

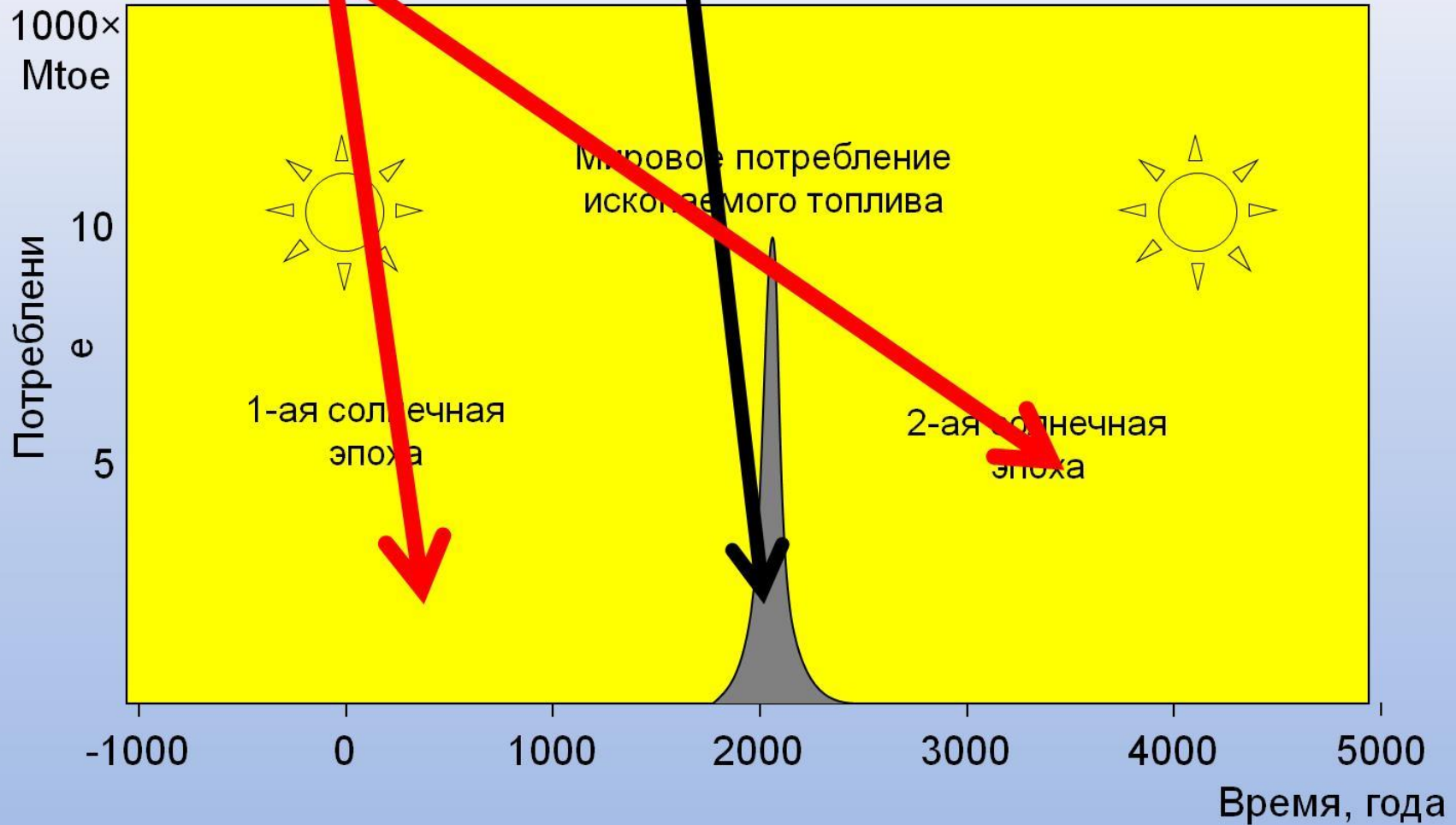
ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
А.В. Бобыль

# ПЕРСПЕКТИВЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ И МИРЕ =



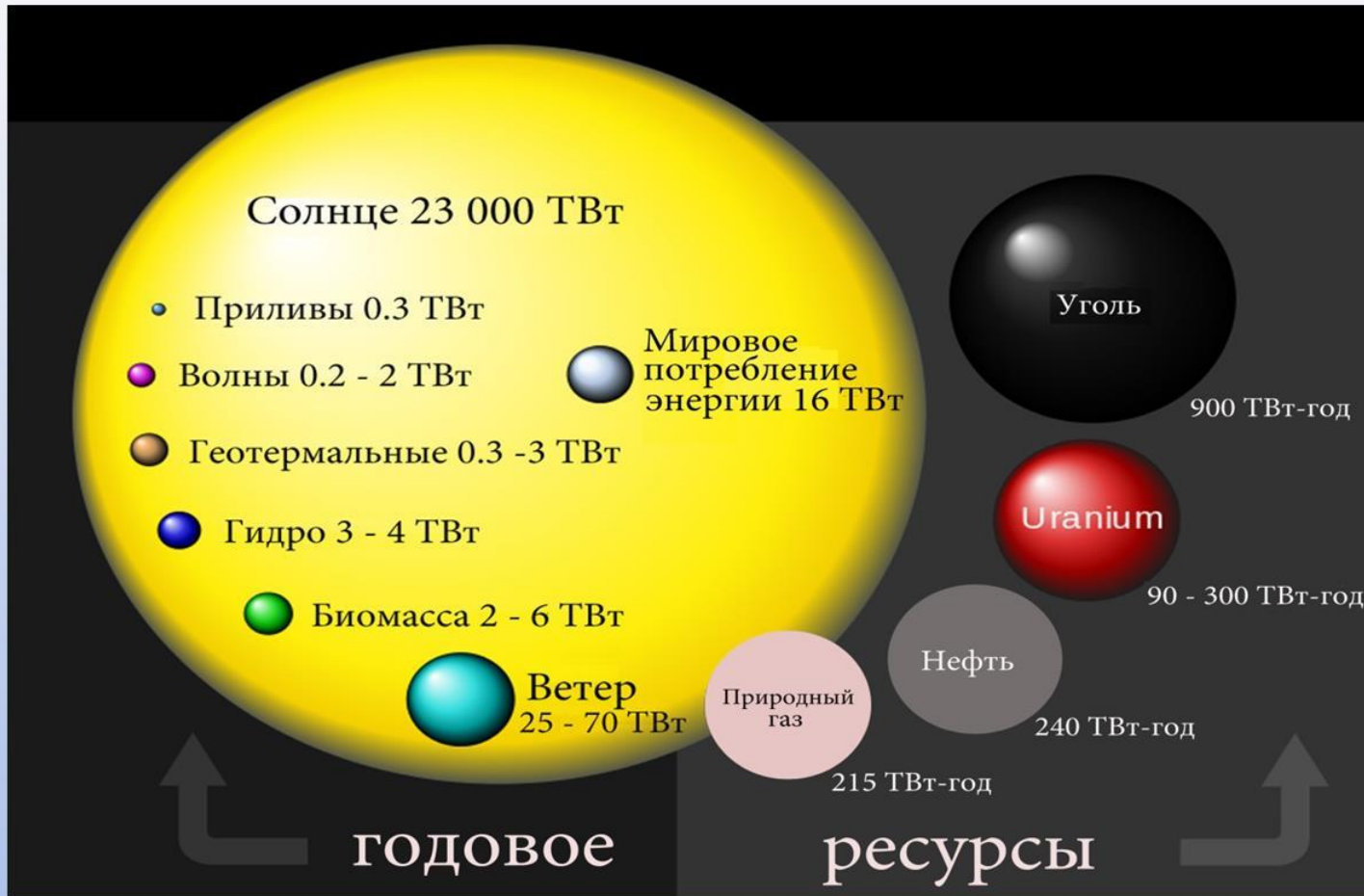
## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ





