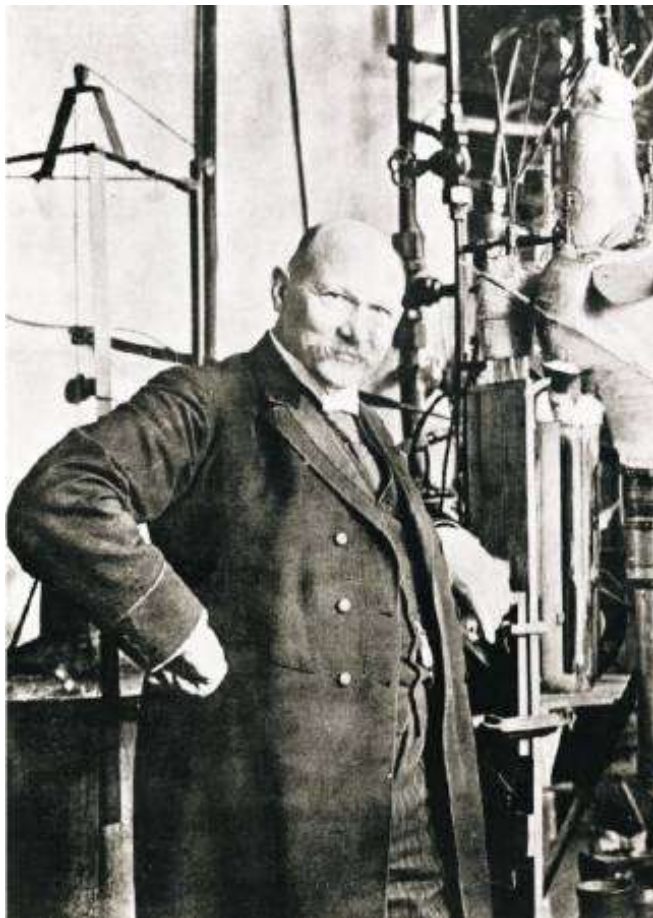




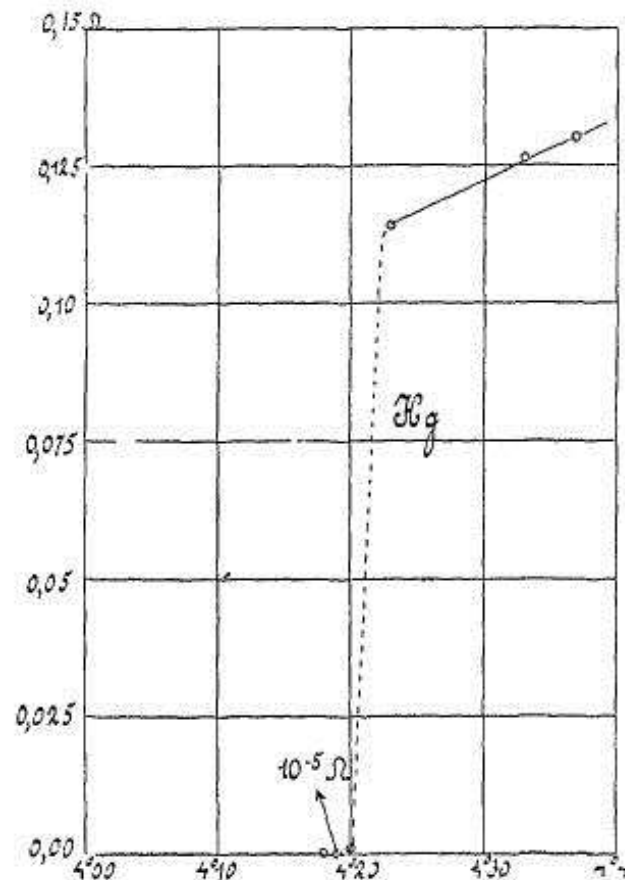
# Возможности современных сверхпроводящих материалов как потенциала формирования нового облика электроэнергетики

**С.В. Шавкин**  
Заместитель руководителя  
отделение сверхпроводимости  
Курчатовский комплекс НБИКС-технологий

# Сверхпроводимость – сложное квантово-механическое явление



Хейке Камерлинг Оннес  
(Heike Kamerlingh Onnes)



Зависимость электросопротивления ртути от температуры, построенная Камерлинг Оннесом в 1911 году

# Явление сверхпроводимости работает только при криогенных температурах

## Основные параметры сверхпроводящих материалов, важные для практики :

- Критическая температура ( $T_c$ ).
- Плотность критического тока ( $J_c$ ): равна нулю при  $T=T_c$ , быстро растет с понижением температуры, уменьшается с ростом внешнего магнитного поля.
- Критическое магнитное поле ( $H_c$ )

