



Развитие аккумуляторных батарей и перспективы снижения стоимости электромобилей

Екатерина Грушевенко
Энергетический центр бизнес-школы СКОЛКОВО
3 апреля 2018г

Сегодня вопрос «Как мы храним энергию?» встает наравне с вопросом «Из чего мы ее вырабатываем?»



?

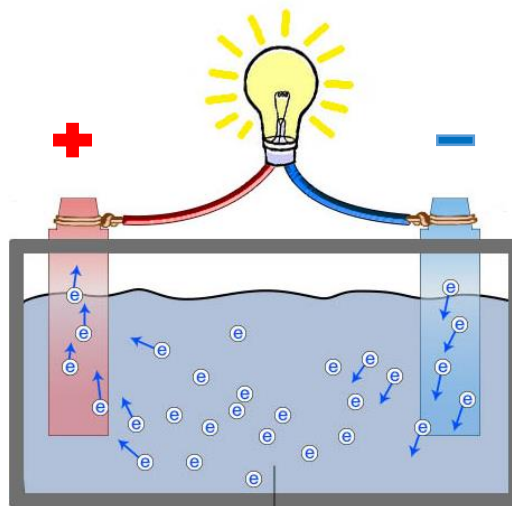


**Сфера применения аккумуляторных батарей крайне широка: электромобили, портативные электронные устройства, накопители излишков электроэнергии.
В будущем возможны, например, самолеты на аккумуляторах и супер накопители**

Батареи преобразуют накопленную химическую энергию непосредственно в электрическую энергию

Фаза разряда

(+) Катод: положительный электрод, который восстанавливается, приобретая электроны



(-) Анод: отрицательный электрод, который окисляется, высвобождая электроны

Электролит — вещество, расплав или раствор, которое проводит электрический ток вследствие диссоциации на ионы (участвует в процессе зарядки)

Фаза заряда

Примитивные батареи могут быть сделаны из медной монеты, оцинкованного гвоздя, лимона или картофеля

Путь от примитивной батареи до современных аккумуляторов был долгий

Алессандро Вольт создал первую электрическую батарею - **Вольтов столб**

Свинцово-кислотный аккумулятор.
Первый перезаряжаемый аккумулятор

Щелочные батареи.
Используются в домашних устройствах. В мире их сделано более 10 млрд

Литий-ионные батареи. Имеют высокую плотность энергии и имеют ряд конкретных катодных композиций для различных применений

1799

1836

1859

1899

1950е

1989

1991

Гальванический элемент Даниэля.
Впервые был отделен катод от анода

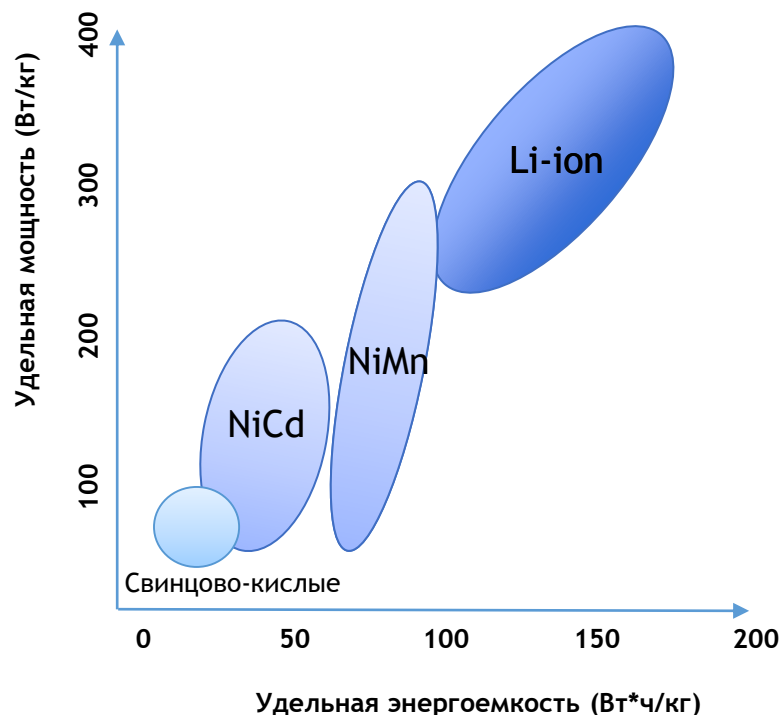
Никель-кадмиевые батареи. Стали основой для современных технологий. Теряют популярность из-за токсичности кадмия

