

# *Лекция 12*      **ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ**

## **Вопросы:**

- 1. Физика образования и основные свойства солитонов.**
- 2. Применение оптических солитонов в волоконной оптике. Схемы солитонных линий.**



# Фактическое открытие солитона

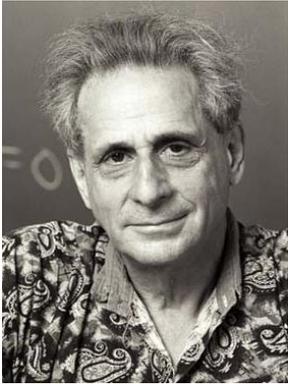


*Воспроизведение опыта  
Дж. Рассела (1995 год)*



**Джон Скотт Рассел  
(1808–1882)**

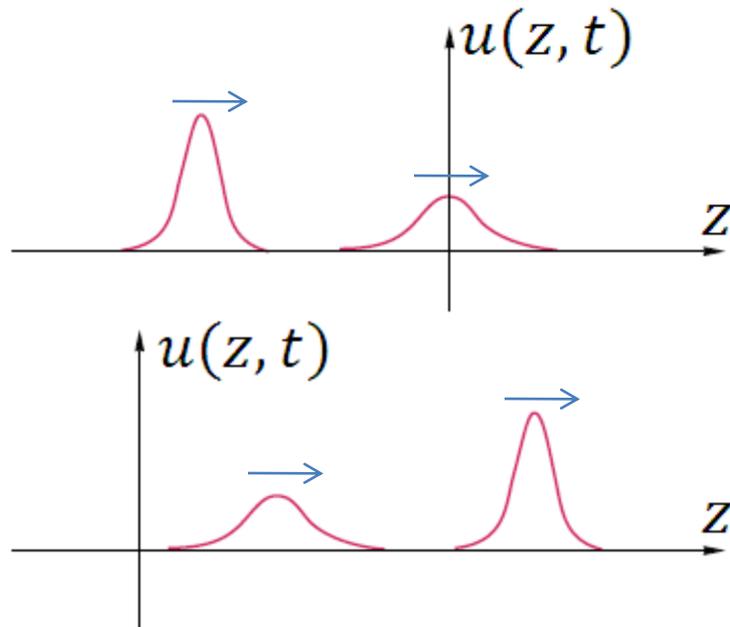
**В 30-е г.г. XIX в. для перевозки грузов широко использовалась система узких каналов, по которым лошади тянули баржи. Рассел обратил внимание, что при резкой остановке баржи вода, увлеченная её движением, отрывалась от баржи и образовывался горб высотой в несколько десятков сантиметров, который двигался по каналу, не затухая, на большие расстояния.**



**Мартин Крускал**  
**(1925–2006)**

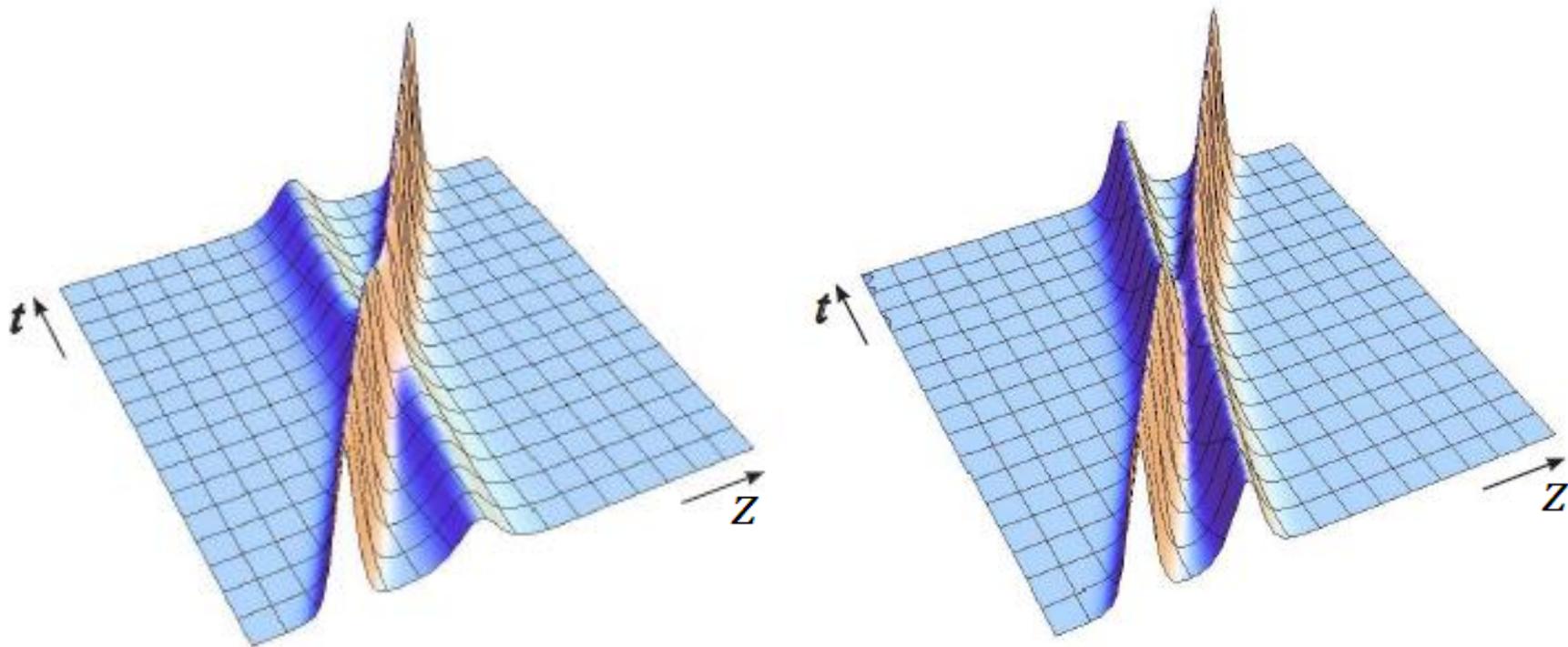
**Солитон – это особый тип нелинейных уединенных волн (волновых пакетов), которые сохраняют свою форму и скорость при собственном движении и столкновениях друг с другом.**