Таблица 1. Критические характеристики сверхпроводящих сплавов и соединений

Материал	Критическая температура, К	Верхнее критическое поле при 4,2 К, Тл
Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП)		
Nb-Zr	9,0–11,0	7–9
Nb-Ti	8,0–10,0	9–13
Nb <sub>3</sub> Sn	17,0–18,0	23–25
Nb <sub>3</sub> AlGe	20,7	41
Nb <sub>3</sub> Ge	23,2	37
Nb <sub>3</sub> Al	17,0–18,0	29–32
V <sub>3</sub> Ga	14,5	21
V <sub>3</sub> Si	17,0	23
V <sub>2</sub> HfZr	10,0	25
PbMo <sub>6</sub> S <sub>8</sub>	15,0	60
Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП)		
La-Sr-Cu-O	35–40	90
MgB <sub>2</sub>	37	9
Y-Ba-Cu-O	95–100	190
Bi-Sr-Ca-Cu-O	110–114	–
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125–130	–

**Мечта ученых: создать материалы с максимальной температурой сверхпроводящего перехода (в идеале – работающих при комнатной температуре), т.к. затраты на обеспечение криогеники очень быстро растут при понижении рабочей температуры:**

- при температуре **70К** затраты ~**10Вт** электрической мощности на 1 Вт холода
- при температуре **20К** затраты ~**60Вт** электрической мощности на 1 Вт холода

## Классы технических сверхпроводников.

### Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП)

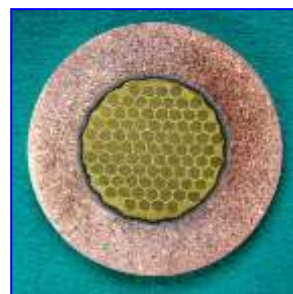
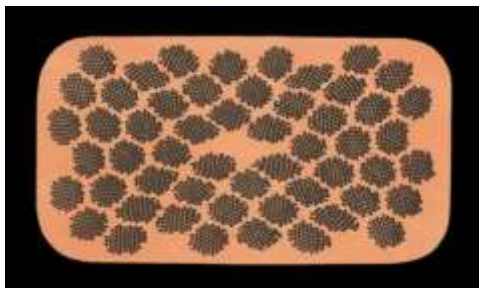
#### 1) “Низкотемпературные сверхпроводники” – работают только при температурах жидкого гелия 4.2К (-269 С)

Сплав  $Nb-Ti$  ( $T_c=9.5K$ ), соединение  $Nb_3Sn$  ( $T_c=18.2K$ ) были открыты в 50-х годах XX века, есть промышленное производство композиционных проводов в развитых странах, в т.ч. в России с 2009 г. (АО ЧМЗ, г.Глазов)

Применение: магнитные системы токамаков (Т-7, Т-15, проект ИТЭР), ускорителей (БАК и др.), магнито-резонансные медицинские томографы, ЯМР-спектрометры, исследовательские магниты.

Достоинства: относительно дешевы, отработанная «металлургическая» технология, долговременное промышленное производство.

Недостатки: высокие требования к криогенике, высокие затраты на охлаждение.



## Классы технических сверхпроводников.

### 2. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП)

“Высокотемпературные сверхпроводники” – работают при температурах жидкого азота 77К (-196 С)

Керамические оксидные соединения  $YBa_2Cu_3O_7$  «123» ( $T_c=92K$ ),  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$  «2223» ( $T_c\sim 110K$ ),  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$  ( $T_c\sim 135K$ ) были открыты в 1986 г. Промышленного производства нет до сих пор!

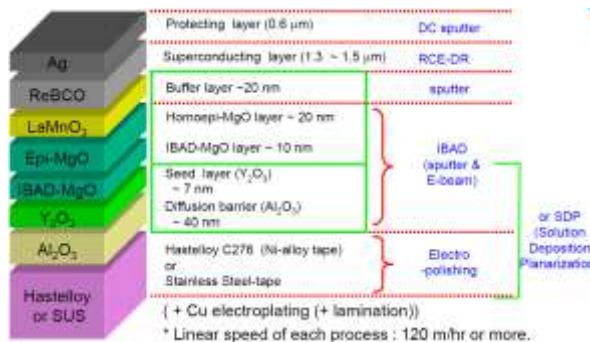
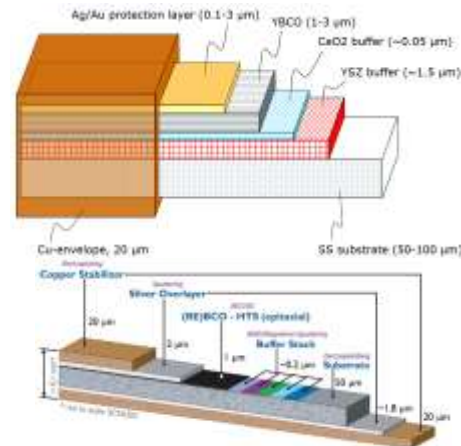
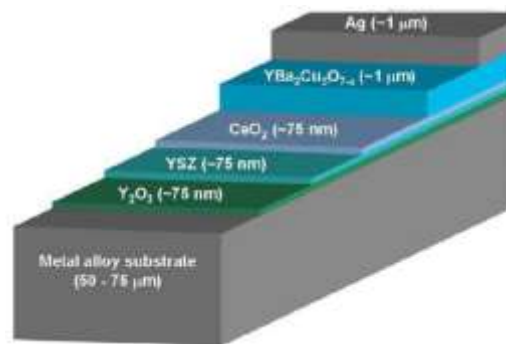
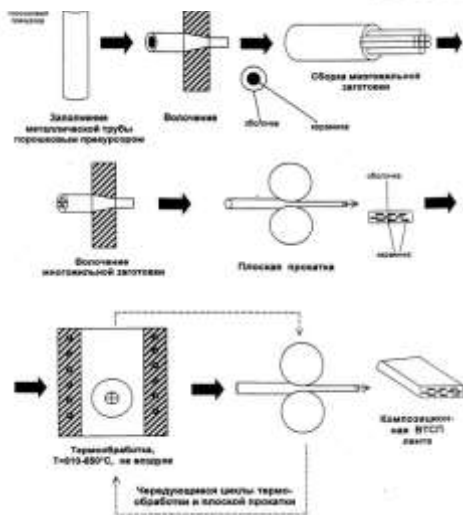
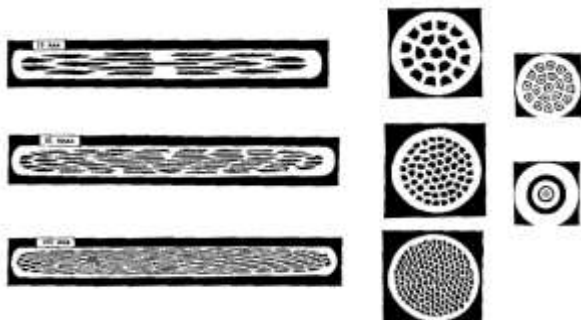
На сегодня вышло 2 поколения ВТСП проводов:

