

# Измерение параметров волоконно-оптических кабелей (ВОК)

## Измерение затухания ВОК

Наиболее важными для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) являются измерения параметров оптических волокон, мест сопряжения кабелей, возможных неоднородностей кабеля.

При эксплуатации ВОК особое значение должно уделяться тому, чтобы оптическое волокно (ОВ) в кабелях не повреждалось из-за воздействия факторов окружающей среды, таких, как температурные перепады, механические нагрузки и диффузия влаги.

Основным ограничением для передачи информации по волоконно-оптической линии связи является затухание оптического сигнала по мере его распространения по волокну.

Так как рассеяние в световоде обусловливается флуктуациями плотности (неоднородностями) с размерами, которые, как правило, меньше длины волны света, то для объяснения этого процесса используется закон рассеяния Рэлея.

Он гласит, что по мере увеличения длины волны  $\lambda$  потери из-за рассеяния  $a$  связаны соотношением  $a = \lambda^{-4}$ . Релеевское рассеяние является основной причиной потерь, имеющих место в волокне.

На более длинных световых волнах рассеяние меньше, чем на более коротких; так, например, свет на длине волны 1550 нм теряет из-за релеевского рассеяния от 0,2 до 0,3 дБ на километр (дБ/км), в то время как на длине волны 850 нм – от 2,0 до 6,0 дБ/км. Имеющие более высокую плотность примеси также увеличивают рассеяние и, следовательно, повышают уровень удельного затухания.



Затухание  $a$  оптического волокна длиной  $L$  определяется выражением

$$a = 10 \log \frac{P(0)}{P(L)} \quad , \text{ дБ}$$

где  $P(0)$  – мощность света направляемых мод, введенная в начале световода;

$P(L)$  – мощность света, оставшаяся на расстоянии  $L$  от начала.

В установившемся состоянии мощность  $P$  направляемого света уменьшается экспоненциально по мере увеличения длины  $L$ .

Коэффициент затухания  $\alpha$  позволяет оценить качество волокна с точки зрения потерь, он показывает затухание волокна на единицу длины в 1 км:

$$\alpha = \frac{a}{L}$$

где  $a$  – затухание оптического волокна длиной  $L$ , дБ;

$L$  – длина оптического волокна, км.

Некоторая часть световой энергии поглощается, а другая уходит из волокна наружу на дефектах, возникающих в стекле при чрезмерных изгибах волокна.

Если световой энергии потеряно очень много, то сигнал может оказаться слишком слабым, чтобы приемник на дальнем конце мог различить в нем отдельные импульсы.

В этом случае на передаче для компенсации чрезмерного затухания придется увеличить выходную мощность передатчика, повысить чувствительность приемника или уменьшить расстояние между ними.

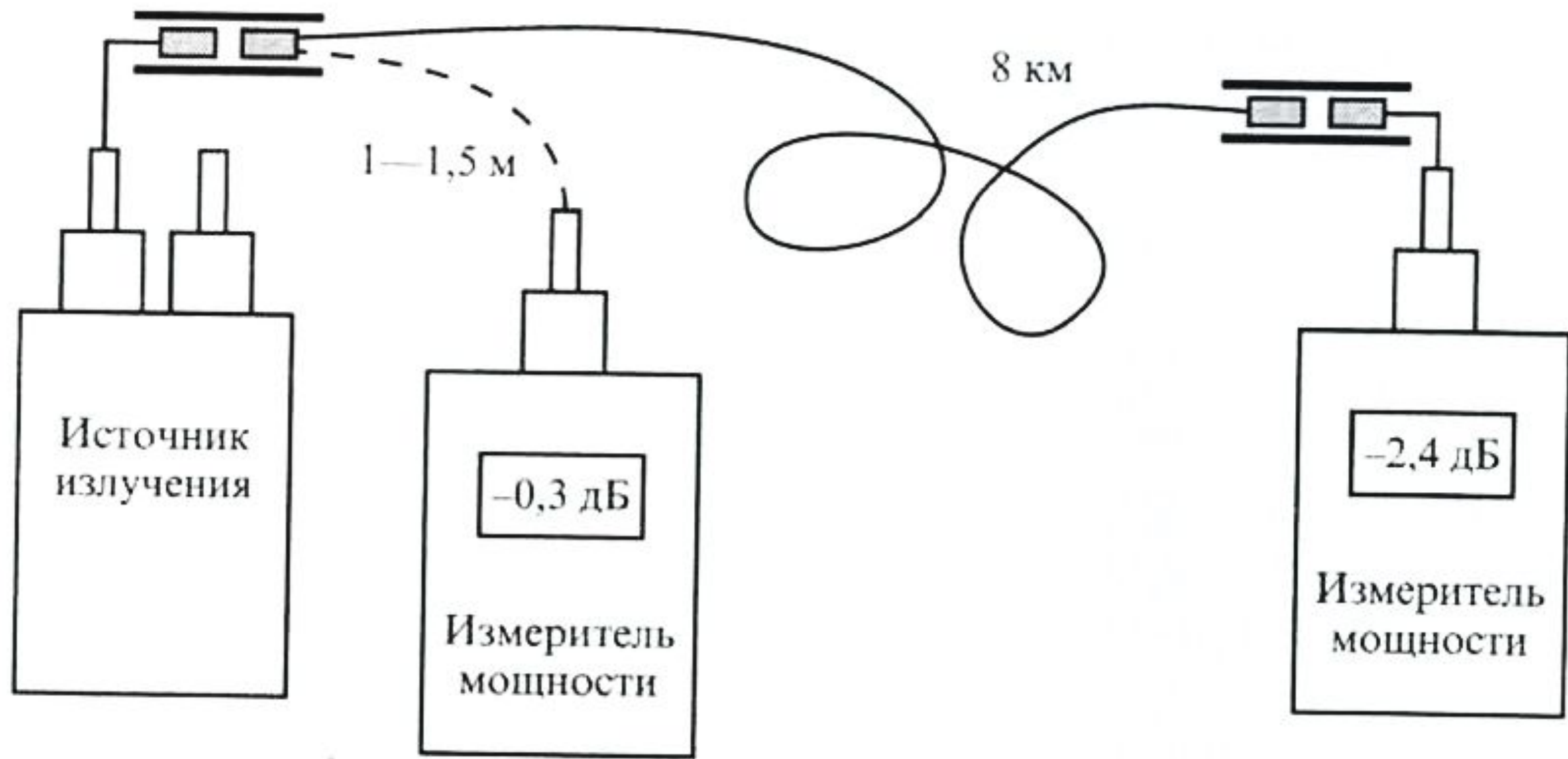
## Методы измерения затухания с использованием проходящего света

При этих методах свет вводится в начале волоконного световода (со стороны передатчика), затем проходит через него и измеряется на конце световода (со стороны приемника).

Источник  
сигнала



Оптический  
измеритель  
мощности





Метод обрыва относится к группе методов разрушающего контроля, имеет высокую точность, применяется чаще всего в лабораторных исследованиях при производстве ВОК и рекомендуется для измерений на коротких оптических волокнах. При данном методе определяется световая мощность в двух точках световода  $L_1$  и  $L_2$ .

Сначала измеряется световая мощность  $P$  на конце в точке  $L_2$  (км). Затем на передающем конце отрезают фрагмент волокна длиной 1 – 1,5 м ( $L_1$ ), скалывают его конец и с помощью адаптера измеряют уровень сигнала на волокне. Уровень в точке  $L_1$  принимают за входной. Разность двух уровней дает искомое значение затухания. Коэффициент затухания  $\alpha$  (дБ/км) световода рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{10}{L_2 - L_1} \log \frac{P(L_1)}{P(L_2)}$$

Недостаток этого метода заключается в необходимости отрезать короткий кусок волоконного световода, что, например, при использовании волоконно-оптических кабелей с соединителями нецелесообразно.