### **Свойства солитонов**

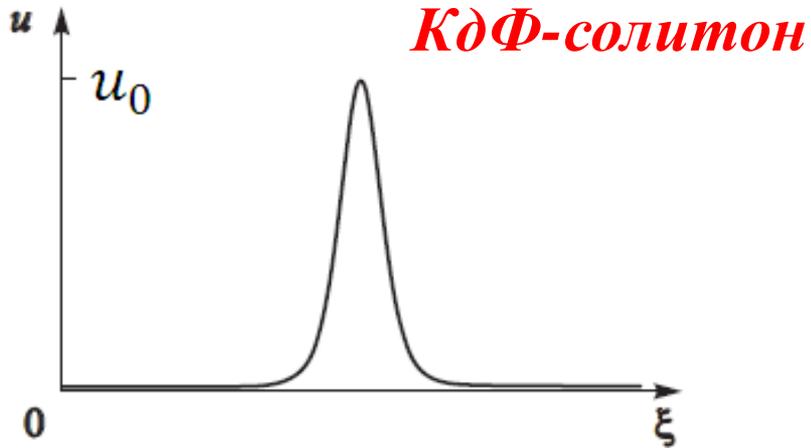


- 1. Скорость движения солитонов тем выше, чем больше их амплитуда.**
- 2. Не испытывают дисперсионного уширения и упруго взаимодействуют, проходя друг сквозь друга. Единственным результатом взаимодействия солитонов может быть сдвиг фаз.**
- 3. Обладают частицеподобным поведением.**

