

УДК 550.834+681.7.063/068/069

## РОССИЙСКИЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО 4D МОНИТОРИНГА

© 2019 г. С.В. Головин, Ю.А. Разин, С.В. Курков, Е.Р. Надеждин

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
г. Долгопрудный, Московская обл., Россия*

Описаны преимущества применения морских донных сейсмических систем в интересах мониторинга динамики разработки морских месторождений углеводородов; проведен сравнительный анализ типов датчиков, использующихся для регистрации сейсмических сигналов. Отмечено, что такие системы используются сервисными компаниями исключительно при оказании дорогостоящих высокотехнологичных услуг, недоступных российским добывающим компаниям вследствие действия экономических санкций. Сделаны выводы о необходимости разработки отечественных систем сейсмического мониторинга.

Описан практический опыт российских разработчиков из Научно-технологического центра морской геофизики Московского физико-технического института (МФТИ) по созданию отечественной системы сейсмического мониторинга на основе донных кос с использованием для регистрации сигналов высокочувствительных широкодиапазонных молекулярно-электронных датчиков, являющихся инновационной разработкой. Представлена применяемая в системе новая технология передачи питания по оптоволокну "Power-over-Fiber". Сделан прогноз о смещении вектора технологий создания сейсмических систем в сторону решений на основе оптоволокну, намечены основные направления выполнения НИР и НИОКР по этой тематике.

**Ключевые слова:** 4D сейсморазведка, мониторинг месторождения, молекулярно-электронные датчики, волоконно-оптические технологии.

### Введение.

#### Этапы технологического развития систем сейсмического 4D мониторинга

В текущем десятилетии 4D мониторинг разрабатываемых нефтегазовых месторождений (или резервуарный мониторинг) превратился для большинства ведущих зарубежных нефтяных компаний из экспериментальной технологии в широко применяемый инструмент повышения эффективности добычи углеводородного сырья. Общее признание и распространение этой технологии стало серьезным стимулом для ее совершенствования как в области методологии, так и в аппаратной части.

Одним из направлений развития регистрирующих систем, применяемых для 4D сейсморазведки, стало создание донных регистрирующих систем для морской сейсморазведки.

Использование подобных систем для сейсмического мониторинга морских месторождений в сравнении со съемкой, проводимой с применением буксируемых сейсмических кос, имеет несколько положительных эффектов, среди которых улучшение повторяемости геометрии приёмной системы за счет ее стационарной раскладки непосредственно на морском дне, а также значительная экономия финансов в долгосрочной перспективе за счет снижения затрат на проведение повторных съемок [Разин, Разин, Головин, 2018]. Именно эти две проблемы всегда формулировались отраслевыми экспертами, когда речь заходила об основных факторах, препятствующих повсеместному применению 4D сейсморазведки.

Помимо вышеуказанных еще одним преимуществом применения донных систем перед буксируемыми является получение данных более высокого качества, что существенно влияет на достоверность создаваемых геологических моделей, что и является, собственно, главной целью 4D сейсмического мониторинга<sup>1</sup>.

В течение десятилетий для проведения сейсмических исследований измерения осуществлялись с помощью различных электрических датчиков (тензорезистивные, струнные, потенциометрические и т.д.). Несмотря на их повсеместное использование, такие датчики имеют ряд существенных недостатков, таких как потери при передаче сигнала на большие расстояния, восприимчивость к электромагнитным помехам, необходимость организации пожаробезопасной электрической цепи и так далее. Эти ограничения делают электрические датчики непригодными или сложными для применения при решении задач перманентного резервуарного мониторинга со значительной протяжённостью донных кос и долговременной инсталляцией.

На смену электромеханическим и пьезоэлектрическим датчикам в последние годы пришли микроэлектромеханические системы (МЭМС) – устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты, МЭМС-сенсоры, а затем и молекулярно-электронные датчики на новых принципах измерения сейсмических волн.

В этой связи развитие регистрирующих систем, применяемых для 4D сейсморазведки, идёт, в частности, в направлении внедрения оптоволоконных технологий для регистрации сейсмического сигнала и передачи данных – создания донных волоконно-оптических регистрирующих систем для морской сейсморазведки.

Отдельно следует отметить, что на текущий момент на рынке геофизического оборудования отсутствуют даже традиционные отечественные системы, предназначенные для сейсмического 4D мониторинга, а разработки волоконно-оптических систем ведутся учеными-энтузиастами, старающимися вывести российскую сейсморазведку на новый технологический уровень.