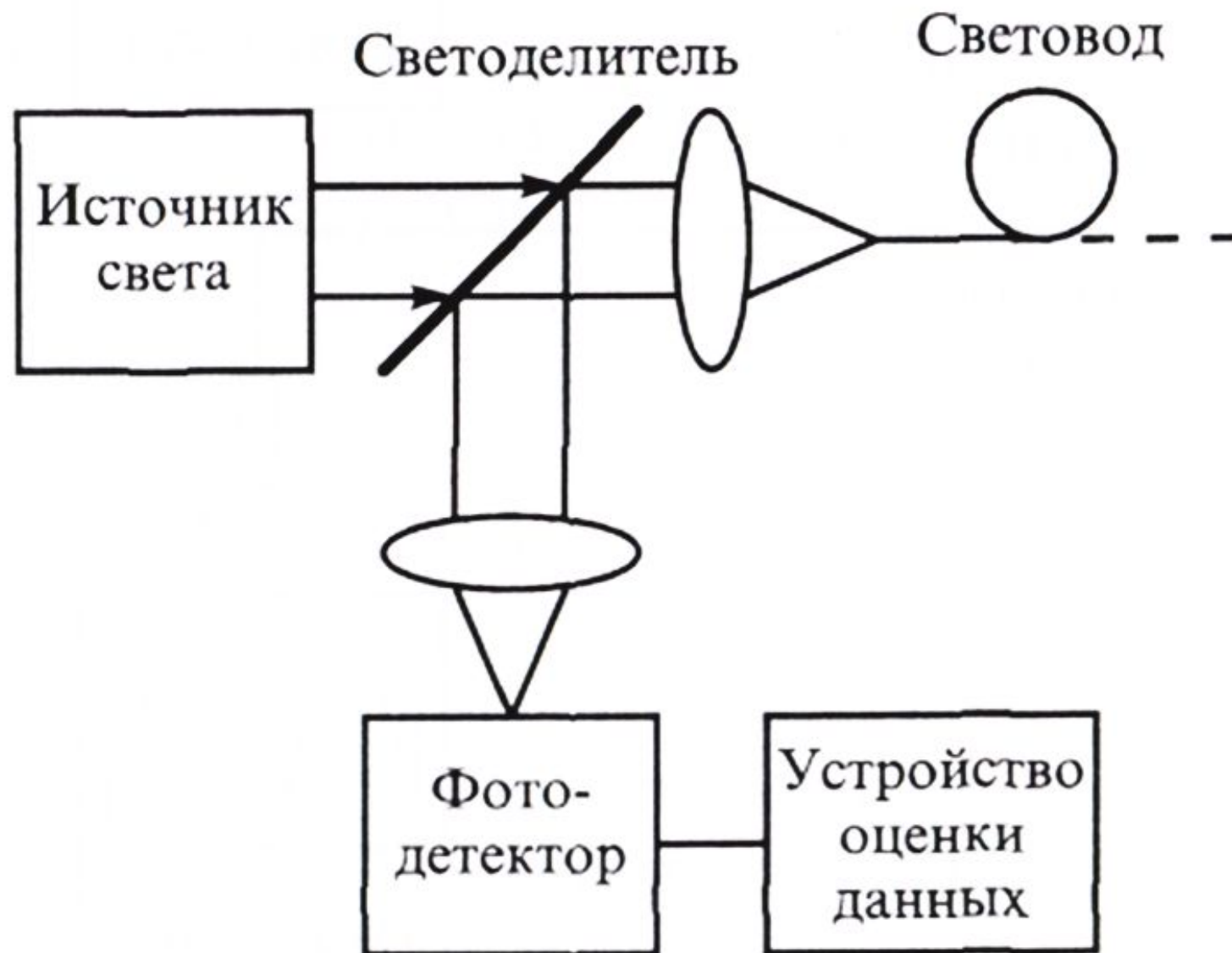
Для увеличения точности измерений рекомендуется провести их несколько раз, а за уровень входного сигнала принять среднее значение. Основной недостаток метода обрыва состоит в том, что при каждом измерении происходит потеря 1 – 1,5 м волокна.

## **Измерение параметров ВОК методом обратного рассеяния**

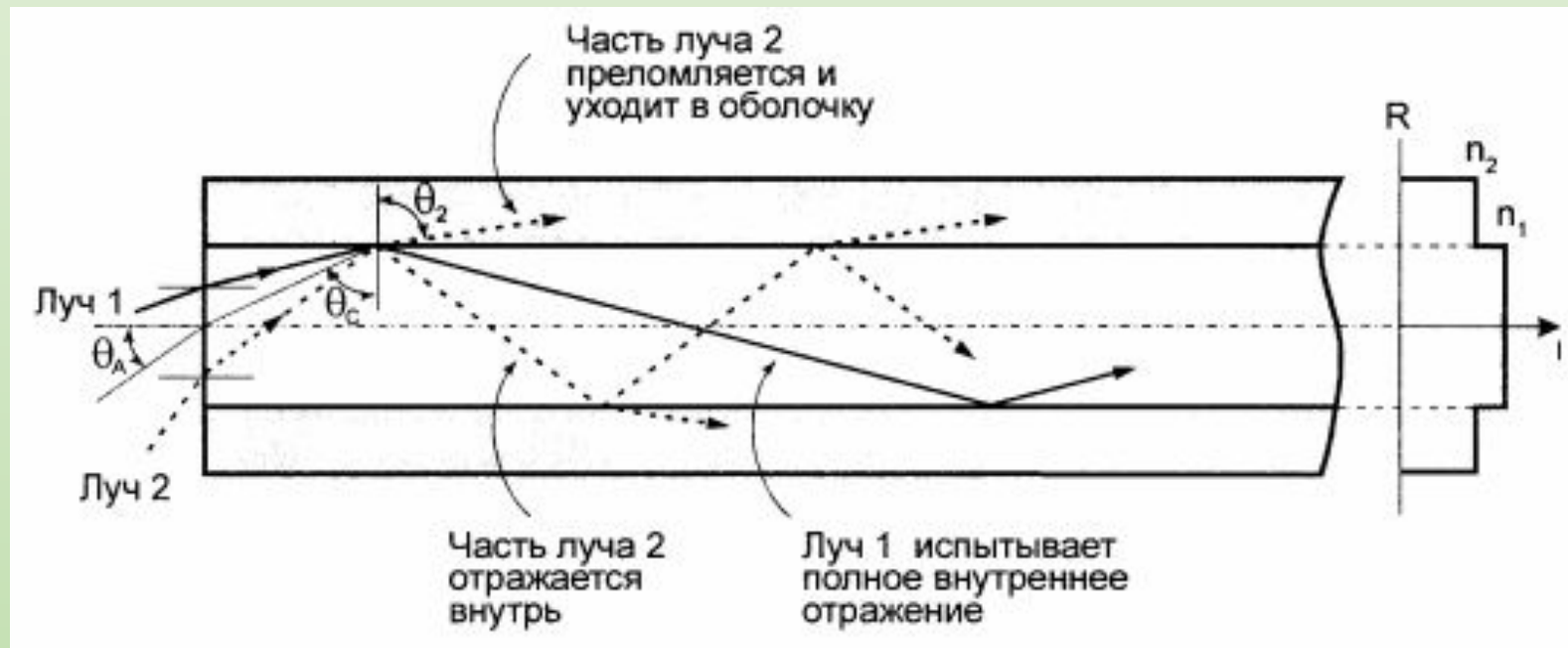
При методе обратного рассеяния свет вводится и выводится на одном конце волоконного световода. Дополнительно можно получить информацию о процессе затухания вдоль световода. В основу метода положено рэлеевское рассеяние.

Основная часть световой мощности распространяется в направлении «вперед», а небольшая ее часть рассеивается назад к передатчику. Эта мощность обратного рассеяния по мере прохождения по волоконному световоду также претерпевает затухание. Оставшаяся часть мощности с помощью светоделителя, например полупрозрачного зеркала, расположенного перед световодом, выводится и измеряется.

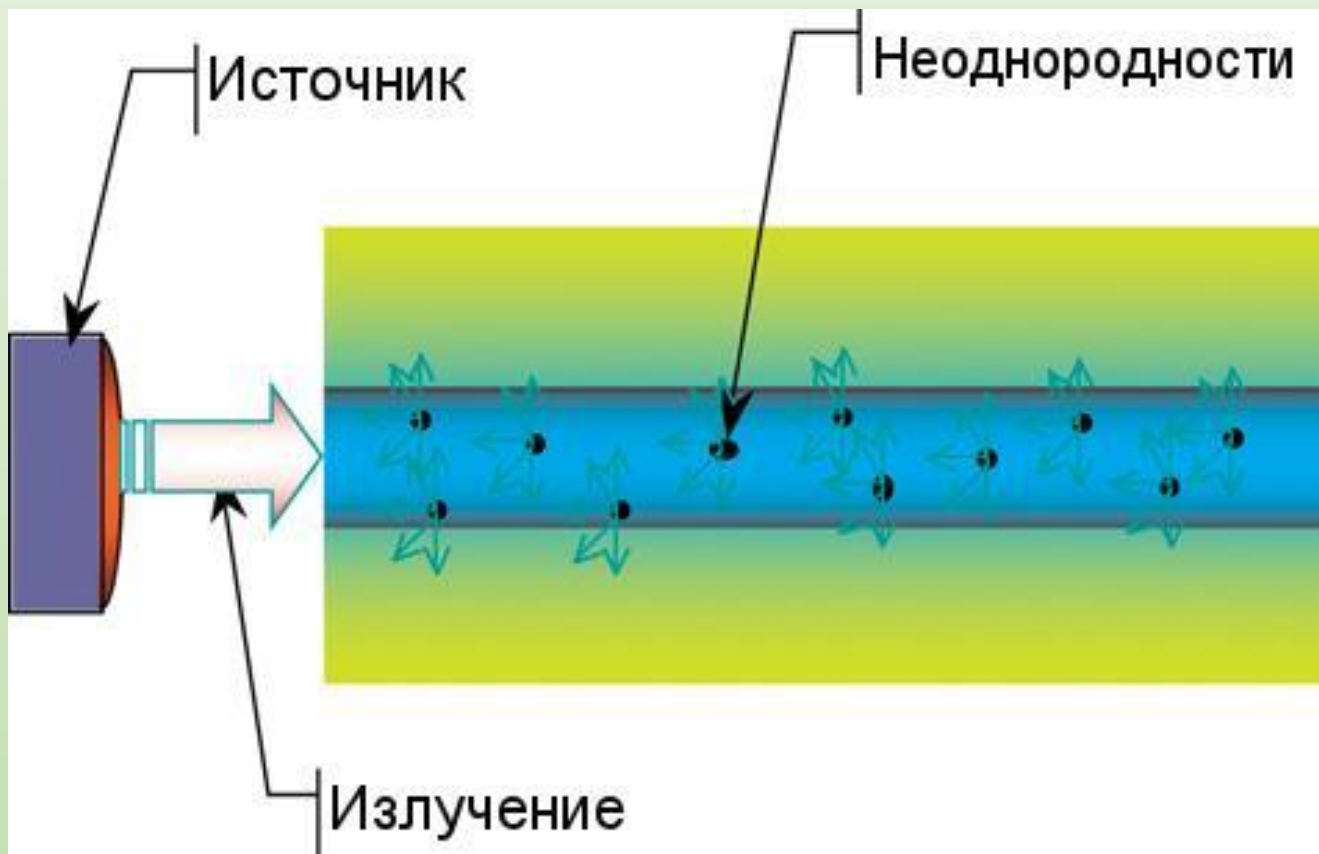
По этой световой мощности обратного рассеяния и времени прохождения по световоду можно построить кривую, на которой наглядно видно затухание по всей длине световода.