**Возобновляемая энергетика. Перспективы развития.**

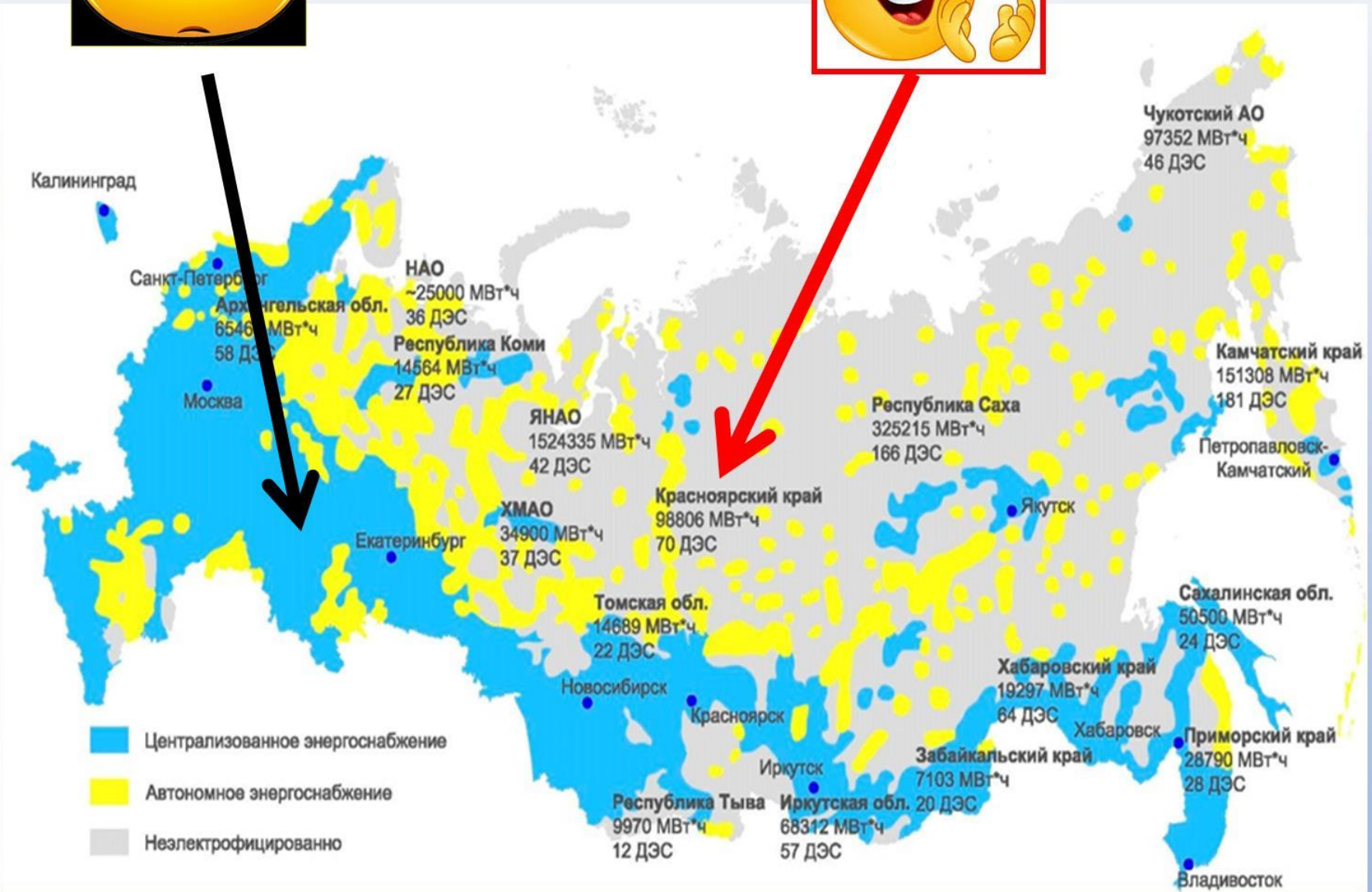
# Земля: потенциал источников



За 70 дней количество энергии солнца = всем известным запасам ископаемого топлива

99% тепла поступает от солнца. Без солнца температура понизиться до  $-240^{\circ}\text{C}$  ( $+ 33^{\circ}\text{K}$ )





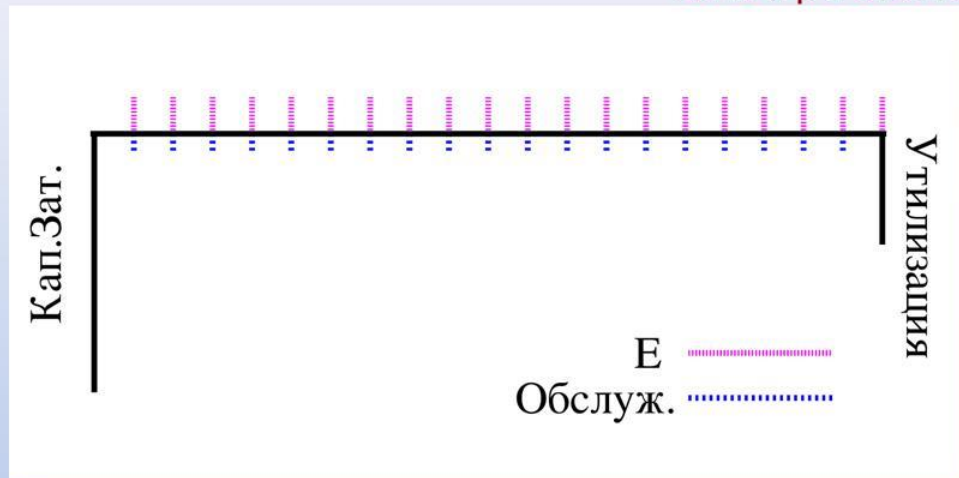
# **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОНОМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ: РОЛЬ ДЕГРАДАЦИИ Li-ion НАКОПИТЕЛЕЙ**

- 1. Экономика – это распределенные во времени потоки денег.**
- 2. Достижение сетевого паритета.**
- 3. Нормированная стоимостью энергии (LCOE) и ее хранения (LCOS).**
- 4. Экспресс-оценка срока возврата средств.**
- 5. Эффект использования накопления по регионам РФ, опыт Якутии и СПб.**
- 6. Проблемы предсказания (прогноза) срока жизни.**
- 7. Проблемы деградации аккумуляторов и экономические риски.**
- 8. Поток денег солнечной электростанции с учетом накопителя.**
- 9. Выводы.**



# 1. Экономика – это распределенные во времени потоки денег.

Распределенные во времени потоки денег, связанные с солнечными электростанциями



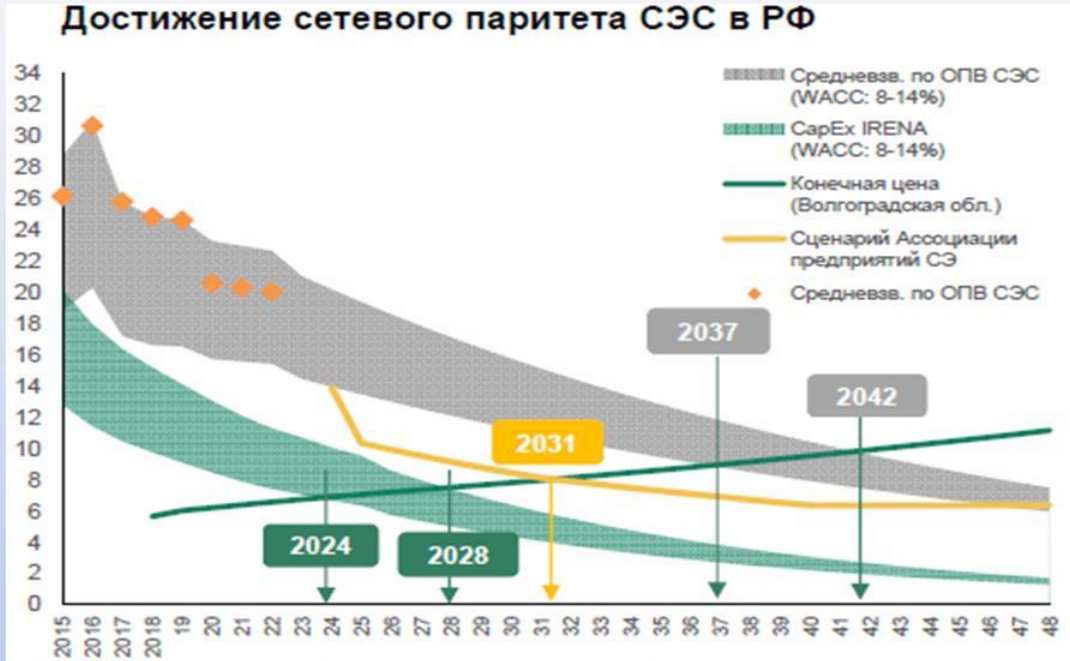
**Расписание:  
доходы – расходы =  
прибыль**