#### **Опыт Московского физико-технического института в создании донных систем сейсмического 4D мониторинга**

Несмотря на очевидную эффективность использования результатов сейсмического 4D мониторинга для оптимизации разработки месторождений, подобные работы могут позволить себе только незначительное количество крупных нефтяных компаний в связи с чрезвычайно высокой стоимостью такого специализированного сервиса. Что касается российского рынка, то, несмотря на наличие в России крупных отраслевых государственных и частных компаний и корпораций мирового уровня (Газпром, Роснефть, Новатек, Лукойл и др.), он оказался изолирован от инноваций мировой нефтегазовой геофизики вследствие действия экономических санкций со стороны США и присоединившего к ним Евросоюза для ослабления российской экономики, т.е. в целях конкурентной борьбы. Само по себе это не удивляет – мировой рынок углеводородного сырья и его добычи в большинстве своём контролируется американскими и британскими транснациональными компаниями (*ExxonMobil, Shell, BP, Chevron, ConocoPhillips* и др.); акционерами многих национальных нефтедобывающих компаний других стран являются также американские и британские компании или

---

<sup>1</sup> Подробно об особенностях 4D мониторинга см. в (Ампиров Ю.П. Контроль в четырех измерениях. Портал Neftegaz.ru: <https://neftgaz.ru/science/view/883-Kontrol-v-chetyreh-izmereniya> (accessed 02.08.2019)).

капиталы, которым не нужна на мировом рынке (в частности, на европейском) конкуренция со стороны российских компаний, особенно на рынке углеводородов.

Однако годы “выживания” российской экономики под гнётом санкций стали катализатором для развития наукоёмких производств, в том числе и в нефтегазовом секторе, поскольку де-факто главной отраслью и локомотивом роста экономики России стала именно нефтегазовая промышленность, остро нуждающаяся, в числе прочего, в современном геофизическом оборудовании мирового уровня.

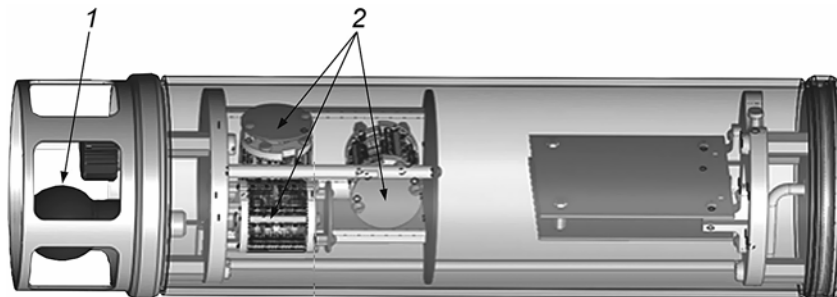
Создание доступной отечественной системы сейсмического 4D мониторинга разрабатываемых месторождений позволит расширить круг заказчиков и объектов, на которых могут быть использованы такие системы (в перспективе каждое разрабатываемое месторождение на море должно иметь свою систему резервуарного мониторинга на 5000–10000 каналов), а использование системы в периоды между активными сейсмическими исследованиями для пассивного мониторинга, в том числе гидроакустической обстановки, позволит повысить её экономическую эффективность.

В этой связи, во исполнение Поручения Президента РФ Пр-963 от 18.05.2017 г. ведущий технический вуз России Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ) участвует в реализации программы “Социально-экономическое развитие арктической зоны Российской Федерации” в направлении развития геофизических технологий в условиях Арктики. В рамках этой программы МФТИ по Государственному заданию проводит разработку геофизической распределенной информационно-измерительной системы долговременной инсталляции с целью пассивного и активного перманентного мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов для оптимизации разработки, проведения 3D и 4D сейсморазведочных работ, а также акустического мониторинга шельфовых акваторий Арктической зоны РФ с возможностью обнаружения и прослеживания надводных и подводных объектов (далее – Система).

Специалисты Научно-технологического центра морской геофизики МФТИ поставили перед собой амбициозную задачу создания системы, не уступающей по своим характеристикам ведущим мировым аналогам. Реализация такого проекта требует привлечения передовых технических и программных решений, которые призваны сформировать для создаваемой Системы уникальный набор возможностей за счёт расширенных и улучшенных параметров и характеристик.

Система в полной конфигурации представляет собой расстановку из донных кос, уложенных рядом через 50 м прямыми параллельными линиями, обеспечивающую таким образом необходимое площадное покрытие. Несмотря на линейность расположения донных кос, фактически, Система организована в сеть топологии “Звезда”. Каждая донная коса имеет группу регистрирующих модулей, числом до нескольких десятков, расположенных последовательно на косе равномерно с шагом 50 м, каждый из которых присоединён к своему кабелю. В свою очередь, каждый регистрирующий модуль имеет в своём составе управляющую цифровую электронику и регистрирующее оборудование: один гидрофон для регистрации акустической компоненты волнового поля и три ортогонально расположенных геофона для регистрации сейсмических X-, Y-, Z-компонент волнового поля. Программное обеспечение управляющего компьютера позволяет оператору управлять сбором данных, контролировать качество получаемой информации и состояние Системы. Также в Системе предусмотрено оборудование синхронизации работы подсистем по сигналам 1PPS.

Основа Системы – четырехкомпонентные регистрирующие модули (рис. 1), от характеристик которых зависят характеристики Системы в целом. В свою очередь, основные характеристики регистрирующего модуля определяются чувствительностью элементов – датчиков, являющихся технологической основой всей Системы.



