

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Мощные сверхпроводящие кабельные линии большой протяженности: проект Garwin-Matisoo – 40 лет спустя

Paul Michael Grant

#### I. ВВЕДЕНИЕ

За поразительным открытием в 1911г. сверхпроводимости в ртути при 4.2 К командой Камерлинг-Оннеса в Лейденской лаборатории, возникли надежды на создание чрезвычайно мощных электромагнитов и передачу электроэнергии без потерь. Однако эти надежды быстро рухнули, так как вскоре было показано, что сверхпроводимость полностью исчезала при пропускании по проводнику тока всего в несколько ампер и в магнитном поле в несколько гаусс. Такой была ситуация вплоть до 1930-ых, в эти годы были обнаружены: эффект Мейснера-Оксенфельда, объясненный Лондоном, и позже – сверхпроводники Второго рода, кардинально отличающиеся от открытых ранее. Последующий период сопровождался прогрессом в эмпирических металлургических изысканиях, которые были необходимы для оптимизации свойств сверхпроводников, и формулировкой «технической» макро-микроскопической теории Гинзбурга, Ландау, Абрикосова и Горькова, которая позволила определить направление экспериментальных усилий, предпринимаемых для выявления основных зависимостей критических параметров сверхпроводников от их структуры. К середине 1960-ых пришло время, когда можно было начать серьезно рассматривать применение сверхпроводимости для передачи электроэнергии.

#### II. Проект GARBTIN-MATISOO

##### A. Как это начиналось

Возможность использования для передачи энергии криорезистивных кабелей на основе простых металлов типа бериллия при 77 К или алюминия при 20 К изучалась во многих странах еще в начале 1960-ых. Сразу стало ясно, что экономия энергии, получаемая от снижения омических потерь, не возмещала высокие расходы сам проводник и его охлаждение. В 1966 инженер центрального совета британского министерства электроэнергетики К. J. R. ВТilkinson представил статью, в которой исследовались свойства фольги ниобия при 4.2 К в сверхпроводящем состоянии. Он заключил, что только «идеальная проводимость» представляет благоприятную возможность, окупить затраты на криогенную систему и материал. В то же время, сравнивая затраты на обычный и СП кабели одинаковой мощности, он заключил,

что ни криорезистивные, ни сверхпроводящие кабели не являются экономической и технической альтернативой обычным подземным кабелям. Однако, тогда же Ричард Гарвин и Юрий Матиссо («G-M») из IBM (США) опубликовали в IEEE концепцию СП кабеля, способного передавать огромное количество энергии на очень большие расстояния.

##### B. Конструктивные особенности проекта G-M кабеля

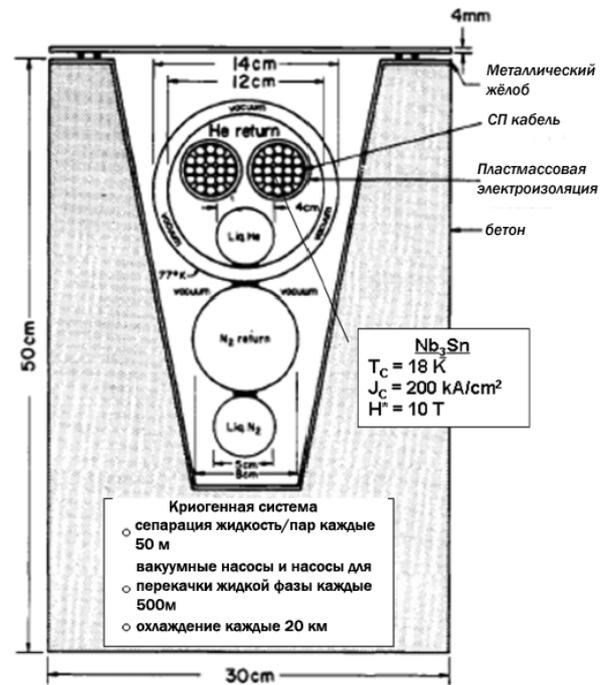


Рис.1

На Рис. 1 показаны основные элементы 1000 км, 100ГВт DC линии, основанной на применении криогенных и СП технологий. Сравнительно с этими цифрами, например, максимальная электроэнергия, которую способны передавать единые высоковольтные энергосистемы (HVDC), развернутые в Itaipu-Бразилии и Three Gorges - Китае – составляет ~ 3 ГВт при длине ~800 км.