- 1-е поколение: многожильные ленточные провода на основе фазы «2223» в серебряной матрице.
- 2-е поколение: многослойные ленточные провода буферные слои, сверхпроводящий слой на основе фазы «123», нанесенные на тонкую металлическую ленту-подложку (сталь, хастеллой, сплав Ni-W).

Достоинства: потенциально позволяют расширить рынок применения сверхпроводящих устройств, в т.ч. в электроэнергетике, транспорте, промышленности, в космосе. Невысокие требования к криогенике, невысокие затраты на охлаждение.

Недостатки: дорогостоящие технологии выпуска: применяются физические и химические методы осаждения тонких слоев (толщиной десятки и сотни нанометров).

# Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) Конструкция и технологии выпуска



ВТСП 1-го поколения  
и технология выпуска  
по методу «порошок в трубе»

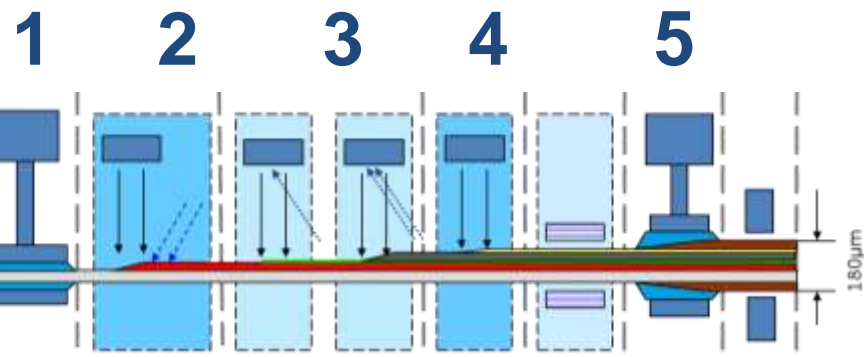
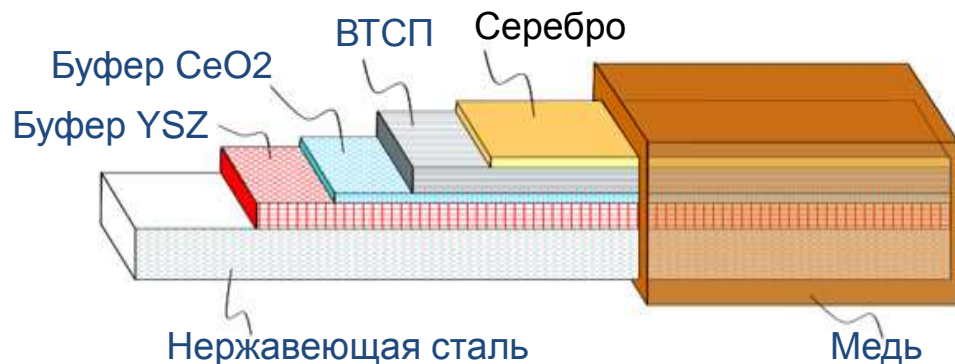
ВТСП 2-го поколения – большое разнообразие конструкций  
и методов выпуска

**Суммарная декларированная производительность достигает 5000- 6000 км/год**

## Основные тенденции в развитии ВТСП в мире

- **ВТСП-2 ленты** – Промышленное производство
- **Кабели** (Корея – энергосети; Япония – энергосети для жел.дорог, ЕС - энергосети)
- **Сверхпроводниковый ограничитель токов КЗ** (резистивный)
- **Ветроэнергетические установки** – 10 МВт
- **Медицина** – томография и протонно-ионные ускорители для онкотерапии
- **Военные применения** – СПИН, Генераторы, размагничивание кораблей, двигатели кораблей, авиационные двигатели