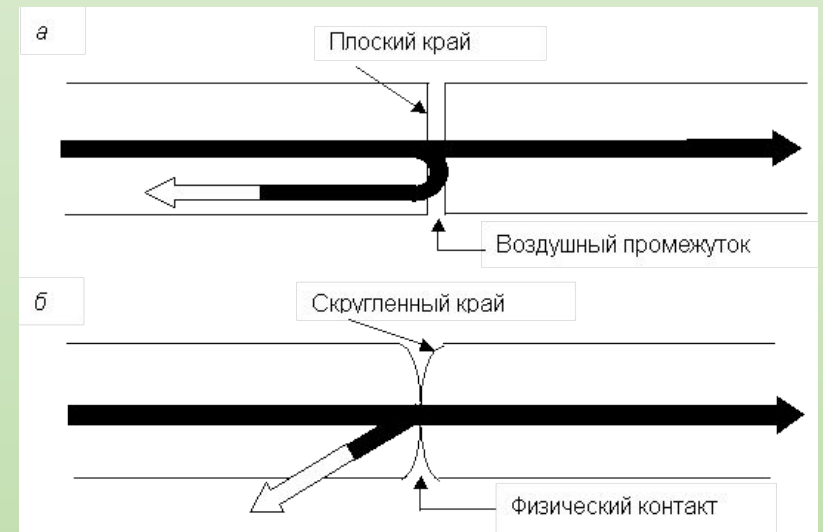
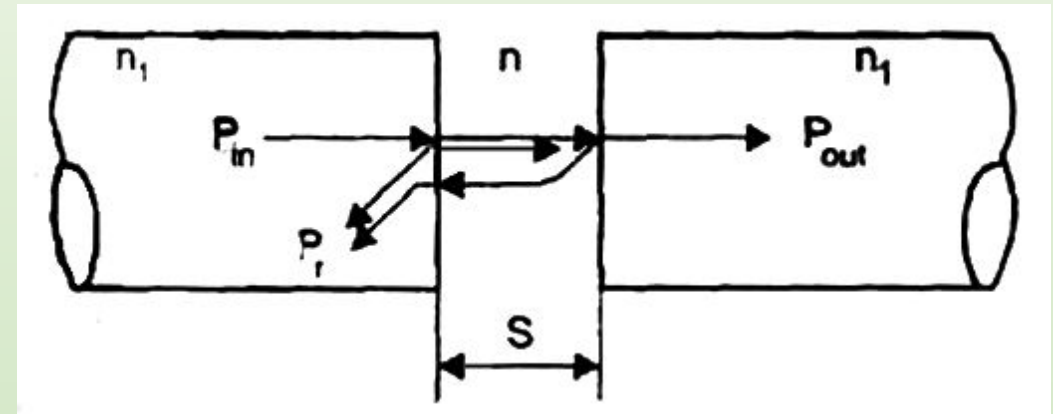
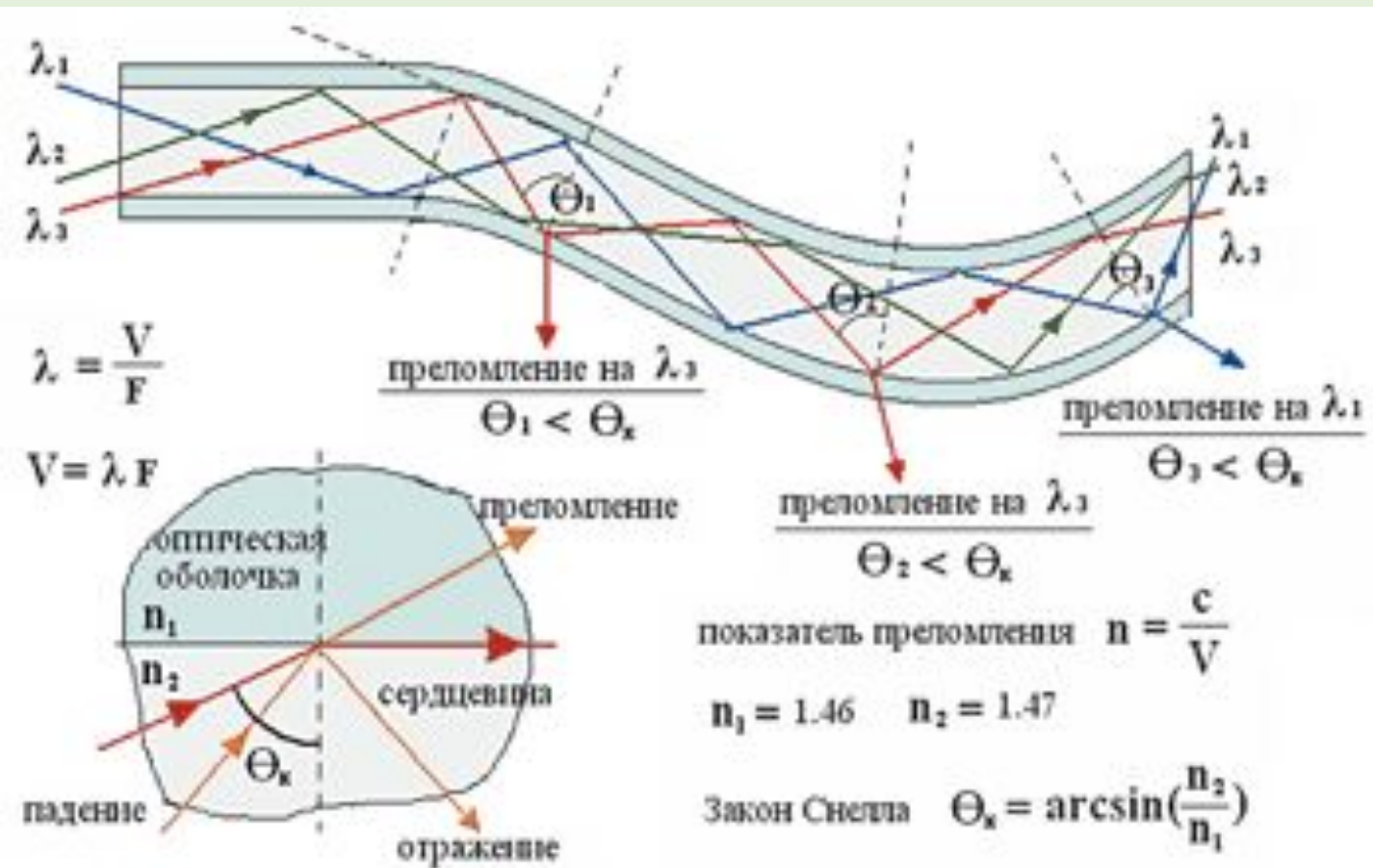
Волоконно-оптический кабель использует внутреннее отражение или исполняет роль волновода для передачи оптического сигнала. В ходе передачи исходного импульса по волокну основная часть светового пучка движется в направлении кабеля. Небольшое количество света движется в разных направлениях из-за микродефектов в материале из которого изготовлена сердцевина волоконно-оптического кабеля, претерпевая многократные отражения.



Обратное рассеяние - это небольшая часть рассеянного света, которая направляется обратно к рефлектометру и может быть им обнаружена. По изменению величины обратного рассеяния рефлектометр регистрирует события, приводящие к затуханию исходного импульса по мере его движения по кабелю.



Отражениями Френеля называются значительные по величине отражения света назад (в сторону рефлектометра), вызванные резкими изменениями коэффициента преломления стекловолокна. Наиболее часто отражения Френеля бывают вызваны дефектами соединений, разрывами кабеля, трещинами, сильными изгибами и дефектами на торце кабеля.



Если коэффициент затухания и коэффициент обратного рассеяния остаются постоянными по всей длине световода, то кривая убывает от начала световода экспоненциально.

Из-за скачка показателя преломления в начале и конце световода относительно большая часть световой мощности рассеивается обратно в этих местах, что обуславливает наличие пиков в начале и конце кривой.

По разности времени  $\Delta t$  между этими двумя пиками, скорости света в вакууме  $c_0$  и групповому показателю преломления  $n_g \sim 1,5$  в стекле сердцевины можно рассчитать длину волоконного световода



$$L = \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{c_0}{n_g}$$

где  $L$  – длина волоконного световода, км;

$\Delta t$  – разность времени между пиками начального и конечного импульсов, с;

$c_0$  – скорость света в вакууме 300 000 км/с;

$n_g$  – действительный групповой показатель преломления стекла сердцевины.

Коэффициент затухания  $\alpha$  для любого участка световода между точками  $L_1$ , и  $L_2$ , определяется по формуле

$$\alpha = \frac{5}{L_2 - L_1} \lg \frac{P(L_1)}{P(L_2)}$$

Вследствие того что свет проходит как вперед, так и назад, в формуле используется коэффициент 5 вместо 10 в аналогичном уравнении для метода светопропускания. Это уравнение имеет силу, исходя из предположения, что коэффициент обратного рассеяния, числовая апертура и диаметр сердцевины остаются неизменными по всей длине световода. Если это не обеспечивается, то рекомендуется сделать два измерения на обоих концах световода, а результаты усреднить.