Уже тогда Гарвин и Матиссо предвидели, что огромный рост потребления электроэнергии в Америке в конце 20-ого столетия приведет к строительству большого количества угольных, водородных, атомных и гидроэлектростанций вдали от населенных районов. Это, в свою очередь, требует разделения энергетической системы США на четыре или пять больших электросетей с высокой пропускной способностью, намного превышающей уровни, доступные для обычной технологии. В середине 1960-ых, общее количество передаваемой электроэнергии в Соединенных Штатах по грубым оценкам было ~200 ГВт - сегодня эта ве-

личина составляет - около 1200 ГВт. В Китае эта цифра достигает ~450 ГВт.

Сегодня практический верхний предел энергоёмкости подземных электрических линий, как АС так и DC, ограничен физическими параметрами изоляционных материалов. При напряжениях ~ 1200 кВ, для проводников любого разумного диаметра становится очень серьезной потеря энергии из-за коронного разряда. Из-за емкостных и индуктивных потерь предельная длина АС линий, размещенных под землей или над ней, составляют соответственно 50 км и 500 км. При определённых токах наступает чрезмерный разогрев линий из-за омических потерь.

Единственная тропинка к большей пропускной способности электросетей, это использование сверхпроводников, транспортирующих в 10-100 раз большие токи.

При первом взгляде на рис. 1 сразу бросаются в глаза маленькая ширина траншеи и высокая результирующая плотность энергии, соответствующая СП кабелю. Из других особенностей отметим следующие:

1) *Почему DC?*: Появление в начале 1960-ых сверхпроводников второго рода с очень высокими критическим током и магнитным полем ( $Nb_3Sn$  и др.), привело к открытию необратимости движения вихрей Абрикосова, возникающей при изменении направления тока или поля. Эта необратимость существует даже при умеренно низкой частоте этих изменений и ведет к существенным тепловым потерям. Этот гистерезисный эффект подобен эффекту, возникающему при перемагничивании жестких ферромагнетиков из-за необратимого движения доменных стенок. Это явление количественно объяснялось моделью критического состояния, развитой С. Бином. Потери в ваттах на метр и частоте  $\nu$  в Гц для круглого сверхпроводящего провода даются формулой

$$W/m = 2 \times 10^{-7} n I_c^2 [2(1 - I_0/I_c) \ln(1 - I_0/I_c) + (I_0/I_c)(2 - I_0/I_c)]$$

$$0 \leq I_0 \leq I_c = \pi R^2 J_c(1)$$

где  $R$  - радиус провода в метрах и  $J_c$  - критическая плотность тока в амперах на квадратный метр. Поскольку  $Nb_3Sn$  при 4.2 К способен переносить 500 кА при 60 Гц, то мы получаем гистерезисные потери, превышающие 6 МВт/м! Очевидно, что DC - единственный выбор для таких энергий и токов. Из выше сказанного следует, что АС потери из-за гистерезиса в движении вихревой решетки определяют максимальный практический предел использования АС ВТСП кабелей. Например,

при токе 3000А и 60 Гц уровень потерь энергии составит 1 Вт/м.

2) *Криогенная система*: Как показано на рис.1, СП линия состоит из низкотемпературной части, охлаждаемой жидким He до 4.2 К, и охлаждающей ее части с жидким  $N_2$ . Сейчас это наиболее часто применяемая конфигурация. Однако, из-за тепловых потерь, возникающих при протекании обеих жидкостей, через каждые 50 м необходимо устанавливать станции, отделяющие жидкость от пара и возвращающие холодные пары к станциям ожижения. Очевидно, что при использовании только жидкого азота этого осложнения можно избежать.

3) *Магнито-механические Аспекты*: Расположение «бок о бок» двух проводников  $Nb_3Sn$  может быть серьезным осложнением для ВТСП эквивалента G-M проекта. Отталкивающие силы между двумя проводниками в этой геометрии могут создать давление до 400 атм., которое не выдержит ни один из существующих сегодня ВТСП кабелей. Однако, эта проблема отсутствует при коаксиальной геометрии проводников.