Никель-металл-гидридные батареи. Используются в электроинструментах, цифровых камерах и т.п. Они также использовались в ранних Toyota Prius

*100 лет потребовалось для создания современного прототипа
200 лет для самой современной коммерческой аккумуляторной батареи*

Факторы, определяющие эффективность аккумуляторов: удельная энергоемкость и удельная мощность

Удельные энергоемкости и мощности различных типов батарей



- ✓ **Удельная энергоемкость** - это количество энергии, которую батареи могут аккумулировать
- ✓ **Удельная мощность** - это количество тока, которое может выдавать аккумулятор на единицу веса/объема

Источник: Nevada Energy Metals, eCobalt Solutions Inc., and Great Lakes Graphite

Аккумуляторы все еще имеют множество ограничений: необходимость частой перезарядки, ограниченная удельная мощность. Максимальным является 1й цикл работы аккумулятора, при последующих циклах он начинает терять свою эффективность

Современные аккумуляторные батареи обладают низкой энергетической емкостью

Удельные мощности и энергетические емкости аккумуляторов в сравнении с другими видами топлив



Источник: DOE, C. E. Thomas - Fuel Cell vs. Battery Electric Vehicles, 2009,
https://xtronics.com/wiki/Energy_density.html

Даже самые лучшие литий-ионные батареи имеют удельную мощность около 250 Вт*ч/кг. Это всего лишь 2% от плотности энергии бензина и менее 1% от водорода

Характеристики аккумуляторных батарей, которые позволяют оценить их пригодность использования в электромобилях



Удельная энергоемкость - это количество энергии, которую батареи способны аккумулировать. Чем выше удельная энергоемкость аккумулятора, тем дольше он может работать



Удельная мощность - это количество тока, которое может выдавать аккумулятор (на единицу веса/объема)



Доступная цена



Длительность жизненного цикла. Так как химический состав батареи не идеален, аккумуляторы имеют лимитированное количество циклов заряда/разряда - их малое количество приводит к ограниченному использованию аккумуляторов

Характеристики аккумуляторных батарей, которые позволяют оценить их пригодность использования в электромобилях (2)



Высокий уровень безопасности. Поскольку аккумуляторы используются массовым потребителем, а так же на промышленных объектах, их низкая воспламеняемость является критической характеристикой



Широкий рабочий диапазон: некоторые химические реакции плохо протекают при низких или высоких температурах, поэтому аккумуляторам важно иметь широкий температурный диапазон работы



