Первая отечественная нодальная бескабельная система «Открытие» с электронно-молекулярными датчиками

- Абдулвалиев М.Т., технический директор НТЦ, ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Тиссен А.П., вице-президент по науке, ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Толкачев В.М., президент ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Череповский А.В., главный специалист НТЦ, ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»

Показаны перспективы и преимущества бескабельных регистрирующих систем нодального типа. Рассмотрены особенности инновационной отечественной нодальной системы «Открытие», расширяющей возможности наземной сейсморазведки. Описана конструкция и принцип действия встроенного молекулярно-электронного датчика, обладающего рекордной чувствительностью (250 В/(м/с)), широким диапазоном частот (от 1 до 300 Гц) и низким уровнем аппаратурного шума. Описаны первые опытные работы 2D с системой «Открытие», выполненные весной этого года, и результаты экспресс-обработки полученного массива данных.

Актуальность перехода на бескабельные регистрирующие системы.

В последние десять лет на различных международных геофизических конференциях и форумах всё больше говорится о бескабельных регистрирующих системах и о том, что именно за такими системами будущее наземной сейсморазведки [2]. Несмотря на то, что кабельные регистрирующие системы продолжают совершенствоваться, и сейсмопартии с кабельным оборудованием способны обеспечивать высокую производительность полевых работ 3D с количеством активных каналов до 100000 и больше, размотка десятков и даже сотен километров соединительных кабелей на площадях с развитой инфраструктурой (нефтепромысловые сооружения, трубопроводы, шоссе, промышленная и жилая застройка) или с изрезанным рельефом и густой речной сетью представляет собой трудноразрешимую задачу или предполагает повышенные трудозатраты. Кроме того, в некоторых регионах частые повреждения кабелей, вызывающие снижение производительности полевых работ и увеличение их сроков, могут быть обусловлены дикими животными или недружественным местным населением. Этими факторами объясняется растущий интерес заказчиков сейсморазведочных работ к бескабельным регистрирующим системам.

Бескабельные системы сбора сейсмических данных расширяют возможности сейсморазведчиков при выполнении исследований любой сложности и с любой плотностью наблюдений. Но основным мотивом внедрения новых типов регистрирующих систем, конечно, является их экономическая целесообразность, вопросы охраны труда и защиты окружающей среды.

С точки зрения многих Заказчиков, основным недостатком нодальных систем было и остается отсутствие возможности контроля работоспособности каналов в реальном режиме времени. Для решения этой задачи некоторые производители современных бескабельных систем снабдили свои автономные модули той или иной возможностью периодического или непрерывного контроля «статусов», то есть параметров регистрации сейсмических данных и функционирования полевых модулей [4]. Чаще всего для беспроводного контроля «статусов» используются хорошо известные технологии Wi-Fi и Bluetooth, а иногда Zigbee. Но надо принимать во внимание, что такие конструктивные решения приводят к увеличению стоимости оборудования, а также к повышенным энергозатратам.

В недавнем прошлом дополнительными препятствиями, лежащими на пути завоевания бескабельными системами

главенствующей роли при наземной сейсморазведке 3D, были громоздкость, большой вес и высокая стоимость одноканальных модулей, которые были снабжены разъемами для подключения внешних аккумуляторов, необходимых для обеспечения длительного периода работы, и больших групп электродинамических сейсмоприемников (или геофонов), из-за чего вес бескабельных систем в расчете на один канал был больше, чем у традиционных кабельных систем. Поэтому для перевозки и установки бескабельных модулей требовалось много транспортных средств и ручного труда.

Технологичность бескабельных систем резко повысилась при появлении компактных и морозостойких литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов, благодаря которым автономность бескабельных модулей со встроенными аккумуляторами удалось увеличить от 1-2 дней до 1-2 месяцев, в зависимости от температуры окружающей среды. Другим важнейшим моментом для разработки бескабельных систем нового поколения стали дешёвые и высокочувствительные приёмники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), среди которых наибольшей популярностью обладают американская система GPS, российская система Глонасс и китайская система Бэйдоу (в южной Сибири и на Дальнем Востоке). ГНСС-приёмники в автономных модулях бескабельных систем в первую очередь предназначены для синхронизации (хронирования) записываемых отсчётов сейсмических трасс. Использование ГНСС стало ключевым моментом, который открыл дорогу автономной регистрации сейсмических данных с использованием неограниченного количества бескабельных модулей [4].