### С. Экономический расчет проекта G-M - вчера и сегодня

Таблица 1  
Сопоставление стоимости отдельных элементов 1000 км Nb-Sn кабеля в долларах 1966 и 2006 года

Наименование	Условное обозначение /Количество	В ценах млн.\$ 1966	В ценах млн.\$ 2006
Материал сверхпроводника	$10^4$ т $Nb_3Sn$	550	3405
Криогенная система	0.5 млн. \$ за 1 кВт жидкого He	25	155
Станции ожижения	Каждые 20 км по 10 кВт каждая	5	31
Вакуумные насосы	500 \$ на станцию (2000 шт.)	1	6
Металлоконструкции	1 \$/фунт, расход 100 г на см линии	20	124
Бетон	10 \$/ярд <sup>3</sup> , расход 0,5 ярд <sup>2</sup> x 1000 км	5	31
АС/DC конверторы	Тиристоры, 1 \$/кВт	200	1238
ИТОГО		806	4990

1 фунт=453,592 г

1 ярд =0,9144 м

Таблица I представляет главные результаты экономического анализа G-M проекта, выполненного в 1966. Здесь же приведен перевод этих данных к уровню 2006 г., с учетом сегодняшнего курса доллара, используя данные, полученные от Бюро Трудовой Статистики. На сегодняшний день стоимость кабеля G-M около \$5 миллиардов, она очень близка к стоимости предложенного MACKenzie Valley 1200 км трубопровода природного газа от дельты реки Макензи до северо-западных территорий Канады в провинции Альберты. Объем поставляемой тепловой энергии трубопроводом MACKenzie составляет 18 ГВт, в то время как кабель G-M мог бы передавать в 5 раз больше электроэнергии.

### III. ВТСП КАБЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### A. Первые попытки

Начнем с краткого обзора проектов сверхпроводящих DC кабелей:

##### 1) Многофункциональное использование криогенных линий:

В начале 1970-ых предполагалось построить в Нью Мехико космический центр NASA, обслуживающий запуски космических челноков. Эта перспектива побудила Bartlit, Eduskuty и Hammel из Научной Лаборатории в Лос-Аламоса предложить проект «трубопровода» в 600 миль, берущего начало на газовых месторождениях около Four Corners. Предполагалось, что по нему в Лос-Анджелес будет поступать жидкий азот и электричество по охлажденным этим азотом криорезистивным проводникам, а в другую сторону охлаждаемое этим же азотом ракетное топливо - жидкий водород. При этом была рассмотрена возможность использования сверхпроводников, охлаждаемых жидким гелием.

##### 2) Проекта DC сверхпроводящей линии передачи энергии LASL:

В середине 1970-ых был начат масштабный проект 5 ГВт СП DC кабеля большой пропускной способности, поддержанный Министерством энергетики DOE и Филадельфийской Электрической Компанией (PECO). После сдачи и испытания нескольких метров провода проект был прекращен из-за недостатка финансирования и отсутствия интереса к практическому применению.

##### 3) Охлаждаемые водородом Nb<sub>3</sub>Ge DC сверхпроводящие кабели:

Исследование было выполнено в Стэнфорде в 1975 с использованием переохлажденного водорода при 14 К и кабеля Nb<sub>3</sub>Ge с T<sub>c</sub>=23К.

#### 4) VISC - DC линия из ВТСП:

Фактически это первый (1995г.) опытный образец Vi-2223 ВТСП кабеля, который был создан и испытан, хотя он и имел длину всего 1 метр. Его конструкция, должна была обеспечить пропускную способность ~ 400 МВт при 40 кВ, 10 кА на 400 км европейском “ring buss” с охлаждением жидким гелием.

#### 5) EPRI: «электрическая – труба»:

Это исследование сравнило экономическую альтернативу между HVDC линиями, газопроводами и ВТСП «электрической трубой», способных транспортировать 5 ГВт химической или электрической энергии от месторождений газа в Катаре около Персидского залива на расстояние ~1000 миль до района Палестины и Израиля. Это был, в действительности, мини G-M проект.