**Рис. 1.** Общий вид регистрирующего четырехкомпонентного сейсмического модуля  
1 – молекулярно-электронный гидрофон; 2 – молекулярно-электронные X-, Y-, Z-датчики

**Fig. 1.** General view of the recording four-component seismic module  
1 – molecular electronic hydrophone; 2 – molecular-electronic X-, Y-, Z-sensors

Более 80 % донного сейсмического оборудования, находящегося в распоряжении российских геофизических компаний, использует сейсмические датчики, произведённые за рубежом. Но на сегодняшний день, вследствие действия антироссийских санкций, покупка качественных датчиков западного производства невозможна, а доступные датчики китайского производства не соответствуют необходимым параметрам.

Кроме того, в современных условиях для разведки и мониторинга новых, глубоко залегающих и расположенных в сложных геологических условиях месторождений требуются высокочувствительные, малошумящие и обладающие широким частотным и динамическим диапазоном регистрирующие системы, позволяющие принимать слабые сигналы от глубоких горизонтов и уверенно выделять их на фоне помех, что не всегда успешно решается даже современной приборной базой зарубежного производства.

По этой причине первым передовым техническим решением стало применение в создаваемой Системе разработанных в МФТИ сейсмических высокочувствительных широкодиапазонных датчиков нового поколения на физических принципах микромолекулярного переноса.

В отличие от традиционных сейсмодатчиков, их молекулярно-электронные аналоги используют жидкую инерциальную массу, являющуюся одновременно и рабочим телом сенсора. Чувствительный элемент представляет собой систему образующих решетку микроэлектродов, которые преобразуют переменный поток рабочей жидкости, вызванный силами инерции, в вариации межэлектродного электрического тока. При этом достигается высокая крутизна преобразования механического сигнала в электрический ток и обеспечиваются широкий частотный и динамический диапазоны. Это даёт возможность создания сейсмодатчиков с частотой среза на низких частотах до тысячных долей герца, высокой чувствительностью и низким шумом, а применение обратной связи обеспечивает идентичность характеристик на уровне 0.2 %. Датчики имеют относительно простую моноблочную конструкцию, отсутствие движущихся элементов точной механики придает им высокую надёжность и устойчивость к нежелательным внешним воздействиям.

Молекулярно-электронные датчики используются при изготовлении гидрофонов и геофонов, определяя основные характеристики Системы (табл. 1).

**Таблица 1.** Основные характеристики Системы с молекулярно-электронными геофонами и гидрофонами

Характеристика	Значение
Полоса регистрации сейсмических сигналов	1–500 Гц
Полоса регистрации гидроакустических сигналов	1–500 Гц
Чувствительность геофонов	Не менее 250 В/м/с
Чувствительность гидрофонов	Не менее 30 мВ/мБар
Разрядность АЦП	Не хуже 24 разрядов
Эффективный динамический диапазон АЦП (при частоте регистрации 1 кГц и коэффициенте усиления 1)	Не ниже 120 дБ
Коэффициент усиления для канала гидрофона	Не хуже 8
Максимальная частота регистрации сигнала	2 кГц
Точность определения положения модуля	Не хуже $\pm 1$ м

Оборудование регистрирующего модуля компактно размещено в герметичном стальном корпусе-контейнере цилиндрической формы со специальными разъёмами, рассчитанными на глубины до 500 м.

Для обеспечения информационного обмена в Системе используются волоконно-оптические каналы связи, имеющие преимущества перед “медными” технологиями. В развитие возможностей волоконно-оптических технологий в Системе применена технология передачи мощности по оптоволокну *Power-over-Fiber (PoF)*, что стало вторым передовым техническим решением, применяемым в создаваемой Системе.

По технологии *PoF* источником питания служит достаточно мощный (30 Вт) лазерный диод с драйверами управления, к которому присоединяется оптоволоконный кабель (рис. 2).



**Рис. 2.** Блок питания и управления лазерными диодами для волоконно-оптической системы энергоснабжения (разработка МФТИ)

**Fig. 2** Laser diode power supply and control unit for fiber optic power supply system (MIPT design)

Оптическое излучение, попадая на фоточувствительный элемент конвертера, преобразуется в постоянный электрический ток. При этом обеспечивается полная гальваническая развязка, т.е. передача энергии от источника питания к устройству без непосредственного электрического контакта между ними, помехозащищенность линии питания и расположенных поблизости линий связи, а также исключается вероятность возгорания токоведущих проводов.

Правильный подбор комплектующих (мощность и рабочая длина волны оптического излучения лазерного диода, числовая апертура оптоволокну и т.д.) позволил соз-

дать оптический источник питания с выходными характеристиками (ток, напряжение), подходящими для энергоснабжения оборудования регистрирующего модуля.

Волоконно-оптический кабель морского исполнения присоединяется к регистрирующему модулю через герметичную соединительную оптическую муфту, в которой размещены оптические трансиверы и фотовольтаические конвертеры, обеспечивающие оптоэлектрическое преобразование для каналов телеметрии и питания. Параллельно в НТЦ морской геофизики МФТИ разрабатывается альтернативная конструкция регистрирующего модуля с интегрированной в основное оборудование оптоэлектрической элементной базой в едином корпусе с герметичным кабельным вводом.