Низкая токсичность



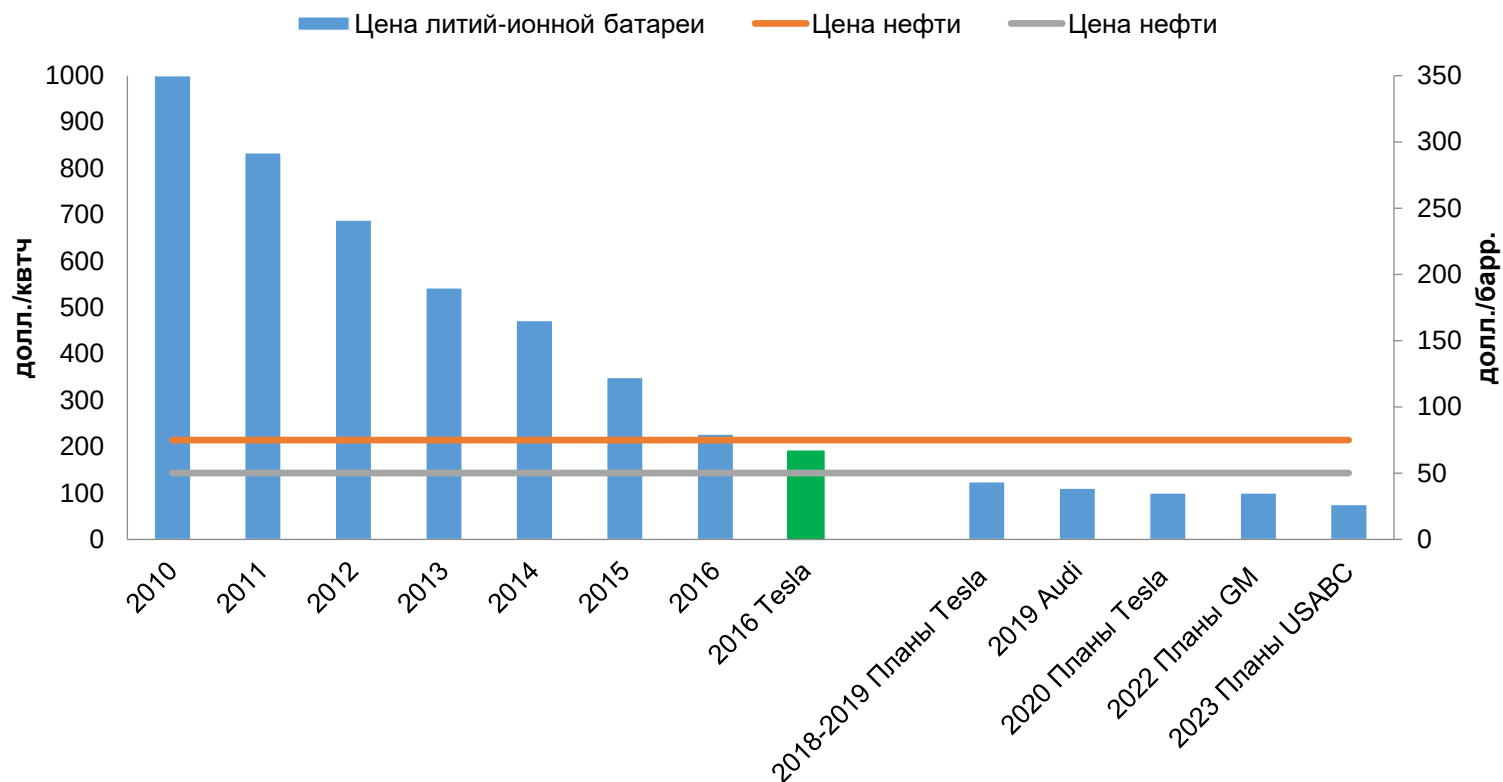
Быстрая зарядка



Низкий уровень саморазряда: все аккумуляторы в состоянии покоя разряжаются в небольших количествах, - вопрос в том, как быстро это происходит?

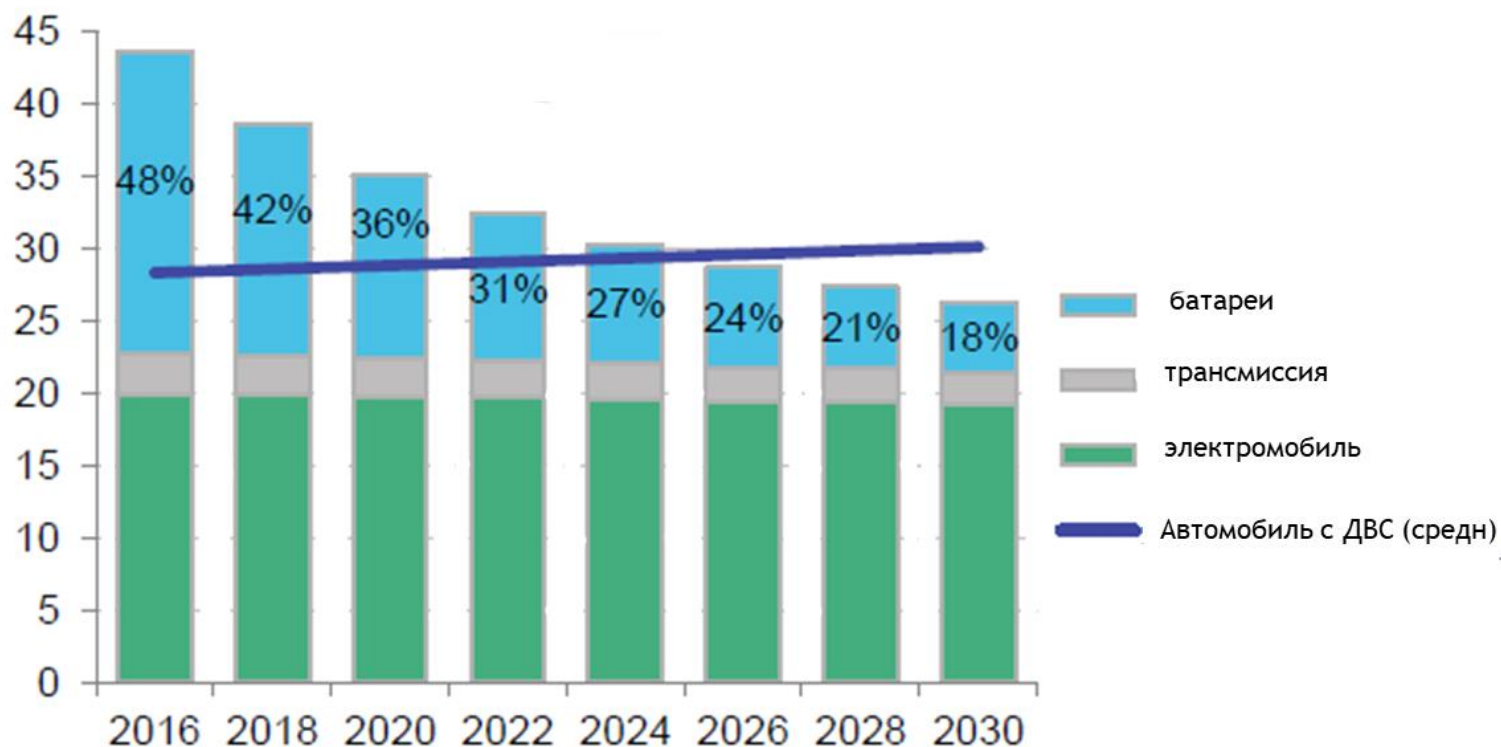
При цене \$240/кВтч ЛИБ конкурентоспособны при стоимости нефти в \$75/барр. При цене \$150/кВтч нефть может снизиться до \$50/барр.