# Компьютерное моделирование взаимодействия солитонов

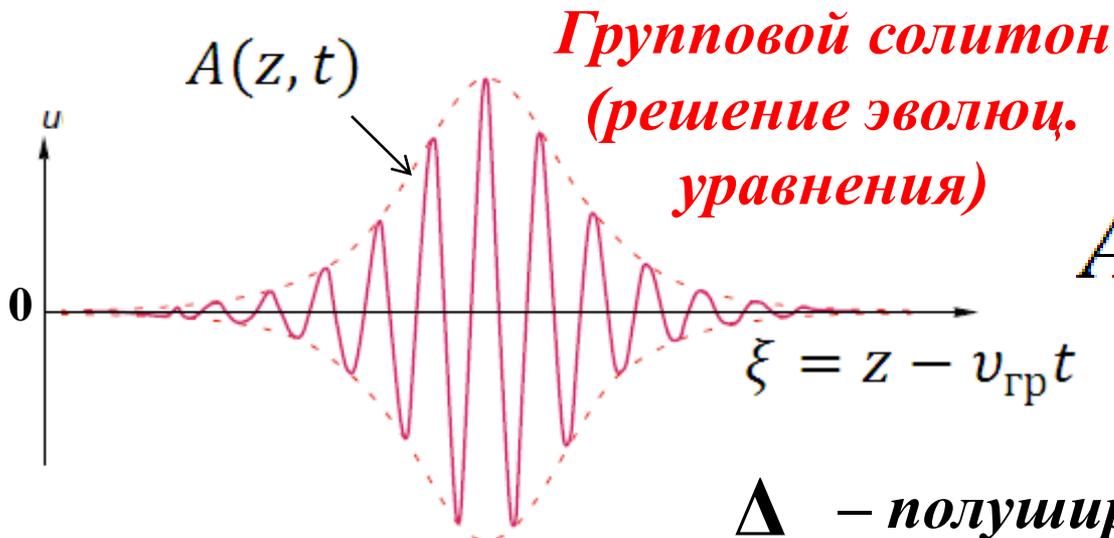


# Аналитические солитонные решения



$$u(z, t) = u_0 \operatorname{sech} \frac{\xi}{\Delta}$$

$$\operatorname{sech}(z) = \frac{2}{e^z + e^{-z}}$$

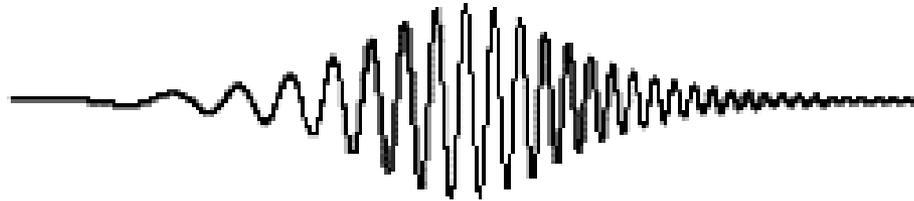


$$A(z, t) = A_0 \operatorname{sech} \frac{\xi}{\Delta}$$

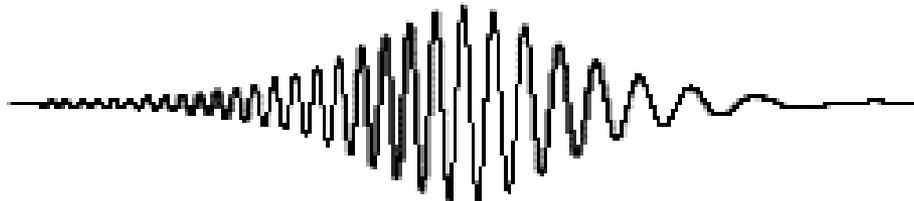
$\Delta$  – полуширина солитона.

# Формирование оптического солитона

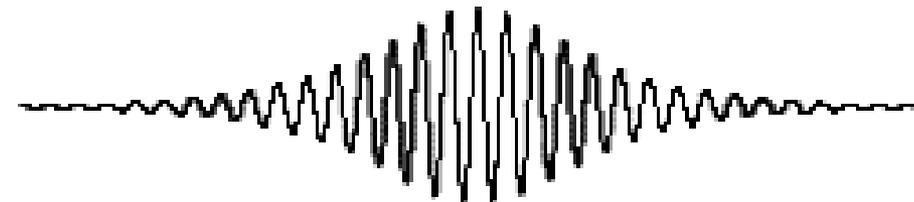
Фазовая модуляция оптического импульса в волокне



