожалением констатируем, что наше противоречие с основной массой авторов, которые писали разные статьи по теории кодирования, состоит просто в том, что ещё в начале 70-х годов мы поняли, что **теория кодирования - вовсе не математическая задача!** Её проблемы решаются только в союзе теории и высокопрофессионального моделирования, в частности, на языке C++. Никакие **вероятности ошибки любых алгоритмов** при больших уровнях шума **не могут быть получены аналитически**. Это - принципиальный момент! **Оценки достоверности - задача моделирования**.

Развитие нашей теории всегда направлялось, в основном, именно результатами тонких экспериментов. А моделирование, в свою очередь, показывало те области, на которых должна сосредоточить своё внимание теория, ориентированная на изощрённые, но всегда простейшие вычисления. Их **синергетическое взаимное ускорение** и решило **все проблемы теории кодирования**.

Да, теория ОТ быстрее осваивается в зарубежье, чем на родине, в России, как это видно из диаграммы. А "классика", так и не ставшая в России реально таковой, уже несколько десятилетий как сошла со сцены. **Её успехи - нуль!**

Мир увидел новизну ОТ и осваивает её. Мы верим, что и **наше** молодое поколение, идущее в теорию кодирования, найдёт баланс между теорией и экспериментом. Уверены, что так и будет, хотя лозунг начала века о том, что **"программирование - вторая грамотность"**, увы, давно не в почёте. **Жаль!**





Рис.3

Тем нашим читателям, которые уже готовы почитать что-нибудь про многопороговые декодеры (МПД), мы рады сообщить, что **в 2018 году издана наша новая монография**, которую вы видите на рис.3. Она содержит все необходимые сведения, чтобы понять идею и детали устройства таких декодеров. Всестороннее интерактивное взаимодействие этой монографии (как и предыдущих!) с нашими сетевыми порталами, которые представлены на рис.2, содержащими в совокупности более 600 блоков информационно-справочных и научно-методических данных, делает **реальный объём книги примерно в 5÷10 раз большим** её физического размера. Это позволяет считать, что студенты, инженеры и научные сотрудники России имеют все реальные возможности разобраться в сути и в многочисленных нюансах Оптимизационной Теории. А **множества программных платформ** на их учебных страницах для разработок различных версий МПД алгоритмов позволяют быстро начать самостоятельные исследования в области ОТ.

Научный редактор монографии **академик РАН Н.А. Кузнецов** в течение очень длительного времени возглавлял ведущий академический институт, являющийся головным по тематике помехоустойчивого кодирования - ИППИ РАН. Он полагает, что "некоторые из результатов автора **являются открытиями в теории кодирования**." А в своей вступительной статье к нашей монографии он написал: "...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**."

## Открытия Оптимизационной Теории

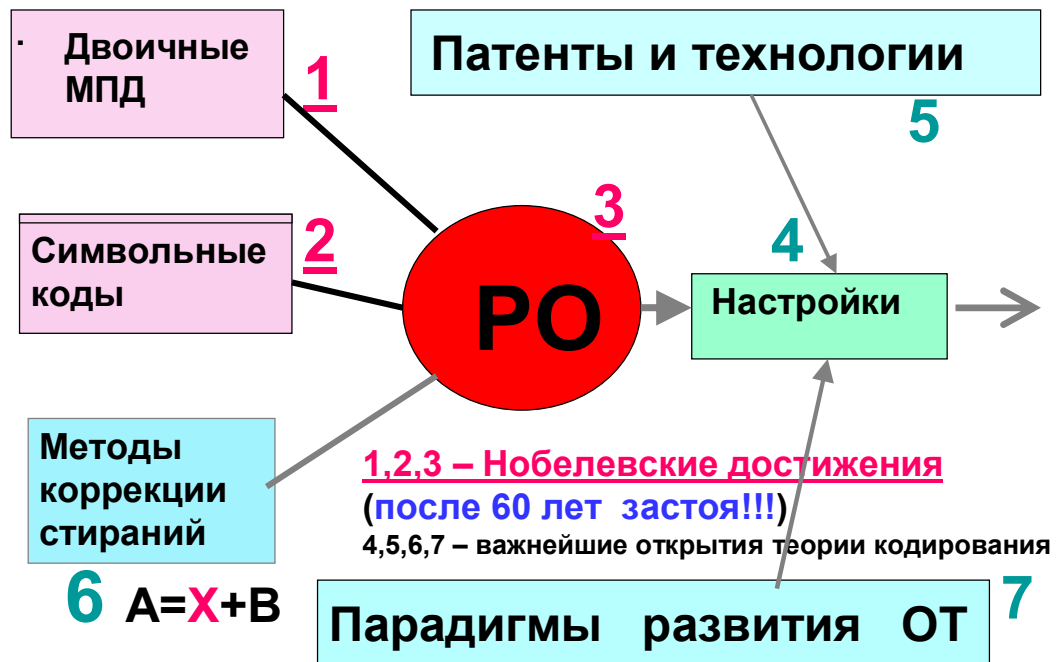


Рис.4.

Мы предлагаем вам твёрдо понять, что та прежняя теория кодирования, которая до последнего времени могла называться «классической», завершила свое существование. Причина этого в том, что она за последние десятилетия не предъявила в доказательном формате ни одного конкретного алгоритма декодирования. В самом деле, кроме результатов научной школы ОТ, нигде вообще нельзя найти какой-либо конкретный декодер, который был бы опубликован в виде статьи с достаточно большим объёмом описывающего его цифрового материала и при этом был бы доступен всем в виде программы, предпочтительнее на языке C++, которая была бы моделью работы этого декодера в канале с достаточно большим уровнем шума. Только так можно оценить все возможности алгоритмов декодирования по единому жёсткому критерию «достоверность-помехоустойчивость-сложность».

Поэтому для формирования у читателей понимания того, что мы предлагаем действительно реальную полную простую и технологичную теорию, т.е. чтобы заинтересовать наших российских «новых Ньютонов» в освоении ОТ, на **рис.4** показана структурная схема ОТ. Она состоит из нескольких больших кластеров (совокупностей типичных параметров кодов, декодеров и каналов), три из которых мы и некоторые наши коллеги полагают высокими достижениями нобелевского уровня, а ещё четыре – открытиями в ОТ.

Отметим также, что ОТ крайне компактна, изложена как полный системно-философский трактат, но содержит все необходимые формулы для разработок МПД декодеров. Давайте посмотрим, что может наша ОТ в плане создания простых декодеров для всех традиционных моделей каналов связи.



# 1. Почему ОТ - о самых лучших алгоритмах

А) - простейшие кодеры.

**Кодировать проще!!!**  
**Пример кодера для свёрточного**  
**кода с кодовой скоростью  $R=1/2$  и  $d=5$**

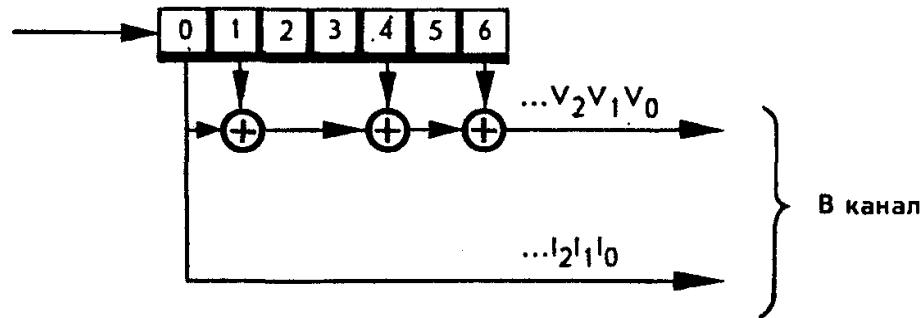
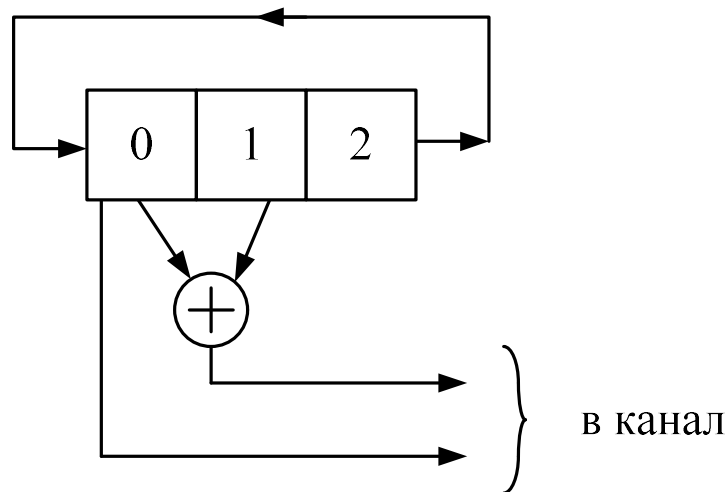


Рис.4,б. Кодер сверточного кода

4



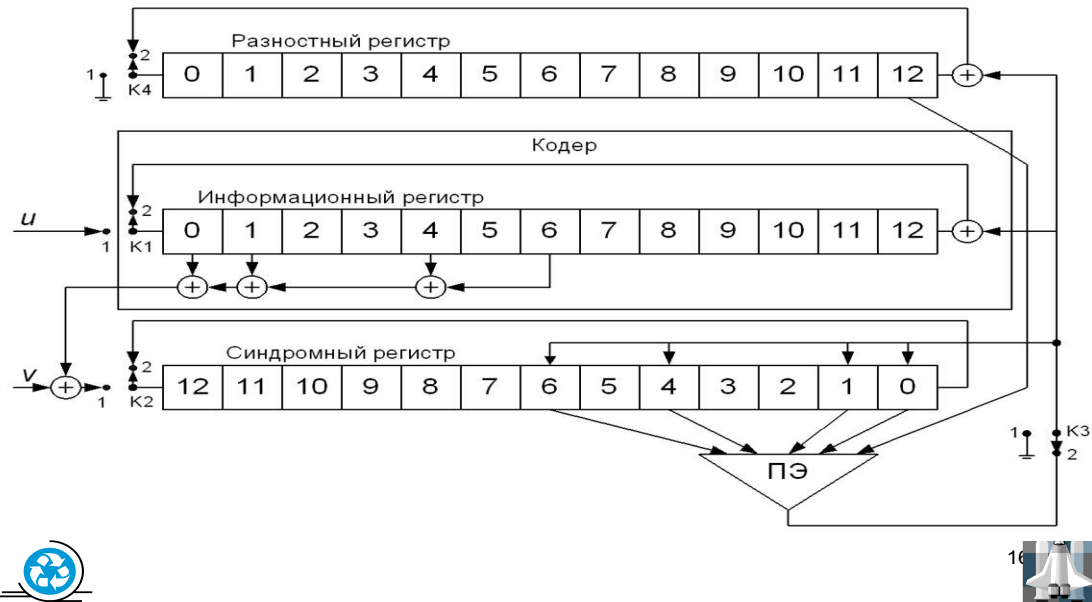
Кодер блочного кода

В самом деле, **сложность  $N$  кодеров** мажоритарно декодируемых кодов - **минимально возможная**:  $N \sim n$ , где  $n$  – длина применяемых кодов, что видно и из представленных слайдов. **Проще уже ничего и не придумать**. Не забудьте при этом, что у многих кодов, которые почему-то **(и абсолютно зря!)** считаются эффективными, имеются кодеры со сложностью порядка  $N \sim n \cdot \ln(n)$ . На самом деле, если кодеры сложные, то и декодеры также практически всегда сложнее того, что реально возможно даже при сопоставимой эффективности.