## Базовая технология производство ВТСП-2



### Процессы:

- 1** Подготовка поверхности (механическая полировка, УЗ-очистка, контроль)
- 2** Нанесение буферного слоя YSZ (использование ассистирующего ионного пучка: ABAD –технология)
- 3** Нанесение CeO<sub>2</sub> и ВТСП слоя (импульсное лазерное осаждение: PLD технология)
- 4** Нанесение защитного слоя серебра (термическое осаждение)
- 5** Нанесение шунтирующего слоя меди (гальваническое осаждение)

### Технические характеристики ВТСП провода:

- Толщина ленты-подложки – 0,1 – 0,05 мм.
- Ширина ленты – 4 мм.
- Длина ВТСП ленты – до 1000 м
- Критический ток – не менее 200 А/см (в собственном поле при температуре 77К)



## В рамках проекта «Сверхпроводниковая индустрия» (2010-2015) создано оборудования для производства ВТСП-2 длиной до 1000 м

### НИЦ КИ

- Задача повышение свойств ВТСП
- Задача разработки и отработки технологий ВТСП

*Пилотная линия  
ВТСП на 100 м  
Установка PLD T-1000*

### НИИТФА

- Оборудование на 1000 м
- Полировка
- УЗ мойка
- ABAD/IBAD

### НИИЭФА

- Оборудование на 1000 м
- PLD
- Металлизация
- Кислородный отжиг
- Гальваническая установка

### ВНИИНМ

- Ленты-подложки
- Мишени (керамические мишени, металлические мишени)  
(на ВТСП 100 - 1000 м)

Разработка оборудования и технологий опытного производства (длина куска > 1000 м)

### ГСПИ

Проектирование производства на ЧМЗ (г.Глазов)

### ТВЭЛ

Организация производства на ЧМЗ (г.Глазов)

Организация производства  
(необходимо доп. финансирование)

## Установки Пилотной линии по выпуску ВТСП -2 в НИЦ «Курчатовский институт» - запущены в октябре 2015



**Установка механической полировки**



**Система УЗ очистки ленты**



**Установка лазерного контроля  
качества полировки**



**Установка нанесения буферных слоев  
методом ионного ассистирования (ABAD)**

## Установки Пилотной линии по выпуску ВТСП -2 в НИЦ «Курчатовский институт» - запущены в октябре 2015



Лазерная система осаждения (PLD)



Установка термического осаждения серебра



Печь кислородного отжига



Гальваническая установка  
(покрытие медью)



Измерение  $I_c$

## Продукция на основе высокотемпературных сверхпроводников (коммерциализации)



### Целевой продуктовый портфель :

- Ленточные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП-2) и устройства на их основе

### Ключевые заказчики/ потребители:

- Сетевые энергокомпании - ФСК ЕЭС, Россети, МОЭСК; Транспортные компании – Железнодорожный транспорт - ПАО РЖД, Трансмашхолдинг; ТРТранс; Морской транспорт – ЦНИИСЭТ, АО Айсберг:

### Поддерживающие мероприятия

- Проект - СОТ
- Проект – Лента ВТСП-2
- Проект – ВТСП кабель
- Формирование ФЦП по энергосистемам

### Суть Продуктовой стратегии:

Коммерциализация отдельных разработанных в рамках проекта «Сверхпроводниковая индустрия» продуктов осуществляется последовательно-параллельно с учетом длительности сертификационных испытаний продукта, завершением подготовки нормативно-правовой документации и уточнением бизнес-модели в рамках частных ПС по продуктам: ВТСП-2 лента; СОТ; СКНЭ; СПИН; СПСГ; СП -кабель