Кроме сейсмического мониторинга, создаваемая Система, имея в своём составе гидрофоны, способна осуществлять пассивный гидроакустический мониторинг акватории в месте её развёртывания. С учетом “квадратно-гнездового” характера размещения гидрофонов на дне, фактически, организуется гидроакустическая антенная решётка, позволяющая не только детектировать подводные и надводные объекты, но и определять их пеленг, а также трассировать их перемещение в реальном масштабе времени. Специализированное программное обеспечение, позволяющее Системе выполнять функции гидроакустического мониторинга с визуализацией обстановки на средствах отображения информации, стало третьим передовым программным решением, применяемым в создаваемой Системе. Гидроакустический мониторинг позволит непрерывно освещать подводную обстановку, например, вокруг морской буровой установки, предупреждая возникновение негативных ситуаций природного или техногенного характера.

Таким образом, для создания отечественной геофизической системы мониторинга с расширенными возможностями специалисты НТЦ морской геофизики МФТИ использовали целый ряд инновационных решений. При этом в ходе разработки сформировалась новая концепция развития регистрирующих систем в направлении создания технических решений в области оптических технологий. На сегодняшний день проведён комплекс лабораторных испытаний элементов Системы, запланированы натурные испытания экспериментального образца Системы минимальной конфигурации на акватории одного из российских арктических морей.

### **Оптоволоконные технологии – новые возможности для сейсморазведки и сейсмического мониторинга**

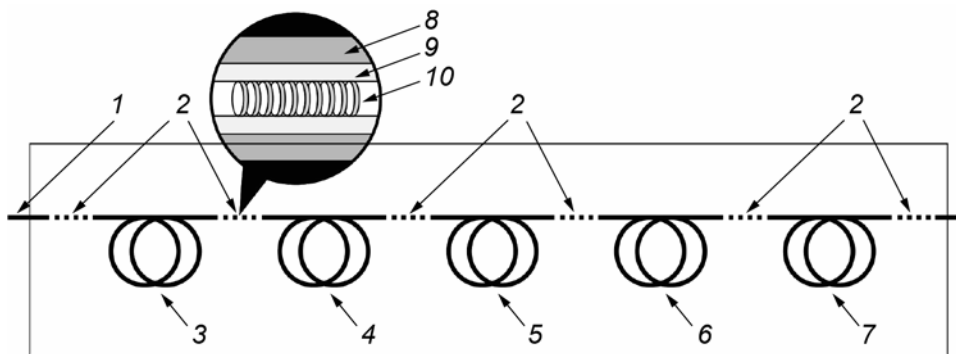
Дальнейшее развитие сейсмических регистрирующих систем видится, в частности, в области волоконно-оптических технологий. Такие системы не требуют питания сенсоров, так как сенсорами является само оптоволокно; они легко переконфигурируемы (могут быть расположены линиями, петлями и т.д.) и масштабируемы (обеспечивается возможность увеличения каналов регистрации и площади покрытия), помехозащищены и идеально подходят для долговременной установки.

Как часто бывает, технология волоконно-оптических сенсоров пришла в гражданские отрасли в ходе конверсии военных разработок. С технологической точки зрения, большим преимуществом использования подобного типа датчиков для нужд сейсморазведки, выгодно отличающих их от традиционных геофонов и гидрофонов, является возможность разделения управляющей и питающей электроники и непосредственно чувствительного элемента. Это существенно облегчает процесс обслуживания и ремонта системы сейсмического мониторинга, что особенно важно в условиях морских месторождений, а также увеличивает срок службы системы и уменьшает операционные риски, связанные с проблемой обеспечения бесперебойного питания подводных модулей. Следует отметить, что по сравнению с традиционными датчиками, волоконно-оптические датчики обладают повышенной чувствительностью и широким частотным

диапазоном, являются более долговечными и стойкими к воздействию окружающей среды. Оптические волокна и датчики являются непроводящими, электрически пассивными и невосприимчивыми к электромагнитным помехам. Опрос с помощью перестраиваемого лазера высокой мощности позволяет проводить измерения на большие расстояния практически без потери сигнала. Кроме того, в отличие от электрического канала измерительной системы, каждый оптический канал может опрашивать множество датчиков, что значительно уменьшает размер и сложность такой системы измерения. Все это позволяет прогнозировать, что будущее сейсмических регистрирующих систем, особенно в области морских исследований с применением донных кабелей, будет тесно связано с дальнейшей имплементацией волоконно-оптических технологий.