#### В. Исходная сверхпроводниковая DC коаксиальная конфигурация кабеля

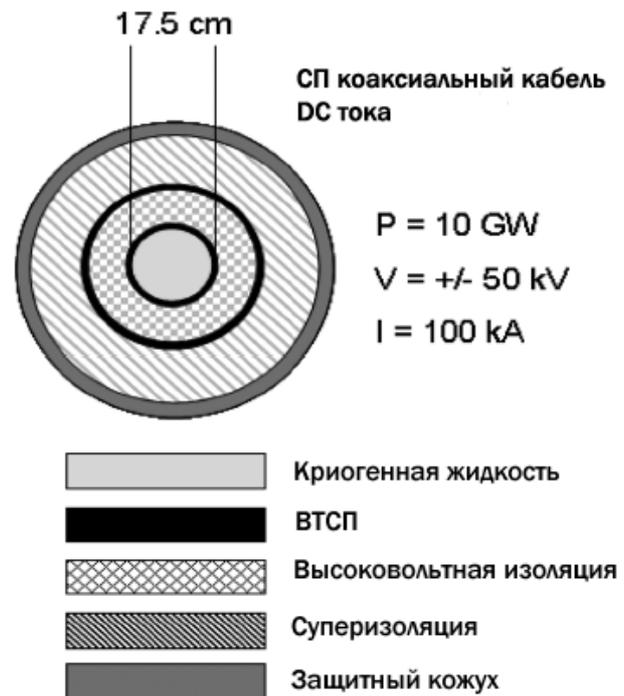


Рис.2

На Рис.2 показано поперечное сечение коаксиального кабеля. Основное различие этого проекта от G-M в том, что вместо центрального проводника, мы имеем полый СП цилиндр, по которому течет криогенная жидкость. Выбор значения мощности и рабочих параметров: 10 ГВт, 50 кВ и 100 кА объяснен ниже. Диаметр внутреннего полого СП цилиндра ~17.5 см выбирался, исходя из величины магнитного поля на его поверхности, так чтобы его значение, измененное внешним проводником, оставалось ниже 0.3Т при токе 100

кА. Это значение ниже номинальной величины поля необратимости ВТСП купратов при 77 К.

Таблица II

Конструктивные и технические характеристики СП кабеля DC тока проекта «Суперсвязь»

Наименование	Значение	Единицы измерения
<b>Параметры ВТСП ленты (77 К, 0,3 Тл)</b>		
• Критическая плотность тока, $J_c$	15000	А/см <sup>2</sup>
• Критический ток ленты, $I_c$	150	А/ленту
• Стоимость/Техническая характеристика	50	\$(кА·м)
• Ширина ленты	0,4	см
• Толщина ленты	0,025	см
• Длина одного куска ленты	800	м
• Интегральные потери	5	%
• Контактное сопротивление	0,92	мВт
• $I^2R$ потери на контакте	0,8	МВт/м
<b>«Суперсвязь» СП кабель DC тока, параметры и технические характеристики</b>		
• Общая длина	5000	км
• Количество проводников	2	1 на линию
• Радиус кольцевого проводника	8,75	см
• Максимальная мощность	10	ГВт
• DC напряжение	50	кВ на линию
• Сила DC тока	100	кА
• Магнитное поле на поверхности проводника	0,23	Тл
• Поперечное сечение проводника	6,62	см <sup>2</sup>
• Потери мощности на контактах одной линии	4,0	кВт
• Стоимость ВТСП ленты одной линии	26,3	Млрд. \$

#### IV. СУПЕРСВЯЗЬ

С тех пор, как размер электросети США достиг континентального масштаба, было предложено использовать колебания суточного спроса на электроэнергию в дневные и вечерние часы в восточных и западных штатах.

##### А. «Две Калифорнии»

Предположено, что потребление электроэнергии на востоке и западе одинаково, т.е. имеется зеркальная копия реальной Калифорнии - «Атлантическая Калифорния», как показано на рис. 3. Эти две Калифорнии связаны 10 ГВт сверхпроводниковой DC «Суперсвязью».