- Строительство
- Операционные затраты + кредиты
- Утилизация в конце срока
- Доходы от продажи электроэнергии + дополнительная полезность

1 руб через N лет стоит меньше:  $1 \text{ руб} / (1+r/100)^N = 1 \text{ руб} * \exp(-\alpha N) = 1 \text{ руб} * \exp(-(d+\alpha)N)$   
r- % ставка дисконтирования: учитывает риск невозврата и альтернативу (% в банке), показатель экспоненты  $\alpha = \ln(1+r/100)$ , d – скорость деградации,  $E = E_0 \exp(-dN)$  – уменьшение прибыли

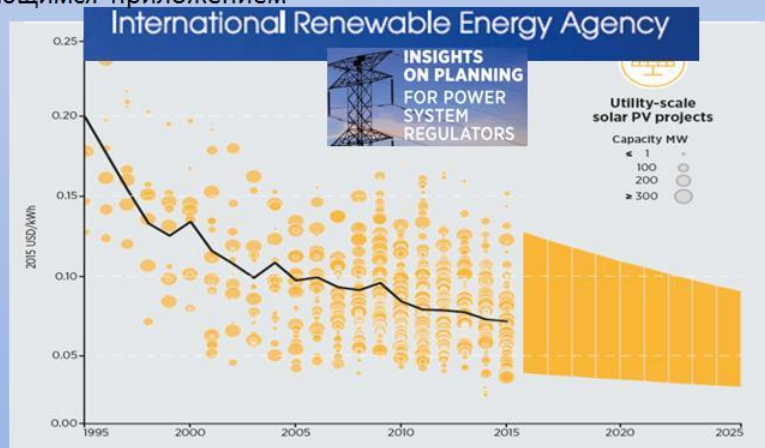
А.В. Бобыль, А.Г. Забродский, С.А. Кудряшов, В.Г. Малышкин, В.М.Макаров, Е.Е. Терукова, А.Ф. Эрк. "Перенормируемая модель оценки экономической эффективности солнечных электростанций" **Известия РАН. Энергетика №6 2017**

## 2. Достижение сетевого паритета.



Доклад О.Г. Баркина, заместителем Председателя  
Правления НП «Совет Рынка», Май 2018 г.

ОПВ - отбор инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии, являющимся приложением



Global range of electricity generation costs for solar projects

**ОРЕХ**, OPerating EXpense

**САРЕХ**, CApital EXpenditure

**КИУМ** коэффициент использования установленной мощности

Атомная энергетика: 90,3 %

Уголь: 63,8 %

Тепловые электростанции на природном газе: 42,5 %

Гидроэлектростанции: 39,8 %

Другие возобновляемые источники: 33,9 %

Тепловые электростанции на нефти: 7,8 %

Среди них:

Ветрогенераторы: 20-40%.<sup>[5][6]</sup>

Фотовольтаика (солнечная энергетика)

в Массачусетс: 13-15%.<sup>[7]</sup>

Фотовольтаика в Аризоне: 19%.<sup>[8][9]</sup>

тепловые солнечные станции в Калифорнии 33%.<sup>[10]</sup>

**Ставка дисконтирования** — это

процентная ставка, используемая для пересчёта будущих потоков доходов в единую величину текущей стоимости.

**WACC** средневзвешенная стоимости капитала.

**Формула расчета**

Среднее арифметическое:  $(10\% + 20\%)/2 = 15\%$

Средневзвешенное (WACC):  $(0.1 * 10\% + 0.9 * 20\%) = 19\%$

**LCOE** (Levelised Cost of Energy

нормированная стоимость электроэнергии)



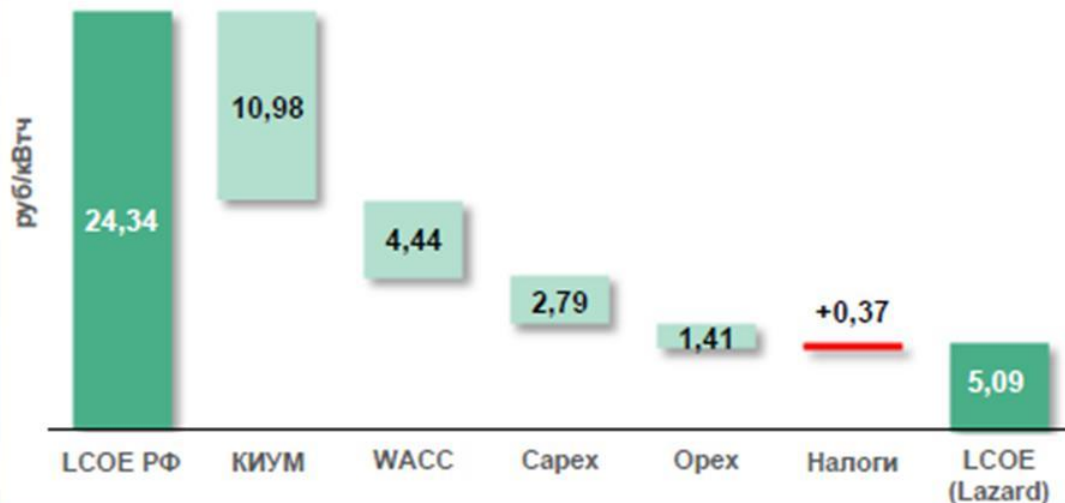
### 3. Нормированная стоимостью энергии (LCOE) и ее хранения (LCOS).

Доклад О.Г.Баркина, заместителем  
Председателя Правления НП «Совет Рынка»,  
Май 2018 г.

ДПМ - Договора о поставки  
мощностей

ОПВ - отборочных инвестиционных проектов  
по строительству генерирующих объектов,  
функционирующих на основе использования  
возобновляемых источников энергии

**Факторный анализ LCOE в сравнении с зарубежными**  
(Levelised Cost of Energy нормированная стоимость электроэнергии)



Виды генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Генерирующие объекты, функционирующие на основе энергии ветра	65 630	65 565	65 499	65 434
Генерирующие объекты, функционирующие на основе фотоэлектрического преобразования энергии солнца	111 839	109 602	107 410	105 262
Генерирующие объекты установленной мощностью менее 25 МВт, функционирующие на основе энергии вод	146 000	146 000	146 000	146 000



## LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS—VERSION 11.0, 2017



C&I Commercial & Industrial

**Нормированная стоимость электроэнергии**—долгосрочная стоимость кВт-ч, обеспечивающая стабильную цену для потребителей э/энергии, а инвестору — безубыточность его инвестиций в ЭС и приемлемую норму доходности. Используется для инвестиционного анализа и тарифообразования. Это самая распространённая сегодня методика оценки конкурентоспособности проектов сооружения электростанций.