Принципиально волоконно-оптическая сейсмическая регистрирующая система состоит из трех основных элементов: оптических интеррогаторов, волоконно-оптических кабелей для телеметрии (и возможной передачи питания) и непосредственно самих волоконно-оптических датчиков, являющихся приемниками упругих волн. Применяемые в подобных системах интеррогаторы можно концептуально представить, как совокупность двух блоков: блока передачи света по волокну и блока принимающей электроники. Блок передачи включает в себя лазерный источник, фазовый модулятор и импульсный генератор и обеспечивает передачу оптических сигналов с требуемыми характеристиками. В свою очередь блок принимающей электроники отвечает за демодуляцию принятого сигнала, его оцифровку и дальнейшую передачу, в центральную регистрирующую станцию. В качестве волоконно-оптического кабеля, в современных сейсмических регистрирующих системах используется промышленное одномодовое оптоволокно, с толщиной непосредственно центрального оптического волокна от 8 до 10 мкм, подобное применяемому в телекоммуникационных отраслях. Для систем морской сейсморазведки данный тип кабелей должен иметь в своем составе водонепроницаемую оболочку и особые гидрофобные слои, делающие возможным его использование в широком диапазоне глубин.

На текущий момент на рынке 4D сейсмического мониторинга представлены четырёхкомпонентные системы (рис. 3), использующие в качестве датчиков волоконно-оптический гидрофон и трёхкомпонентный акселерометр, смонтированные в виде



**Рис. 3.** Пример архитектуры волоконно-оптического сейсмического модуля

1 – оптоволокно; 2 – волоконные брэгговские решетки; 3 – контрольная катушка; 4–6 – катушки геофонов: X (4), Y (5), Z (6); 7 – катушка гидрофона; 8 – покрытие оптоволокна; 9 – оболочка оптоволокна; 10 – сердечник оптоволокна

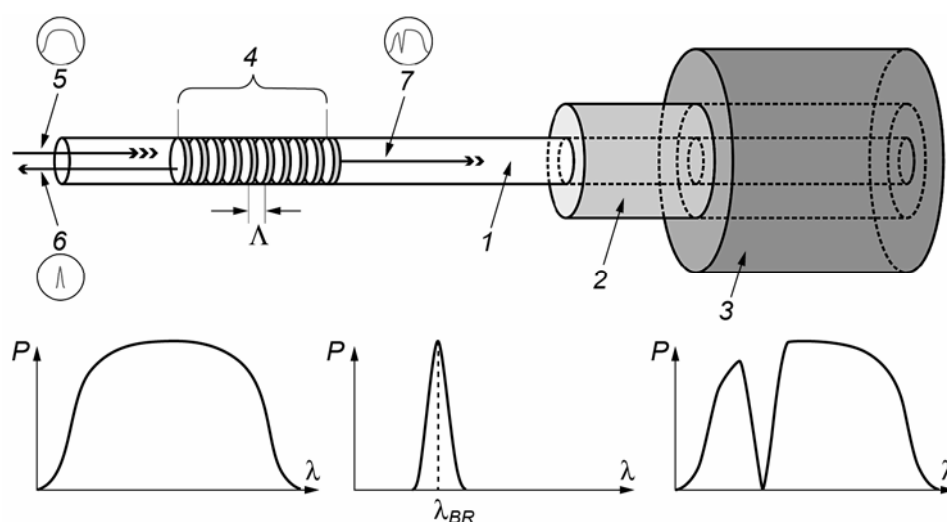
**Fig. 3.** Example of the architecture of the fiber optic seismic module

1 – fiber optic; 2 – fiber Bragg gratings; 3 – control coil; 4–6 – geophone coils: X (4), Y (5), Z (6); 7 – hydrophone coil; 8 – fiber optic coating; 9 – fiber optic sheath; 10 – fiber core

единого сейсмического регистрирующего модуля, размещенного на волоконно-оптическом кабеле [Лангхаммер и др., 2009].

В основе работы волоконно-оптических датчиков лежит модуляция одного или нескольких свойств распространяющейся световой волны (интенсивность, фаза, поляризация, частота), изменение которых происходит вместе с изменением измеряемой физической величины. Принцип действия чувствительных элементов таких сейсмических датчиков основан на свойствах волоконной брэгговской решетки (ВБР) – разновидности дифракционной решетки, сформированной в светонесущей сердцевине оптического волокна [Bertrand et al., 2014].

Решетки в волоконно-оптических датчиках отражают световой сигнал, спектральная характеристика которого (длина волны) смещается вместе с изменением измеряемого параметра (рис. 4). При изготовлении решеток внутри сердечника создается брэгговская решетка – область с периодическим изменением показателя преломления.



