

**Распределенные акустические сейсмические системы и перспективы их использования  
при скважинных (ВСП) и наземных сейсмических съемках**

**М.Б. Шнеерсон, д.т.н., профессор МГПИ – РГГРУ, [shneer@bk.ru](mailto:shneer@bk.ru), 89037256690**

**Distributed acoustic seismic systems and their perspectives in VSP and land acquisitions**

**M.B. Shneerson, doct, professor MGPI – RSGGY**

**Аннотация.** *Распределенные акустические приемные системы (distributed acoustic sensing, DAS), предусматривающие подачу луча лазера в опτικο-волоконный кабель и измерение амплитуд и фаз рассеянных волн получают в последнее время определенное применение в сейсморазведке при скважинных наблюдениях ВСП и наземных съемках. Их использование в сейсморазведке основывается на том, что под действием внешних волновых нагрузок на кабель происходит его деформация, которая приводит к изменению разностей времен и фаз между исходным и вторичными, рассеянными волновыми импульсами, что и определяет возможность определения по ним положения деформированных по глубине точек. Сравнение сейсмических материалов, полученных с новыми и стандартными приемными системами, показало их идентичность, что послужило основанием для проведения работ с опτικο-волоконным кабелем в том числе в сложных условиях, в которых невозможны традиционные работы ВСП. Распределенные системы обеспечивают одновременный прием и регистрацию волн по всей длине опущенного в скважину кабеля без остановки бурения, и они не чувствительны к внешним электрическим и магнитным полям. Оказалось успешным опробование акустических систем и при наземных сейсмических съемках. В статье по материалам зарубежных публикаций приведены результаты применения в сейсморазведке опτικο-волоконных распределенных систем.*

**Ключевые слова.** *Сейсморазведка, ВСП, распределенные опτικο – волоконные приемные системы.*

**Abstract** *Distributed acoustic sensing (DAS) are systems that use optical fibre cable as a sensor for acoustic signals. Coherent laser pulses are launched into the fibre to measure amplitudes and phases of backscatter waves with time. An acoustic signal, which is coupled by friction or pressure to the optical fibre, induces dynamic strain changes along the cable. These strain changes lead to small displacements of the scattering elements and therefore to variations of the relative phases of the backscattered waves. The fibre behaves as a series of interferometers whose output is sensitive to small changes of the strain along its length. DAS systems designed for seismic measurements offer the possibility to record and process this optoelectronic signal in a manner that establishes a linear relationship to the time dependent local strain. In order to record the ground motion not only in space but also in time, snapshots of the wavefield are created, by repeatedly firing laser pulses into the fibre at sampling frequencies much higher than seismic frequencies. Comparison seismic dates from uniform geophones and DGS systems show that they are identical and that it is possible to use new system in VSP and land acquisitions. The review of latest publications of distributed systems is presented in the paper.*

**Key words.** *Seismic prospecting, VSP, distributed acoustic sensing (DAS)*

## **Введение**

Распределенные акустические приемные системы на основе оптико-волоконных кабелей и лазерных источников света (Distributed acoustic sensing, DAS) получают в последнее время определенное, пока еще незначительное, применение в сейсморазведке при скважинных наблюдениях и наземных съемках. Результаты их опробования показывают, что они особенно эффективны при работах ВСП, технология проведения которых позволяет одновременно принимать и регистрировать колебаний по всей длине опущенного в скважину оптико-волоконного кабеля, что исключает необходимость использования перемещаемых по стволу скважины одиночных или гирлянд сейсмоприемников, минимизирует (возможно до одного) число необходимых воздействий и не требует остановки бурения, что во многих случаях является трудно преодолимым препятствием для проведения соответствующих скважинных измерений. Оптико-волоконные распределенные системы допускают многократное использование кабеля для приема колебаний, контроля и наблюдения за измеряемыми параметрами (температура, давление и др.), и они не чувствительны к внешним электрическим и магнитным полям. Следует отметить, что эти системы имеют повышенный уровень шумов и при их применении возникают определенные затруднения с определением положения приемного сегмента. Кроме того, повышенная чувствительность кабеля к напряжениям и растяжениям вдоль его длины и меньшая - к перпендикулярным нагрузкам делает их более чувствительными к продольным, а не поперечным волнам.

Тем не менее, существенные преимущества оптико-волоконных скважинных комплексов по сравнению со стандартными существенно упрощают проведение работ ВСП, снижают их стоимость и открывают перспективы их широкого практического применения. Их внедрение позволит значительно увеличить объемы скважинных сейсмических исследований и повысить эффективность сейсморазведки, особенно в сложных сейсмо-геологических условиях.

Обзор зарубежных геофизических публикаций последних лет показывают, что интерес к распределенным оптико-волоконным системам возрастает, и они находят применение при решении практических, как правило, сложных задач.