**Рыночные продукты** Технологическая инжиниринговая компания «Системы накопления энергии» (ТИК «СНЭ»)

*LCOS – Levelized Cost of Storage* нормированной стоимостью хранения энергии»

$$LCOS = \frac{Capital + \sum \frac{(O\&M_t + E_{aux})}{(1+r)^t}}{\sum \frac{E_0}{(1+r)^t}}$$

*Capital* – суммарные капиталовложения, руб;

*O&M* – затраты на содержание, эксплуатацию и техническое обслуживание за время *t*, руб;

*E<sub>aux</sub>* – стоимость запасенной электроэнергии (т.е. энергии, полученной из сети) за время *t*, руб;

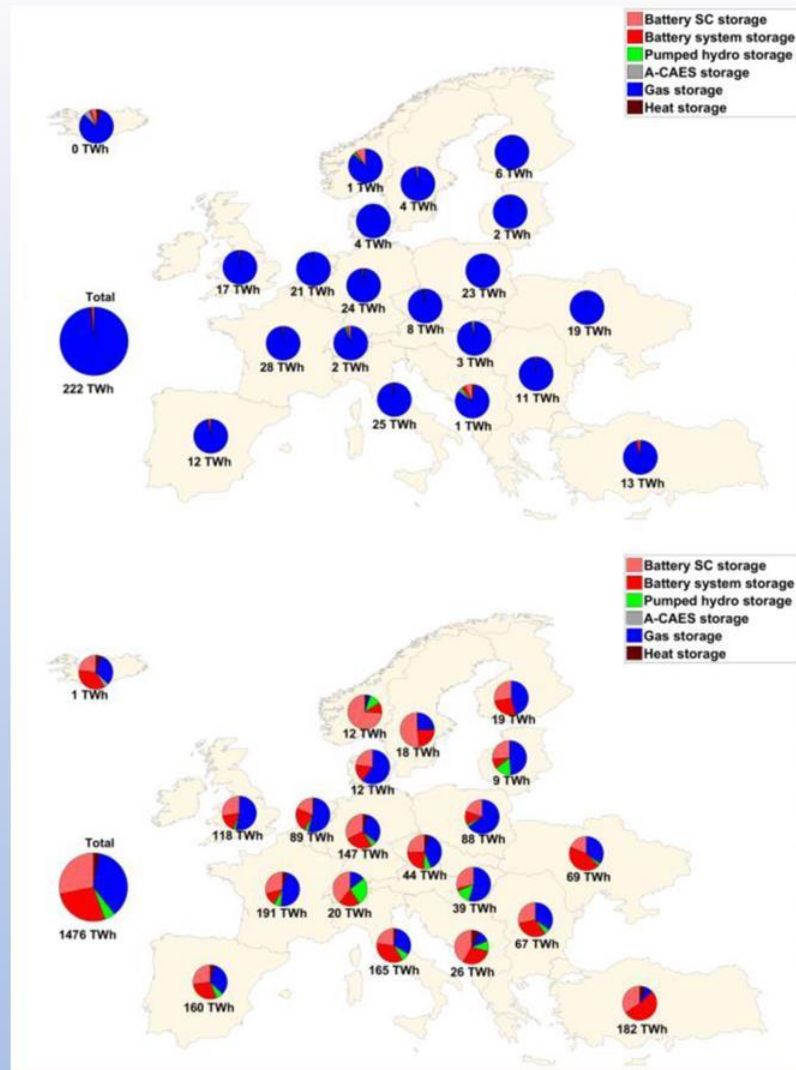
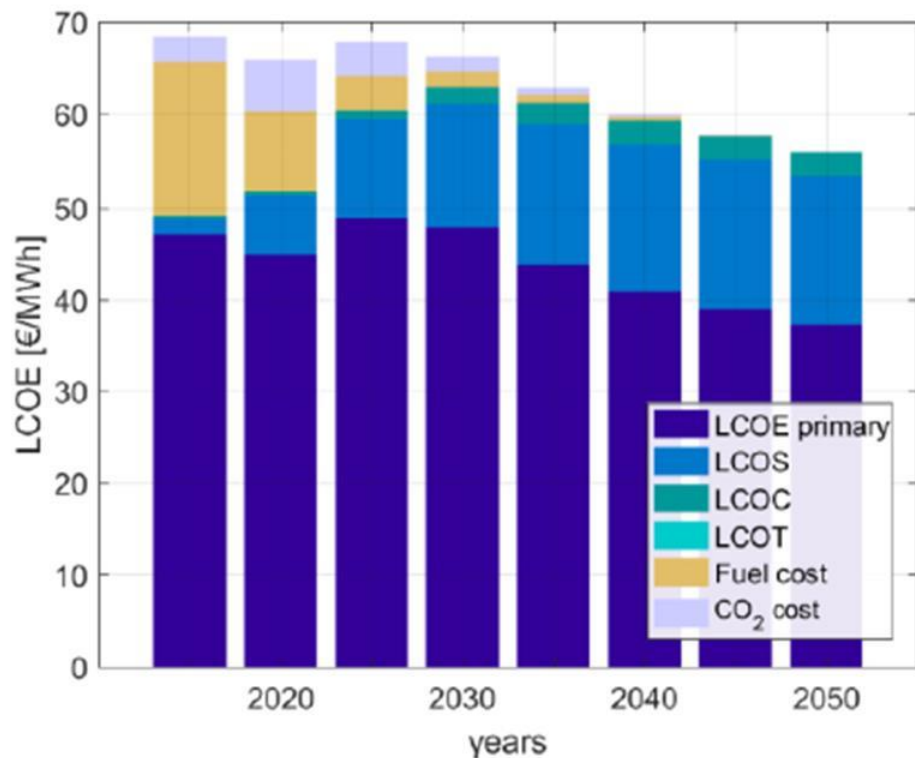
*r* - ставка дисконтирования, о.е.;

*E<sub>0</sub>* – количество электроэнергии, которую выдала СНЭ за время *t*, МВт·ч.

По результатам расчета стоимость хранения энергии для системы производства ТИК «СНЭ», применяемой в изолированных энергосистемах, составила **32,5 руб./кВт·ч**, что на 10% ниже, чем установлено в прогнозе на 2018 год «Концепцией развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации», подготовленной Министерством энергетики РФ.

The role of storage technologies for the transition to a 100% renewable energy system in Europe

Michael Child, Dmitrii Bogdanov, Christian Breyer  
Lappeenranta, Finland

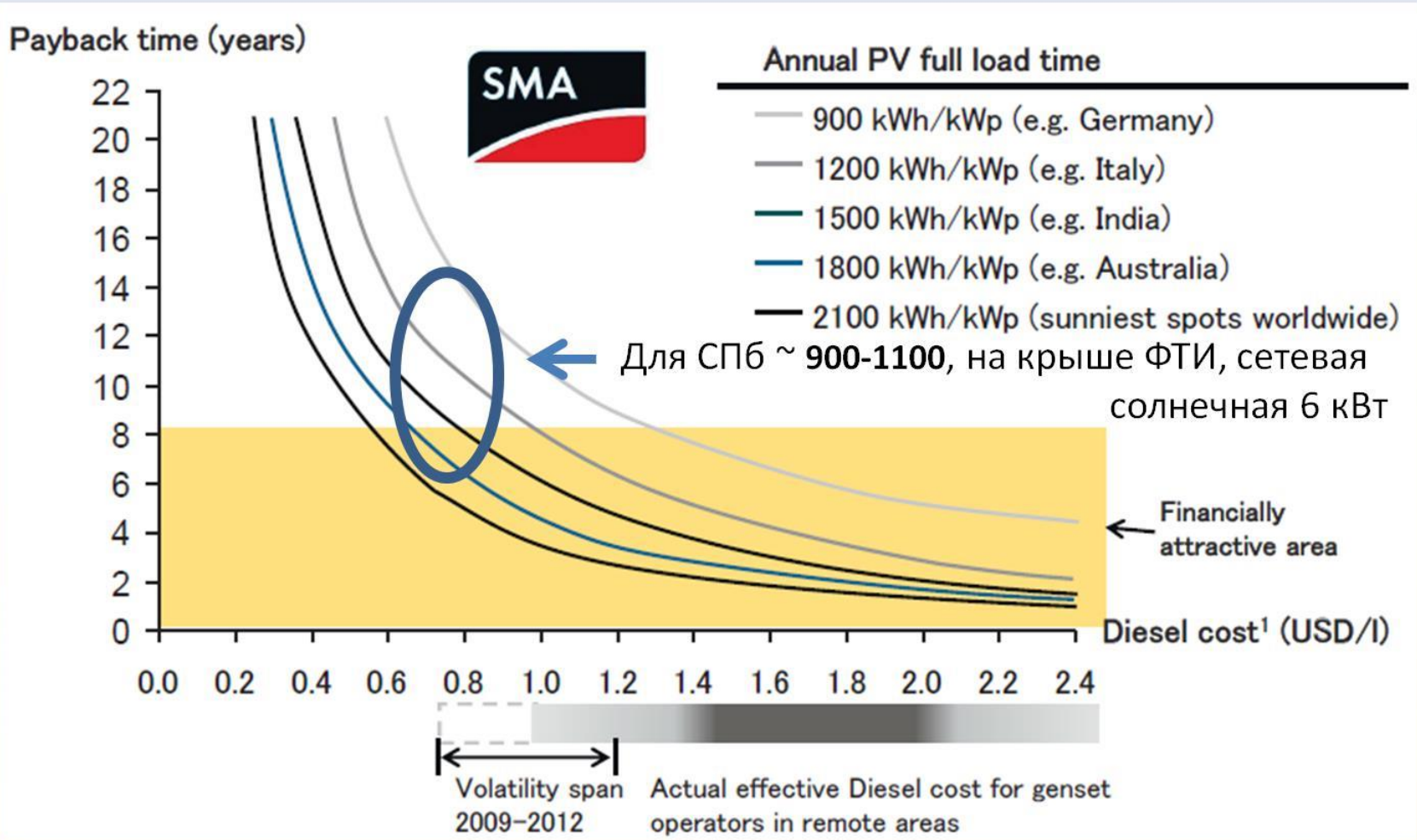


Installed storage capacities (upper) and storage output (lower) by 2050.