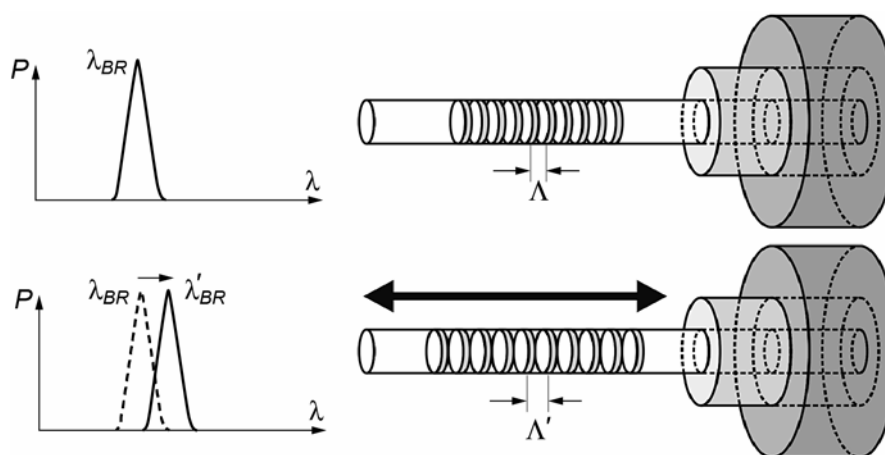
**Рис. 4.** Принцип организации волоконной брэгговской решетки (вверху): 1 – сердечник оптоволоконка; 2 – оболочка оптоволоконка; 3 – покрытие оптоволоконка; 4 – ВБР;  $\Lambda$  – период ВБР; в кружках показана форма входящего (5), отраженного (6) и прошедшего (7) сигналов. Спектры сигналов см. внизу: спектр входящего сигнала (слева), отраженного (по центру), прошедшего (справа) сигналов;  $\lambda_{BR}$  – длина волны Брэгга

**Fig. 4.** The principle of organization of the fiber Bragg grating (top): 1 – fiber core, 2 – fiber sheath, 3 – fiber coating, 4 – FBG,  $\Lambda$  – FBG period; the circles show the spectrum shape of (5) input, (6) reflected and (7) transmitted signals. See the spectra of signals below: input signal spectrum (left), reflected signal spectrum (center) and transmitted signal spectrum (right);  $\lambda_{BR}$  – Bragg wavelength

Когда широкополосное световое излучение проходит через брэгговскую решетку, отражения от каждого сегмента области с переменным показателем преломления интерферируют только для конкретной длины волны света, называемой длиной волны Брэгга ( $\lambda_{BR}$ ). Это фактически приводит к тому, что ВБР отражает волны определенной длины (определенной частоты) света и пропускает все остальные.

Зная, что длина волны Брэгга зависит от периода решетки, можно изготовить решетки с разным значением  $\lambda_{BR}$ . Любые изменения (перемещение, давление, деформация, ускорение и вибрация) влияют на эффективный показатель преломления и период решетки, что вызывает фиксируемое смещение длины волны отраженного сигнала (рис. 5).





**Рис. 5.** Принцип измерения с помощью волоконной брэгговской решетки. *Вверху* – оптоволокну в покое,  $\Lambda$  – период ВБР до воздействия; *внизу* – оптоволокну под воздействием,  $\Lambda'$  – период ВБР после воздействия. Черная стрелка – оказываемое воздействие

**Fig. 5.** Principle of measurement using a fiber Bragg grating (FBG). *Top*: the optical fiber at rest,  $\Lambda$  – the FBG period before influence; *below* – the optical fiber under the influence,  $\Lambda'$  – the FBG period after influence. The influence is shown by a black arrow

Это обстоятельство лежит в основе использования ВБР в качестве чувствительных элементов датчиков физических величин в сейсмических регистрирующих системах.

Впервые полноценные системы 4D сейсмического мониторинга с применением волоконно-оптических технологий были опробованы в 2007–2008 гг. на месторождениях Снорре (*Snorre*) и Экофиск (*Ekofisk*), расположенных в норвежском секторе Северного моря. Работы проводились с использованием созданной норвежской компанией *OptoplanAS* системы *Optowave*, специально для которой этой компанией был разработан уникальный по тем временам волоконно-оптический сейсмический датчик. В 2010 г. был успешно реализован первый проект, включавший в себя работы на участке площадью 60 кв. км. В ходе работы на дно Северного моря в специально подготовленные неглубокие траншеи было уложено более 200 км сейсмического волоконно-оптического кабеля с 4000 четырёхкомпонентных сейсмических датчиков. Система *Optowave* предназначена для работ на глубинах до 500 м и оборудована датчиками с частотным диапазоном от 1 до 200 Гц.

Показательно, что входящая в финскую группу *Nokia* французская компания *Alcatel Submarine Networks*, являющаяся владельцем системы *Optowave*, не продает систему как отдельный продукт, предлагая крупнейшим нефтяным компаниям мира сервис по мониторингу нефтегазовых месторождений с её использованием. Это ещё один аргумент, подчеркивающий необходимость разработки отечественной системы 4D сейсмического мониторинга.

Другой распространенной системой 4D мониторинга является разработанная норвежской компанией *Petroleum Geo-Services (PGS)* система *OptoSeis*, которая, как и система *Optowave*, построена на основе четырёхкомпонентных волоконно-оптических датчиков, но позволяет проводить работы на больших глубинах (до 3000 м). Эффективная компоновка наборной электроники позволяет разместить в габаритах стандартного 20-футового морского контейнера блок оборудования, способный обеспечивать работу и регистрировать данные с системы, включающей в себя более 50 тыс. каналов.

Как забортное, так и набортное оборудование легко масштабируется, что дает возможность создания мегарасстановок с использованием до 250 тыс. каналов<sup>1</sup> (табл. 2).