## Цепочка создания ценности продукта для СП-устройств

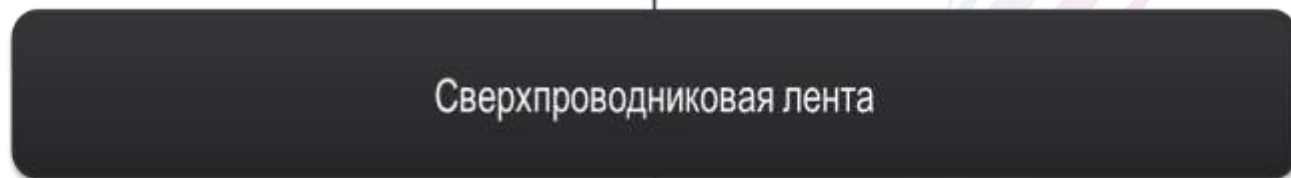
Конечный потребитель



Производители оборудования



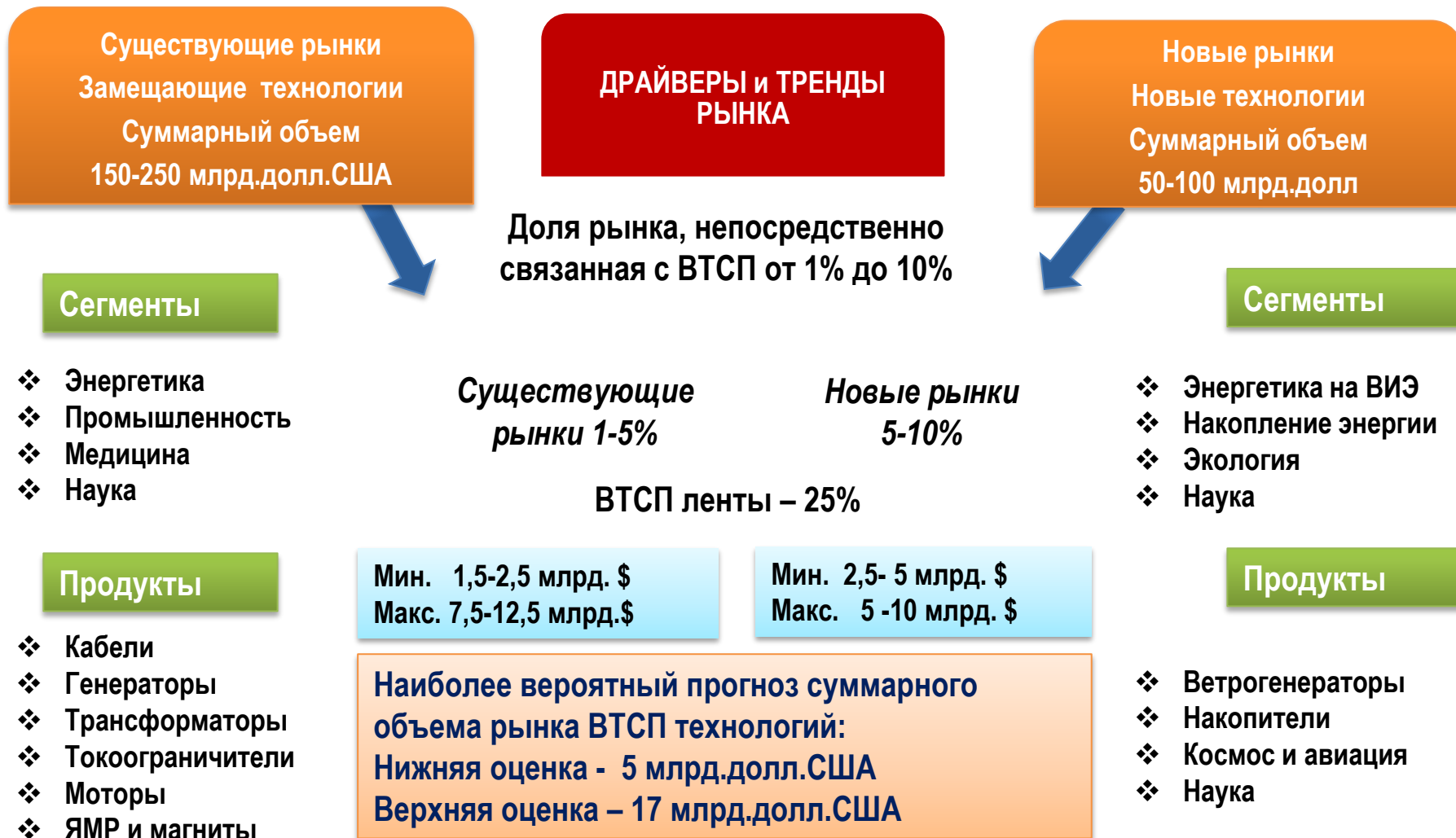
Производители ленты



Производители исходных материалов и базового оборудования



## Прогноз развития мирового рынка сверхпроводниковых технологий (к 2035 г.)



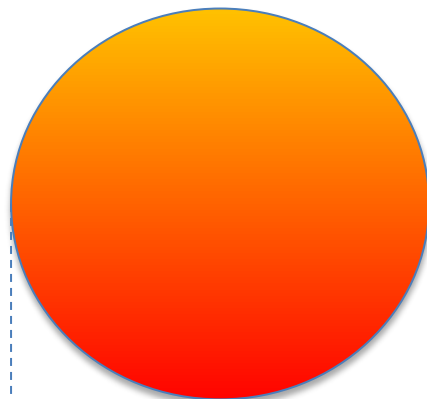
# Высокотемпературные сверхпроводящие кабельные линии

- соединение по «низкой» стороне отдельных секторов энергосистемы без увеличения токов КЗ;
- повышение устойчивости сети и предотвращение каскадных отключений потребителей;
- возможность связи несинхронизированных энергосистем;
- регулирование распределения потоков мощности в параллельных линиях.
- передача мощности с минимальными потерями в кабеле и, как следствие, снижение требований к криогенной системе;