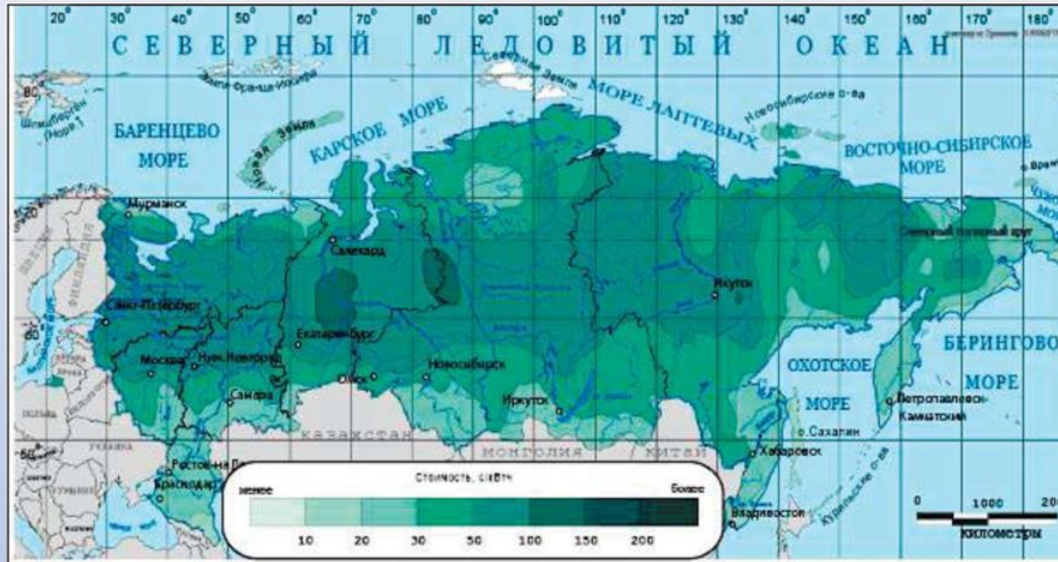
# 4. Экспресс-оценка срока возврата средств.

PV-Diesel-Hybrid is already a real business case in high irradiation regions with effective Diesel cost > 1 USD/liter

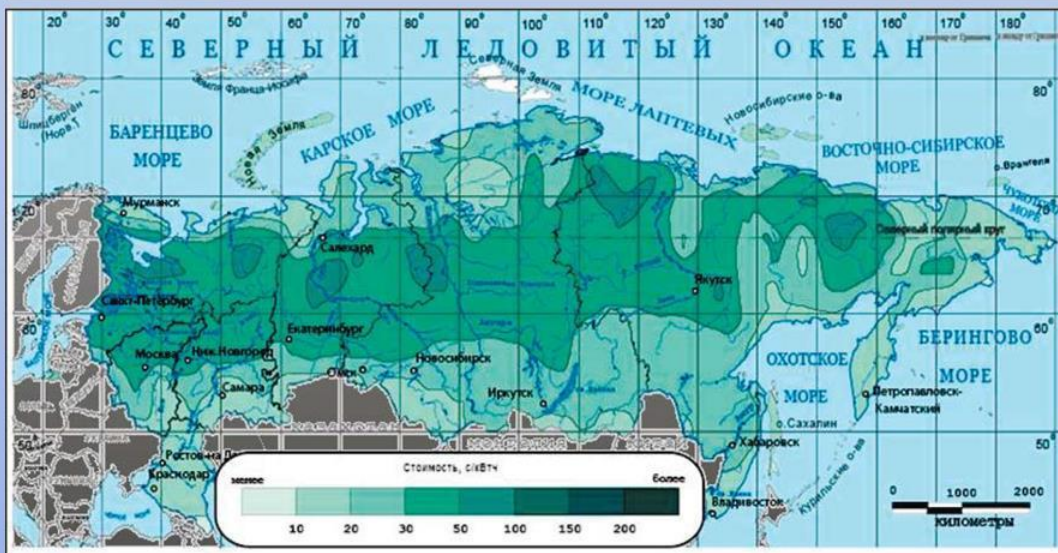


## 5. Эффект использования накопления по регионам РФ, опыт Якутии и СПб.

РАСЧЕТНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ СОЛНЕЧНО-ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ, *центы/кВтч* (О.С.Попель)



Без накопителей электроэнергии



С накопителями электроэнергии



## Экономия дизельного топлива за счет использования солнечных электростанций ОАО «Сахэнерго»

№ п/п	Место расположения (населенный пункт, улус)	Установленная мощность (кВт)	Год ввода в эксплуатацию	Факт выработки э/э, за 2014 г. (тыс. кВт.ч)	Планируемая выработка э/э, за 2015 г. (тыс. кВт.ч)	Планируемая выработка э/э, за 2016 г. (тыс. кВт.ч)	Экономия топлива (орпент.) за 2016г., тонн	Экономия в денежном эквиваленте (орпент.) за 2016г., тыс. руб.	КИУМ за 2014, %
1	СЭС п. Батамай Кобяйский улус	60	2011-2014	32,773	57,676	57,676	17,3	780,2	10,4
2	СЭС п. Ючюгей Оймяконский улус	20	2012	21,635	21,474	21,474	5,9	267,7	12,4
3	СЭС п. Дулгалах Верхоянский улус	20	2013	23,153	22,574	22,574	9,0	404,7	13,2
4	СЭС п. Куду-Кюель Олекминский улус**	20	2013	12,172	20,229	20,229	6,6	296,3	6,9
5	СЭС п. Эйик Оленекский улус	40	3 кв 2014	6,042	36,047	36,047	12,0	540,8	4,1
6	СЭС п. Куберганя Абыйский улус	20	4 кв 2014	0,891	20,909	20,909	6,1	272,6	1,8
7	СЭС п. Джаргалах Эвено-Быгантайский улус	15	4 кв 2014	0,016	13,421	13,421	4,6	206,7	0,1
8	СЭС с. Юнкюр Верхоянский улус*	40	2015	-	10,934	36,447	13,8	623,2	-
9	СЭС с. Бетенкес Верхоянский* улус	40	2015	-	10,994	36,647	13,9	626,7	-
10	СЭС с. Столбы Верхоянский улус*	10	2015	-	3,078	10,261	3,9	175,5	-
11	СЭС с. Улуу Алданский улус*	20	2015	-	6,892	22,974	8,7	392,9	-
<b>ИТОГО</b>		<b>СЭС - 305 кВт</b>		<b>96,682</b>	<b>224,2</b>	<b>298,7</b>	<b>101,9</b>	<b>4 587,2</b>	

**На крыше ФТИ, сетевая солнечная 6 кВт – КИУМ =13.6 %, при 10% затенении на данный момент с мая 2014 выработка 31 МВт\*ч (31000/6\*1580 д)/24=0.136)**