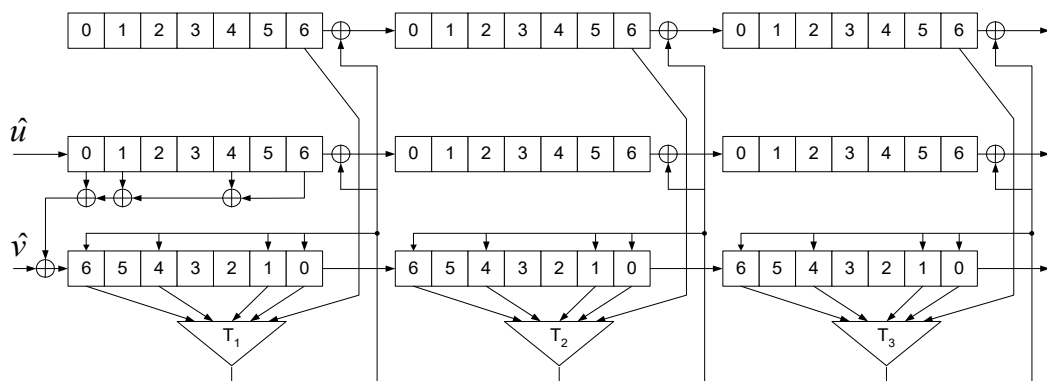
Так что мы нашли первую причину **преимущества мажоритарных алгоритмов**. Оно вполне полезное, но пока **не самое важное**.

### Б) – простейшие декодеры

### Блочный многопороговый декодер для кода с $R=1/2$ , $d=5$ и $n$ итерациями



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



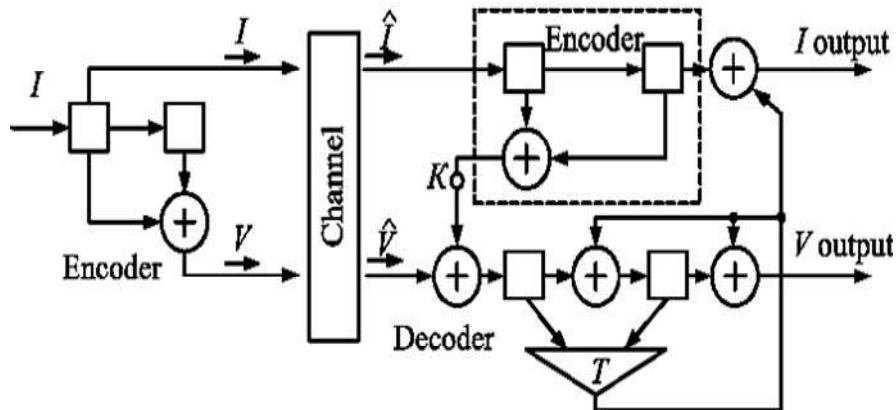
→ **Основа оптимизационной теории**

**Рис. XX1.**

А вот **простые мажоритарные декодеры (МД)** – тоже факт. Все прочие декодеры «простейшего типа» никто не сможет даже изобразить на бумаге так, чтобы было понятно. И ещё: все прочие декодеры работают с *действительными числами*, а наши мажоритарные – *только складывают небольшие целые числа*. И формальная **сложность мажоритарных декодеров** (число простейших операций сложения небольших целых чисел)  $N \sim n$ , т. е. тоже минимальная. **У других – много больше.** Это – уже более **важная причина**.

Самое главное: МД – могут быть оптимальными декодерами (ОД)

## Революционная интерпретация смысла синдрома линейного кода



13

Рис.А.

Странный заголовок - совсем не из точных наук, да? Вспомним, что ОД измеряет расстояние принятого вектора до всех возможных потенциальных решений и выбирает из этого экспоненциально по  $n$  растущего списка то решение, которое самое близкое к этому принятому вектору. Так работает алгоритм Витерби (АВ) – спасение теории кодирования на почти полвека, хотя он экспоненциально сложен: все свои решения ему надо помнить.

Но схема системы кодирования на рис.А совсем не похожа на схему АВ. Тут – МД свёрточного кода. И вот он-то и стал отправной точкой ОТ. Почему? Да потому, что никто ни разу за последние 60 лет жизни в теории кодирования не заметил следующего: АВ измеряет расстояния от принятого вектора до возможных решений. Так вот этот МД – тоже! Но! Тут на основе вектора синдрома пороговый элемент в МД измеряет расстояние только по проверочным символам кода. А надо ещё и по информационным, как у АВ. Ну, ладно. А зачем? Да затем, что если измерять полное расстояние, то (если повезёт!) МД начнёт лучше исправлять ошибки, ведь у АВ это отлично получается.

И оказалось, что да! В декодер на рис. **XX1** добавлен ещё один регистр, в котором отмечаются решения порогового элемента (ПЭ) в декодере МД. И тут вдруг (!) выяснилось, что на каждом шаге при изменении контролируемых символов такой МД, который назван многопороговым декодером (МПД), строго приближается к решению ОД. А это уже суперреволюция! Потому что сложность МПД всего лишь линейная от длины кода, но он заменяет переборный экспоненциально сложный ОД. И так больше никто не может!

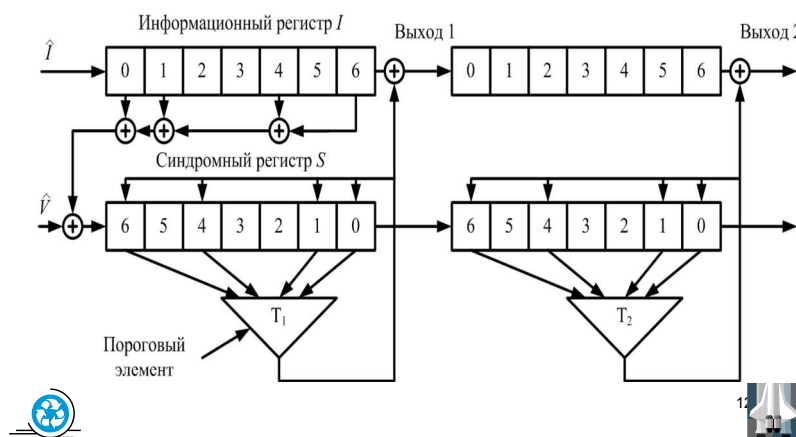
## Основная теорема многопорогового декодирования

- При каждом изменении декодируемых символов кода решения МПД строго приближаются к принятому сообщению, **т.е. правдоподобие решений МПД строго возрастает.**
- **Следствие-цель**  
МПД **может** при линейной от длины кода сложности декодирования достичь наиболее правдоподобного решения, которое обычно требует экспоненциальной от длины кода сложности.

15

На этом слайде формально представлена основа ОТ, определившая много лет назад её перспективы. Но в следствии тут же указано, что декодер всего лишь **может** «прибежать» в ОД, **но совсем не обязан**. Более того, МПД – это просто повторное декодирование! И всё? Так ведь **повторное декодирование малоэффективно**, что действительно выяснилось более 50 лет назад в десятках различных довольно масштабных исследований. А тут агрессивно хвалят МПД, пусть даже и крайне простой. С чего бы это? Он работает? Но почему? Что главное поменялось в идеологии декодирования, если **МПД – панацея?** Ниже для справки приведён слайд с обычной схемой повторного декодирования. Он реально мало отличается от МПД. **И в чём же дело?**

**Пороговое повторное декодирование свёрточного кода**  
с  $R=1/2$ ,  $d=5$  и  $n_A=14$ . **Это – слабо!**



Ну, давайте сравним последний слайд с МПД декодером. У него нет разностного регистра, где содержатся решения пороговых элементов (ПЭ). Так вот для него нельзя доказать Основную Теорему. А что же тогда ещё?

Вторая причина оказалась вообще за пределами схем декодеров.  
ВОТ ОНА!

## Размножение ошибок

- Решена задача оценки размножения ошибок (РО) при мажоритарном декодировании
- Созданы методы оценки РО для различных типов кодов
- Созданы комплексы ПО для построения кодов с малым уровнем эффекта РО.

22

Миллиарды известных кодов для мажоритарного декодирования на самом деле таковы, что после первого же ПЭ ошибки идут пакетами, а МД и МПД обычно проектируются, конечно же, для случая независимых ошибок, например, двоичного симметричного канала (ДСК). Значит, пакет им «не по зубам». Но мы давно заметили, что если построить МД код, который имеет такое же кодовое расстояние  $d$ , например,  $d=11$ , как и самый короткий из возможных, но особый, который будет раз в  $5 \div 10$  длиннее, то повторное декодирование для них будет вполне успешным. Более того, иногда и третья попытка коррекции будет весьма полезной. Характеристики таких кодов описаны во всех наших монографиях. Так вот для них-то разностный регистр, который есть в МПД, очень полезен, т. к. в этом варианте уже начинает снова “играть” Основная Теорема для МПД. И тогда надо искать условия, когда можно уже не мечтать, а надеяться на реальность достижения решений ОД на базе МПД. Как? На основе теории размножения ошибок (РО)!

Мы сформулировали проблему, решили её и, что самое важное, нашли на основе РО такие новые мажоритарно декодируемые коды, разумеется, особые и довольно длинные, которые позволяют обычно достигать решений ОД даже при очень большом уровне шума, буквально вблизи границы Шеннона.