Аномальная дисперсия в нелинейном волокне



Оптический солитон



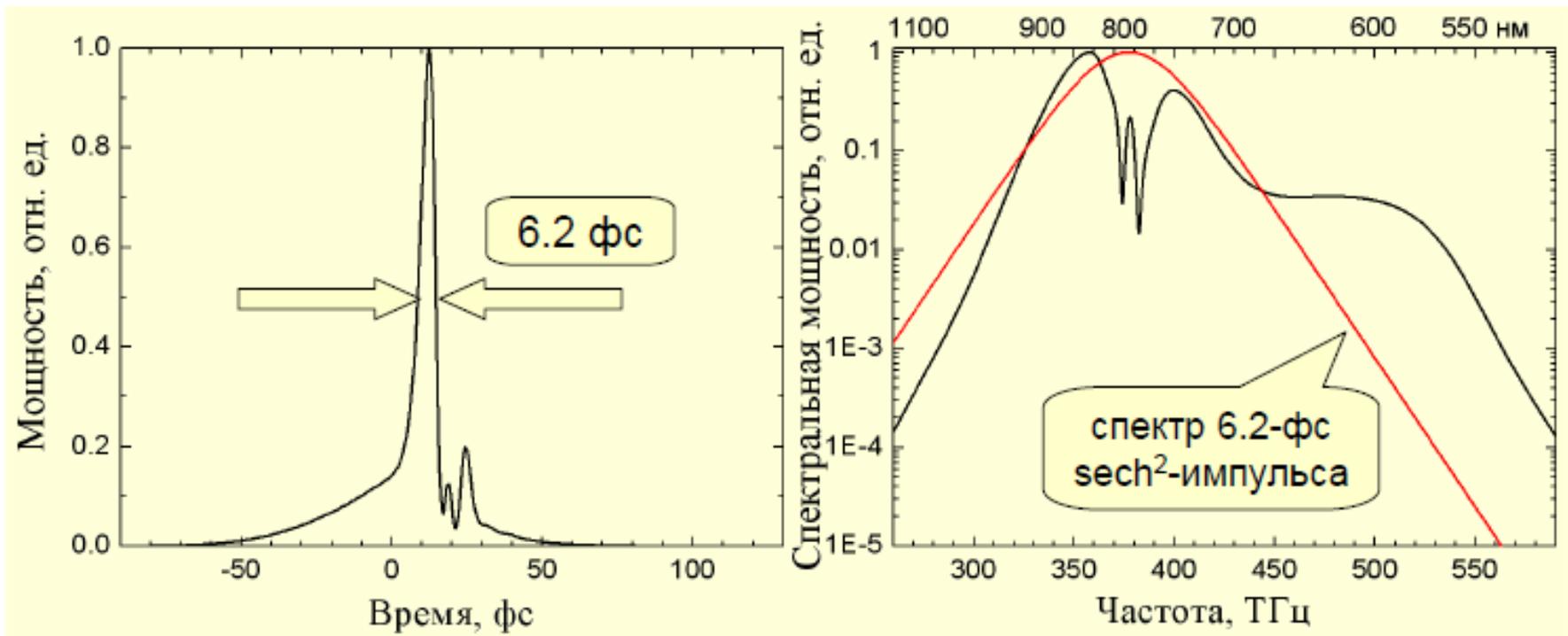
**Условия:**

$$\beta_2 < 0$$

$$n_2 > 0$$

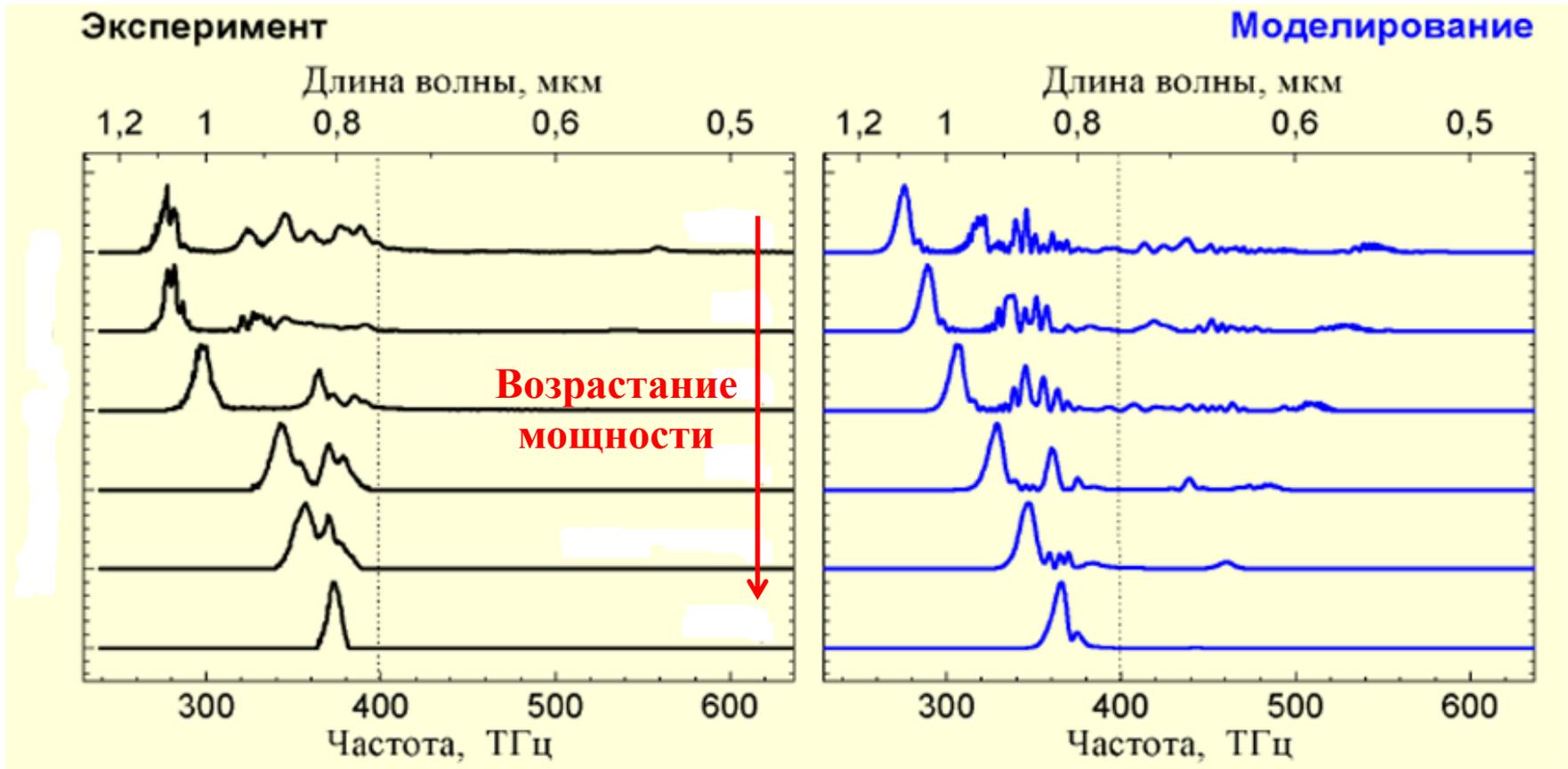
**Высокочастотные составляющие оптического импульса сдвигаются к его «хвосту», а низкочастотные — к его «голове», в результате формируется устойчивое волновое образование.**

## Основное свойство оптических солитонов



**В волоконных световодах оптический импульс, имеющий во времени форму, содержащую гиперболический секанс, будет распространяться без искажения своей формы на большие расстояния.**