Всегда, когда свет, распространяющийся в каком-нибудь материале (например, в оптическом волокне), попадает в материал с другой плотностью (например, в воздух), часть световой энергии (до 4 %) отражается назад к источнику света, в то время как остальная световая энергия продолжает распространяться дальше.

Резкие изменения плотности материала имеют место на концах волокна, у его обрывов и иногда у стыков.

Количество отраженного света зависит от величины изменения плотности материала (которая характеризуется показателем преломления – более высокий показатель преломления означает большую плотность), а также от угла, под которым свет падает на поверхность раздела между двумя материалами.

## Оптический рефлектометр

Использование оптических усилителей позволило в современных системах передачи увеличить длину участка регенерации, а это привело к необходимости создания систем автоматизированного дистанционного мониторинга и обнаружения неисправностей ВОЛС.

В основе решения этих задач лежит использование оптического рефлектометра (Optical Time Domain Reflectometer – OTDR).

OTDR – это электронно-оптический измерительный прибор, который используется для определения характеристик оптических волокон. Он измеряет уровень потерь сигнала и устанавливает местонахождение дефектов и повреждений в любой точке оптического волокна.

Работа рефлектометра основана на введении в волокно импульсного оптического излучения и последующем анализе той части излучения, которая возвращается на фотодиод в результате обратного рассеивания и отражений световой волны, распространяющейся в волокне. Оптический рефлектометр производит тысячи измерений по всей длине волокна.

Точки с результатами измерений находятся друг от друга на расстоянии от 0,5 м до 16 м. Они выводятся на экран и образуют наклонную линию, идущую слева направо и сверху вниз; таким образом, в результате математической обработки сигнала на экране прибора строится кривая, называемая рефлектограммой.

Оптические рефлектометры широко применяются на всех этапах создания и эксплуатации волоконно-оптической сети – от сооружения до технического обслуживания (определения мест повреждений и их исправления).

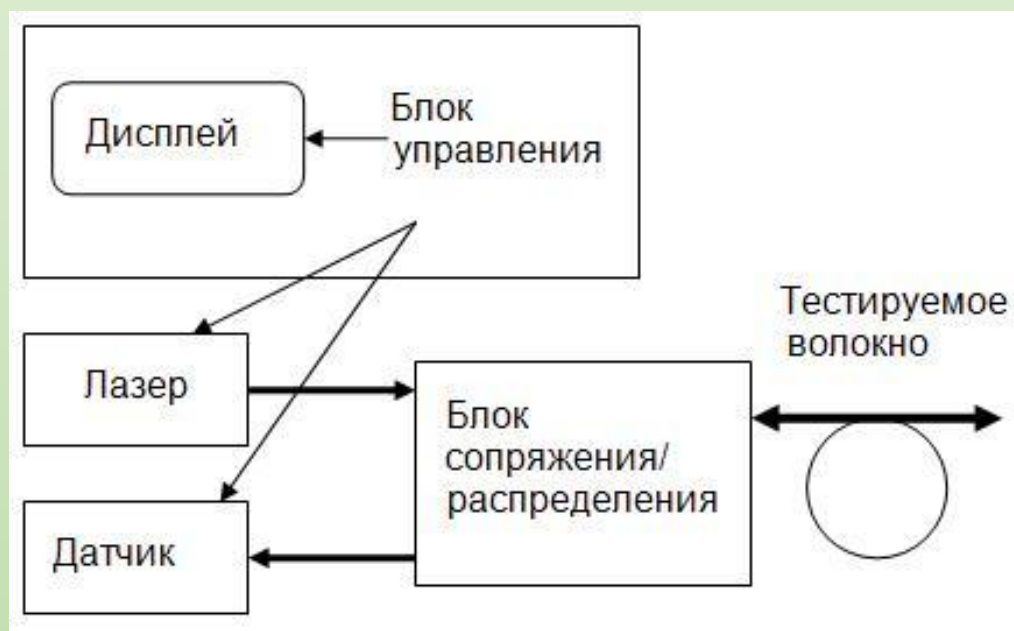
Рефлектограмму можно проанализировать на месте, распечатать для создания документации о сети или сохранить в компьютере для последующего анализа и сопоставлений. По рефлектограмме оператор может точно определить конец волокна, местонахождение оптоволоконных стыков и потери в них, а также полные потери в волокне.

В большинстве последних моделей рефлектометров предусмотрена возможность автоматического анализа полученных рефлектограмм, что упрощает пользование ими.

Хотя оптический рефлектометр измеряет только уровень обратного рассеяния, а не передаваемой световой энергии, существует определенное соотношение между уровнями обратного рассеяния и переданного импульса: обратное рассеяние составляет определенный процент переданной световой энергии.

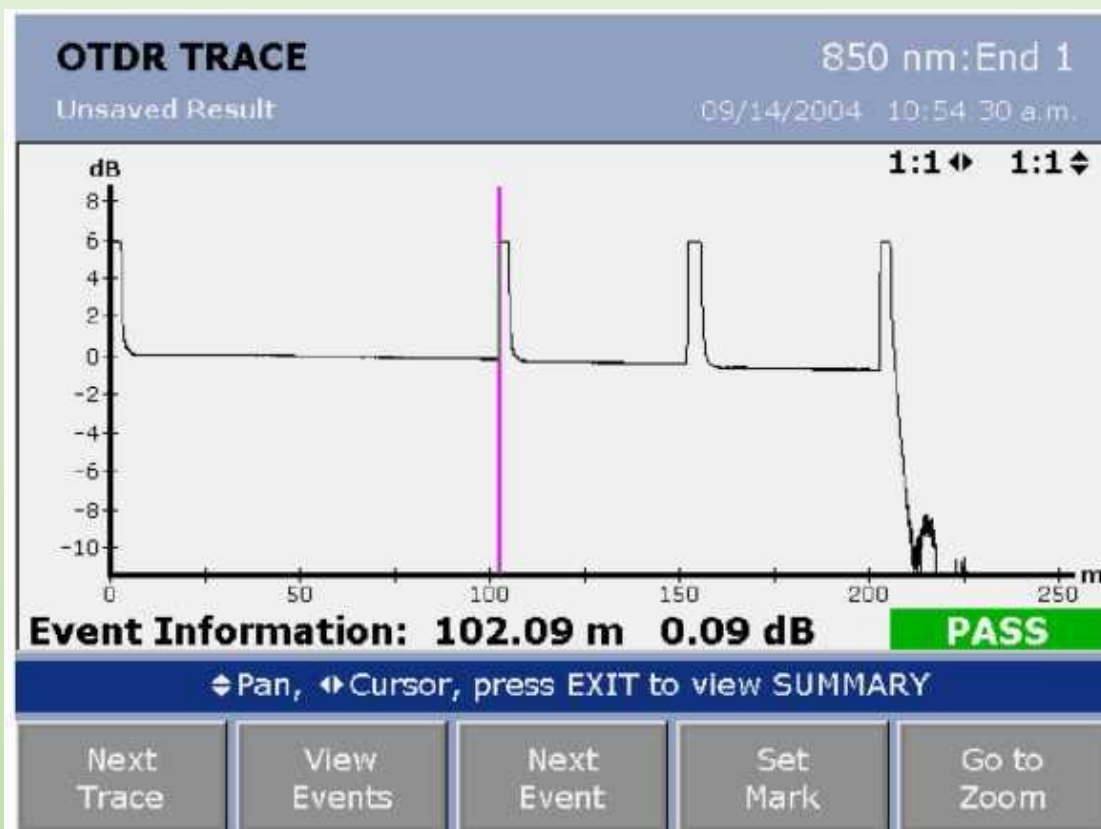
Соотношение между световой энергией обратного рассеяния и переданной световой энергией называется коэффициентом обратного рассеяния. Если из-за сильного изгиба, соединения двух волокон (оптоволоконного стыка) или какого-нибудь дефекта количество передаваемой световой энергии между точками А и Б резко падает, то и соответствующее обратное рассеяние между этими точками уменьшится в той же пропорции. Факторы, которые понижают уровни передаваемых импульсов, приведут к падению уровня обратного рассеяния этих импульсов.

OTDR подает в волоконно-оптический кабель серию кратковременных, но мощных оптических импульсов и измеряет отраженный сигнал, который возвращается назад по кабелю. Для излучения таких сигналов в оптических рефлектометрах используются импульсные лазерные диоды. Кроме того, применяются высокочувствительные оптические измерители, например лавинные фотодиоды, для измерения мощности отраженного сигнала и обратного рассеяния.