Соотношение размеров сечения кабелей

**МЕДЬ**

**ВТСП-2**



22 мм



1,9 мм

**1 Га**

Площадь земли под трассу 100 м ЛЭП

Охранная зона трассы кабеля

**ВТСП-2**



100 м

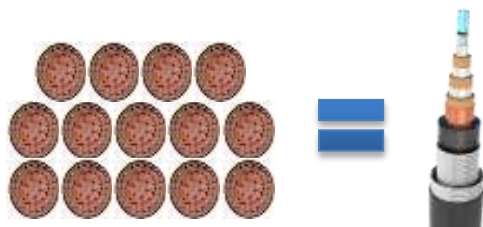
до 4 м\*

**Высвобождение значительных площадей земли московского региона**

\* В зависимости от глубины залегания и плана застройки

## Проект - ВТСП кабели

Соотношение размеров сечения обычных и ВТСП кабелей



Охранная зона трассы кабеля

ЛЭП

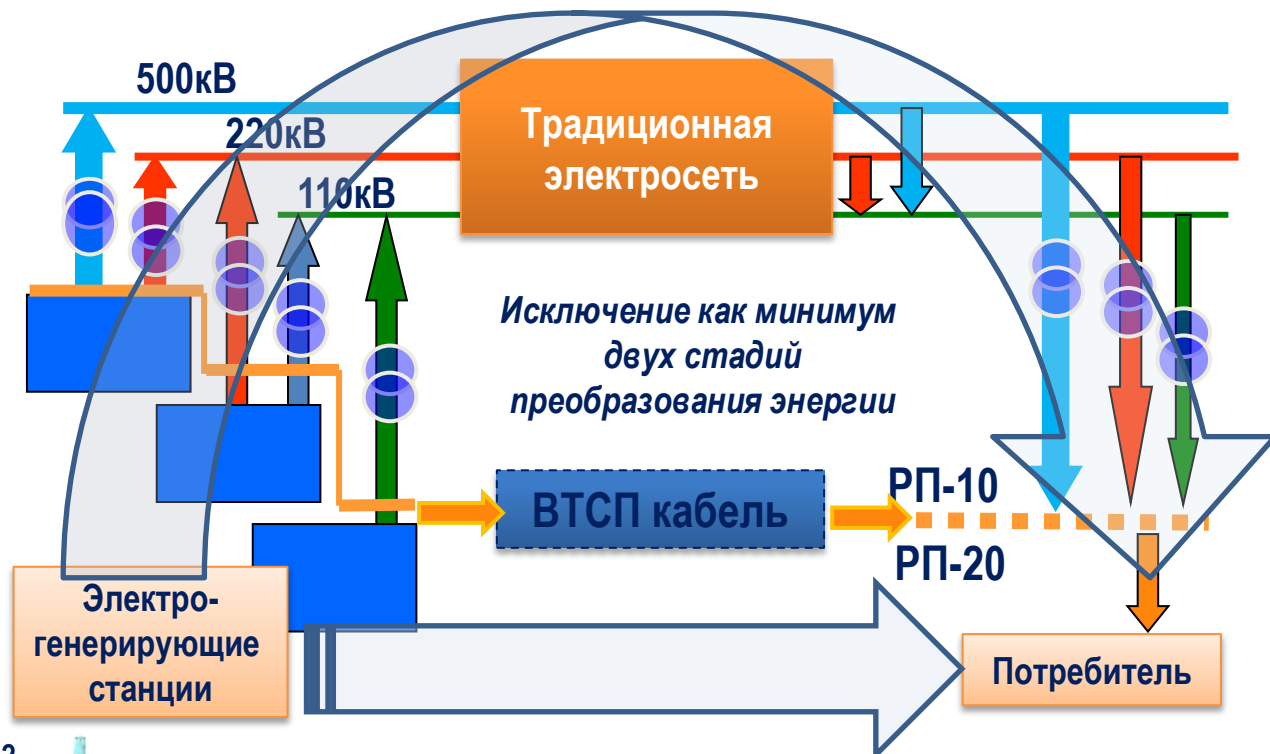


100 м

ВТСП-2



до 4 м



- соединение по «низкой» стороне отдельных секторов энергосистемы без увеличения токов КЗ;
- повышение устойчивости сети и предотвращение каскадных отключений потребителей;
- возможность связи несинхронизированных энергосистем;
- передача мощности с минимальными потерями в кабеле.

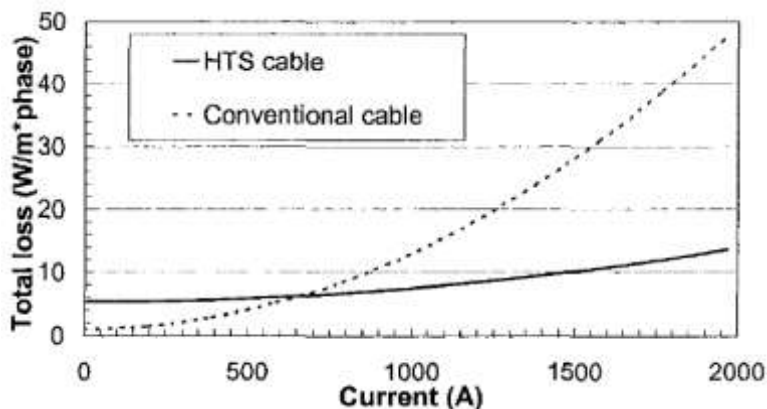
Высвобождение значительных площадей земли в мегаполисах и промышленных центрах