Принцип действия распределенных акустических систем и результаты их методического и опытно-производственного опробования изложены в ряде работ и докладов, представленных на международных конференциях и симпозиумах [1 – 6]. В них рассмотрены особенности приема и регистрации переменных динамических нагрузок оптико-волоконными системами, показана на конкретных примерах практическая идентичность волновых полей, зарегистрированных стандартными сейсмоприемниками и распределенными акустическими системами, а также приведены результаты их практического применения в различных районах и условиях. Ознакомление с этими материалами представляет определенный интерес, т.к.

позволяет достаточно полно оценить достоинства и ограничения этих систем и перспективы их развития и промышленного использования

Изложению этих вопросов и посвящена настоящая статья.

## **1. Распределенные оптико-волоконные системы как приемники сейсмических волн**

Используемые в сейсморазведке распределенные акустические системы предусматривают подачу луча лазера в опущенный в скважину оптико-волоконный кабель и измерение амплитуд и фаз рассеянных волн, образовавшихся на его мелких неоднородностях и распространяющихся от них в прямом и обратном направлениях. При этом часть светового потока возвращается к датчику - излучателю. Измерение задержек времени между моментами излучения и приема колебаний и разностей фаз между ними позволяют определить положения точек рассеяния вдоль оптико-волоконного кабеля, длина которого может достигать десяти и более километров. Обычно расстояние между этими точками составляет около одного метра, что и определяет разрешенность получаемых данных. Поскольку доля возвращающегося света очень небольшая, то для получения приемлемого отношения сигнал/шум необходимо использование различных способов повышения этого отношения, например, использование нескольких линий или увеличение до нескольких минут длительности измерений. Возможность использования оптико - волоконных приемных систем в сейсморазведке основывается на том, что под действием внешних волновых нагрузок, подходящих к кабелю, происходит его деформация, которая фиксируется чувствительной приемной системы по изменению характера рассеянных волн, что и позволяет по разности времен и фаз между исходным и вторичными волновыми импульсами определять их положение по глубине. Высокая скорость световых волн позволяет практически непрерывно фиксировать положение подходящих к скважине волновых фронтов, т.е. волоконно-оптические распределенные акустические приемные системы аналогичны большой гирлянде сейсмоприемников, но принципиально отличаются от них тем, что, как было отмечено ранее, не требуют остановки скважины и размещения в ней дополнительного оборудования. При этом следует иметь в виду, что если стандартные приемные устройства позволяют измерять три компоненты волнового поля, то оптико - волоконные - только одну в зависимости от угла между ними и направлением распространения волны. Другой особенностью этих систем является то, что областью приема данных является не одна точка, как в стандартных сейсмоприемниках, а некоторый интервал – секция оптико-волоконного кабеля «длина датчика, gauge length», относительная протяженность которого определяет форму регистрируемого импульса и его интенсивность [2]. При этом, если длина датчика меньше распространяющейся длины волны, то волновой импульс имеет простую форму с одним максимумом, в противном случае, когда длина датчика превышает длину волны – импульс имеет двугорбный характер, что показано на рис.1. Т.е. при уменьшении области измерения повышается разрешенность записей, но снижается амплитуда сигнала, и, наоборот, увеличение области приема - ухудшает разрешенность и повышает уровень записей. Этим

определяется значимость этого параметра приема и необходимость его выбора в зависимости от решаемых и условий проведения работ. По приведенным в [2] оценкам оптимальная «длина датчика» лежит в пределах от 0,3 до 0,6 длины волны.