Стоимость литий-ионных аккумуляторов и их конкурентоспособность по сравнению с ценой нефти



Батареи - основная причина дороговизны электромобилей

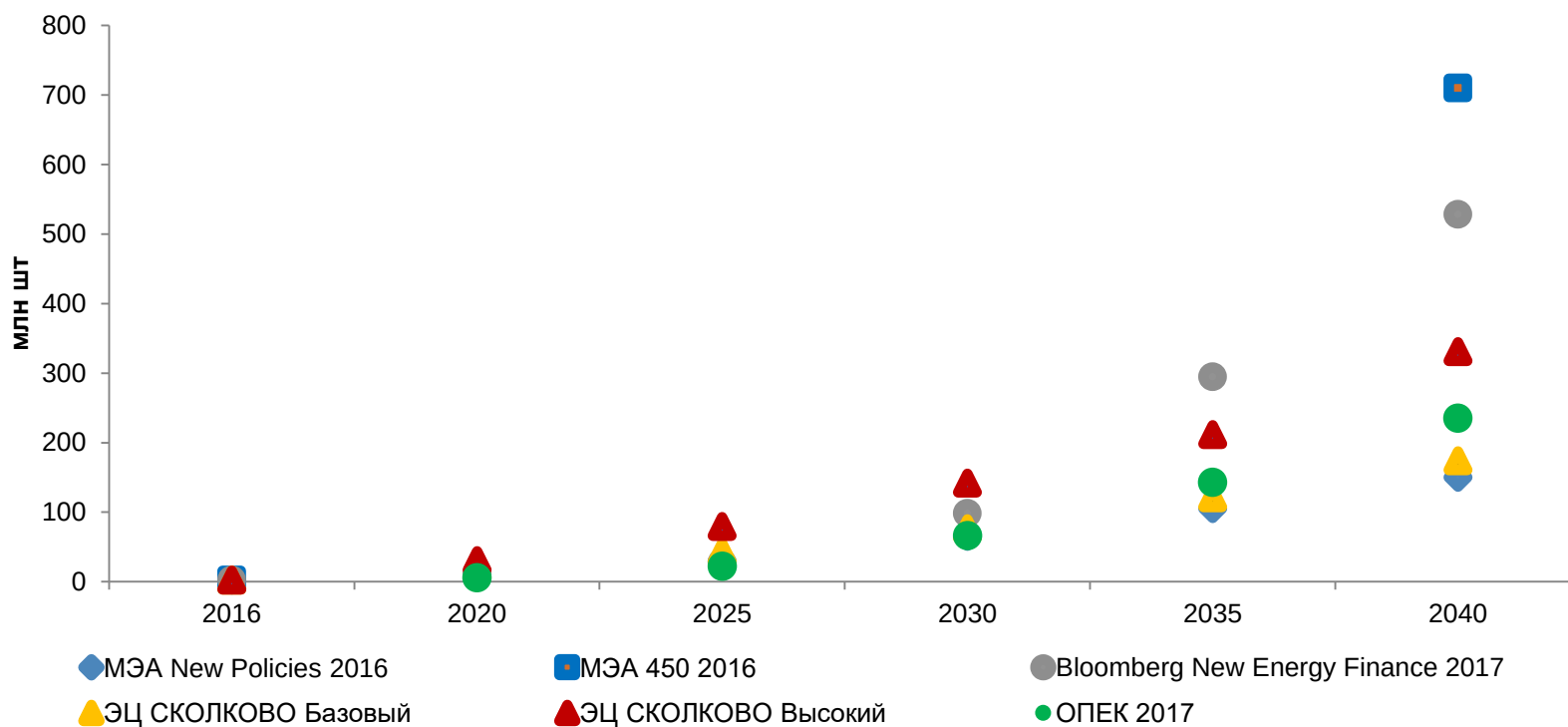
Структура цены электромобиля на фоне цены автомобиля
(цены в тыс. USD без налогов, США, средний ценовой сегмент)