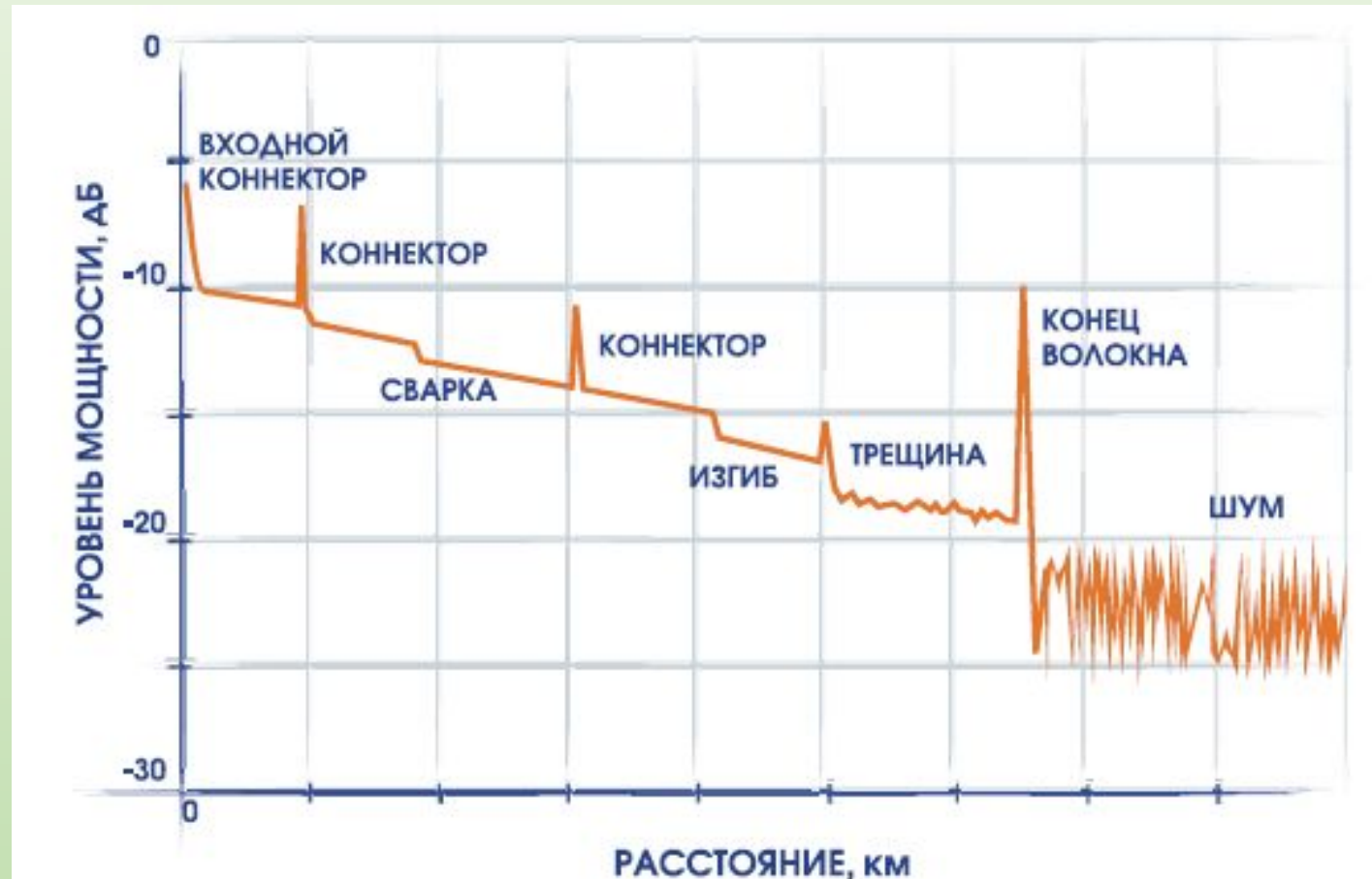




Оптические рефлектометры показывают результаты измерений в виде графика (рефлектограммы) зависимости количества отраженного и рассеянного света от длины кабеля. Большинство рефлектометров также извлекают сведения о событиях из рефлектограммы и формируют таблицы с информацией об их расположении и характеристиках.



По горизонтальной оси графика откладывается расстояние, а по вертикальной – уровень сигнала. Выбрав с помощью курсоров две любые точки с результатами измерений, можно определить расстояние между ними и разницу в уровнях сигналов в этих точках.





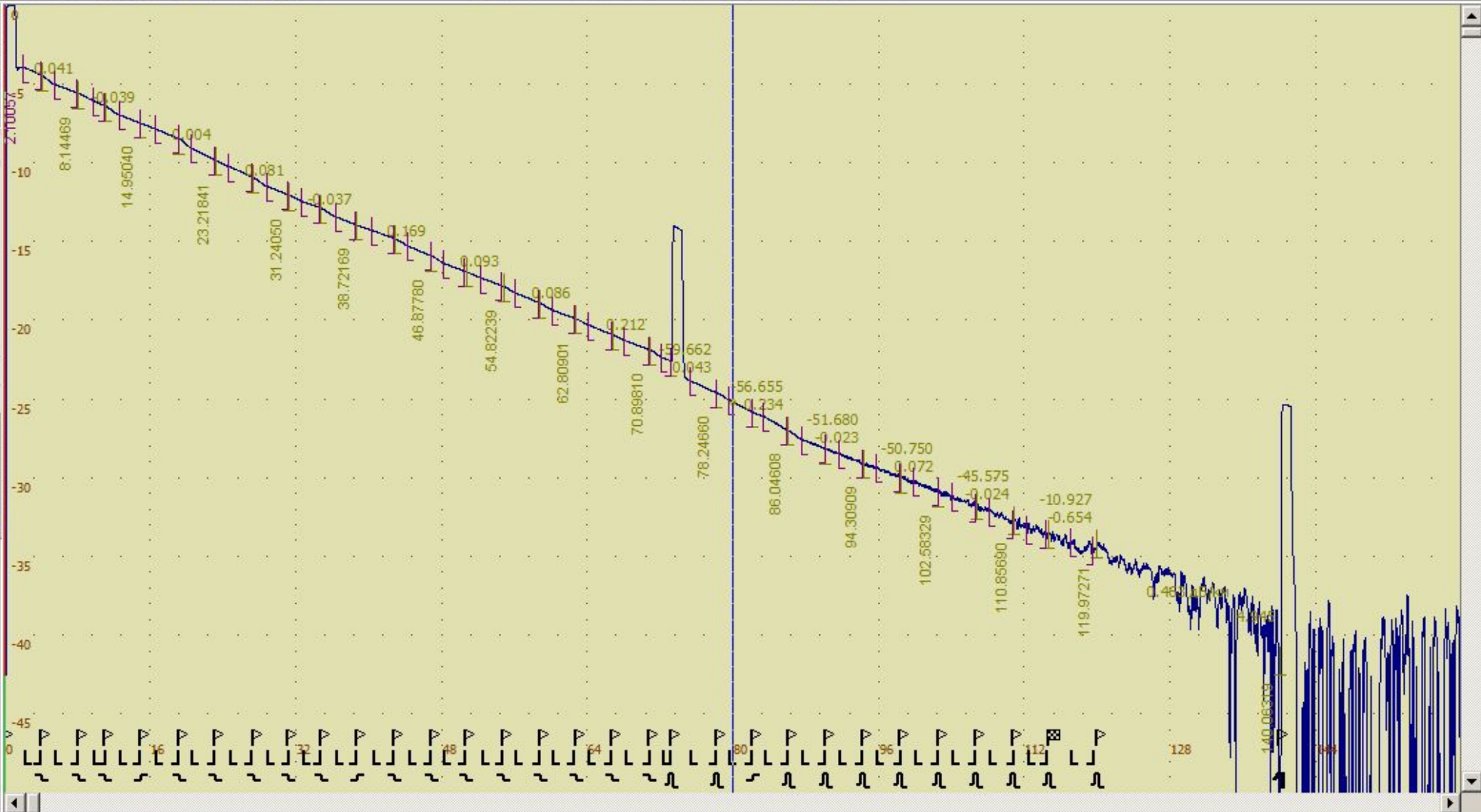
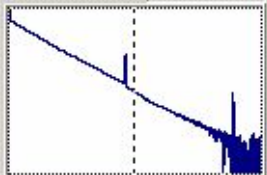
L, км -0.00520  
 R, км 79.98982  
 R - L, км 79.99502  
 дБ -33.592  
 дБ/км -0.420

Рефлектограммы

^Витебск-ГосГр.sor

Буфер:

Шаблон:



X: [-0.00520, 159.98484] км; 15.99900 км/дел  
 Y: [0.000, -50.000] дБ; 5.000 дБ/дел

OM-1550 n=1.46810 Lmax=160 км Tr=10000 Nav=16 L1=-0.00521 км L2=159.98484 dL=12 м Пороги: заданы