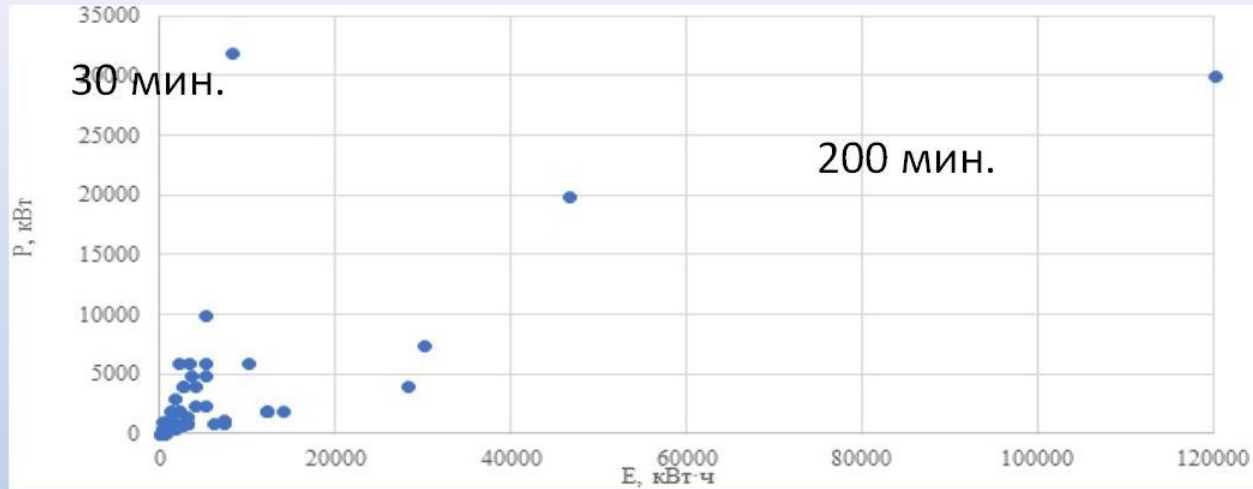


## Анализ станций по странам

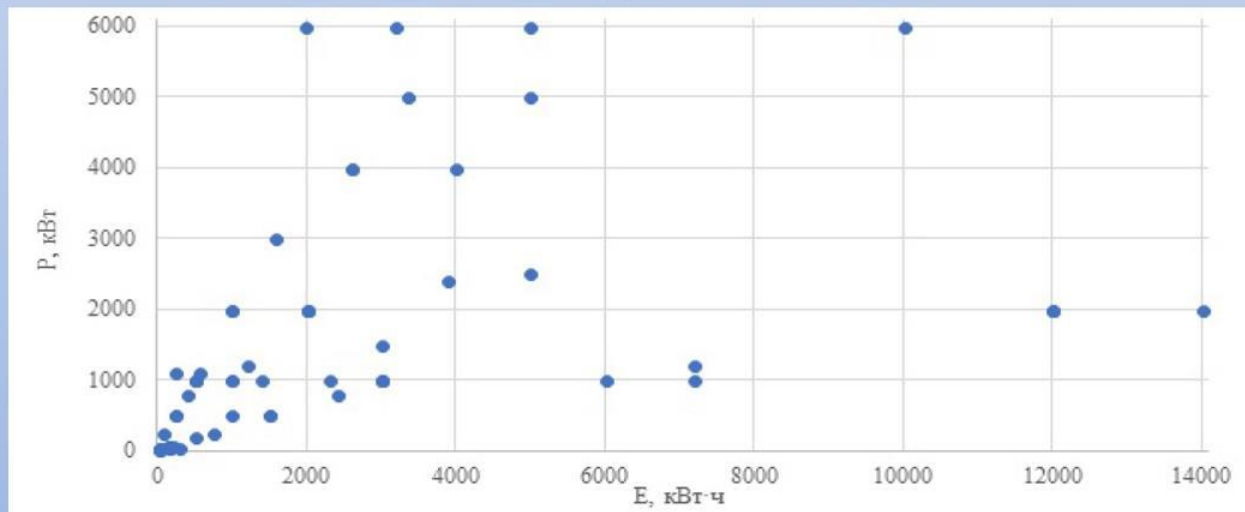
## Выбор емкости накопления

№	Страна	Кол-во систем
1.	США	37
2.	Германия	9
3.	Великобритания	5,7
4.	Канада	4
5.	Италия	3
6.	Австралия	3
7.	Южная Корея	2
8.	Япония	1

## Мощность станций и объём накопления



## То же в большем масштабе для малых станций

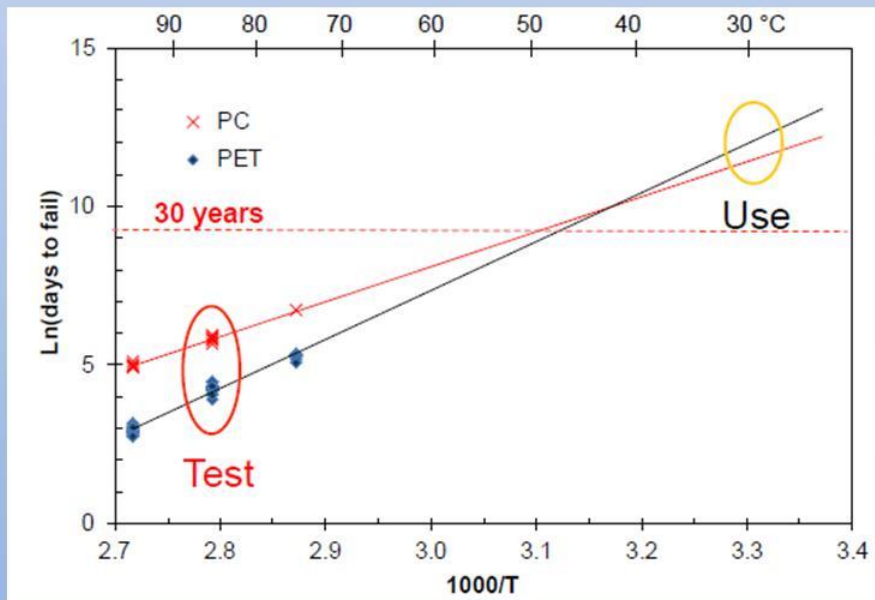
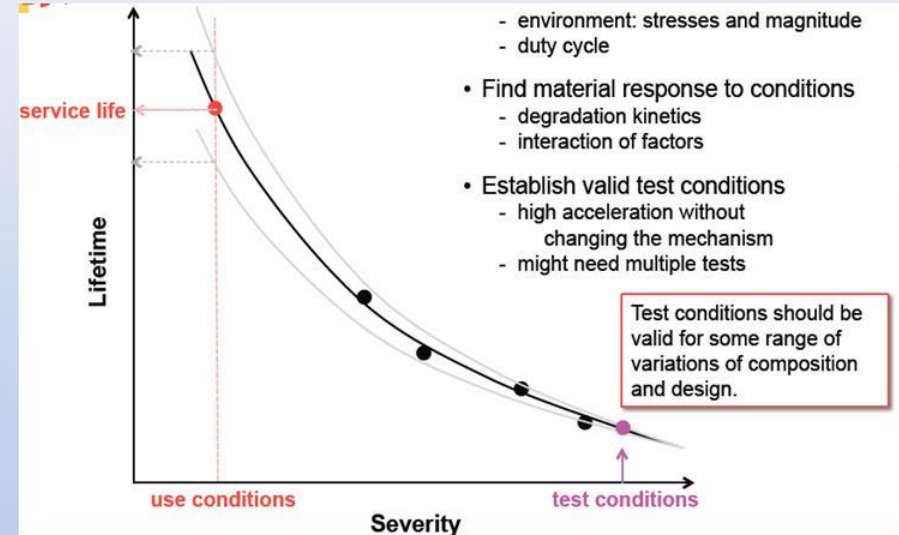
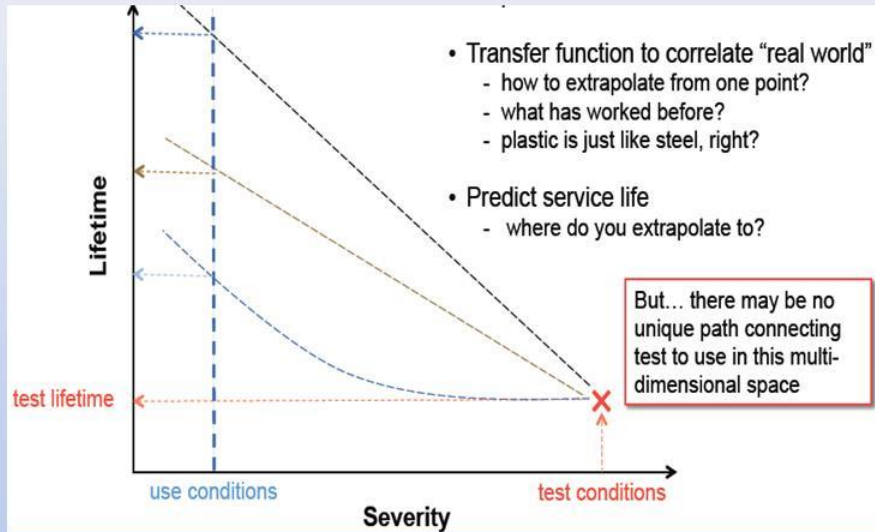