## Экономия при создании ВТСП КЛ достигает 20% относительно традиционных линий

Напряжение	Передаваемая мощность	Протяженность	Себестоимость (млн.руб.)	Стоимость внедрения* (млн.руб.)	Экономия относительно традиционных линий
20 кВ	50MVA	1 км	173,02	419,20	<b>10%</b>
		2,5 км	401,66	651,77	<b>7%</b>
		10 км	1 544,81	1 814,59	<b>8%</b>
	100 MVA	1 км	248,05	683,36	<b>18%</b>
		2,5 км	583,79	915,93	<b>18%</b>
		10 км	2 214,19	2 078,75	<b>20%</b>

\* - стоимость внедрения включает затраты по монтажу, СМР, ПНР, стоимость дооснащения устройств дополнительным оборудованием и т.д.



Сравнение потерь в сверхпроводниковом кабеле и в традиционном кабеле (450 MVA при 132 кВ) при различных токах нагрузки.

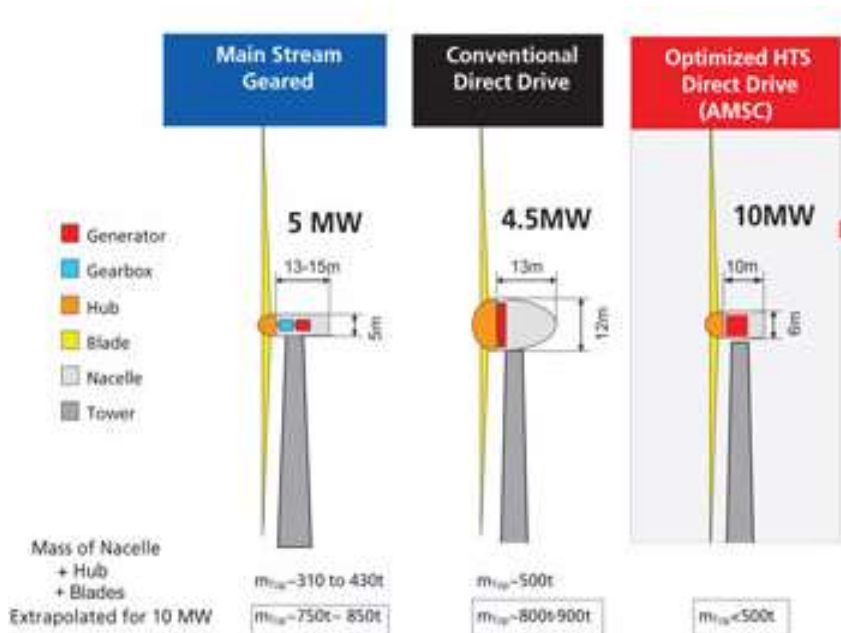
Ostergaard, J., Okholm, J., Lomholt, K., & Tonnesen, O., Energy losses of superconducting power transmission cables in the grid. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 11(1), 2375-2378 (2001)

## Существующие и проектируемые ВТСП кабели

Изготовитель	Размещение/Страна/Год	Тех. характеристики	ВТСП
Innower	Yunnan, Китай, 2004	35 кВ, 2 кА, 33 м, 3-фаз.*	Bi 2223
Sumitomo	Albany, США, 2006	34.5 кВ, 800 А, 350 м, 3-фаз.	Bi 2223
Ultera	Columbus, США, 2006	13.2 кВ, 3 кА, 200 м, 3-фаз.	Bi 2223
Sumitomo	Gochang, Корея, 2006	22.9 кВ, 1.25 кА, 100 м, 3-фаз.	Bi 2223
LS Cable	Gochang, Корея, 2007	22.9 кВ, 1.26 кА, 100 м, 3-фаз.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, США, 2007	34.5 кВ, 800 А, 30 м, 3-фаз.	YBCO
Nexans	Hannover, Германия, 2007	138 кВ, 1.8 кА, 30 м, 1-фаз.	YBCO
Nexans	Long Island, США, 2008	138 кВ, 1.8 кА, 600 м, 3-фаз.	Bi 2223
Nexans	Испания, 2008	10 кВ, 1 кА, 30 м, 1-фаз.	YBCO
Sumitomo	Chubu Утшм, Япония, 2010	10 кВ, 3 кА DC, 20 м, 200 м	Bi 2223
ВНИИКП	Москва, Россия, 2010	20 кВ, 1.4 кА, 200 м	Bi 2223
Nexans	Long Island, США, 2011	138 кВ, 574 МВА, 2.4 кА, 600 м, 1-фаз.	YBCO
LS Cable	Gochang, Корея, 2011	154 кВ, 1 ГВА, 100 м, 3-фаз.	YBCO
LS Cable	Seoul, Корея, 2011	22.9 кВ, 50 МВА, 400 м, 3-фаз.	YBCO
Sumitomo	ТЕРСО, Япония, 2012	66 кВ, 5 кА, 15 м	Bi 2223
Furukawa	ТЕРСО, Япония, 2012	275 кВ, 3 кА, 30 м	YBCO
Sumitomo	Yokohama, Япония, 2012	66 кВ, 200 МВА, 240 м, 3-фаз.	Bi 2223
Ultera	New York, США, 2015	13.8 кВ, 4 кА, 170 м, 3-фаз.	YBCO
Nexans	Essen, Германия, 2013	10 кВ, 40 МВА, 1000 м, 3 фаз.	Bi 2223
ФСК ЕЭС	С.Петербург, Россия, 2014	20 кВ, 50 МВА, 2.5 кА, 2,5 км, пост.тока	Bi 2223
LS Cable	Jeju Island, Корея, 2014 Испытан: Октябрь 2016 г	154 кВ, 600 МВА, 2.25 кА, 1 км, 3 фаз.	YBCO