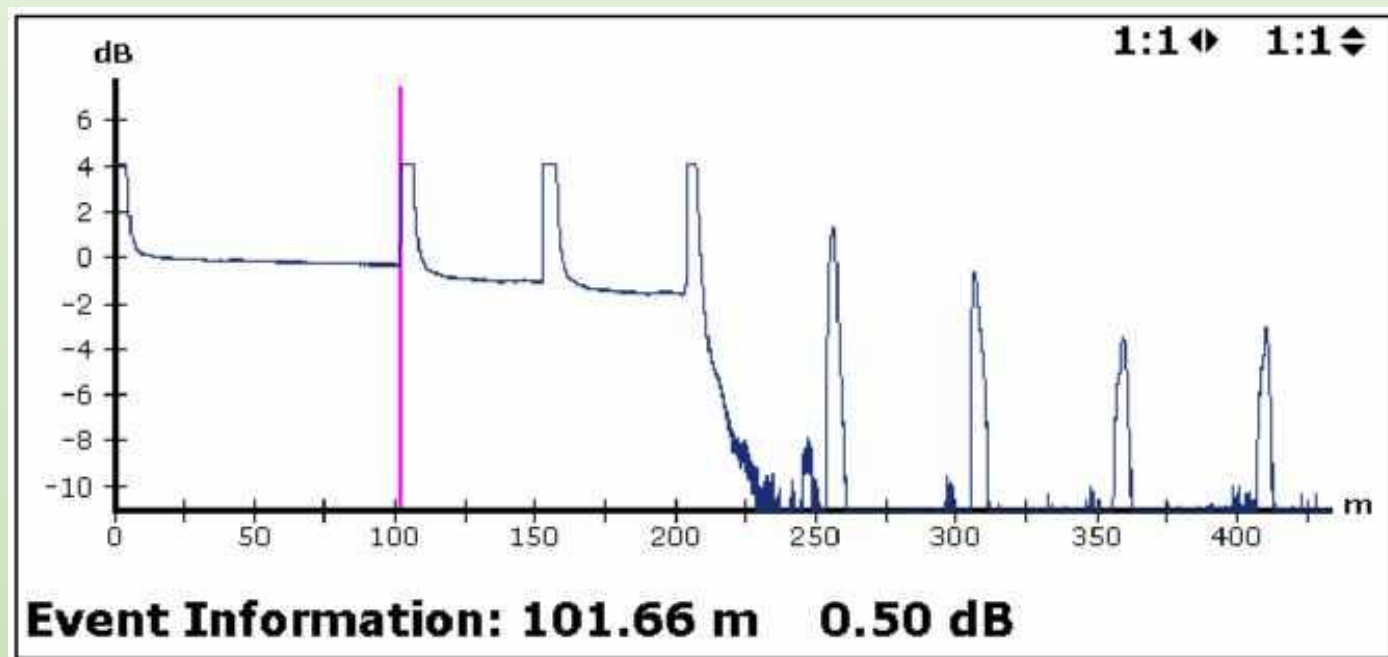
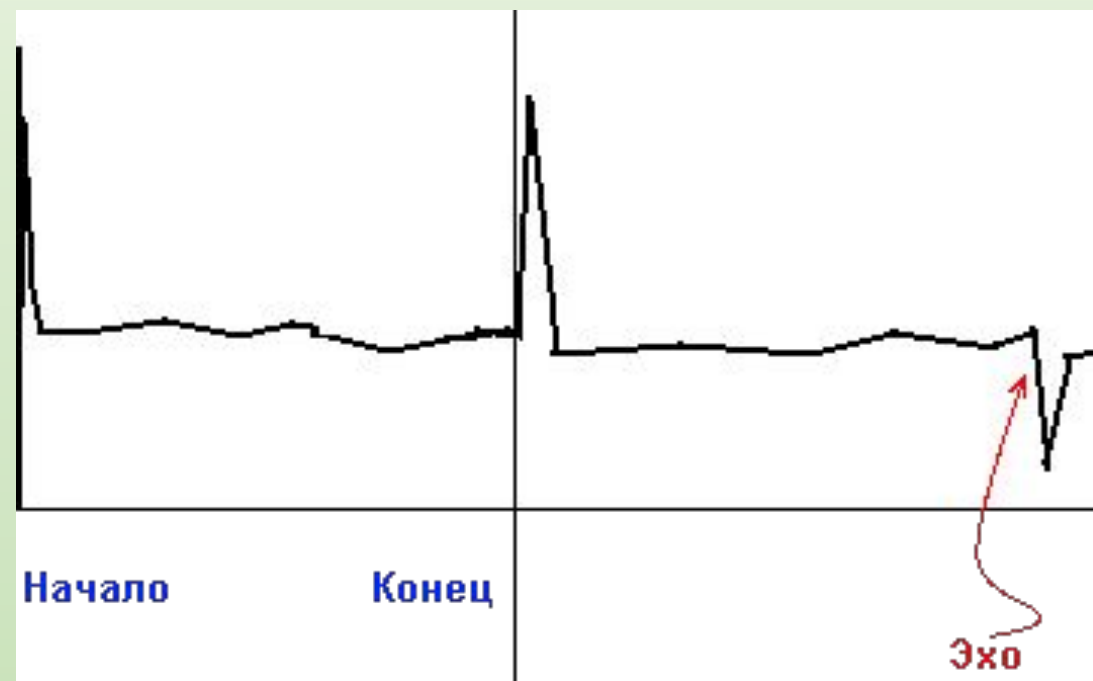
# ТИПЫ СОБЫТИЙ

События отражения можно разделить на два класса. На *обратное отражение* - потери сигнала, вызванные его отражением в направлении источника излучения. И *вносимые потери* - это затухание сигнала в ходе прохождения по линии или через устройство.

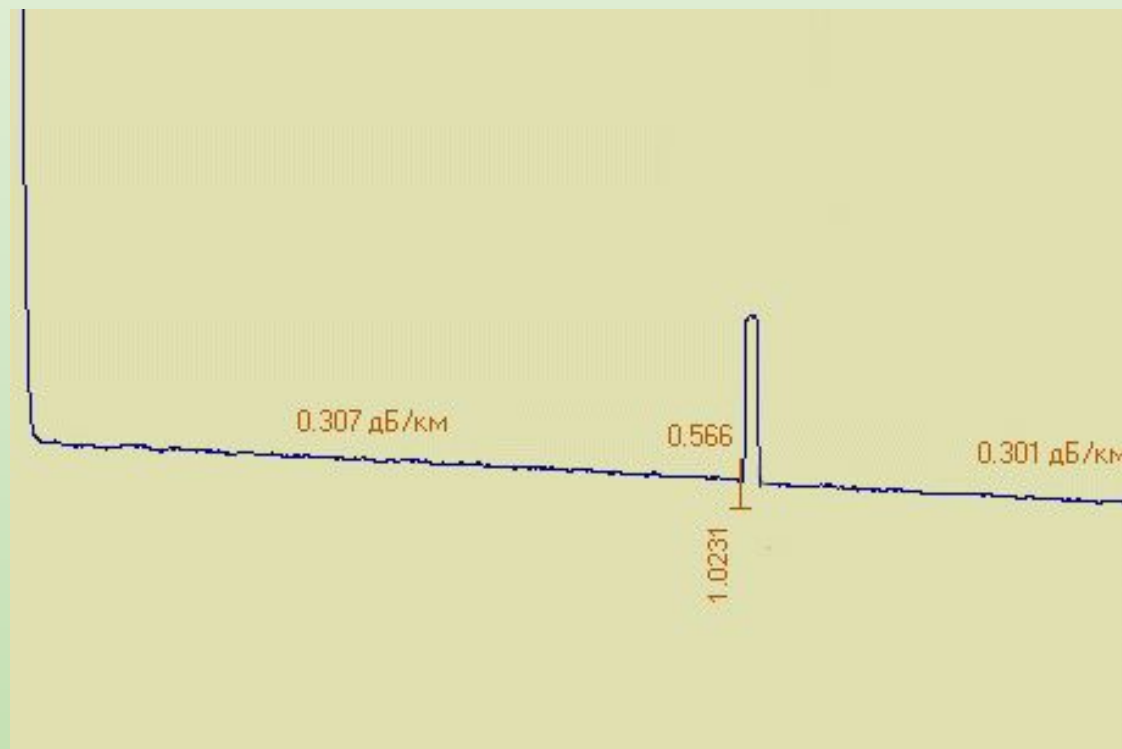
Потеря сигнала, в отличие от отражения, обычно бывает вызвана дефектами сварных швов и перегибами кабеля. В таких местах мало отражений Френеля, но происходит затухания сигнала из-за кабеля. Они могут быть выявлены путем регистрации резких скачков обратного рассеяния. Для обнаружения такого события необходимо, чтобы рефлектометр был способен создавать и обнаруживать обратное рассеяние, превосходящее по величине уровень шума самого приемника OTDR.

*Эхо (фантомы)* представляют собой отражения пучков света, как правило, вызванные некачественным соединением в точке стыка кабелей. Термины *эхо* и *фантом* применяются для обозначения двух типов несуществующих событий, являющихся плодом процесса получения рефлектограммы.

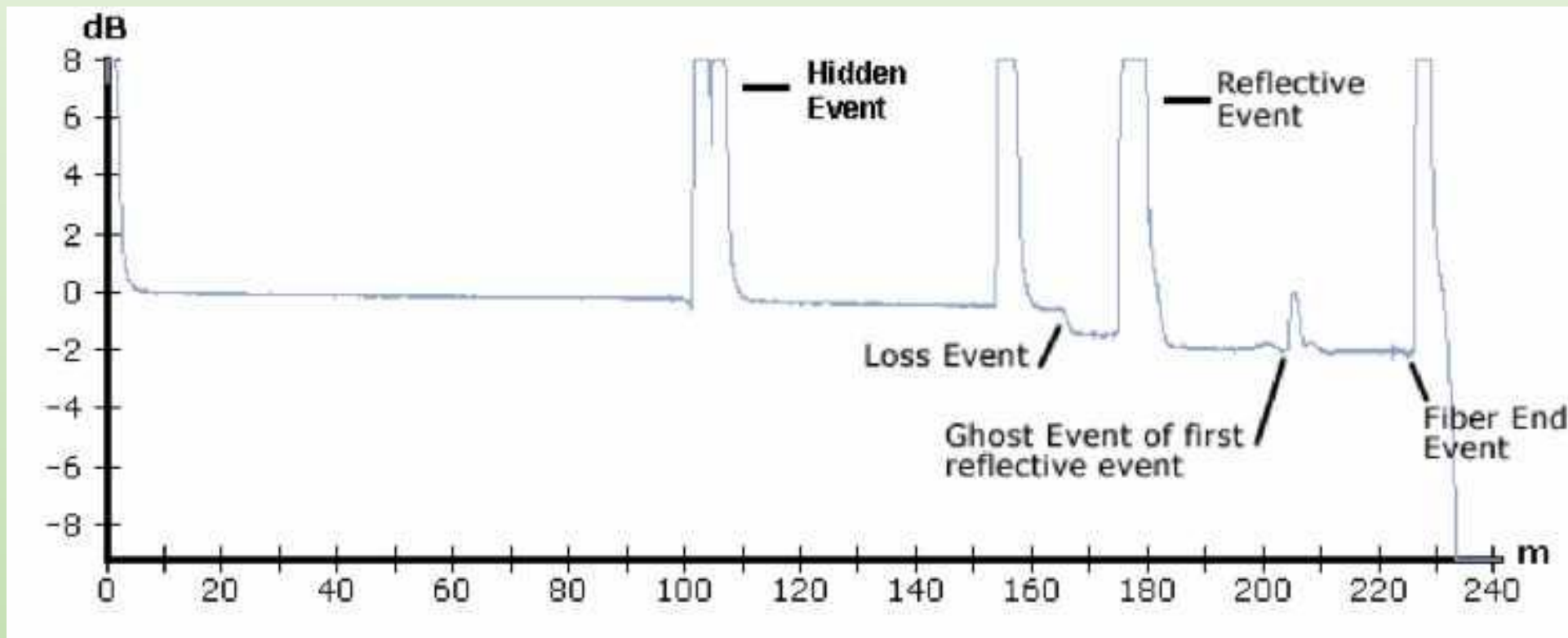
*Эхом* называются события, вызванные многократным отражением света.