**Таблица 2.** Основные характеристики системы *OptoSeis*

Характеристика	Значение
Максимальное количество каналов	от 112 до 250 000
Срок работы системы, лет	25
Частота дискретизации	от 125 Гц до 4 кГц
Динамический диапазон	206 дБ при частоте регистрации 1 Гц 186 дБ при частоте регистрации 15 Гц 170 дБ при частоте регистрации 100 Гц
Потребляемая мощность, кВт: 2000 станций 3000 станций 4000 станций	14 17.5 21.5
Максимальная рабочая глубина, м	3000
Диапазон рабочих температур, °С	-20...+60
Максимальная длина подводного кабеля, км	50
Максимальная длина сейсмического кабеля, км	28

В 2013 г. концерн *Siemens* (Германия) в тандеме с компанией *OctioAS* (Норвегия) создали аналогичную систему 4D мониторинга под названием *OctioRemSystem*, основанную на волоконно-оптической телеметрии и использующую МЭМС-датчики *VectorSeis* компании *IONGeophysical*. Компания *OctioAS* заявляет в характеристиках созданной ею системы 25 лет непрерывной работы, динамический диапазон сейсмических датчиков от 0 до 500 Гц и широкие возможности масштабирования системы. Однако к настоящему моменту в открытых источниках нет информации о проведенных полномасштабных 4D сейсмических исследованиях с использованием этой системы.

Один из лучших примеров использования локальных сетей, не требующих электропитания оптических датчиков, – система *EkofiskLoFS*, созданная в 2010 г. норвежской компанией *Optoplan*. Эта система использует порядка 4000 датчиков; общая протяженность кабелей составляет ~200 км, включающих в себя 3500 км оптических волокон и 24 тыс. волоконных решеток Брэгга. Принцип работы датчиков подразумевает использование шести имеющих одинаковые параметры ВБР с отражением от 10 до 0.1 %. В каждом датчике установлено пять катушек с оптоволоком: три катушки – это взаимно ортогональные (*X*, *Y*, *Z*) акселерометры с оптоволоком, уложенным на чувствительную мембрану плоской спиралью; четвертая является гидрофоном в виде оптоволоконного намотанного на цилиндрический сердечник; пятая катушка – контрольный интерферометр для подавления синфазных помех. Динамический диапазон датчика составляет 132 дБ; взаимное влияние соседних каналов может быть уменьшено до -60 дБ при снижении отражения решетки до 0.1 %. Сигналы разных групп датчиков выделяются путем временного или частотного мультиплексирования.

Работа такой системы подробно описана в [Jin et al., 2018], где представлен также краткий обзор многочисленных моделей различных акустических акселерометров со ссылками на оригинальные публикации. Важная особенность рассматриваемой системы

<sup>1</sup> Производитель анонсирует скорое расширение возможностей системы до 1 млн. каналов.

состоит в том, что для ее работы не требуется электропитание сейсмодатчиков, хотя в кабелях кос *OptoplanSersel* постоянное питание в 50 В все-таки предусмотрено.

Первая сейсмическая съемка с использованием системы *EkofiskLoFS* на месторождении Экофиск (*Ekofisk*) стартовала в ноябре 2010 г. [Разин, Разин, Головин, 2018] и использовалась для мониторинга раз в полгода – на декабрь 2016 г. было проведено 10 сейсмических съемок. Как сообщается в [Bertrand et al., 2014], с помощью системы *EkofiskLoFS* удалось оптимизировать выбор места закачки замещающего раствора и таким образом значительно (до 70 %) повысить извлекаемость запасов месторождения. Это дало значительный положительный экономический эффект и позволило продлить предполагаемый срок эксплуатации месторождения до 2050 г.

### Заключение

Месторождения российского Арктического и Дальневосточного шельфа объективно нуждаются в экономически эффективном инструменте для оптимизации их разработки, каким могут стать системы перманентного сейсмического 4D мониторинга, что подтверждается успешным опытом их практического применения зарубежными коллегами.

Научные институты нашей страны, обладая научно-технологическим потенциалом, необходимым для разработки отечественных конкурентоспособных волоконно-оптических систем, понимают сложности, с которыми придется столкнуться в процессе выполнения многочисленных НИР и НИОКР. Так, создание подобной системы потребует, в первую очередь, организации в России производства необходимого количества оптических брэгговских решеток на 1.5 мк со строгим отбором требуемых параметров по отражению и спектральной полосе.

Проекты построения альтернативных систем с использованием молекулярно-электронных сейсмодатчиков и гидрофонов, подобных разрабатываемой в МФТИ, требуют решения вопроса их электропитания. Здесь было бы интересным развитие технологии *PoF*, предполагающей энергоснабжение по оптоволокну в диапазоне длин волн 1.5 мк третьего окна прозрачности. Однако соответствующие фотовольтаические преобразователи в мире пока не выпускаются, хотя теоретически они проработаны, и сделано это именно в России [Хвостиков и др., 2016].