Практика применения распределенных акустических систем для регистрации волн в скважинах показывает, что контакт кабеля с обсадной, эксплуатационной или инжекторной трубами должен быть достаточно надежным т.к. может оказывать существенное влияние на качество получаемых материалов. В общем случае возможно размещение оптико-волоконного кабеля в обсадной колонне или прикрепление его к эксплуатационной или нагнетательной трубам. Каждый из этих способов имеет свои положительные и отрицательные стороны. Так, например, помещение кабеля в трубы позволяет менять его, но может приводить к снижению качества получаемых записей при ухудшении контакта кабеля с трубой и др. Закрепление кабеля в обсадной колонне позволяет получить более однородные и качественные материалы, но требует значительных затрат времени и средств при необходимости его замены. Особенности сейсмических материалов, получаемых при этих двух способах размещения распределенных приемных устройств рассмотрены в работе [2] на примере анализа параметров волн, полученных при пространственных наблюдениях ВСП в глубокой скважине, верхняя часть которой имела наклон порядка  $9^{\circ}$ , а нижняя часть была практически вертикальна с углом наклона менее  $2^{\circ}$ . Анализ материалов, полученных при размещении кабеля в обсадке и в трубе (рис 2), показал, что в верхней, наклонной части скважины, записи практически идентичны, а на глубине - записи от кабеля в трубе осложнены звоном. Аналогичные результаты были получены и при оценке уровня помех и отношения сигнал/помеха: размещение кабеля в трубе приводит к получению более шумных волновых полей, который хорошо коррелируется с углом наклона скважины (рис. 3). Чем больше наклон скважины, тем он меньше влияет на качество материалов и уровень помех. Этому результату дано следующее объяснение. В наклонных скважинах (угол наклона  $9^{\circ}$  и более от вертикали) труба под действием силы тяжести прижата к обсадной колонне и получаемые записи по полезным волнам и помехам идентичны, и в этом случае предпочтительней прикрепление кабеля к колонне. На вертикальных участках скважин (угол наклона от вертикали менее  $2^{\circ}$ ) контакт трубы и колонны ослабевает, труба свободна и может вести себя, как вибрирующая струна, что и приводит к появлению сильного звона, который может быть уменьшен путем жесткого закрепления кабеля в трубе. Другой возможный способ снижения уровня звона – это применение деревербационного фильтра. Важность обеспечения хорошего контакта со стенками скважины показана в работе [3]. При опробовании оптико-волнового кабеля при наблюдениях ВСП возникла такая необходимость, т.к. скважина была вертикальной и при полном натяжении кабеля на записях доминировали резонансные помехи, которые полностью перекрывали вступления продольных волн. Причиной этого был плохой контакт кабеля со стенками скважины. Последовательное ослабление натяжения кабеля привело к провисанию кабеля, улучшению его контакта со средой, повышению качества записей и уверенному выделению и прослеживанию волн в первых

вступлениях по всему стволу скважины. На рис.4 приведены соответствующие сейсмограммы, иллюстрирующие влияние натяжения оптико-волоконной распределенной приемной системы на качество получаемых записей.

## **2. Сопоставление волновых полей, полученных распределенными акустическими системами и стандартными приемными устройствами**

Использованию в сейсморазведке распределенных оптико-волоконных приемных систем предшествовали эксперименты по сравнению качества и полноты материалов, получаемых с ними и со стандартными сейсмоприемниками, основные результаты которых изложены в ряде работ [4 - 6]. В целом, они оказались успешными поскольку показали возможность получения идентичных по характеру исходных сейсмограмм и конечных построений, получаемых с новыми и стандартными приемными устройствами. В [4] приведены результаты одновременной регистрации волн оптико-волоконными закрепленными в обсадке скважины системами и гирляндой сейсмоприемников в диапазоне глубин 1470 – 2355 м. При этом расстояния между сейсмоприемниками были равны 15 м, а интервал дискретизации записей распределенных систем составлял 1 – 2 м. На рис.5 приведены вертикальные монтажи Р – волн, полученные оптико-волоконной системой (слева) и сейсмоприемниками (справа), которые иллюстрируют идентичность полученных материалов. В [5] приведены результаты опробования в скважине оптико-волоконной системы, состоящей из последовательности трех-компонентных (x,y,z) интерферометров, и сравнения ее с вертикальной расстановкой стандартных сейсмоприемников. Для получения сопоставимых результатов была изготовлена гирлянда приборов, в которой 20 интерферометров, образующих оптико-волоконную, многоканальную приемную систему и 24 сейсмоприемника располагались попеременно друг за другом с шагом 25 футов, образуя единую скважинную косу. Колебания частотой 10 – 180 Гц и длительностью 20 с. возбуждались вибратором, регистрировались и обрабатывались. Обработка материалов предусматривала корреляцию вибрационных записей, получение и анализ волновых полей и амплитудно-частотных спектров зарегистрированных волн. На рис 6 и 7 приведены полученные материалы, сопоставление которых показывает их практическую идентичность. Пример хорошего совпадения материалов наземной съемки и пространственных наблюдений ВСП с оптико-волоконными приемными системами приведен в работе [6]. Последние были выполнены на подземном газохранилище CO<sub>2</sub> по системе наблюдений, предусматривающей последовательное возбуждение колебаний частотой 7 – 120 Гц и длительностью 50 с в 24 точках, образующих нерегулярную систему, и одновременную регистрацию волн в четырех близко расположенных контрольных скважинах, в обсадку которых были вмонтированы приемные системы на основе оптико-волоконного кабеля. Синхронное накопление сигналов и корреляция виброграмм позволили получить материалы с хорошим отношением сигнал/помеха. По результатам обработки материалов был построен небольшой куб данных ВСП, который хорошо вписался в

разрезы по продольной и поперечной линиям, построенным по ранее выполненным наземным сейсмическим работам 3D, что показано на рис. 8.