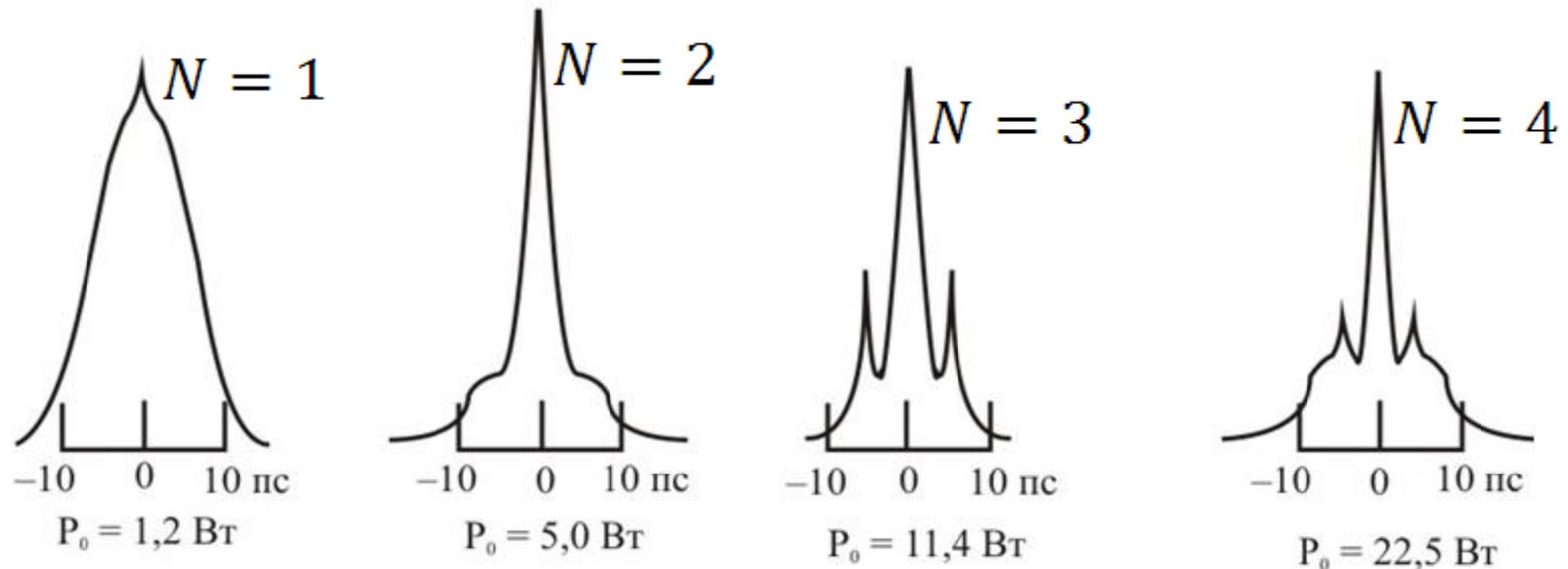
# Образование оптических солитонов при импульсном возбуждении в области аномальной дисперсии



**Оптические солитоны возбуждаются, когда мощность импульсов превышает некоторое пороговое значение.**

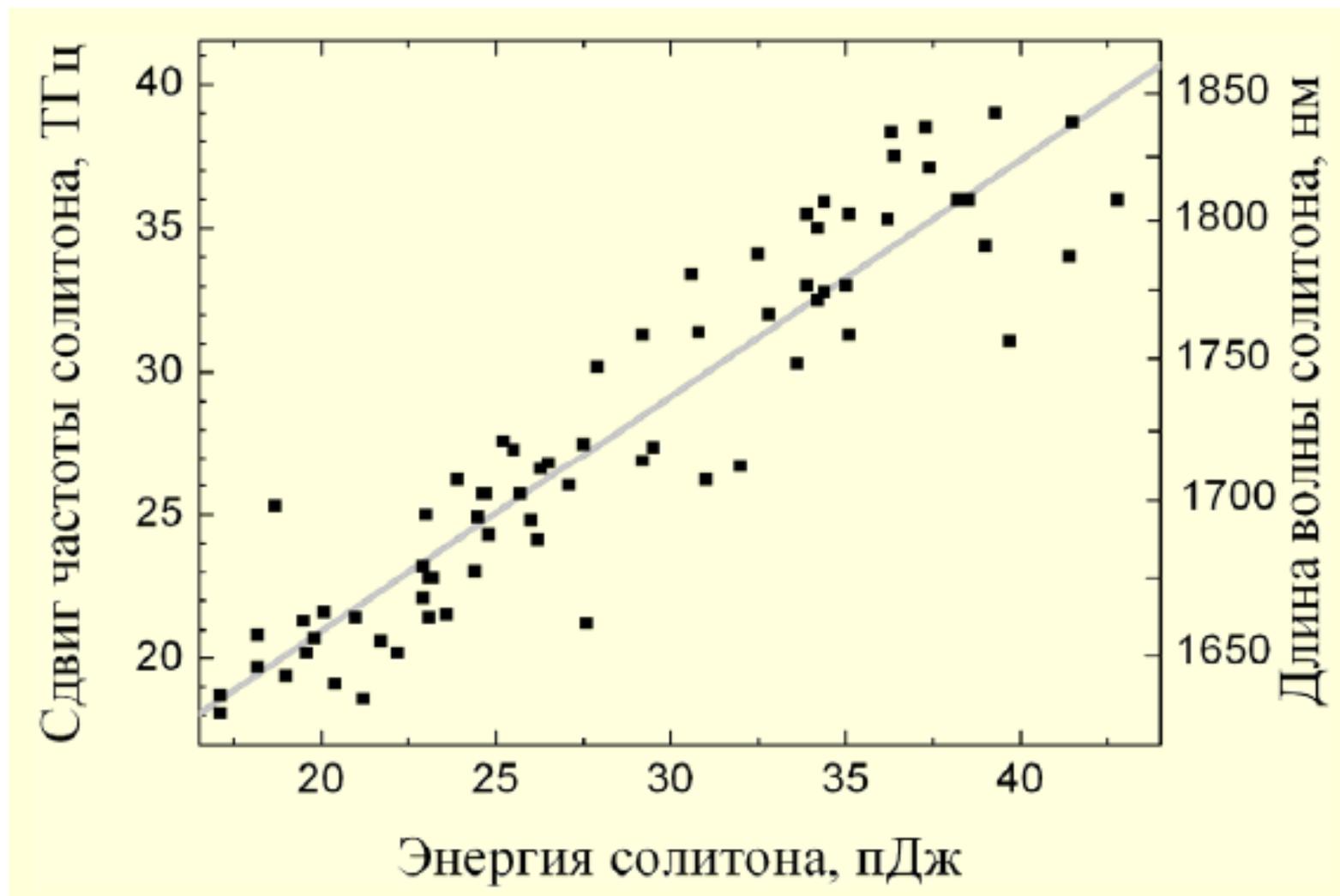
## Оптические солитоны высших порядков

Число собственных солитонных решений  $A_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) эволюционного уравнения определяет порядок солитона  $N$ . Солитон 1-го порядка (*фундаментальный солитон*) формируется при  $L_D = L_{NL}$ .