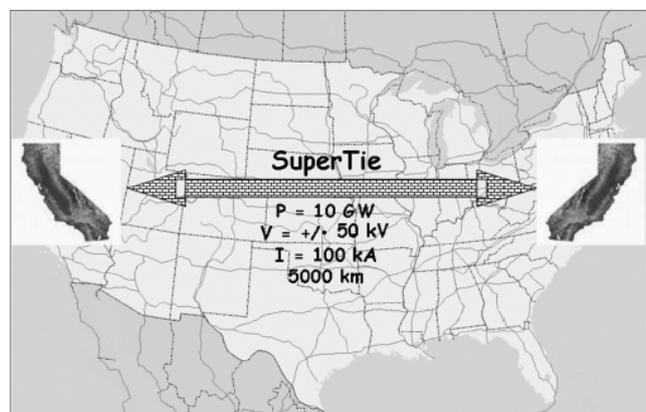


Рис.3

На Рис.4 показано зимнее суточное потребление электроэнергии в «реальной» Калифорнии. В течение лета, пиковое потребление колеблется между 22 ГВт и 45 ГВт. На Рис.5 показана производная временной зависимости потребления электроэнергии в середины зимы восточно-западной суперсвязи «Двух Калифорний», представляющая величину и скорость перебрасываемого потока энергии и соответственно возможную величину экономической выгоды от такого переброса электроэнергии.

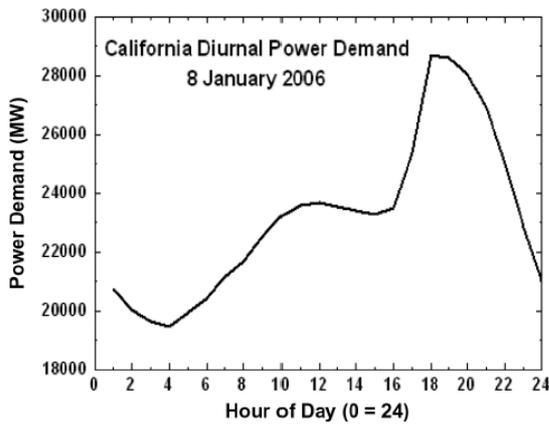


Рис.4

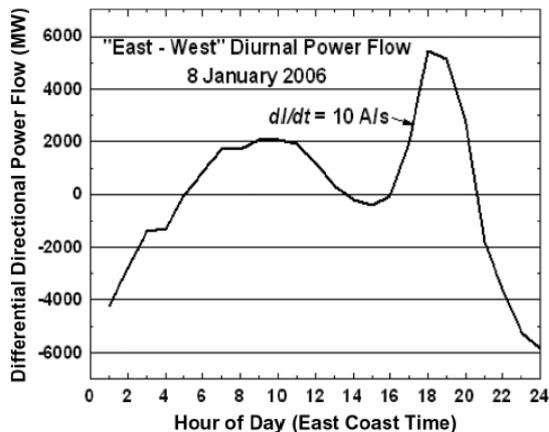


Рис.5

Мы видим из Рис.3 и 5, что 10 ГВт кабель вполне удовлетворяет условиям поставленной задачи. Параметры кабеля и стоимость других работ представлены в таблице II. Затраты только на СП провод - \$52.6 миллиарда.

## В. Анализ потерь из-за колебаний вихревой решетки.

Источники потерь, возникающие при движении вихревой решетки:

1) *АС потери при слабых колебаниях вихрей:* преобразование АС в DC приводит к появлению пульсаций. При малых колебаниях уравнение потерь (1) несколько меняется.

$$W=4 \times 10^{-8} (\Delta I)^3 v / (J_c R^2) \quad (2)$$

где  $R$  - эффективный радиус внутреннего цилиндрического провода  $\sim 1.45$  см, поперечное сечение кольцевой области при этом -  $6.62 \text{ cm}^2$ ,

$J_c$  - критический ток  $\sim 15 \text{ kA/cm}^2$ ,

$\Delta I$  - среднеквадратичное значение тока пульсаций, который мы возьмем равным  $\sim 1\%$  или  $1000 \text{ A}$  (на самом деле пульсации могут быть существенно уменьшены надлежащими фильтрами),

$v$  - частота пульсаций  $\sim 360$  Гц для 6 фазных преобразователей на АС входе.

При этих условиях мы получаем  $W \sim 1 \text{ Вт/м}$ , что является приемлемой для системы охлаждения величиной.

2) *Суточные гармоники Суперсвязи:*

На Рис.6 показаны результаты Фурье анализа временной зависимости дневной передачи мощности изображенной на рис.5.