## СП Ветрогенераторы

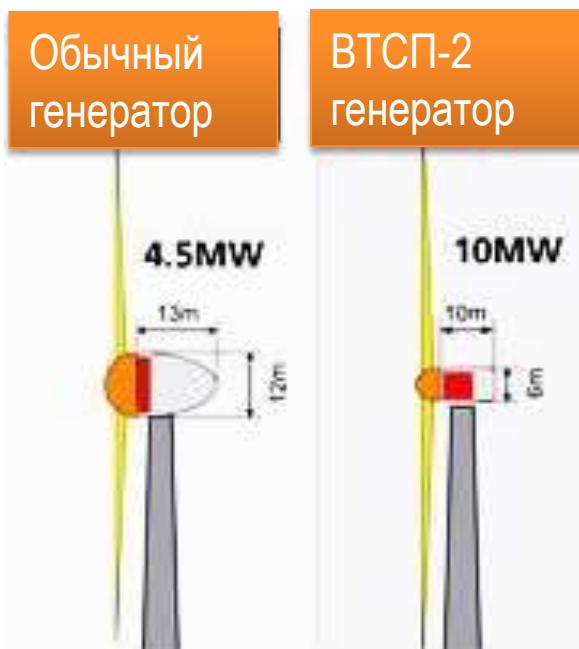
Прогнозируемая доля ветровой энергетики ~3%. Ввод генерирующих мощностей ветровой энергетики составит к 2020г. ~ 6 ГВт. Экономически целесообразным является применение в ВЭУ генераторов мощностью 6-10 МВт. При этом становится возможным создание производства мощностью до 100 генераторов в год. (~ **2000 км ВТСП** в год).



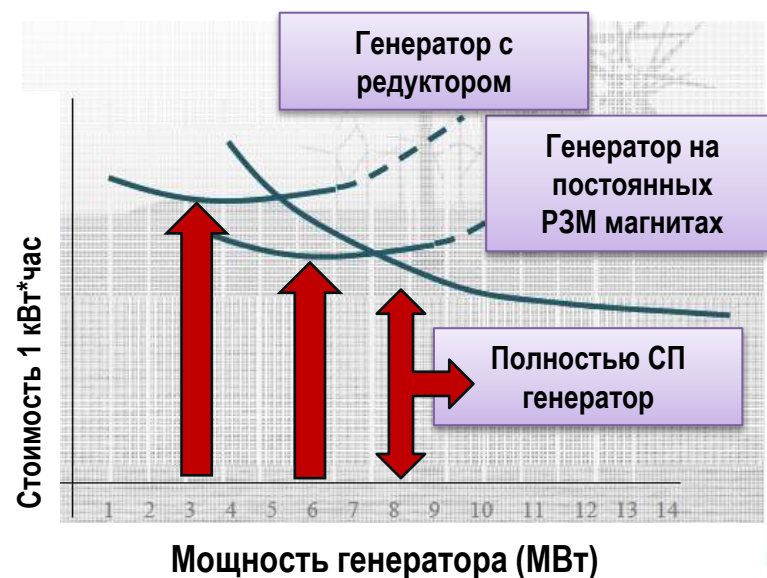
Снижение потерь энергии составит 170 кВт (240 кВт– обычный – 70 кВт СП) на каждый генератор мощностью 6 МВт

**При работе 6000 час/год экономия составит 3 млн. руб/год на каждый генератор**

## Генераторы для ВЭУ



1кВт установленной мощности – 3000\$  
 10 МВт генератор – 30 млн.\$ (1,95 млрд.руб)



Стоимость электроэнергии становится ниже в СП генераторах мощностью более 7 МВт

**Дальнейшее развитие отрасли ВЭС связано с ВТСП технологиями**

## Выводы

1. В рамках проекта «Сверхпроводниковая индустрия» (2010-2015) в кратчайшие сроки разработаны и изготовлены ряд перспективных для применения в энергетике прототипных устройств.
2. Создана научно-экспериментальная база для дальнейшего совершенствования ВТСП-2 материалов. Разработано промышленного масштаба отечественное оборудование и технологии для выпуска длинномерных (до 1000 м) ВТСП-2
3. Созданы предпосылки для применения сверхпроводниковых технологий в реализации новой парадигмы в энергетике, основанной на распределенной генерации, децентрализации, прорывных технологиях накопления, передачи и управления энергетическими ресурсами широкого спектра.