Теория РО не далась за 50 лет ни в каком виде ни одному научному коллективу в мире. А мы поняли, что «золотой ключик» от оптимального декодирования при большом уровне шума спрятан в теории РО, которая и позволила нам затем найти необходимые для этого коды. Теория РО и её прикладные результаты после открытия МПД декодеров оказалась вторым достижением несомненно высшего нобелевского уровня. Новые коды работают и у границы Шеннона. Но пока обсуждались только каналы типа ДСК.

Однако ДСК – только первый пробный камень при сравнении кодов. А весь мир любит сопоставлять алгоритмы декодирования для гауссовского двоичного канала, когда применяют квантование двоичного потока в приёмнике, а декодер полностью использует возможности такого канала. И дополнительный энергетический выигрыш  $\sim 2$  дБ от кодирования (ЭВК) в этом случае всегда очень полезен и важен. Это и стало причиной переноса конкурса кодов и декодеров на гауссовские каналы.

Ну, и как там дела у МПД? Отлично! Как и АВ, МПД для гауссовских каналов также получает эти 2 дБ дополнительного ЭВК, гарантируемые теорией. Так более того, мы запатентовали **блоковый АВ (БАВ)**!

## Блоковый алгоритм Витерби



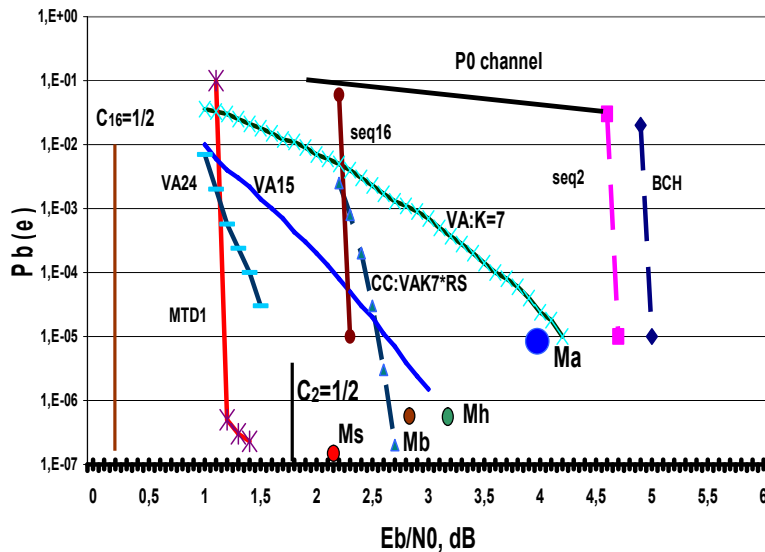
Напоминаем, что самый главный метод декодирования, который спасал всю теорию кодирования около 40 лет – алгоритм Витерби для двоичных свёрточных кодов, буквально все-все очень долго хотели преобразовать так, чтобы он был бы применим и к блоковым кодам. Как известно, сложность АВ - экспонента от длины  $K$  кодирующего регистра. И в течение последних 30 лет игры в ОД для блоковых кодов, отчасти на базе АВ, позволили почти что роте учёных защитить в Москве и Питере докторские (!) диссертации, в которых очень “творчески” настроенные индивидуумы создали ОД для блоковых кодов, но со сложностью декодера, которая пропорциональна экспоненте от  $2K$ , т.е. катастрофически огромна. А у нас есть патент на блоковый АВ (БАВ) с такой же сложностью, как и у свёрточного АВ, т.е. с экспонентой от  $K$ , но без «двойки» при  $K$ , как у наших доморощенных «изобретателей».

Но двойная экспонента – много ли это? В NASA ещё в том тысячелетии сделали АВ для свёрточного кода с  $K=15$ . Так вот если по тому же ТЗ от NASA создать блоковый АВ, его сложность при реализации по методам «новых докторов» будет в  $\sim 16'000$  больше сложности нашего запатентованного БАВ! Так что все версии АВ и МПД образуют крайне эффективный и очень технологичный пул методов, лучше которых придумать уже ничего нельзя!



## А что всё-таки могут реальные МПД ?

ОТ: приём эстафеты от алгебраической теории



31

Несомненно, что каждый график с характеристиками конкретных алгоритмов заслуживает многостраничного анализа, а иногда и нескольких параграфов в монографии. Поэтому детальный и, главное, сравнительный анализ мы проводить не будем. Наша цель – дать общий, но, подчеркнём, краткий и правильный обзор всей ситуации в теории и технологиях кодирования. А глубокий анализ – это в монографиях, обзорах и статьях по ОТ. Читайте!

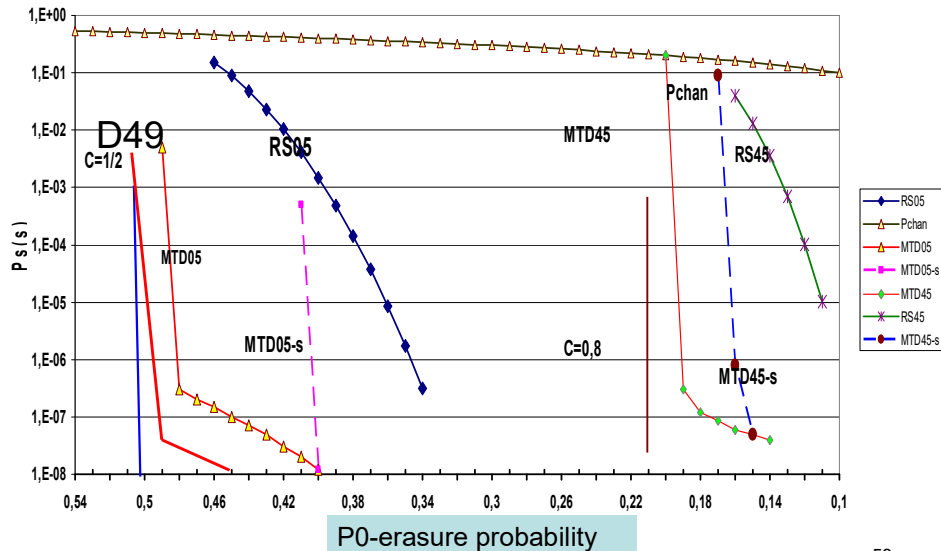
Вот и представленный слайд рассмотрим в предлагаемом стиле. На нём в традиционном формате изображены возможности методов МПД и АВ, границы Шеннона в ДСК и гауссовском каналах, а также результаты для последовательных алгоритмов и кодов БЧХ. Их итог: «старые» методы заметно слабее и медленнее МПД декодеров, у которых сложность минимально возможная теоретически, линейная. Более того, точки «М» с индексами, также относящиеся к МПД декодерам, получены много десятилетий назад, а теперь возможности ОТ гораздо шире. Например, точка Ма – результат МПД для ДСК с 11 итерациями, опубликованный после больших мытарств ещё в очень далеком 1986 году, соответствует уровню ОД при весьма малом отношении  $E_b/N_0$ .

Так вот в те годы, как и в последующем тысячелетии, такой грандиозный факт про МПД наши «теоретики» умудрились не заметить и вообще не стали анализировать столь экстремально впечатляющий для того времени результат. А в итоге-то они оказались к настоящему моменту в тех же 80-х годах того ещё тысячелетия. Ни тогда, ни сейчас у них не было и нет способов анализа этой ситуации. Они так и не поняли, что для эффективных методов декодирования при большом уровне шума нет и никогда не будет аналитических методов точного определения вероятности ошибки алгоритмов коррекции ошибок. Это возможно сделать, причём очень быстро, но только на программных моделях. А они этого так до сих пор и не могут. Вот это и стало полным концом «классики» ещё три десятилетия назад!

## Методы исправления стираний

Интуитивно ясно, что исправлять случайно неопределённые символы в стирающих каналах гораздо проще, чем ошибки в неизвестных местах. Однако это не помогает «классическим» методам заметно упростить их.

### Характеристики МПД и кодов РС в каналах со стираниями



53

Этот слайд, если сослаться на него кратко, показывает прекрасные возможности МПД и в стирающих каналах при вероятности стирания в канале, лишь на 2% меньшей, чем при равенстве кодовой скорости  $R$  и пропускной способности канала  $C$ . Это недоступный уровень близости  $R$  и  $C$  для других методов. А сложность МПД вообще ничтожна: на каждой итерации решается простейшее уравнение для трёх маленьких целых чисел  $A=X+V$ . И всё!

Сложность же иных методов восстановления стёртых символов много более, чем  $N \sim n$ . Это позволило некоторым авторам написать, что сложность МПД нередко в сотни раз меньше, а скорость – больше, чем у других методов, которые ещё и дальше от границы Шеннона, чем рабочая область МПД.

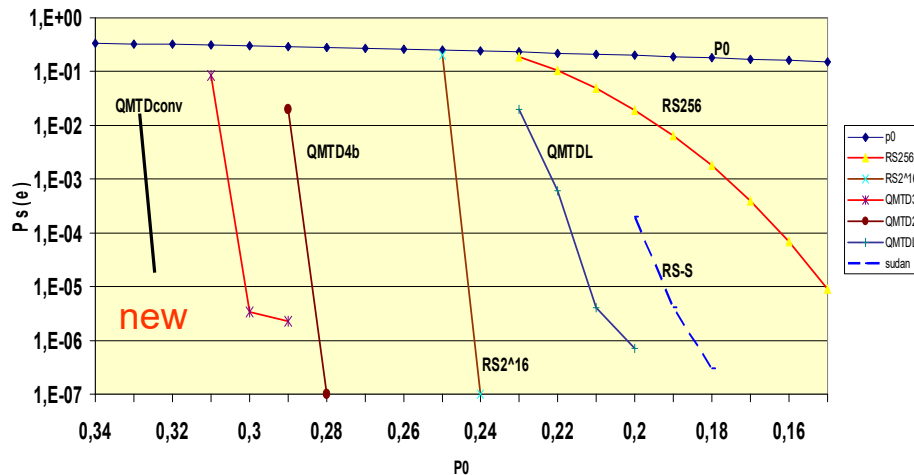
Кстати, весьма забавно, что до сих ещё пор печатаются статьи, в которых с использованием  $30 \div 50$  и более сложных выражений, и ещё до 15 ссылок на других авторов выводятся формулы для различных алгоритмов восстановления стираний. Но проверить их невозможно! И всегда оказывается, что «те» методы работают при вероятности стираний в канале в  $2 \div 5$  раз меньших, чем у МПД, которые представлены на слайде. Но зато такие авторы всегда крайне счастливы оттого, что их формулы получены как бы аналитически. И они забывают, что их декодеры сложнее, чем МПД, а качество восстановления символов многократно более слабое. Снова напомним: любые аналитические методы оценки достоверности методов вблизи пропускной способности каналов неработоспособны. Достоверности - только на моделях!