*Форма солитонов 1 – 4-го порядков и мощности, требуемые для их формирования*

## Характеристики оптических солитонов



# Применение оптических солитонов в высокоскоростных ВОЛС

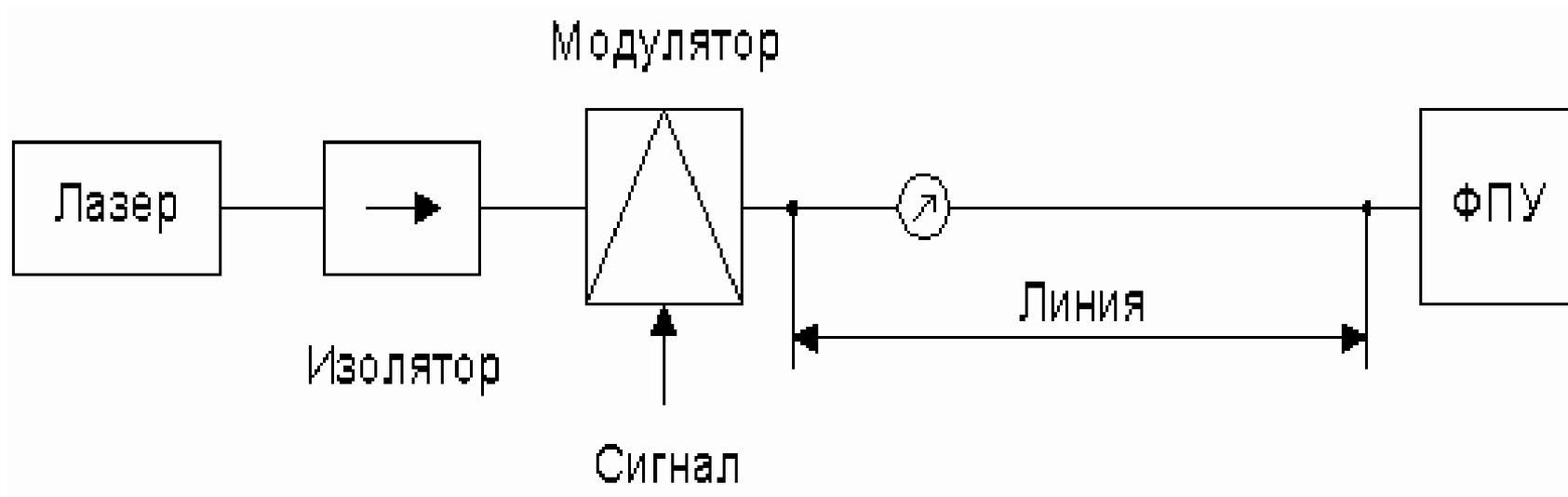
## 1-ое направление

Использование солитонного эффекта для улучшения работы отдельных участков ВОЛС (напр., увеличения расстояния между ретрансляторами). Пиковая мощность относительно невелика ( $\sim 1$  мВт). Дальность распространения  $\sim 100$  км.

## 2-ое направление

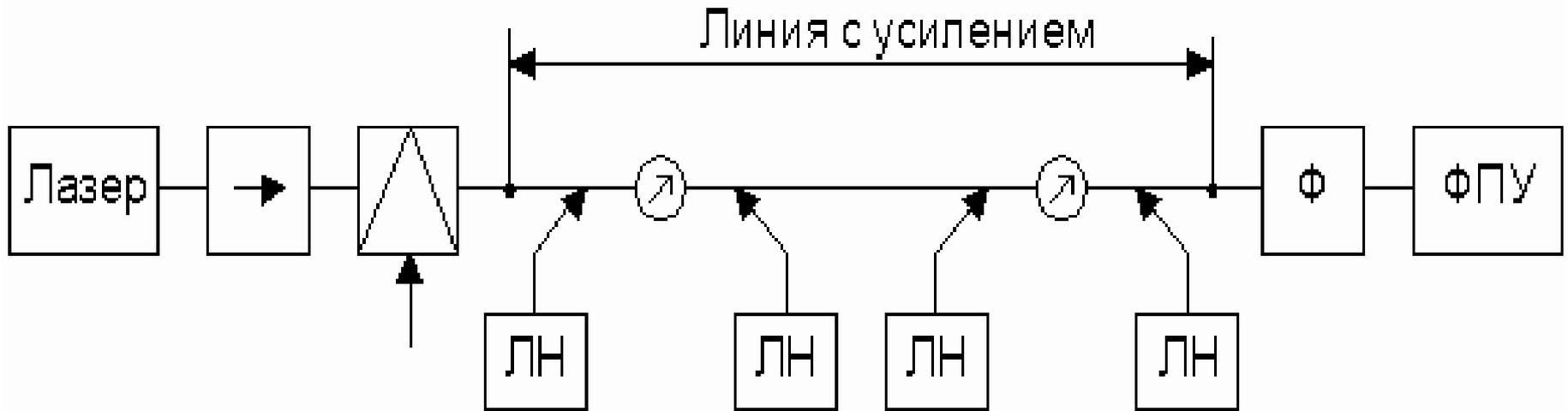
Использование солитонов для передачи информации на расстояния  $\sim 1000$  км без применения электронных ретрансляторов. Для восстановления первоначальной формы и пиковой мощности солитонов применяется оптическое усиление.