При дальнейшем развитии распределённых волоконно-оптических сейсмических систем они составят серьёзную конкуренцию электронным системам. В настоящее время в нашей стране к разработке сейсмической системы на основе оптоволоконных технологий прикладывается научно-технологический потенциал НТЦ морской геофизики МФТИ и ряда других ведущих научных коллективов профильных организаций и учреждений.

### Литература

- Лангхаммер Я., Эрикруд М., Накстад Х., Кринглботн Дж.-Т. Оптоволоконные донные регистрирующие системы для повышения эффективности разработки месторождений нефти и газа // Приборы и системы разведочной геофизики. 2009. Т. 29, № 3. С.31–35.
- Разин А.Ю., Разин Ю.А., Головин С.В. 4D сейсмический мониторинг нефтегазовых шельфовых месторождений акваторий северных морей с помощью донных регистрирующих систем // Научный аспект. 2018. № 4. С.779–798.
- Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Хвостикова О.А., Левин Р.В., Пушный Б.В., Тимошина Н.Х., Андреев В.М. Фотовольтаические преобразователи лазерного излучения 1550 нм на основе

GaSb: метод получения и характеристики // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, вып. 10. С.1358–1362.

Bertrand A., Folstad P.G., Lyngnes B., Buizard S., Hoerber H., Pham N., de Pierrepont S., Schultzen J., Grandi A. Ekofisk life-of-field seismic: Operations and 4D processing // The Leading Edge. 2014. <https://seg.org/Publications/The-Leading-Edge>

Jin M., Ge H., Li D., Ni Ch. Three-component homovibrational vector hydrophone based on fiber Bragg grating F-P interferometry // Applied Optics. 2018. V. 57, is. 30. P.9195–9202. <https://doi.org/10.1364/AO.57.009195>

#### *Сведения об авторах*

**ГОЛОВИН Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(498) 713-91-58. E-mail: [golovin.sv@mipt.ru](mailto:golovin.sv@mipt.ru)

**РАЗИН Юрий Андреевич** – главный инженер, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(498) 713-91-58. E-mail: [razin.iaa@mipt.ru](mailto:razin.iaa@mipt.ru)

**КУРКОВ Сергей Викторович** – научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(498) 713-91-58. E-mail: [kurcov.sv@mipt.ru](mailto:kurcov.sv@mipt.ru)

**НАДЕЖДИН Евгений Ростиславович** – научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(498) 713-91-58. E-mail: [nadezhdin.er@mipt.ru](mailto:nadezhdin.er@mipt.ru)

## **RUSSIAN EXPERIENCE AND PROSPECTS OF SEISMIC 4D MONITORING SYSTEMS DEVELOPMENT**

S.V. Golovin, Y.A. Razin, S.V. Kurcov, E.R. Nadezhdin

*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia*

**Abstract.** The article describes advantages of bottom cable seismic systems utilization for monitoring of offshore oil & gas deposits exploitation dynamics and compares different types of seismic sensors used for offshore seismic data harvesting. It is emphasized, that such systems are offered by service companies as a part of expensive high-tech monitoring services, which are not available for Russian oil & gas companies due to implemented economic sanctions. The authors make a conclusion about necessity of domestic seismic monitoring system development.

The article shows existing experience of Russian engineers from MIPT Scientific and Technology Center of Marine Geophysics in development of domestic seismic monitoring system based on ocean bottom cables. The cables are equipped with state-of-the-art technology invented and developed by MIPT specialists – high sensitive wide range molecularly-electronic seismic sensors. A new power transmission technology using fiber optics – “Power-over-Fiber” is also described. Authors made a prospect of changing the technological approach in development of seismic recording systems in respect of fiber optics utilization and determine the main areas for further R&D projects.

**Keywords:** 4D seismic, field monitoring, molecular electronic sensors, fiber optic technology.

### References

- Bertrand A., Folstad P.G., Lyngnes B., Buizard S., Hoerber H., Pham N., de Pierrepont S., Schultzen J., Grandi A., Ekofisk life-of-field seismic: Operations and 4D processing, The Leading Edge, 2014.
- Jin M., Ge H., Li D., Ni Ch., Three-component homovibrational vector hydrophone based on fiber Bragg grating F-P interferometry, *Applied Optics*, 2018, vol. 57, no. 30, pp. 9195–9202.
- Khvostikov V.P., Sorokina S.V., Khvostikova O.A., Levin R.V., Pushny B.V., Timoshina N.Kh., Andreev V.M., GaSb-based 1550 nm photoelectric laser converters: production method and characteristics, *Semiconductor Physics and Technology*, 2016, vol. 50, is. 10, pp. 1358-1362.
- Langhammer J., Eriksrud M., Nakstad H. and Kringlbotn J.T., Fiber-optic bottom recording systems to improve oil and gas field development, *Instruments and systems for exploration geophysics*, 2009, no. 3, pp. 31-35.
- Razin A.Y., Razin Y.A., Golovin S.V., Oil and gas fields time-lapse seismic in Northern seas using bottom cable recording systems, *Scientific Aspect*, 2018, no. 4, pp. 779-798.