Заметим после этого, что для МПД вероятность невозстановления символа, как и для ОД, всегда оценивается как  $P_s(s) = p_0^d$ , где  $d$ , конечно, минимальное кодовое расстояние. Просто? Да, очень! И это - всё!

## Фантастика, которой скоро будет 40 лет!

О чем это мы? Да о кодах Рида-Соломона (РС). Но это только для заправки. Конечно, мы снова про МПД. Но - про особые!

## Performance QMTD and codes RS



52

После реального полного триумфа МПД для ДСК в 1978 году, т.е. нашего двоичного первого декодера (жаль, что его вообще тогда не заметили, но это - их проблема!) мы очень хотели придумать что-то вместо кодов РС. Они везде применяются и, значит, очень нужны. Но они короткие и поэтому малоэффективны. Придумали их 60 лет назад и после этого у теоретиков заметного прогресса в недвоичных кодах не было вообще. Правда, таких кодов много, но почти все они похожи на коды РС. А применяются они потому, что многие типы данных - байтовые (цифровая музыка, фото и т.д.), которые тоже надо беречь, хранить и восстанавливать, да и передавать, конечно.

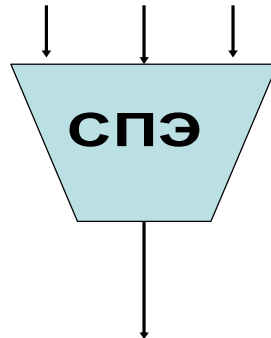
Однако, повторим, короткий код – абсолютно всегда слабый код. А длинных байтовых кодов РС вообще не бывает. Что делать?

Ситуация уже давно в этом «уголке» теории кодирования была тяжёлой ещё и потому, что для недвоичных кодов принципиально нельзя создать АВ. Это и неудивительно. Общая оценка сложности АВ для произвольного алфавита  $q$  (когда, например, для байтового кода РС длины  $n=q-1=255$  символов и  $q=256$ ) равна  $N=q^K$ , что уже для  $K>7$  даёт величину  $N>10^{15}$ . Кто же будет делать такой декодер, если ещё и его характеристики будут весьма и весьма слабыми, т.к.  $K$  тут очень невелико! (См. выше графики РС и QМПД).

Последнее обстоятельство особенно сильно мобилизовало нас на поиск схемы недвоичного МПД. Но после открытия нами двоичных МПД поиск недвоичного растянулся на 8 лет. Так мы его всё же придумали! И получили на него 4 патента. А тем самым и завершили создание всех основ для ОТ!

## Тайна символьных МПД

### Недвоичный символьный пороговый элемент



124

Да, действительно, МПД для особых недвоичных кодов, которые мы далее будем называть символьными, чтобы чётко их отделять от прочих недвоичных кодов, завершили последние этапы создания новой «квантовой механики» в теории информации, нашей ОТ. Теперь оказались разработанными методы МПД декодирования уже вообще для всех каналов, рассматривавшихся ранее в классической теории кодирования и нашей научной школой.

Но всё же что было сделано? Те 8 лет, которые мы искали символьные МПД, были потрачены на поиск подходящих недвоичных кодов и на правила работы создаваемых для них символьных МПД декодеров. Структура кодов оказалась такой же, как и у двоичных. А вот символьный ПЭ, представленный на слайде, должен был быть особым и искать решение как о месте ошибки, так и о её значении в диапазоне  $1 \div q$ , чего в принципе не требовалось в двоичном ПЭ для МПД. И такое правило символьного МПД было найдено. Мы запатентовали СПЭ как 4 способа реализации, в том числе и при линейной от  $d$  сложности. Правда, «теоретики» тут же сказали нам, что это пустая работа, т. к. недвоичные коды очень похожи на двоичные. Но это был третий нобелевский феноменальный результат. (См. страницу выше)

Напомним снова, что для недвоичных кодов 60 лет назад придумали только коды РС, весьма малоэффективные. А хороших недвоичных АВ, как мы выяснили только что, построить тоже не удастся никогда. И это - всё!

В итоге символьный МПД, как и двоичный, имеет линейную сложность от длины кода и так же сходится к ОД! И при полном отсутствии результатов для недвоичных кодов за 60 лет развития теории кодирования сейчас проблемы декодирования недвоичных кодов оказались «вдруг» вообще полностью решенными в ОТ. Символьный МПД полностью описан ещё в 1984 году. Но «теоретики» за эти 35 лет его, однако, так и «не увидели».

Это - причина уже вообще полного финала «классики». И теперь везде лидирует только ОТ. Т.е. не лидирует. Других-то методов просто нет!

## ОТ оценили почти все!

### Наши медали



Именно полная теория символьных кодов, завершившая создание обновлённой Вселенной в теории кодирования, стала одной из важнейших причин вручения нашей научной школе **Золотой медали Евросоюза (ЕС) «За исключительные достижения / For exceptional achievements»**, которой награждаются активно работающие учёные за действительно выдающиеся исследования. На первых слайдах нашего альбома читатели уже могли убедиться в том, что мировое научно-техническое сообщество давно внимательно следит за нашей работой. **Золотая медаль - зримое подтверждение высокой оценки** наших результатов зарубежными высокими научными структурами.

**Премия Правительства РФ** —это **вторая медаль** нашей научной школы.

А как же наши, с позволения сказать, коллеги? Несколько попыток публикации наших, конечно, безусловно *высочайших достижений в теории кодирования* в одном журнале, который, несомненно, должен быть уважаемым, эти *«теоретики» дружно отвергли* на основании того, что в наших статьях *не было ничего нового*. А вот не было и всё тут! Ну, там, якобы, не было также большого обзора других результатов и очень ещё много чего сверх того.

Последовавшие затем наши попытки рассказать «коллегам», что же такое **исключительно ценное мы сделали**, на семинаре тамошних «теоретиков» заканчивались **весьма странно**. Например, требовали рассказать о зарубежных результатах. **А наши методы с линейной сложностью и оптимальным декодированием** их вообще не заинтересовали. Особо горькую печаль мы ощутили на последнем семинаре про символьные коды, где «теоретики» опять (!) **в который раз не смогли опровергнуть нашу Основную Теорему** и заявили нам, что мы, несомненно, излагаем какую-то зарубежную статью, которую **мы и сами-то не поняли**, но не хотим в этом признаваться. Вот тогда прежняя «теория» и закончилась. Уж тут - навсегда! **Теперь есть только ОТ!**



## Одна из важнейших наград школы ОТ за изобретательство



На этом слайде показана Золотая медаль и диплом Международного салона изобретений за патент на высокоскоростную версию МПД декодера, которая может использоваться практически во всех вариантах организации процессов декодирования цифровых потоков. Показанный далее на с.24 декодер на ПЛИС также использовал этот отмеченный медалью способ, что **особо подчёркивает его технологическую ценность.**

Отметим в связи с этим, что обязательное патентование основных технических решений в области методов декодирования всегда является важным официальным подтверждением оригинальности и полезности разрабатываемых идей. Не забывайте подавать аргументированные заявки на патенты. Это всегда подчеркнёт ценность заложенных в них идей и для ваших коллег. А это всегда весьма полезно.

И одновременно, что очень важно, всегда помните, что нужно не только избегать крупных ошибок в науке, но и не повторять других уже пройденных путей. Повторение – вовсе не наука! Это другое. [Консультируйтесь](#) у сторонников и у активных исследователей ОТ. Ищите своё. И вы увидите, что ваше движение вперёд в сфере ОТ будет гораздо более быстрым.

И одно из обязательных условий работы в ОТ: **баланс теории и компьютерного моделирования**. В чём он будет заключаться – это определяют те конкретные задачи, за которые вы возьмётесь. И тут надо всегда знать и чувствовать, что **теория кодирования – вовсе не математическая задача.** Это сплав уникальных оптимизационных компьютерных технологий и тонкой элегантной теории, направленных на решение проблем повышения достоверности цифровых данных всех типов на базе ОТ при максимально возможном уровне шума и с минимальной сложностью.



## А где всё это прочитать «по-научному»?

### Главные книги по ОТ



Хотя на предыдущих страницах мы уже отметили качественно все базовые достижения ОТ, вопрос о доступе к строгим научным описаниям пока не рассматривался. Но и здесь всё очень просто.

В продаже или на наших порталах всегда можно найти практически все наши книги, в том числе изданные за последнее время. Часть из них представлена на слайде выше. Если обратиться к portalу [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru), то на странице «**Наши книги**» можно найти сведения обо всех основных монографиях, изданных нашей научной школой. Очень важными нам представляются теперь уже два полных издания монографий по ОТ и на английском языке, которые выложены на этом портале в свободном доступе, как и целый ряд других.

Особая роль в доведении до научно-технического сообщества новейших результатов ОТ принадлежит монографии «Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума», изданной в 2018 году. Она масштабно и особенно разнообразно взаимодействует с нашими сетевыми порталами, так что её реальный информационный содержательный объём во много раз больше физического. Конечно, огромная польза изучения и всех предыдущих монографий про ОТ также несомненна. Очень популярен и наш справочник.

Особо важно указать на то, что в книге 2018 года подготовлено ещё одно новшество. Огромное преимущество ОТ перед всей остальной наукой о кодировании, составляющее много десятилетий, обусловлено тем, что разработка ОТ в течение всех 50 лет создания и изучения МПД базировалась на ускоренном формировании высокоинтеллектуального программного обеспечения. Все научные группы, которые захотят вести исследования в области теории кодирования, должны его создать буквально с нуля или найти для себя другие пути развития. Это крайне важная и сложная задача.