## Схема простой солитонной ВОЛС



**Недостаток: относительно малая протяженность линии.**

## Схема солитонной ВОЛС с ВКР-усилением



**Применение периодической компенсации потерь мощности позволяет увеличить дальность передачи.**

$$\lambda_{\text{ис}} \neq \lambda_{\text{накачки}}$$

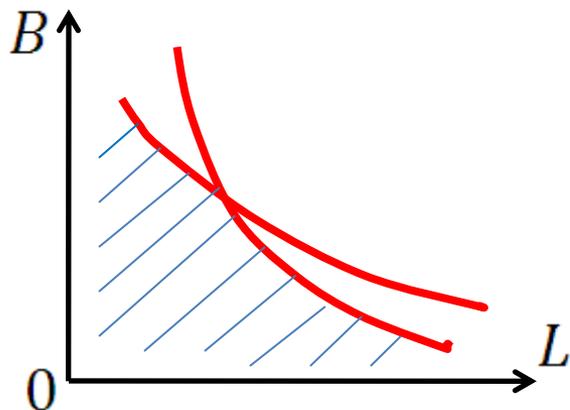
# Ограничения на солитонную ВОЛС с ВКР-усилением

1. Ограничение, связанное с наличием спонтанных шумов в линии:

$$B \cdot (N + 1)L \leq 3 \cdot 10^4 \frac{\text{Гбит} \cdot \text{км}}{\text{с}}$$

2. Ограничение, обусловленное максимально допустимым взаимодействием между солитонами:

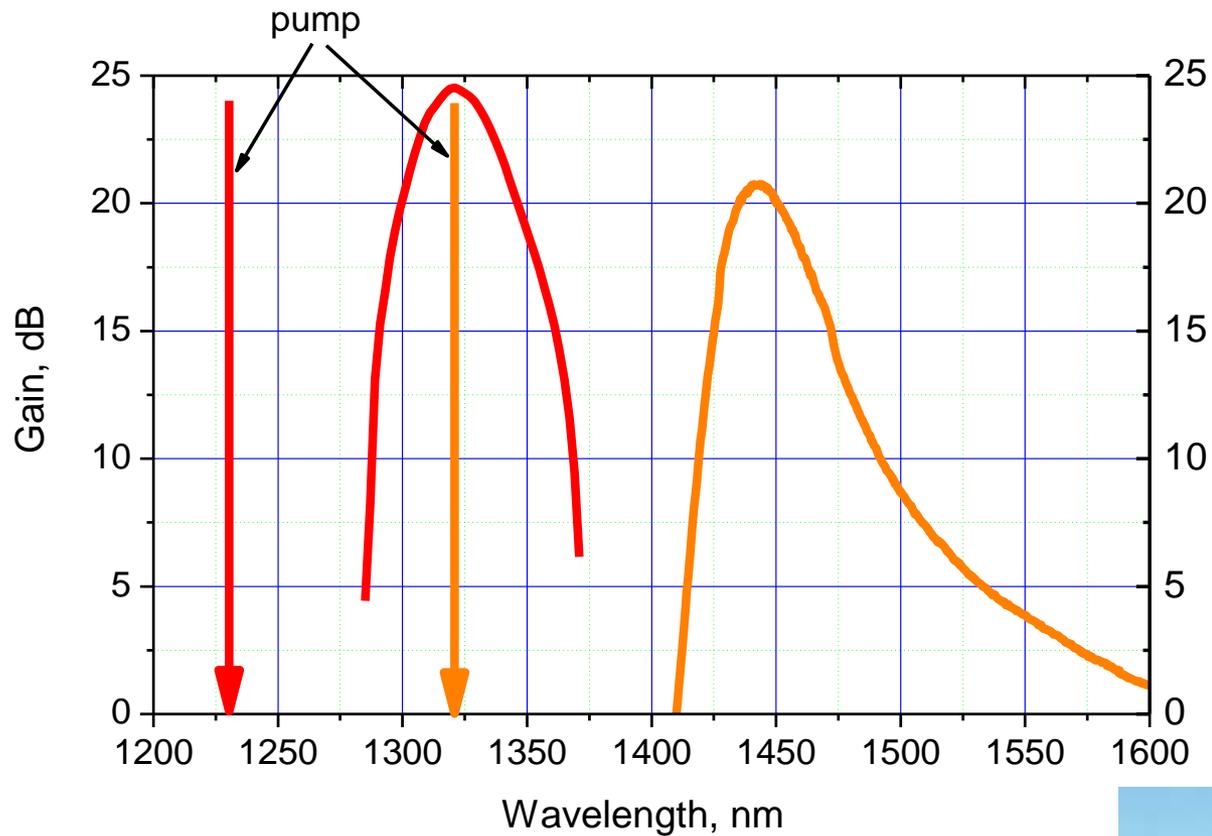
$$B^2 \cdot L \leq 10^4 \left( \frac{\text{Гбит}}{\text{с}} \right)^2 \cdot \text{км}$$



$B$  – скорость передачи информации.