Для станции 1кВт и КИУМ 0.1 необходима емкость не менее 2.4 кВт\*ч

# 6. Проблемы предсказания (прогноза) срока жизни.

**Проблема предсказания времени жизни и ее решение на примере деградации двух полимеров, используемых в технологии солнечных элементах**

**Lifetime prediction — why is this so hard?** James E.Picket, GE GlobalResearch

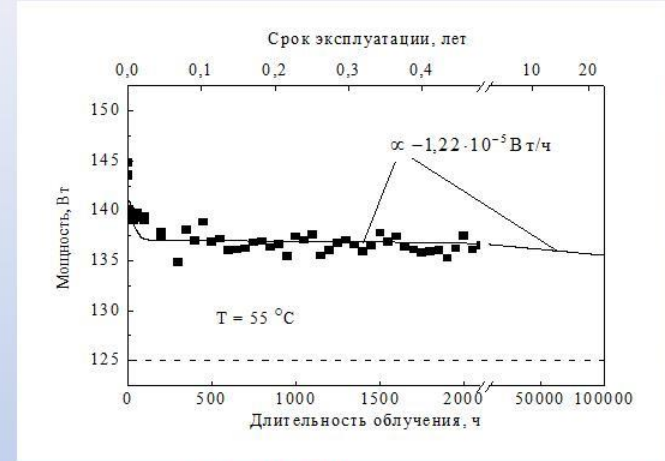
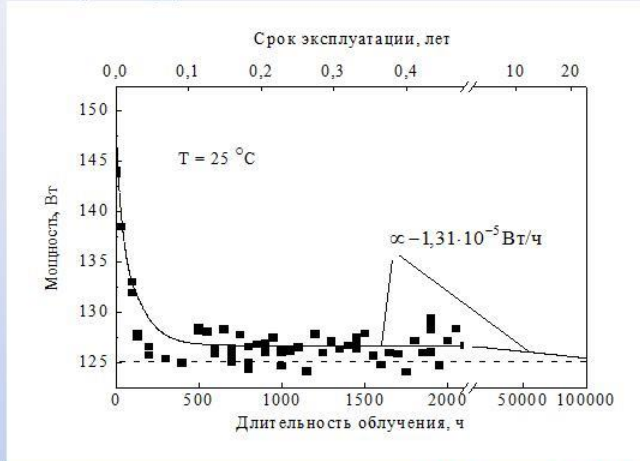


	PC	PET
$E_a$ (kcal/mol)	22.1	30.5
$\ln(A)$	25.2	38.7
$n$	2	2
predicted life (years)	<b>837</b>	<b>1023</b>

1000 ч испытания при 85 °C и влажности 85% показали, что скорость гидролиза полимера PC (polycarbonate) медленнее скорости PET (polyester terephthalate) при 85 °C, но быстрее при < 43 °C

# Два примера предсказания времени жизни солнечного модуля

- 2000 часовые исследования деградации солнечных модулей на свету при температурах 25 и 55 °C.



Время уменьшения мощности от 145 до 125 Вт при T эксплуатации 25 и 55 °C, соответственно 20 и > 100 лет

- Теоретически исследования диффузии влаги по полимерной пленки

$$C(x, t) = C_s + \frac{4(C_0)}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin \left[ \frac{(2m+1)\pi x}{l} \right] e^{(-D(2m+1)^2 \pi^2 t / l^2)}$$

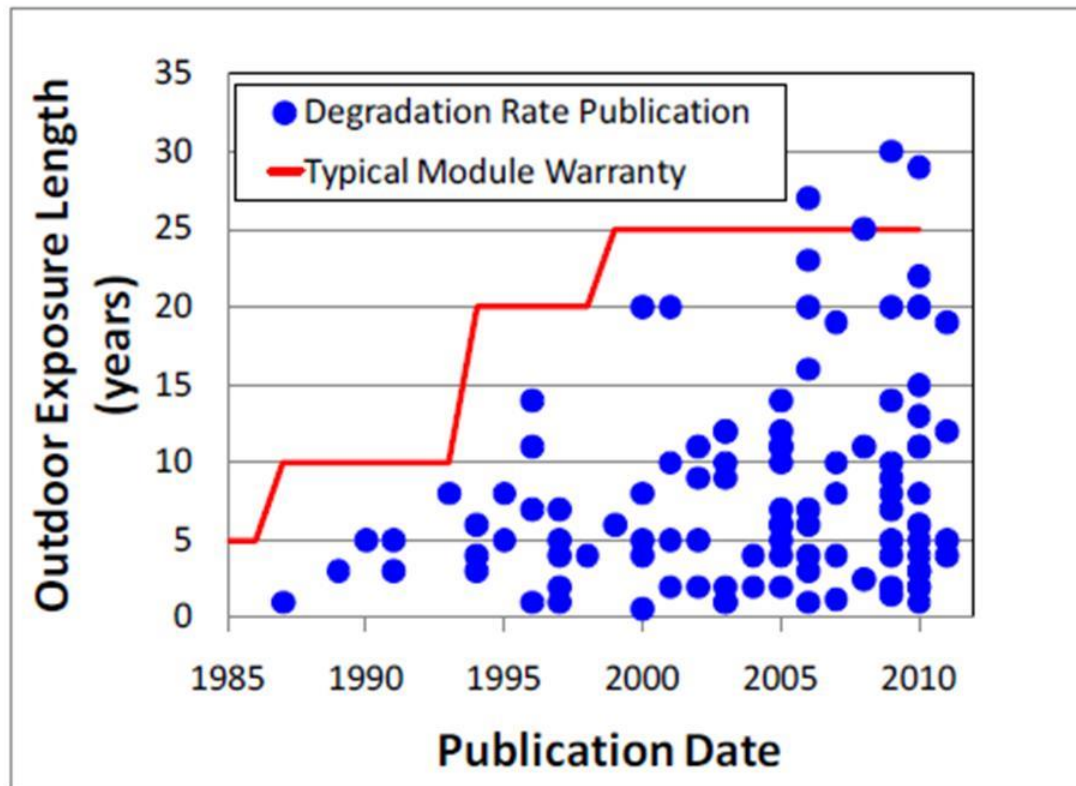


$$\tau_{1/2, \text{центр}} = 0,0593 \frac{l^2}{D}$$

При размерах стекол 1000x2000 мм<sup>2</sup> и площади пленки EVA (этилен винил ацетата) 2 м<sup>2</sup>, используя уравнения, значение коэффициента диффузии EVA при 27 C и 71% влажности равным 5,33·10<sup>-7</sup> см<sup>2</sup>/с можно получить, что **время полупроникновения влаги в центр модуля составит 40 лет.**