Так вот эта книга (см. ниже), в отличие от предыдущих, позволяет взаимодействовать теперь не просто с некоторым софтом, демообеспечением, а предлагает обратиться к большому множеству специальных программных платформ наших порталов, которые представляют собой полноценные программные ресурсы. Обращение к ним позволяет по простым инструкциям на эти платформы сразу начинать интересующие вас исследования для различных типов кодов и каналов с широкой вариацией способов работы с МПД, в том числе с анализом тех кодов, которые захочет выбрать и оценить сам читатель.

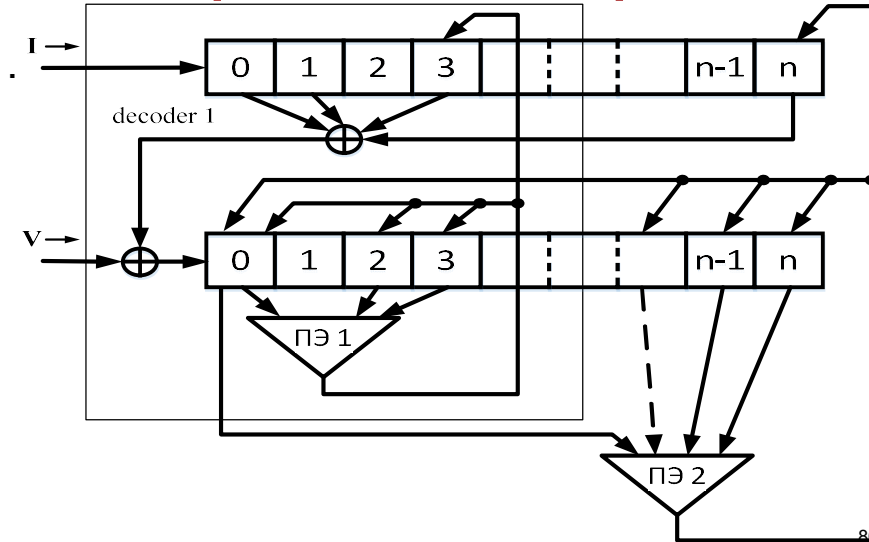


17

Завершая изложение самых существенных основ новой теории кодирования, нашей ОТ, хотим обратить ваше внимание и на то, что крайне простая организация процесса декодирования абсолютно всех кодов на основе, конечно, немного отличающихся версий МПД, которые, однако, построены по весьма общим единым принципам, привела ещё к одному крайне важному итогу, который уже кратко упоминался. А этот итог – огромная скорость всех МПД декодеров. В программном виде, например, на языке C++ МПД демонстрирует при большом уровне шума скорость декодирования  $\sim 10$  Мбит/с в гауссовском канале при  $d \sim 11$  и порядка 10 итераций (попыток повторного декодирования) на ноутбуке с тактовой частотой  $\sim 2$  ГГц. Сравнение с небольшим числом декодеров других типов, для которых известны данные по производительности в программном виде (увы, их через 70 лет очень печальной жизни теории кодирования крайне мало!) показывает преимущество МПД по скорости до 50÷1000 и более раз! А скорость декодирования в большинстве приложений кодов всегда останется столь же важным преимуществом, как и уровень шума, при котором декодер работает, или итоговая достоверность данных после коррекции ошибок. Проверьте это!

## 2. Особые парадигмы Оптимизационной Теории

### Принципы дивергентного кодирования



Решение проблем повышения эффективности кодирования на основе МПД декодеров и различных модификаций АВ, направленное на достижение решений ОД для используемых кодов вблизи границы Шеннона, т. е. непосредственно около пропускной способности каналов связи, привело к созданию специальных методик исследований и разработок, большинство которых было запатентовано. Одной из важнейших парадигм, сформулированных в ОТ, стал принцип дивергенции. Он представляет собой способ некаскадного увеличения кодового расстояния кодовой конструкции. Пример использования идеи дивергенции дан на слайде, где первый пороговый элемент декодера свёрточного кода имеет некоторое количество входов, на основании которых он принимает решения. Но второй ПЭ принимает решения уже с использованием большего на 1 числа входов. Этот ПЭ дополнительно уменьшает число оставшихся ошибок, помогая первому ПЭ лучше исправлять и свой поток ошибок канала.

На самом деле процесс взаимодействия двух ПЭ весьма сложен. Однако при правильном соотношении параметров кода и обоих ПЭ может быть получен небольшой эффект улучшения результата декодирования после второго ПЭ. Разумеется, предложенную схему можно рассматривать как «первый ПЭ» в другой внешней дивергентной схеме и т. д. Существенно, что даже такая вроде бы простая схема хорошо адаптируется к условиям работы именно с использованием программных средств оптимизации параметров кодера и кода. Технологии разработок МПД на идеях дивергенции оказались крайне полезными, а сами алгоритмы очень эффективными.

## Прямой контроль метрики

### Принцип прямого контроля метрики

- АВ – в свёрточном или блоковом варианте – единственный метод, точно измеряет расстояния между принятым вектором и всеми потенциальными решениями.
- МПД – единственный метод, измеряющий расстояние между всего лишь одним вектором, который является промежуточным решением, и принятым вектором.
- Других аналогичных методов - нет!

125

Этот слайд очень жёстко и однозначно указывает на то, что в настоящее время есть лишь два класса алгоритмов, которые точно измеряют удалённость своих решений от принятого вектора. АВ при этом находит из экспоненциально растущего с увеличением  $n$  множества возможных сообщений ближайший вектор-решение к принятому вектору. Это и есть ОД, так как он наиболее вероятный. Но, например, АВ должен помнить все эти решения.

МПД избавлен от хранения всех допустимых решений. В любой момент он содержит текущее наилучшее на данный момент одно решение. Он должен найти единственное требуемое (тоже из экспоненциально большого множества) решение ОД. МПД это делает с линейной сложностью даже вблизи границы Шеннона, если используется код с минимальным уровнем РО.

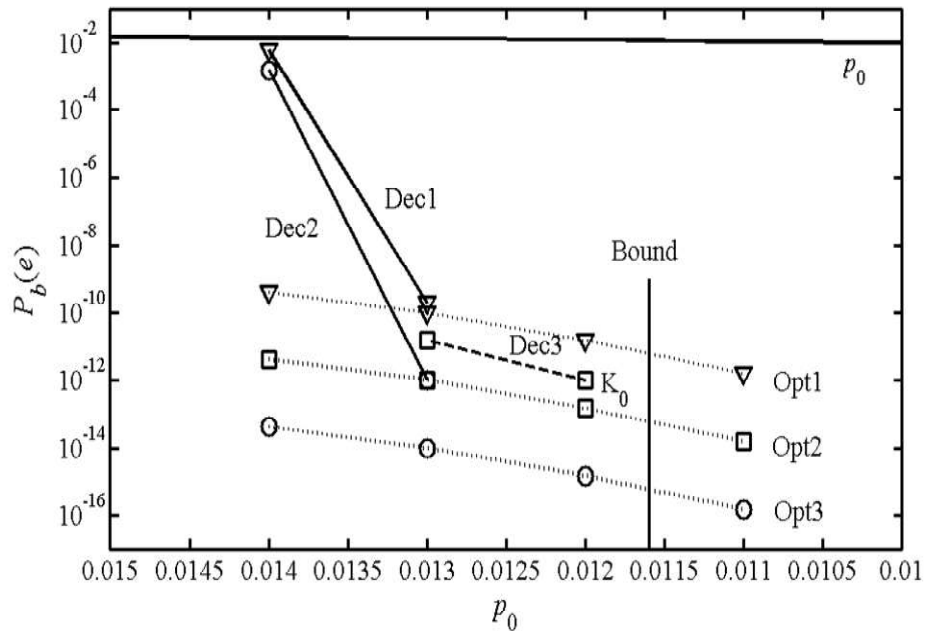
Хорошо. Но почему АВ во всех модификациях и все типы МПД в ОТ выделен в особый класс декодеров с прямым контролем метрики (ДПКМ)?

Да это почти сразу и ясно. АВ заплатил огромной сложностью за то, что не теряет в процессе работы решение ОД и затем передаёт именно его получателю. МПД делает то же, но платит за возможность достижения решения ОД тем, что: **А)** МПД должен брать только код с малым РО; **Б)** это обязательно ведёт к большим задержкам решения; **В)** всегда есть небольшая область между границей Шеннона и рабочей областью МПД, которая, правда, постепенно уменьшается благодаря усилиям школы ОТ. И подчеркнем, что это очень небольшая плата за линейную сложность МПД вместо экспоненциальной.

А всем прочим методам гораздо труднее, чем АВ и МПД, достигать решений ОД. Они просто «не видят» цель - ОД, т. к. не измеряют этих ключевых расстояний. И даже сколь угодно большая сложность таких методов не решает проблему ОД, что история и подтверждает!

## Декодеры для флеш-памяти

# Декодеры для флеш памяти



Совокупность парадигм ОТ позволила решить и важную довольно самостоятельную проблему флеш-памяти. Так называют класс задач исправления ошибок в ненадёжной памяти ограниченного размера, когда требуется особенно высокодостоверный результат, т. к. иначе все данные и программные модули, хранящиеся в ней, применять для чего-либо нельзя. Подчеркнём, что у других направлений особо значимых результатов тут практически нет.

Очень существенно также, что постановка задачи декодирования в этом случае существенно меняется. Требование достижения пропускной способности канала исключается, а скорость декодирования становится особо значимой. Ну, и разумеется, искажения хранимых данных происходят случайно и независимо в битах или в байтах. При этом вероятность ошибки МПД, например, на бит  $P_b(e)$  **должна быть  $\sim 10^{-15}$**  или даже менее, что **является главным пунктом**.

Результат для простого декодера при битовой модели искажений представлен на слайде для малоизбыточного кода в простейшем варианте реализации МПД декодирования и параллельного каскадирования. В случае дополнительного каскада на основе кода контроля по чётности результат достигается ещё легче. При байтовой модели искажений памяти схема декодирования остаётся такой же.