$L$  – расстояние между каскадами усиления.

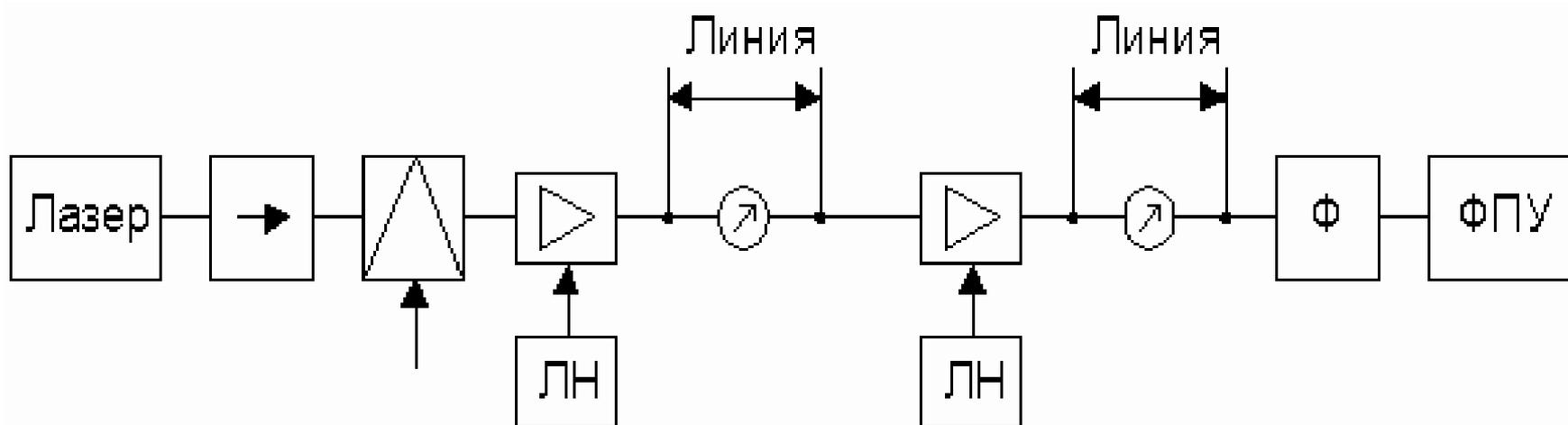
# Волоконно-оптические эрбиевые усилители



167  
**Er**  
Эрбий  
68

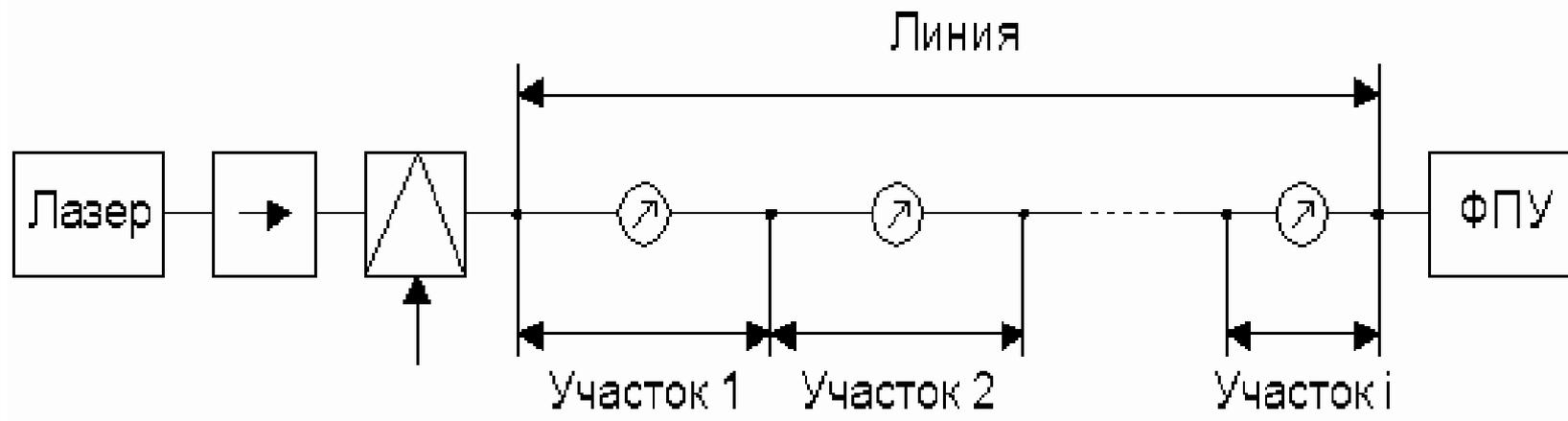


# Схема солитонной ВОЛС с оптическим усилением на основе эрбия



**Усиление происходит не на всей длине участка передачи, а только в усилителях (длина волокна до 100 м). Преимуществом является то, что применяется меньше источников накачки и с существенно меньшей мощностью.**

## Схема солитонной ВОЛС с различными волокнами



**Схема соответствует случаю построения системы без усилителей. Однако протяженный участок существования солитонов достигается благодаря использованию в линейном тракте дискретной последовательности одномодовых оптических волокон с постоянной дисперсией в пределах каждого  $i$ -го участка по убывающей по заданному закону от участка к участку.**