Фантомами называются ситуации, когда промежуток между импульсами лазера настолько мал, что энергия от одного импульса накладывается на трассировочный след другого импульса. В измеряемой линии появляется своеобразное эхо, которое и вызывает ошибку. Фантом пропадает при изменении диапазона измерений, который рекомендуется устанавливать в два раза превышающим предполагаемую длину линии.

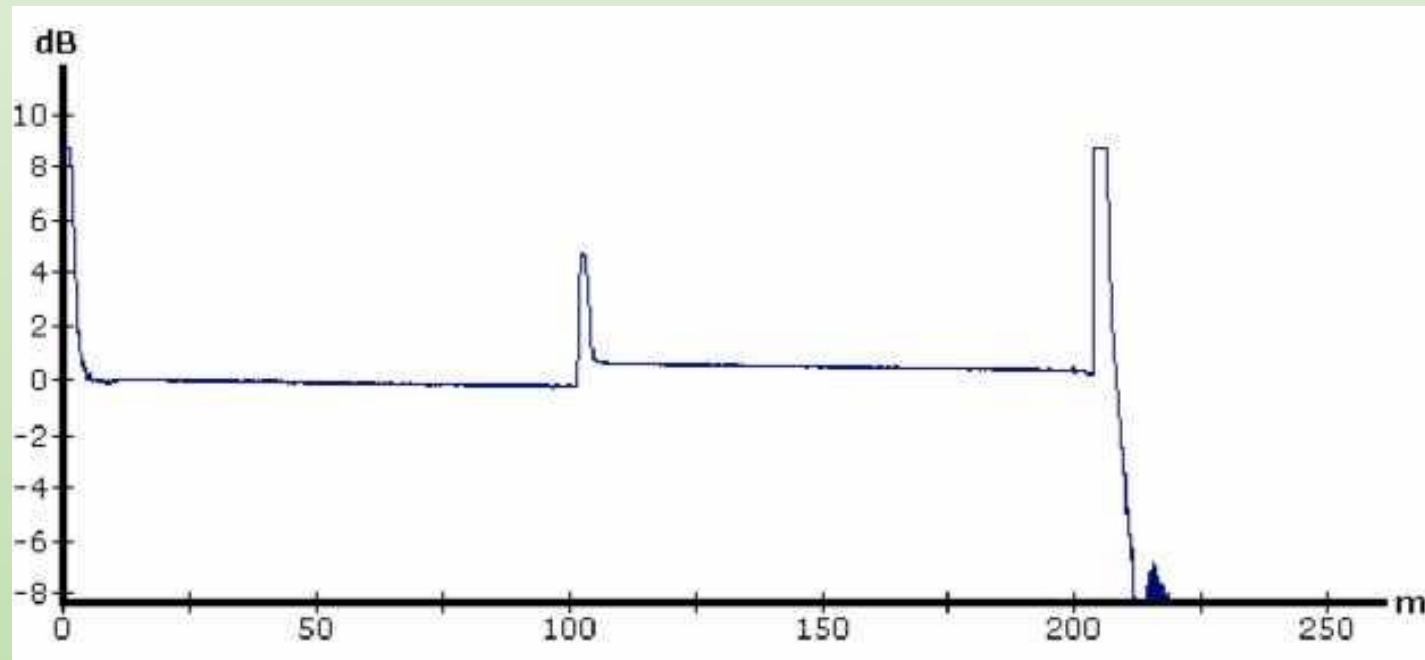


Скрытое событие - это событие, возникающее настолько близко к предыдущему, что у сигнала не остается времени на падение до обычного уровня обратного рассеяния между ними. Типичными источниками скрытых событий служат соединительные шнуры, применяемые при коммутации.



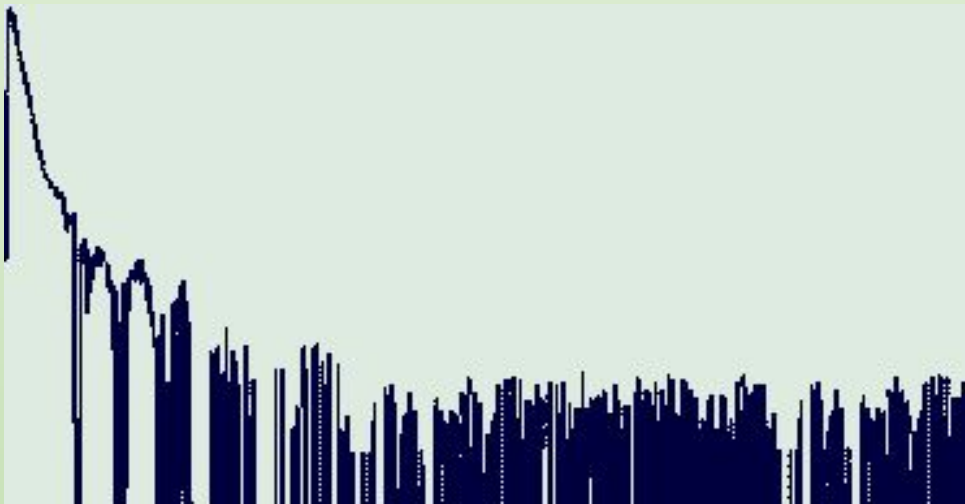
Ситуация, когда уровень обратного рассеяния после события выше, чем до события, называется *подъемом*.

Подъемы часто бывают вызваны стыками разных типов кабеля. Кроме того, подъемы встречаются после больших отражений. От сильного сигнала остается след за отражением, который постепенно исчезает. Если следующее событие достаточно близко, вместо обратного рассеяния наблюдается подъем. Этот уровень может быть выше уровня обратного рассеяния события, за которым возник след.

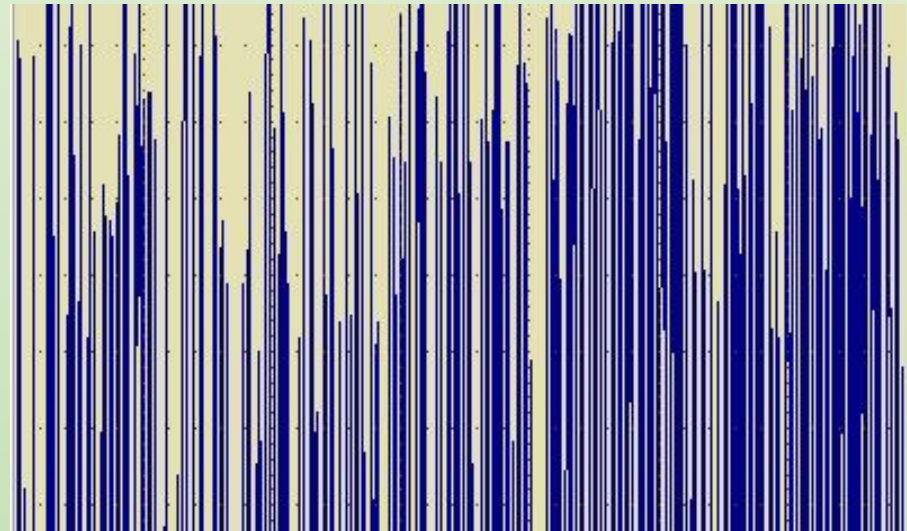




Анализатор характеризует события по их форме, уровню обратного рассеяния до и после события, а также расположению события относительно других событий на рефлектограмме. Грязные и плохо отполированные разъемы отражают сравнительно много света, что сказывается на форме событий и приводит к увеличению подъема и потере сигнала вокруг события. Кроме того, плохие разъемы могут служить источниками эха. Все эти факторы снижают точность работы анализатора.



**Пример загрязнённого или поломанного коннектора на выходе**



**В оптоволокне присутствует сигнал с противоположной стороны**

Мертвой зоной рефлектометра называется время восстановления, в течение которого сильное отражение Френеля может маскировать последующие отражения (мертвые зоны для регистрации событий) или снижение уровня обратного рассеяния (мертвые зоны при измерении затухания). Анализатор событий не может получить полную картину о событии, если оно происходит в пределах мертвой зоны за предыдущим событием.