После достижения  $P_b(e) \sim 10^{-12}$  реализация уровней до  $P_b(e) \sim 10^{-18}$  не представляет для МПД каких-либо сложностей, хотя подтверждение достигнутой достоверности потребует определённых усилий. **Вот и всё об основах ОТ!**



## А декодеры такого вида - навсегда абсолютные рекордсмены

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

### МАКЕТ МПД для каналов на 2,08 Гбит/с

The multithreshold decoder (MTD) for satellite and Space channels, raises efficiency of their usage in 3-10 times, including **channels up to 2Gb/s**



### MTD for the Space, optical channels and flash memory

На этом слайде представлен уже много лет назад созданный в ИКИ РАН образец аппаратного декодера, реализующего многopороговый алгоритм (МПД) на **ПЛИС ALTERA**. В нём использованы несколько запатентованных способов улучшения характеристик таких декодеров, которые уже подтвердили свою эффективность и на других макетах МПД декодеров, в частности на **ПЛИС Xilinx**. Данный МПД демонстрирует успешную работу при высоком уровне шума в гауссовском канале и обеспечивает скорость декодирования входного потока свёрточного кода более 1 Гбит/с информационных символов при кодовой скорости  $R=1/2$ . Это соответствует теоретически максимально возможной скорости аппаратного декодирования, когда скорость продвижения данных по регистрам декодера такая же, как и в случае их перемещения по обычным «пустым» сдвиговым регистрам данной элементной базы на максимально допустимой для них тактовой частоте.

Реализованный в МПД на ПЛИС пороговый элемент организован по одному из четырёх запатентованных школой ОТ способов и продемонстрировал запланированный уровень своего быстродействия, что и позволило ему достичь высочайшей аппаратной скорости декодирования, недоступной для других алгоритмов.

Важно и то, что моделирование нескольких наших кодов на этих и других подобных ПЛИС подтвердило в очередной раз достижение всех тех планировавшихся характеристик эффективности, которые ранее получались на основе теоретических и программных разработок и исследований.



## А теперь - об общей ситуации в кодировании

Посмотрите некоторые мнения и факты, относящиеся к теории ОТ. Они очень простые и понятные. Поэтому наши дальнейшие комментарии будут короче.

Итак, смотрим следующие слайды:

### Причины заката «классики»

- Проблема соотношения возможностей теории и эксперимента особенно обострилась в 80-х годах в связи с бурным развитием вычислительной техники. Часть публикаций на эту тему была представлена даже на портале РАН. Приведём из такой статьи лишь фразу: "....противостояние компьютерного моделирования и теории, основанной на математических методах, – Болезнь Века."
- - Ю. Магаршак - 09.09.2009 - «Независимая газета»  
«Число, возведенное в абсолют» |||  
 Она и стала точным диагнозом ухода со сцены науки «классической» теории кодирования – ни одного проверяемого алгоритма декодирования от «классики» за 30 лет!
- И далее:
- «.....Теоретик, работающий в любой научной области, знает, что далеко не все задачи можно решить аналитически: для подавляющего большинства проблем получить точные и даже приближенные решения не удастся.»
- {Портал РАН или [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru)}

## И выводы:

09.09.2009 - «Независимая газета»

«Число, возведенное в абсолют»

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

Вывод:

- **Теория и эксперимент должны взаимно ускорять, контролировать и поддерживать друг друга**
- **А у теоретиков «про коды» они - в глубоком конфликте.**

Отсюда следует:

## **Основа абсолютного лидерства ОТ**

- Примерно с 1971г. научная школа ОТ применяет технологии исследований, **объединяющие теоретические** (аналитические!) методы с итогами **экспериментальных исследований**, в частности, на базе программных платформ, что и позволило ставить и решать проблемы, **даже сформулировать** которые в рамках только теоретических разработок **вообще невозможно.**

А обязательной разработкой программного обеспечения более **никто** в мире, кроме школы ОТ, похоже, **так и не начал заниматься.** Нигде нет ничего полезного **о сложности** «новых» декодеров. И ни для каких алгоритмов **никто не смог и никогда не сможет** вычислить главный параметр – **вероятность ошибки** вблизи границы Шеннона. **Всё это никому не надо?** Нет. **Не могут!** **А вот макеты МПД** дают **точные результаты по сложности и помехоустойчивости за 5 – 7 минут.** И ведь иначе - **абсолютно никак!**

**А это - баланс результатов  
по теории кодирования в мире и в РФ**

**История важнейших открытий  
теории кодирования**

Мировые достижения	Достижения СССР и России
Коды Хемминга -1950	<b>МПД</b> - 1972
Коды БЧХ и РС -1962	Коды с малым РО - 1975
Пороговые дек-ры 1963	<b>ОКК</b> - 1975
Каскадные коды -1966	<b>Символьные коды</b> - 1981
Алгоритм Витерби -1967	<b>Символьный МПД</b> - 1984
Турбо коды - 1993	<b>Параллельные коды</b> - 1985
LDPC коды - 1961-98	Каскадирование с ККЧ -1990
	«Мгновенные» МПД - 2009
	Теория каск-ния МПД - 2011
	<u><b>Оптимизационная - 2012</b></u>
	<u><b>теория, БАВ, ДПКМ,</b></u>
	<u><b>дивергенция</b></u>

49

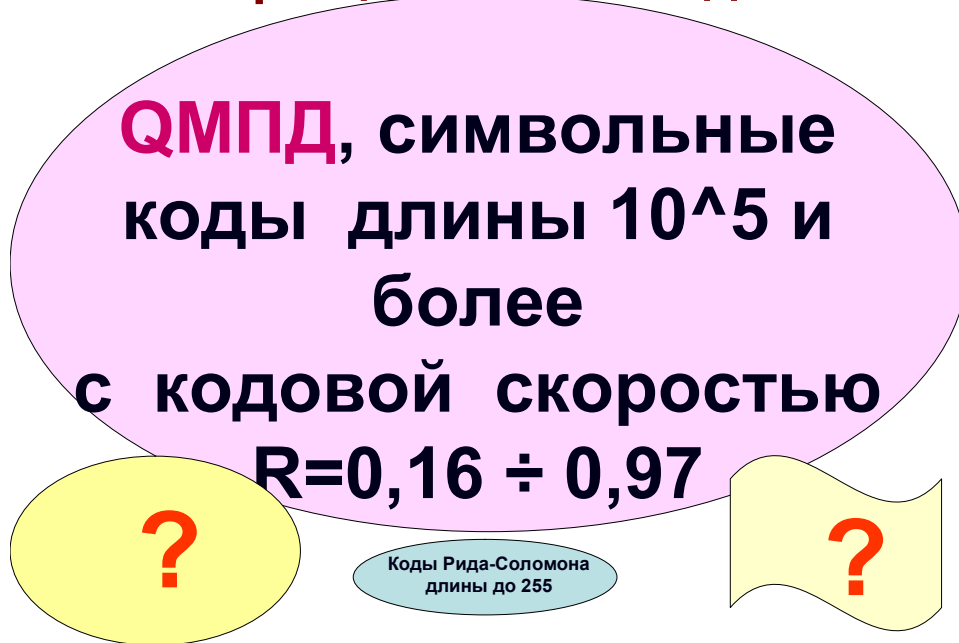
Сравнить все эти прикладные достижения между собой вы можете сами. Отметим, что среди таких достижений РФ коды **ОКК** были опубликованы в ИППИ РАН, а все остальные результаты принадлежат научной школе **ОТ**.

**Мир двоичных кодов для  
спутниковых, а также оптических  
каналов и флеш памяти**



Здесь мы перечисляем те методы, которые ОТ обошла по строгим комплексным критериям **«достоверность-помехоустойчивость-сложность»**. Детали такого сопоставления ищите в обзорах по алгоритмам декодирования. Но **реальных цифр по сложности** для «поляров» и других «достижений» нигде **найти нельзя**, т. к. **их никто не публикует**. **Они все крайне сложны!**

## Мир недвоичных кодов



На этом слайде показана ситуация с недвоичными кодами. Нам даже вообще не с чем сравниться во всей области недвоичных кодов, т. е. здесь тоже достигнуто абсолютное лидерство у ОТ и символьных МПД. А у «поляров» тут уже совсем полный провал: сложность до  $\sim n^3$  и даже много более. Но куда же боле?

### И – некоторые мнения.

- Алгоритмы Золотарёва с линейной сложностью стремятся к решению оптимального переборного декодера.
- Существенно, что целый ряд результатов научной школы автора является открытиями в области теории кодирования, на что совершенно справедливо указывает и научный редактор этой необычной книги академик РАН Н.А. **Кузнецов**.
- . Аналогов... кодам Золотарёва по простоте реализации и помехоустойчивости не существует.
- ОТ стала "квантовой механикой" теории кодирования на основе уже сформировавшихся методов поиска глобального экстремума функционалов специальных дискретных пространств.
- Профессор кафедры высшей математики Рязанского государственного радиотехнического университета, директор лаборатории системного анализа, доктор физико-математических наук **Миронов В.В.**

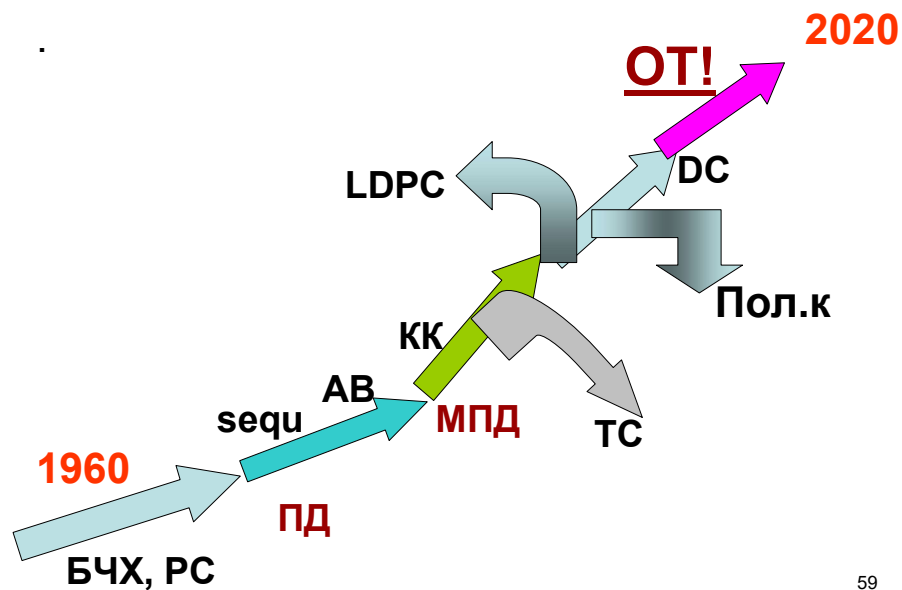
## Мнение РАН

### РАН об Оптимизационной Теории

- ....Пять поколений МПД создано в НИИР....
- ..... Выдающееся достижение Золотарёва имеет прекрасную масштабную **аналогию в физике начала 20 века**. Она была в кризисе и не могла решать многие новые задачи. Квантовая теория усилиями небольшой группы будущих **Нобелевских лауреатов** открыла для физики абсолютно необычные новые горизонты.
- Аналогичную совершенно **грандиозную работу совершила и научная школа Золотарёва** в теории информации. Теперь возможны любые уровни достоверности данных и скорость их обработки при очень высоких шумах канала. Эта **главная прикладная проблема теории кодирования решена** совершенно простейшими средствами и при абсолютном минимуме ресурсов.
- **Триумф теории Золотарёва по всему миру** подтверждают и сетевые порталы его научной школы, которые ежегодно посещают ~100'000 человек. ....↑
- (Подписано:10.03.2015г.) **Член-корреспондент Ю.Б. Зубарев**
- ....работы российской научной школы по теории кодирования преодолели долговременный кризис теории и на основе научно-идеологической революции, сменившей значительную часть основных парадигм теории кодирования, создали условия для её развития на совершенно новых основах. Можно сказать, что в теории кодирования сформировалась своя "квантовая механика". Она трудна, но плодотворна. Других путей пока нет.
- **Член-корреспондент РАН Ю.Б. Зубарев**
- **Журнал «Наукоёмкие технологии» 2016 г.**