Источник: BNEF

Большинство ведущих прогнозных организаций ожидают рост количества электромобилей к 2040г. в диапазоне от 150 до 700 млн единиц...

Прогнозы количества электромобилей в мире

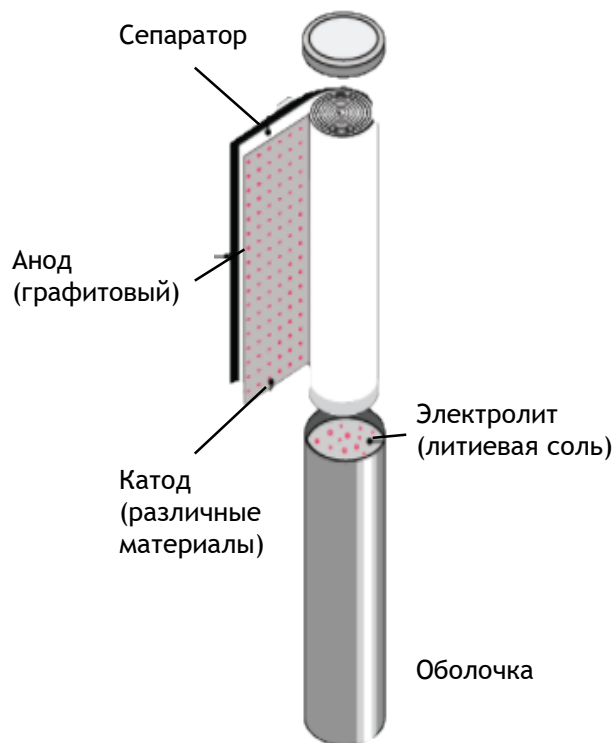


Источники: IEA, Bloomberg New Energy Finance, Энергетический центр СКОЛКОВО, ОПЕК 2017

...при этом вырастет и рынок литий-ионных аккумуляторов

Из чего состоит литий-ионная батарея?

Литий-ионная батарея



Варианты состава катода

	Конечный потребитель	Характеристики
Литий-оксид кобальта (LCO)	Мобильные телефоны, ноутбуки	Высокая удельная энергоемкость, но большее время зарядки, срок службы 1-3 года
Литий-оксид марганца (LMO)	Электроинструменты, медицинские инструменты, электромобили	Быстрая зарядка и высокий ток разряда, но обладает 1/3 от удельной энергоемкости LCO
Литий -никель-кобальт-марганец (LNCM)	Электромобили, электропоезда, Tesla Powerwall	Требуется повышения стабильности работы, возможны вариации хим. состава
Литий -никель-кобальт-алюминий (LNCA)	Электрические силовые агрегаты, электроинструменты	Требуется повышения стабильности работы
Литий-фосфат железа (LFP)	Стартеры, электропоезда	Чрезвычайно высокая стабильность работы, низкое напряжение на элементе

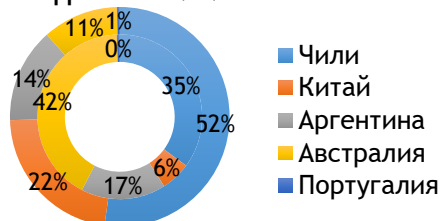
Источники: Bloomberg New Energy Finance

Источники: Resources and Energy Quarterly June 2017, Battery Market Trends and Safety Aspects 2 018-01-17, Breakfast Seminar at Celltech, Kista 1 Adam Sobkowiak, Etteplan

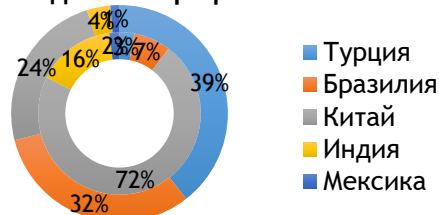
Батарейный отсек в Tesla S формируют 16 блоков, которые параллельно соединены. Каждый блок состоит из 74 ячеек (элементов)