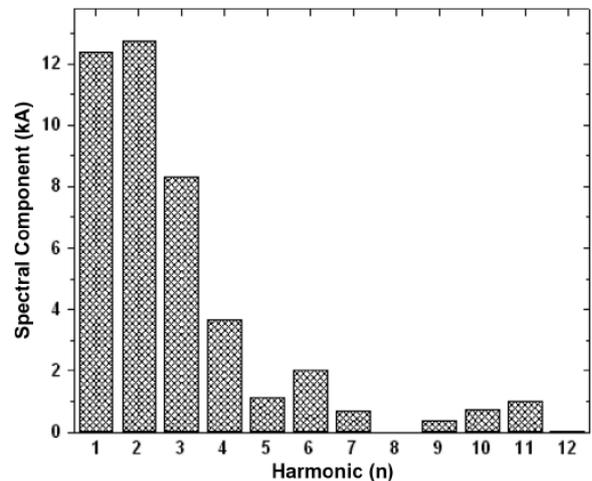


Рис.6

Потеря энергии на каждую гармонику в пределе, когда их амплитуды  $\Delta I$  порядка общего DC тока, получается из (1)

$$W_n(n) = 2 \times 10^{-7} (I_n)^2 v_n \quad (3)$$

где  $n$  - номер гармоники, а  $I_n$  и  $v_n$  ее амплитуда и частота. Потери мощности для первых четырех гармоник представлены в таблице III.

Таблица III

Спектр гармоник в течение 24 часов

Номер гармоники, n	$I_n$ (кА)	$v$ (мкГц)	$W$ (кВт/5000 км)
1	12,4	11,6	1,8
2	12,8	23,2	3,9
3	8,31	34,7	2,4
4	3,67	46,3	6,2
ИТОГО			8,7

Видно, что нет никаких препятствий для переброски энергии в масштабе времени, показанном на рис. 5, которые могли бы создать потери энергии во время работы Суперсвязи. Это вполне ожидаемый результат в свете максимальной скорости изменения потока энергии  $\sim 10$  А/сек. Принимая 1 ВТ/м потерь за верхний предел, из (1) следует, что необходимая переброска энергии по Суперсвязи может быть осуществлена приблизительно за два часа.

### С. Окупаемость затрат на ВТСП провод в Суперсвязи от сокращения потерь электроэнергии

Сколько времени потребуется для возвращения средств, которые будут потрачены на ВТСП провод при строительстве Суперсвязи, если при расчетах использовать данные таблицы III.? При разумном выборе существующей стоимости электричества и уровня загруженности системы, полученные результаты показаны в таблице IV.

Таблица IV

Окупаемость «Суперсвязи» на основе ВТСП за счет уменьшения потерь электроэнергии

Наименование	Значение	Единицы измерения
Стоимость электроэнергии	0,05	\$/кВтч
Общепринятые потери ЛЭП	5	%
Годовые потери 10ГВт ЛЭП при 50% нагрузке	110	млн.\$
Капитальные затраты на ВТСП материал и охлаждение	52,6	млрд.\$
Современная учетная ставка федерального банка	5,5	%
Время окупаемости за счет энергосбережения	62	годы

Согласно цифрам, представленным в таблице IV, возврат средств произойдет только через 62 года. Даже при 100 % загруженности системы этот срок уменьшится до 49 лет. Ясно, что оправдать строительство Суперсвязи только за счет уменьшения потерь электроэнергии нельзя.

### V. ОБСУЖДЕНИЕ

При длине линии в 1000 км, стоимость ВТСП провода для Суперсвязи достигает суммы в \$10.5 миллиарда, не включая затраты на инфраструктуру. Согласно данным таблицы I, стоимость провода из Nb<sub>3</sub>Sn составляет  $\sim 70$  % (\$3,5 млрд.), а инфраструктура -  $\sim$  \$1.6 миллиарда при существующем курсе доллара. Если принять, что стоимость инфраструктуры на единицу длины линии в обоих проектах будет одинаковой, то ее

стоимость проекта Суперсвязи достигнет \$12.1 миллиарда. Таким образом, Суперсвязь на основе Nb<sub>3</sub>Sn с пропускной способностью 10 ГВт будет стоить намного меньше ВТСП версии.

В любом случае, строительство СП DC кабеля, использующего низко- или высоко- температурные сверхпроводники, трудно оправдать только сбережением электроэнергии. Однако, другие глобальные задачи, например, снижение уровня экологического воздействия на природу и слишком длительные сроки строительства электростанций в скором будущем могут заменить одни экономические расчеты на другие. Время покажет.

А.А. Никонов