Ограничимся далее лишь указанием на то, что все монографии научной школы ОТ выходили последние 15 лет **под научной редакцией академиков РАН.**

## Динамика развития теории кодирования



59

А на этом слайде кратко показан трудный путь теории кодирования от 1960 года, когда начался алгебраический этап теории. А потом были пороговые и последовательные методы, каскадные, АВ, затем **МПД, ДПКМ и, наконец, алгоритмы ОТ**. А турбо, LDPC, и, конечно, полярные коды слишком отвлекли научное сообщество от цели - простого декодирования у границы Шеннона. В 2020-й год и далее пойдут успешно только ОТ и её методы. Да! Технологии науки надо всегда выбирать правильно!

Но почему так? Потому что **ОТ обеспечивает:** минимальную сложность, оптимальное решение и предельную близость к границе Шеннона.

### Применение наиболее мощных систем кодирования канала и источника

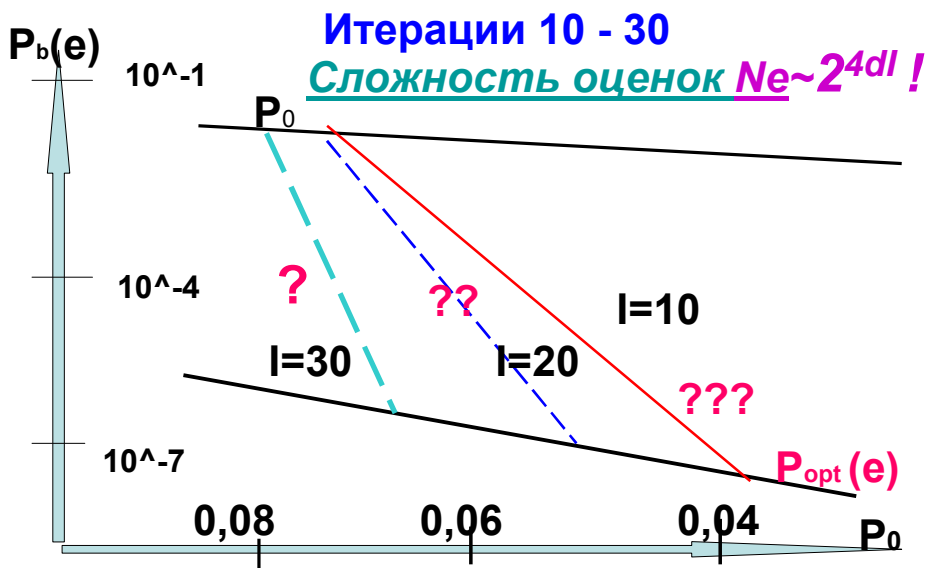
- 1. Кодирование канала.  
Повышает достоверность передачи данных на 2-9 десятичных порядков,  
**ЭВК~8-15 дБ**
- 2. Кодирование источника.  
Достигается сжатие данных в 2-5 и более раз.
- 3. Общий итоговый энергетический выигрыш от применения методов теории информации - **до 40 - 80 раз !**

111

А этот слайд - об общем выигрыше от применения всех теорий кодирования: и источника, и канала. До 80 раз! Но это если всё делать правильно. Вот как всё-таки велика роль науки в цифровом мире!



## Варианты стремления решений МПД к оптимальному



И последний содержательный слайд, завершающий описание, конечно, крайне простых методов ОТ. На графике с реалистичными цифрами для канала с независимыми ошибками и вероятностей ошибки  $P_b(e)$  алгоритма разными цветами указаны ориентировочные характеристики МПД с различным числом итераций декодирования.

**Напомним:** приведённые примерные кривые  $P_b(e)$  для разного числа итераций уточняются в компьютерном эксперименте за  $3 \div 5$  минут, иногда за час. Реальная сложность аналитических оценок  $P_b(e)$  должна быть много больше, чем показывает экспоненциальная оценка  $Ne$  на слайде, т. е. её не получить никогда. И вообще абсолютно все методы декодирования именно такие: вблизи границы Шеннона ничего посчитать нельзя. А методы ОТ оцениваются по вероятности  $P_b(e)$  мгновенно: за 50 лет развития ОТ все необходимые для этого программные платформы созданы, причём с большим запасом. Очень многие из них есть на наших порталах и мы свободно их распространяем. Всё это повышает скорость наших исследований в сотни раз. **Приглашаем всех!**

**Переходим к финалу.** Слайд показывает технологию работы в ОТ. Для заданных параметров системы кодирования, оценив вероятность ошибки обычного ПД, находим требуемые значения кодового расстояния  $d$ , не забыв проверить потенциальные параметры БАВ или МПД декодирования относительно вычислительной скорости канала и его пропускной способности. И если речь - не о новых результатах у границы Шеннона, то оптимизационные методы, число которых на каждый цикл разработки алгоритма не более 5, доведут достоверность декодера до нижней кривой  $P_{opt}(e)$  на слайде. При использовании АВ эти циклы ещё короче, так как все АВ оптимальны. Так что ОТ - это очень просто. **При наличии ПО!** Присоединяйтесь. Только это - наука!

**И вот - трудный и радостный финал: давайте останемся лидерами!**

## Последние комментарии к сошедшей со сцены теории

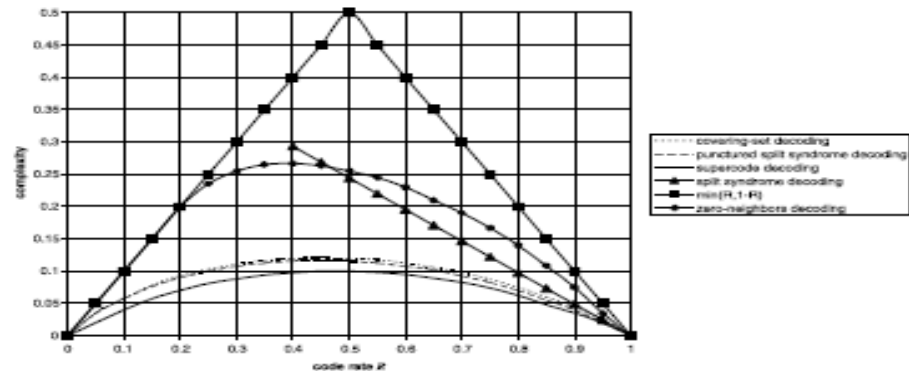


Figure 3.1 Complexity of the hard-decision decoding algorithms for binary codes

Рис. **WW**.

А на этой страничке у нас подготовлены для вас критерии, по которым вам всегда будет удобно отбирать научную и учебную литературу по методам кодирования. Мы укажем те некоторые «идеи», увидев которые вы можете смело закрывать такие книги или статьи «про коды». **Забудьте о них!**

1. На рис. **WW** показан график «важнейших достижений» теории кодирования, оформленных недавно в большом числе докторских диссертаций. Это «улучшения» в сложности декодирования по сравнению с полным перебором. Те доктора наук уменьшают, на пример, при  $n \sim 10000$  сложность декодирования до  $N \sim 10^{200}$  операций. **Всего-то!** Но с 1981 года известно, что в ОТ коды оптимально декодируются с линейной сложностью. **А те книги не читайте.**

2. Огромное число работ, завершившихся «докторскими корочками», рассказывают, что блочные коды на базе свёрточных декодируются со сложностью  $N \sim 2^{2K}$ . **И всему этому очень агрессивно учат даже студентов!** Тут  $K$  - длина полинома свёрточного кода. **Их тоже не читайте. Это пустые теории.** В ОТ сложность таких декодеров - **Not  $\sim 2^K$ ! Как АВ! И это запатентовано!**

3. Миллионы публикаций рассказывают, как хороши коды Рида-Соломона (РС). **Да!** Они были очень полезны в технике хранения данных и системах связи. Но они в реальности только короткие и имеют сложность  $N \sim n^2$ . Формально  $N$  несколько меньше, но несущественно. И значит, они малоэффективны и медленны. А символьные (**недвоичные!**) МПД любой длины декодируются **оптимально при сложности лишь  $N \sim n$ .** **Уловите разницу!** Это тоже детально описано и запатентовано. **Пользуйтесь!**

4. Очень много неоправданных странностей образуют методы передачи **кодов РС по двоичным каналам.** Но это – плохо согласованные кодовые системы и методы модуляции. Их эффективность очень мала. **Забудьте их!**

5. Скучны игры **с полярными кодами** и с каналами, где символы как-то необычно стираются. **И никаких данных о сложности!** А она, (напомним: при тысячах очень непростых итераций «там»!) – **огромна.** Также **игнорируйте!**

Ну и выделим страничку на то, чтобы всё же оценить достижения тех авторов статей по кодам, которых нельзя отнести к научной школе ОТ. Рассмотреть всё, что есть, невозможно. Но, тем не менее, бросим взгляд на недавние работы иного плана, чем те, что нам предлагает научная школа ОТ.