### **3. Примеры применения оптико-волоконных систем**

Положительные результаты работ по сопоставлению полевых сейсмических материалов, полученных с распределенными акустическими и стандартными для сейсморазведки приемными системами колебаний, послужили основанием для применения оптико-волоконных кабелей для решения практических задач. В [7] приведены результаты пространственных наблюдений 3D ВСП, проведенных одновременно в двух инжекторных скважинах на глубоководном нефтяном месторождении. Оптико-волоконные кабели были прикреплены к обсадке скважин, перекрывали их всю глубину и были первоначально предназначены для контроля за давлением и температурой. Ранее они не использовались для приема сейсмических колебаний. Возбуждение волн проводилось стандартными пневмопушками, по системе наблюдений, позволяющей получить объемное изображение околоскважинного пространства. В результате были получены материалы хорошего качества, но с несколько более зашумленными записями на небольших глубинах в скважинах. Применение соответствующих способов повышения отношения сигнал/помеха позволили выделить на сейсмограммах первые и последующие вступления волн, в том числе отраженных и кратных, образованных на границе вода – воздух. На рис. 9 приведены типичные сейсмограмм по скважинам, которые иллюстрируют достаточно хорошее качество полученных материалов. Положительные результаты выполненных нестандартных работ отражают значимость и перспективы применения оптико-волоконной техники при работах по ВСП, т.к. только с ней оказалось возможным проведение необходимых наблюдений в инжекторных скважинах.

Распределенные акустические системы перспективны и при наземных сейсмических съемках. На это указывают сейсмические материалы, приведенные в [8]. В работе приведены результаты полевого эксперимента по сравнению записей, зарегистрированных погруженными на небольшую глубину и распределенными по линии профиля оптико-акустическими датчиками (DAS) и 3С сейсмоприемниками на площади Daly в Канаде. На тех и других сейсмограммах выделяются и прослеживаются отраженные и преломленные волны в первых и последующих вступлениях, отражающие общий идентичный характер наблюдаемой волновой картины. Выборочные сейсмограммы среднего качества приведены на рис. 10. Наряду с полезными волнами, на сейсмограммах присутствуют помехи, уровень которых выше на новых приборах, что привело к получению более низких отношений сигнал/помеха. Тем не менее, полученные в небольшом объеме сравнительные полевые материалы, в целом, положительны и позволяют положительно оценить перспективы применения распределенных оптико-волоконных систем в наземной сейсморазведке.

### **Выводы**

Обзор публикаций по применению распределенных акустических систем на основе оптоволоконной техники показал следующее: - возможность получения идентичных по качеству исходных сейсмограмм и конечных результатов, получаемых с новыми и стандартными приемными комплексами; - на существенное упрощение технологии проведения работ и снижение их стоимости за счет одновременного приема колебаний по всей длине кабеля и исключения необходимости применения перемещаемых по стволу скважины одиночных или гирлянд сейсмоприемников; - на большие перспективы новых приемных систем при проведении скважинных одномерных наблюдений, пространственных съемок 3D ВСП и других видов работ.

#### Литература

1. A VSP field trial using distributed acoustic sensing in a producing well in the North Sea/ K. N. Madsen, M. Thompson, T. Parker, D. Finfer: First Break, Vol. 31, Nov., 2013.
2. DAS VSP Recorded Simultaneously in Cemented and Tubing Installed Fiber Optic Cables/ C. Didraga: 2015, SEG Expanded Abstracts, Madrid.
3. Multi-offset Vertical Seismic Profile Acquisition with Hybrid Optical-electrical Wireline Cable/ A.H. Hartog, B. Frignet: 2014, EAGE Expanded Abstracts, Amsterdam.
4. Simultaneous Acquisition of Distributed Acoustic Sensing VSP with Multi-mode and Singlemode Fiber Optic Cables and 3-Component Geophones at the Aquistore CO2 Storage Site/ T. M. Daley, D. White, D. E. Miller, M. Robertson, B. M. Freifeld, F. Herkenhoff, J. Cock: 2014, SEG Expanded Abstracts, Denver.
5. Field Testing A Three-Component Fiber-Optic Borehole Seismic Sensor Array/ M. Karrenbach, V. Yartsev, M. Emuh, E. Hardin, L. LaFlame, S. Cole, A.Chavarria: 2014, SEG Expanded Abstracts, Denver.
6. Using a fibre optic cable as distributed acoustic sensor foe VSP at the Ketzin CO2 storage site/ J. Gotz, S. Luth, J. Henninges, T. Reinsch: 2015, EAGE Expanded Abstracts, Madrid.
7. Dual-Well 3D VSP in Deepwater Made Possible by DAS/ A. Mateeva, J. Mestayer, Z. Yang, J. Lopez, P. Will, J. Roy, T. Bown: 2013, SEG Expanded Abstracts, Houston.
8. A comparisen of trenched distributed acoustic sensing DAS to trenched and surface 3C geophones Daly, Manitoba, Canada/ R. Kendall: 2014, EAGE Expanded Abstracts, Amsterdam.