Устойчивое предложение некоторых составляющих ЛИБ вызывает сомнения

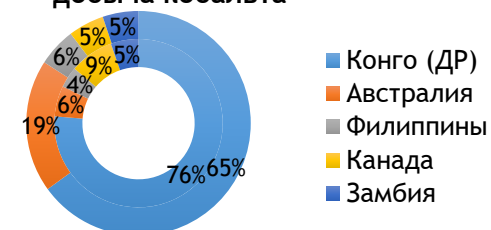
Топ 5: запасы (внешний круг) и добыча лития



Топ 5: запасы (внешний круг) и добыча графита



Топ 5: запасы (внешний круг) и добыча кобальта



Литий

Графит

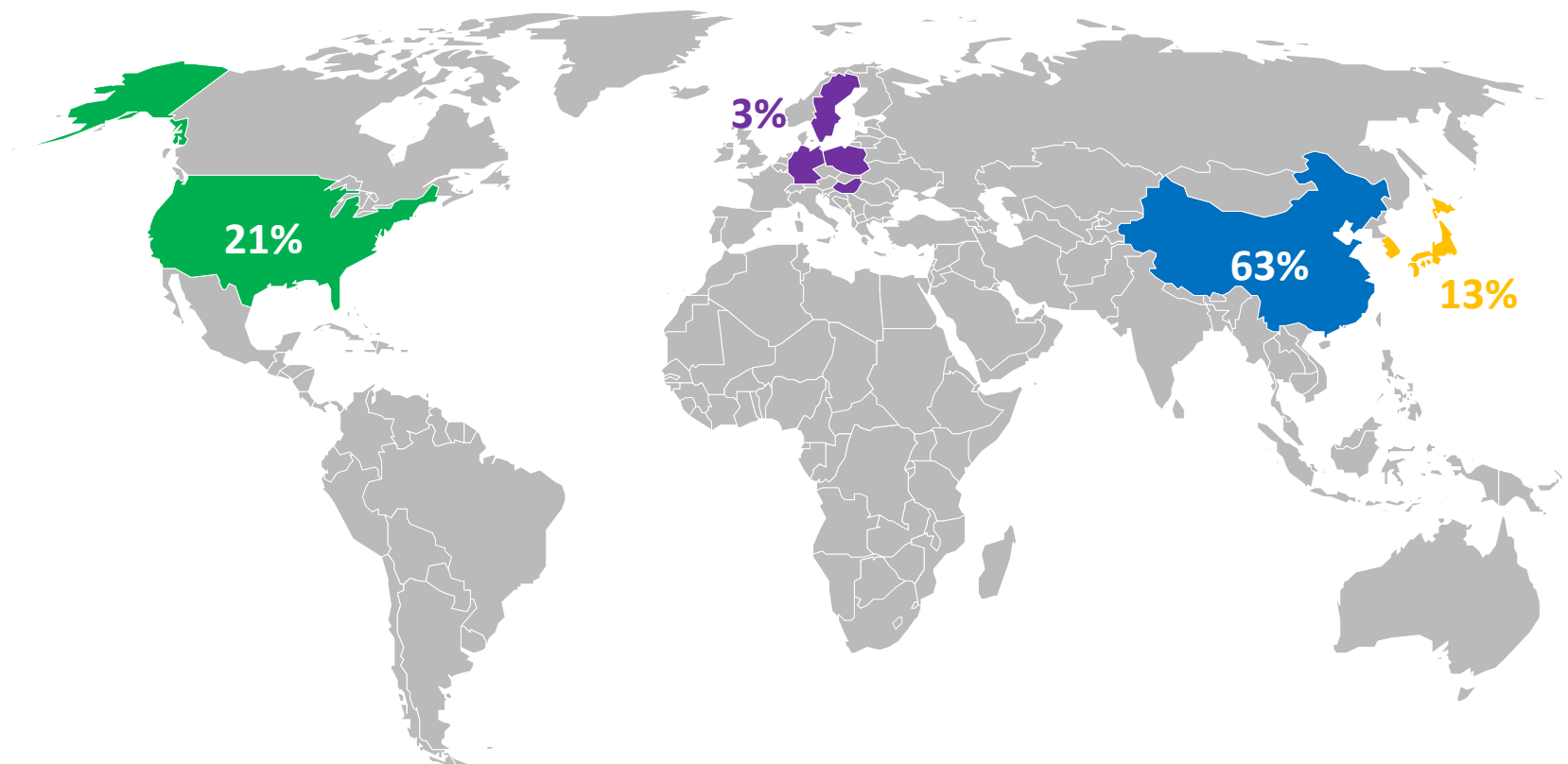
Кобальт

Страны «Литиевого треугольника» располагают 75% мировых ресурсов лития: Аргентина, Чили и Боливия