Итак, слайд:

### **Сложность оценок для ДСК канала**

- Зяблов, **ИППИ**, «ППИ», 2009 г.,
- 15 страниц А4, tnr-10, **>50 формул.**,
- 15 иноссылок на литературу. Рез-т: **??? !**
- **Сложность –  $n \cdot \log(n)$ ?!? Эфф-сть  $\Rightarrow N_e \sim n$  !**
- -----
- **Про МПД: 2 стр., А5, tnr-12, 2 формулы .**
- **Запатентован. Решение – ОД!**
- **Сложность – линейная! С 1978г.+7 моногр.**
- **+ --> Моделирование ! ! ! !**

Тут для ДСК теоретически (50 формул и 15 ссылок!) показано, что декодеры LDPC с  $R=1/2$  исправляют долю ошибок порядка 0,0002 от длины кода. Но ещё 60 лет назад БЧХ коды исправляли долю, равную 0,03, в 150 раз бóльшую. А МПД, как напечатали в том же журнале, исправлял долю более 0,05, т. е. в ~250 раз бóльшую, ещё в 1986 году. И всё потому, что в статье про LDPC вероятности ошибки получены чисто аналитически. А может быть, алгоритм был неэффективный? Современная публикация! И зачем она такая?

Через 4 года этот результат был улучшен и исправляемая доля ошибок была увеличена в 10 раз. Но это всё равно в ~25 слабее, чем у МПД-86. Аналитических методов оценки декодеров в гауссовском канале мы вообще нигде не нашли. А МПД модели демонстрируют экспериментальные характеристики и в этих каналах около границы Шеннона. И сравнить их не с чем!

Мы нашли также аналитические методы, отличные от наших, оценивающие исправление стираний. Но МПД декодеры, как оказалось, успешно работают в канале, в котором доля стираний более, чем в 5 раз превышает допустимый уровень для «тех» кодов, которые ещё и много сложнее декодировать, чем МПД. И 5 раз – это уж слишком много. Снова недостаток аналитических оценок: их реально никогда невозможно проверить (см. выше ссылку на «НГ»).

Наконец, для не двоичных кодов преимущество по вероятности ошибки в канале у символьных кодов составило ~ 2 - 5 раз, причём, сложность «тех» алгоритмов была на 2 порядка больше, чем у МПД. И это - всё!

Таким образом, никакие публикации о методах декодирования из ведущих журналов РФ последнего десятилетия даже не приближаются по критерию «помехоустойчивость-достоверность-сложность» к уровню алгоритмов ОТ для каналов со случайными искажениями, рассматриваемых в теории кодирования. Так что начинайте моделировать! Но смените методы!

**Выводы.** Прикладная теория кодирования как поиск методов, близких по достоверности к ОД при линейной от длины кодов сложности декодирования вблизи границы Шеннона для всех классических каналов, рассматриваемых в теории кодирования, полностью завершена на базе ОТ. «Классическая» теория кодирования передала эстафету лидерства ОТ, новой «**квантовой механике**» теории информации. Созданные инновационные оптимизационные технологии ОТ будут развиваться и применяться при создании декодеров для более сложных новых классов каналов, видов сигналов и типов систем связи.

\* \* \*

А теперь укажем, как мы хотели, основные книги по ОТ. И выше мы уже узнали, от использования какого типа публикаций рекомендуется отказаться. Да, это наше мнение будет поводом для резкой критики. Но глубочайший тридцатилетний кризис науки в столь важной сфере цифровой информатики создал большой клан «научников», оспорить деятельность которого до недавнего времени не мог решиться никто. А мы полагаем, что после полного решения нашей научной школой проблемы Шеннона и превращения прежней сложнейшей бесплодной теории в новую «квантовую механику» теории информации (как мы оцениваем нашу ОТ), нашей обязанностью является и строгая оценка ситуации в теории кодирования последних десятилетий. Кроме нас никто и никогда не осмелился бы принять столь трудное решение описать реальную трагическую ситуацию в нашей науке. И это очень жаль!

А обсуждение всех тех мер, которые восстановят этику работы в науке и наведут порядок в развитии исследований по цифровой информатике на её новом этапе, мы оставляем уполномоченным на это научным структурам.

Основные публикации по ОТ можно найти на наших порталах [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru) и [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru). Несколько важнейших из более 600 книг и статей мы укажем ниже. Остальные найдёте там же.

Перечислять тысячи книг и статей, по которым изучить реальные методы прикладной теории кодирования совершенно невозможно, мы не будем. Проявляйте бдительность сами. Консультируйтесь. Продолжайте развивать теорию. И - учитесь моделировать! Без этого никаких новых методов и технологий в науке об алгоритмах декодирования создать нельзя. Только так!

А у нас, конечно, продолжится публикация новых обзоров по прикладным вопросам теории кодирования. Отслеживайте их тоже. Ведь это очень интересно и крайне полезно. Жаль, что пока эту работу перепоручить некому.

И - всё! Вы готовы к ОТ! Она очень проста. Учите. Развивайте её дальше. И моделируйте все алгоритмы!!! Только они будут теми результатами, которые теперь надо предъявлять научно-техническому сообществу!

Успехов вам!

#### Литература.

1.. В.В. Золотарёв. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования.// Под редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева. Москва, "Радио и связь", "Горячая линия - Телеком", 2006, 266 с., e-book: <https://mtdbest.ru/articles/теория и алгоритмы 2006.pdf> .

2.. Золотарёв В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования // Под редакцией академика РАН В.К. Левина. М.: «Горячая линия – Телеком», 2012, 238 с.

3. В.В. Золотарёв. Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума. // Под редакцией академика РАН Н.А. Кузнецова. М., "Горячая линия-Телеком", 2019, 222с.

4.. V.V. Zolotarev. Coding Theory as a Simple Optimal Decoding near Shannon's Bound (Optimization Theory of error correcting coding - is a new "quantum mechanics" of information theory). М., "Hot Line – Telecom", 2018, 333p, free of charge, e-book: [https://mtdbest.ru/articles/mtd\\_book\\_2019.pdf](https://mtdbest.ru/articles/mtd_book_2019.pdf) .

5. Золотарёв В.В., Назиров Р.Р., Чулков И.В. Оптимальное декодирование в цифровых спутниковых каналах при дистанционном зондировании Земли. // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Выпуск 4, том 1, Москва, ООО «Азбука», 2007, с. 229-235.

6. Zolotarev V.V., Averin S.V., Chulkov I.V. Optimum Decoding Characteristics Achievement on the Basis of Multithreshold Algorithms. //9-th ISCTA'07, July, UK, Ambleside, 2007.

7. Zolotarev V., Zubarev Y., Ovechkin G. Optimization Coding Theory and Multithreshold Algorithms. Geneva, ITU, 2015, 159p., e-book: [https://mtdbest.ru/articles/Zolotarev\\_ITU.pdf](https://mtdbest.ru/articles/Zolotarev_ITU.pdf) .

8. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Применение многопороговых методов декодирования помехоустойчивых кодов в высокоскоростных системах передачи данных // Электросвязь. М., 2014, №12, с.10-14.

9. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. О сопоставлении новых методов помехоустойчивого кодирования //18 Международная конференция "Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2016". М., 2016, Т.1, с.59-65.

10.. Кузнецов Н.А., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Недвоичные многопороговые декодеры и другие методы коррекции ошибок в символьной информации // Радиотехника. М., 2010, №6, Вып.141, с.4–9.

11.. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. Москва. Под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева. «Горячая линия – Телеком», 2004, 126 с., e-book: [https://mtdbest.ru/articles/mtd\\_handbook.pdf](https://mtdbest.ru/articles/mtd_handbook.pdf) .

12. Золотарёв В.В., Назиров Р.Р., Чулков И.В., Овечкин Г.В. Алгоритмы МПД // Российский космос. №1, 2009, с. 60–63.

13. В.В. Золотарёв, Р.Р. Назиров. Сверхнадежное исправление ошибок на основе МПД алгоритмов для баз данных систем ДЗЗ // В сб.: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», вып.5, т.1, ИКИ РАН, М. 2008, с.267-272.

14. Золотарёв В.В., Назиров Р.Р., Никифоров А.В., Чулков И.В. Новые возможности многопорогового декодирования по высокодостоверной передаче данных ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Выпуск 6. Том I. Москва, ООО «Азбука-2000», 2009, с.167–173.



15.. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Теория кодирования как оптимизационная проблема декодирования вблизи границы Шеннона // **Пленарный доклад**. 21 международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». 2019, Вып. XXI-1. с.10-16.

16.. V.V. Zolotarev, G.V. Ovechkin, I.V. Chulkov, P.V. Ovechkin, S.V. Averin, D.Zh. Satybaldina, V.T. Kao. Review of Achievements in the Optimization Coding Theory for Satellite Channels and Earth Remote Sensing Systems: 25 Years of Evolution. // "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 2017, Т. 14, № 1, с.9–24.

17.. Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин. Оптимизационная теория кодирования: Итоги 25 лет развития. **Пленарный доклад**. // Доклады 18-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и её применение", Москва, Т.1, 2016, с.6-12.

18.. В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин. Способ реализации символьного порогового элемента в мажоритарном декодере. Патент РФ №2573741.

19. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Дивергентное кодирование свёрточных кодов // Материалы 18-й Международной научно-технической конференции "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций", 2015, с. 27–32.

20. Zolotarev V., Ovechkin G., Satybaldina D., Tashatov N., Adamova A., Mishin V. Effective multithreshold decoder for optical and other data transmission systems. // Latest trends on Communications: Proceedings of the 18th International Conference on Communications (part of CSCC'14). – Santorini Island, Greece, 2014, p.152-156.

21.. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Применение многопороговых методов декодирования помехоустойчивых кодов в высокоскоростных системах передачи данных // М., "Электросвязь", №12, 2014, с.10-14.

22.. Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин. Новые технологии и парадигмы помехоустойчивого кодирования: после решения проблемы Шеннона. // «Электросвязь», №9, 2019, с.56-61.

23.. Кузнецов Н.А., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Назиров Р.Р., Аверин С.В. Многопороговые алгоритмы на базе Оптимизационной Теории вблизи границы Шеннона // Некоторые аспекты современных проблем механики и информатики. Сб. науч. ст., М.: ИКИ РАН, 2018, с. 99–120. DOI: 10.21046/aspects-2018-99-120.

24.. Гринченко Н.Н., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Каскадирование самоортогональных кодов для каналов со стираниями // 21 Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». 2019. Вып. XXI-1, с.67-72.

25.. Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарёв. О преодолении системного кризиса в теории информации // «Инновационные технологии», №1, 2020 (в печати).