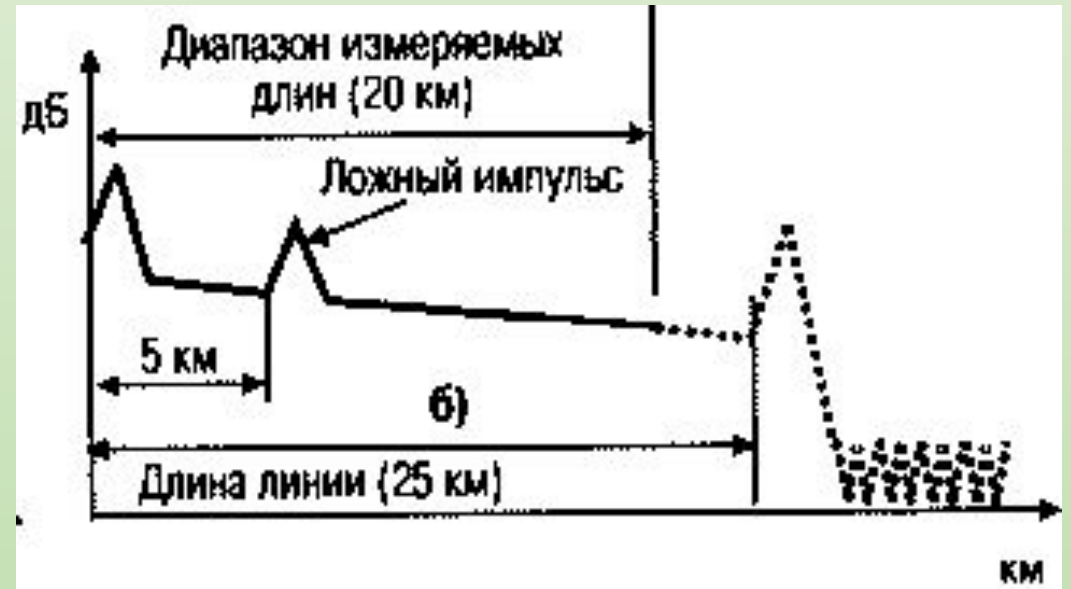
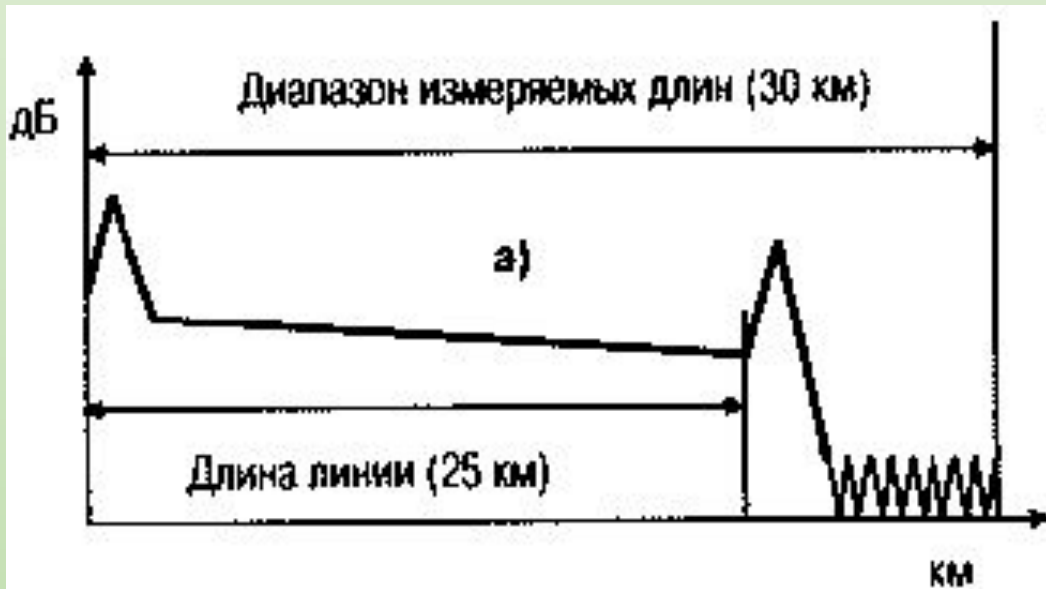
Специально для решения этой проблемы используются километрические катушки, состоящие из некоторой длины (500 м или 1 км) оптоволокна и позволяющие контролировать первую сварку.

Полностью проблемы это не решает так как соединение на коннекторах катушка – шнур, как правило, имеет большое затухание, да к тому же создаёт на рефлектограмме достаточно высокий отражённый импульс (на рисунке всплеск на расстоянии 1 км) и соответственно свою мёртвую зону.



Перед началом измерений в рефлектометре необходимо установить диапазон измеряемых длин. Диапазон измеряемых длин устанавливается немного больше измеряемой длины волокна.

Если значение диапазона измеряемых длин установлено меньше длины измеряемого волокна, то в рефлектограмме появляются ложные сигналы. Они образуются потому, что рефлектометр посылает следующий импульс раньше, чем успеет вернуться предыдущий импульс.



## Влияние коэффициента преломления на результаты измерений

Средний коэффициент преломления волоконно-оптического кабеля - 1,48. Это значит, что скорость света в кабеле составляет около 203 тысяч километров в секунду. Рефлектометр определяет удаленность событий от начала кабеля по коэффициенту преломления кабеля и интервалу времени, через который в рефлектометр поступает отраженный сигнал.

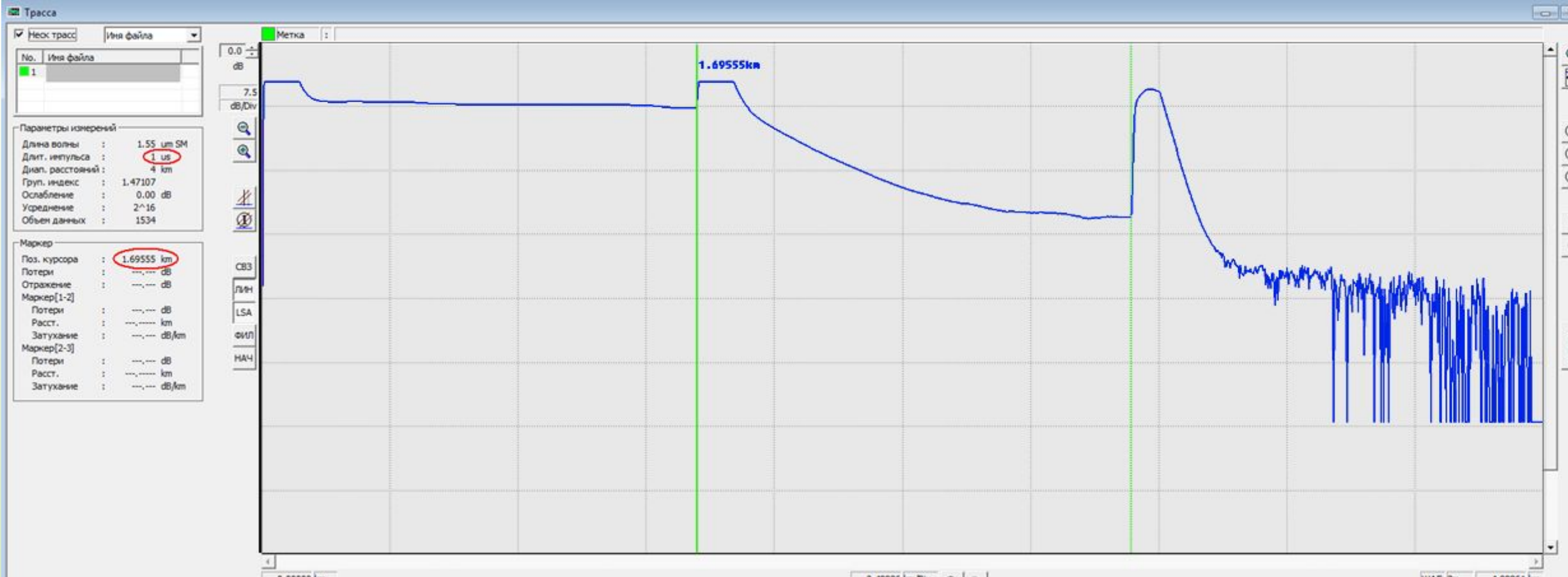
Если не задать точный коэффициент преломления для всех длин волн, используемых для тестирования, результаты измерений (расположение событий) с разными длинами волны будут разными.

Поэтому одно и то же событие может быть зарегистрировано на разных расстояниях в ходе измерений с длиной волны 850 нм и 1300 нм.

Длительность импульсов определяет величину сигнала обратного релеевского рассеяния света в волокне и ширину мертвой зоны в начале рефлектограммы.

При большой длительности импульса (1 мкс) сигнал обратного релеевского рассеяния заметно превосходит уровень шумов в конце рефлектограммы, но при этом мертвая зона делает недоступным для измерения большой участок в начале волокна ( $\sim 0.5$  км).

При уменьшении длительности импульса до 100 нс ширина мертвой зоны уменьшается примерно в 10 раз. При этом уровень сигнала обратного релеевского рассеяния уменьшается на 5 дБ, и вклад шумов может уже стать заметным.



Мощность



Переносимая  
энергия

Переносимая  
энергия

короткий импульс  
короткая мертвая зона  
низкая энергетика

длинный импульс  
длинная мертвая зона  
высокая энергетика

Время



Разрешение может быть описано как «минимальное расстояние между двумя последовательно расположенными точками выборки, которые были измерены прибором». Этот параметр имеет критически важное значение, поскольку от него зависит точность определения расстояния и способность рефлектометра указывать положение неоднородностей. В зависимости от выбранной ширины импульса и диапазона расстояний это значение может меняться от 4 см до нескольких метров.