**Таким образом, «предсказано» время жизни солнечного модуля от 20 до > 100 лет.**



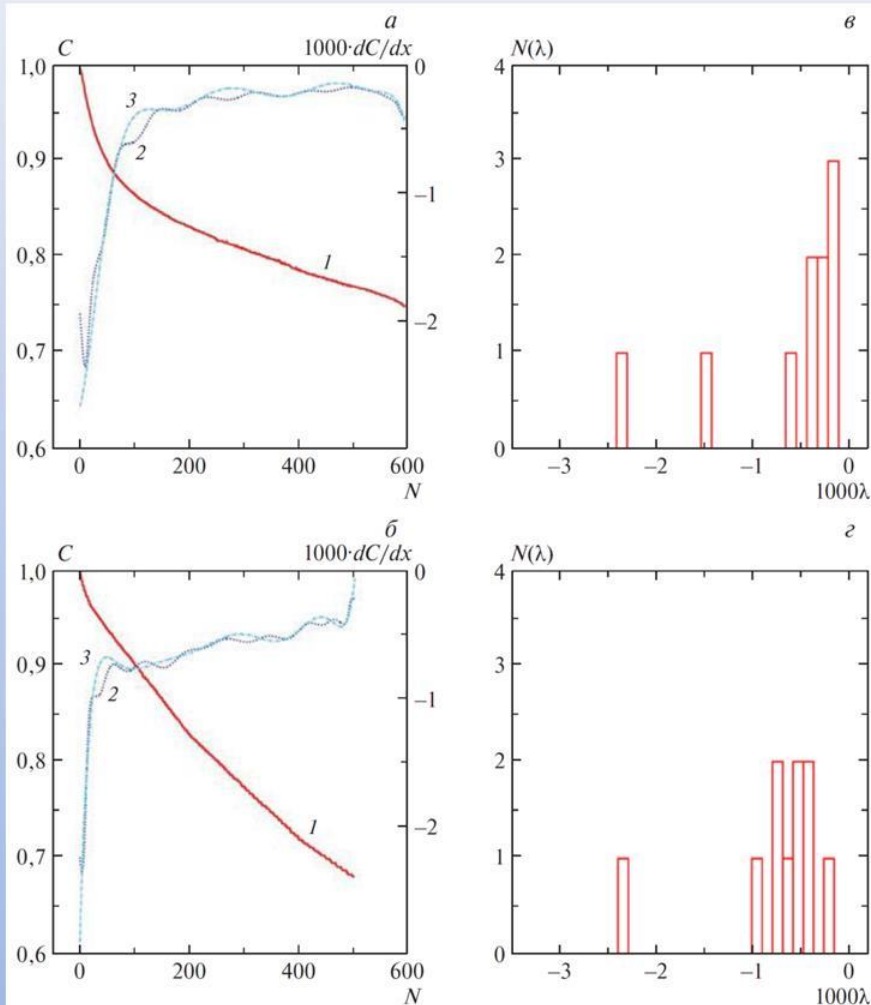


Outdoor field exposure in years versus date of publication. Module warranty from one manufacturer is shown as comparison.

**Производители никому не верит.** Единственный надежный источник - многолетний опыт эксплуатации при наличии многолетней кропотливой работы.  
From 2010 USA annual **Photovoltaic Reliability Workshop**

## 7. Проблемы деградации аккумуляторов и экономические риски.

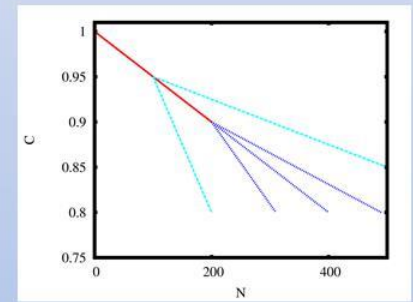
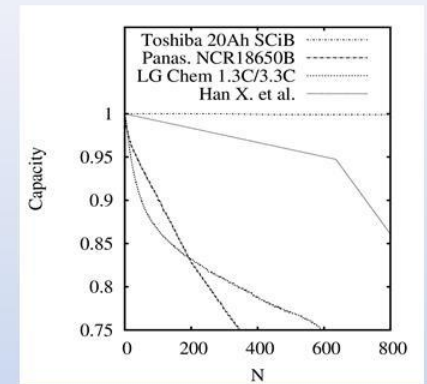
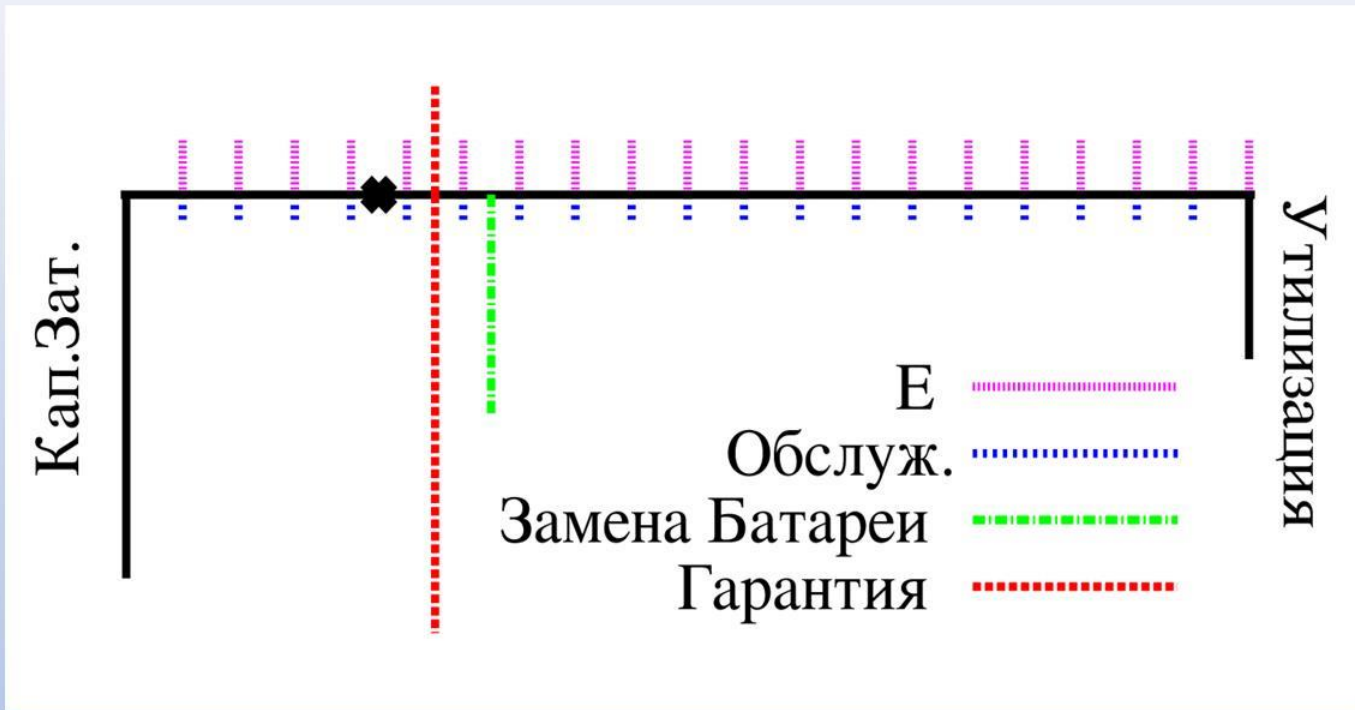
А.В. Бобыль, А.Г. Забродский, В.Г. Малышкин, О.В. Новикова, Е.И. Теруков, и Д.В. Агафонов. "Деградация Li-ion накопителей энергии. Применение обобщенного подхода Радона–Никодима к оценке распределения скоростей деградации." **Известия РАН. Энергетика N1 2018**



Емкость  $C$  и скорость деградации  $dC / dx$ : для *а* – LG Chem; *б* – Panasonic: 1 – емкость  $C$ ; 2 – скорость деградации, интерполированная методом Радона–Никодима; 3 – скорость деградации, интерполированная методом наименьших квадратов (интерполяция проведена с  $n = 10$ ). Соответствующее рис. 2*а* и 2*б* распределение скоростей деградации  $dC / dx$  показано на рис. 2*в* и 2*г* соответственно. Вычисления распределения проведены при  $n = 10$ .

В работе показано, что неопределенность скорости деградации Li-ion накопителей является основным риском для систем автономной энергетики.

## 8. Поток денег солнечной электростанции с учетом накопителя.



**Подарок судьбы**

В момент  $t_{\text{know}}$  узнаем, что в придется заплатить много денег за замену Li-ion целиком (**удар судьбы**, 30% общей стоимости). Цель экспериментов и моделей – уменьшить  $t_{\text{know}}$  сделать его меньше срока гарантии.

**Концепция дисконтирования НЕПРИМЕНИМА**



**9. Вывод:** для повышения экономической эффективности автономных солнечных электростанций необходимо уменьшить риски деградации Li-ion накопителей, для этого необходимо:

- ❑ Интеграция ускоренного циклирования в BMS (Battery Management System) с целью определения скорости будущей деградации. Существует ряд стандартов тестирования.
- ❑ Включение в договора гарантии и страховки условий экспериментальных измерений наступления страхового случая, чтобы перенести потери на производителя в случае выпуска некачественной продукции.
- ❑ Определение стоимости солнечной энергоустановки с учетом будущей деградации Li-ion