65% всего кобальта добывается в ДРК, стране, которая политически нестабильна

65% графита добывается в Китае. Из-за неблагоприятных условий труда и окружающей среды, эта отрасль находится под особым контролем - некоторые шахты были закрыты

Лидером по производству ЛИБ является Китай - 63% рынка



Источники: Battery Market Trends and Safety Aspects 2018-01-17, Breakfast Seminar at Celltech, Kista 1 Adam Sobkowiak, Etteplan

В 2017г рынок литий-ионных батарей составил 100 ГВтч, из них примерно четверть - 25 ГВтч пришлось на батареи для электромобилей

По оценкам Panasonic существующие ЛИБ в ближайшие 5 лет могут увеличить свою эффективность на 20-30%, однако это их предел

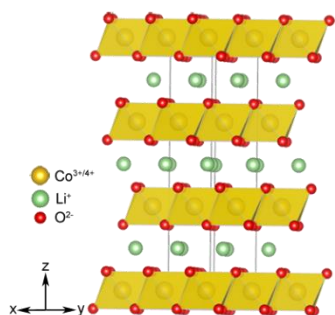
1. Эффективное производство

- ✓ Улучшение инженерных и производственных процессов
- ✓ Более широкая и длинная форма ячеек позволяет использовать их в большем количестве в блоке
- ✓ Новая система охлаждения аккумулятора позволяет использовать больше ячеек в блоке

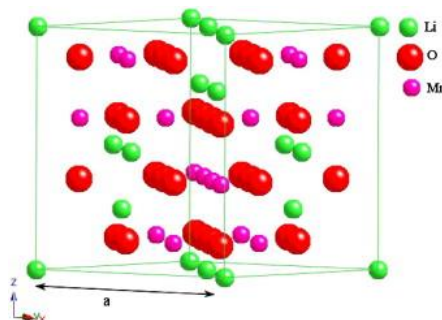
2. Модернизация катода

- ✓ Увеличение энергетической емкости ЛИБ заключалось в изменении объема кобальта, алюминия, марганца и никеля в катодах. К 2020 году ожидается, что 75% аккумуляторов будут содержать кобальт
- ✓ Поиск кристаллических структур, которые могут хранить максимальное количество ионов. Катоды следующего поколения могут состоять из богатых литием слоистых оксидных материалов

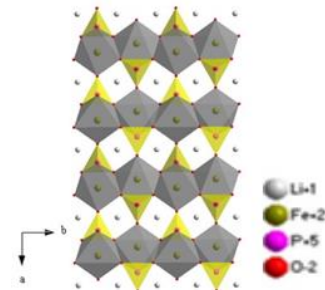
Слоистая структура



Шпинель



Оливиновая структура



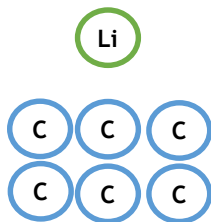
Главная дилемма ЛИБ: повышение мощности не в ущерб безопасности

По оценкам Panasonic существующие ЛИБ в ближайшие 5 лет могут увеличить свою эффективность на 20-30%, однако это их предел (2)

3. Модернизация анода

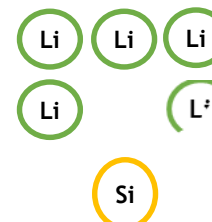
Графитовый анод

может хранить только 1 атом лития на каждые 6 атомов углерода



Кремниевый анод

может хранить 4,4 атома лития для каждого атома кремния



Мощность может быть увеличена до 10 раз

У кремневых анодов есть один существенный недостаток

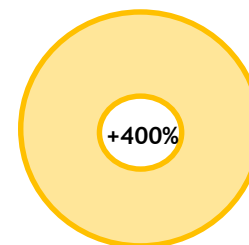
Графитовый анод

в процессе эксплуатации расширяется на 10%



Кремниевый анод

расширяется на 400%. Это может привести к необратимому повреждению анода



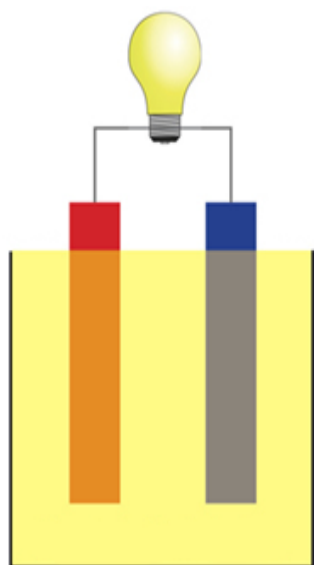
Рассматривают несколько различных решений этой проблемы:

- ✓ Обшивка кремния «графеновой клеткой» для предотвращения растрескивания после расширения анода
- ✓ Использование кремниевых нано проволок, которые могут лучше регулировать изменение объема анода
- ✓ Добавление малых количеств кремния в анод в существующих производственных процессах

Главная дилемма ЛИБ: повышение мощности не в ущерб безопасности

Твердотельные ЛИБ - наиболее перспективная технология в ближайшие 5 лет. В теории их энергоемкость может достигать 1000 кВтч/кг

Главные проблемы - увеличение размера твердотельных ЛИБ и снижение их стоимости

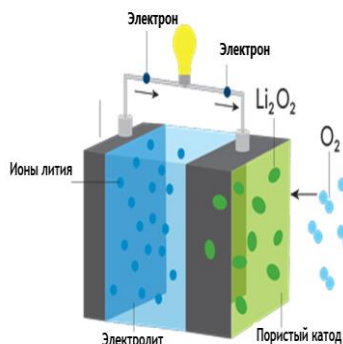


ЛИБ с жидким электролитом



Твердотельные ЛИБ

Такие батареи уже существуют, но обычно они небольшие размером (с монету), обеспечивают резервное питание в электрических цепях, например, в компьютерах. Первые коммерческие образцы ожидаются к 2020г



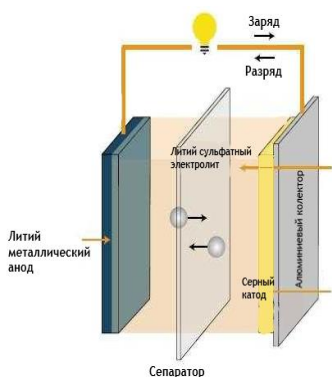
Литий-воздушные

Анод: литий

Катод: пористый углерод (кислород)

Достоинства: плотность энергии в 10 раз выше, чем у ЛИБ

Недостатки: необходимость фильтровать воздух. Литий и кислород образуют пероксид, который в конечном счете, повреждает емкость. Срок эксплуатации составляет всего 50 циклов в лабораторных тестах



Литий-серные

Анод: литий

Катод: сера, углерод

Достоинства: легче, дешевле и мощнее, чем ЛИБ

Недостатки: объем увеличивается до 80%, в результате возникает механическое напряжение. Низкая проводимость и низкая стабильность при высоких температурах. Нежелательные реакции с электролитами

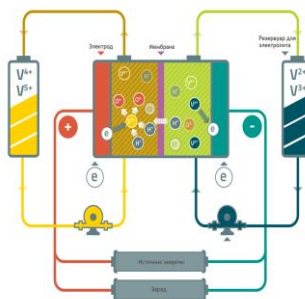
Ванадиевые

Анод: ванадий

Катод: ванадий

Достоинства: позволяют хранить энергию в большом масштабе. Могут быть расширены за счет использования больших емкостей для электролита.

Недостатки: низкое соотношение энергии к объему. Очень тяжелые, используются стационарно



Дорожная карта развития литиевых батарей



Основные тренды - рост энергоемкости и безопасности:

- применение различных электродов с существенно бóльшей теоретической емкостью (сера, кремний, металлический литий)
- увеличение предела напряжения в ячейке до примерно 5 В (стандарт в электронике)
- переход к твердотельным электролитам - жидкие небезопасны при утечке

Скорость снижения стоимости аккумуляторов напрямую будет зависеть от развития новых технологий

- У современных существующих технологий производства ЛИБ есть потенциал по снижению их стоимости примерно в два раза. Однако потенциал по их увеличению эффективности ограничен 20-30%.
- На цену современных ЛИБ будет оказывать влияние стоимость и доступность сырья для их производства. Волатильность на этих рынках может по мере роста спроса так же вырасти.
- Все новые технологии производства батарей имеют высокий энергетический потенциал. Однако их стоимость пока крайне высока.
- В краткосрочном периоде наибольший потенциалом развития обладают твердотельные ЛИБ.