По этим причинам абсолютное большинство производителей бескабельных систем решили отказаться от радиосвязи, предназначенной для централизованной передачи данных в реальном времени. Дело в том, что высокая надёжность современных бескабельных систем позволяет выполнять «слепые» сейсмические съёмки 3D, при которых подрядчик и Заказчик ничего не знают о состоянии вынесенных на профиль автономных модулей и не получают сейсмических данных для контроля качества в реальном времени. Многолетний опыт эксплуатации «слепых» бескабельных систем показал, что за время выполнения одной съемки 3D доля вышедших из строя бескабельнвых модулей обычно не превышает 0,2%.

Нодальные бескабельные системы

Дальнейшее повышение компактности и технологичности бескабельных регистрирующих систем было достигнуто при переходе на «истинно бескабельные» системы, в модулях которых располагаются одиночные встроенные сейсмоприемники. Такие бескабельные системы стали называть нодальными. Поскольку одиночные приемники не ослабляют ни волны-помехи, ни микросейсмы, записанные нодами сейсмограммы обычно характеризуются довольно низким отношением сигнал/помеха (С/П). Следовательно, нодальные регистрирующие системы в первую очередь применимы на сейсмических проектах с высокой плотностью наблюдений, то есть с сокращенным шагом пунктов приема (не более 20-25 м).

Отметим, что в невзрывной сейсморазведке 3D высокую плотность наблюдений в условиях открытой местности можно также обеспечить за счет сокращенного интервала между линиями и пунктами возбуждения – например, за счет применения высокопроизводительной технологии «Glide», когда импульсные источники «Енисей» работают в движении, с шагом от 5 до 10 м, обеспечивая повышение производительности сейсморазведочных работ в 2-3 раза. В таких случаях для регистрации данных могут быть особенно эффективно использованы ноды, установленные по разреженной сети наблюдений

– скажем, 100 на 100 м по обеим координатам площади работ.

Поначалу в нодах использовались стандартные геофоны с собственной частотой 10 Гц. Но в последние годы большинство производителей нодальных регистрирующих систем перешли на высокочувствительные геофоны (от 80 до 100 В/(м/с)) с собственной частотой 5 Гц, что позволяет получать более широкополосные данные, требуемые для корректной интерпретации и полноволновой инверсии сейсмических данных. В отдельных случаях в нодах используются акселерометры (датчики, измеряющие не скорость, а ускорения упругих колебаний), но даже лучшие приборы такого рода – хорошо известные в отрасли микроэлектро-механические системы (МЭМС) – характеризуются высоким уровнем собственных шумов на частотах ниже 10 Гц. Конструкторам ещё предстоит добиться выравнивания плотности аппаратурного шума этих датчиков и всего регистрирующего канала в низкочастотной части спектра [1].

Молекулярно-электронный датчик (МЭД)

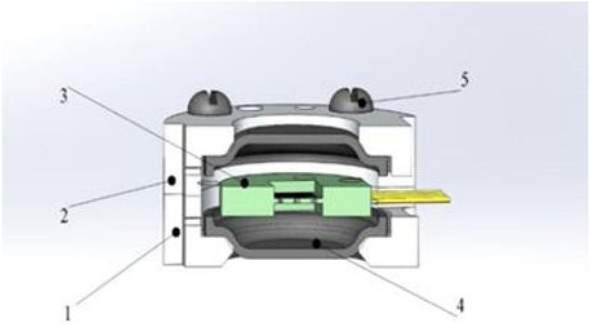
По нашему мнению, наиболее перспективным одиночным приемником для нодальных бескабельных систем является молекулярно-электронный датчик (МЭД). Такие датчики длительное время конструируются и выпускаются российской компанией Р-сенсорс, основанной выпускниками МФТИ и сотрудничающей с центром молекулярной электроники этого института. Датчики МЭД успешно работают в сейсмических сетях Единой геофизической службы РАН – на территории Якутии, в Магадане, на Сахалине и Курильских островах, применяются для круглосуточного сейсмического мониторинга стадионов и высотных зданий, но пока не нашли широкого применения в нефтегазовой сейсморазведке.

МЭД устроен таким образом, что при наличии внешнего сигнала электролит в канале приходит в движение благодаря гибким торцевым мембранам, и поток жидкости преобразуется в электрический ток (рис.1). Изменения тока между электродами чувствительного элемента являются выходным сигналом датчика, который благодаря электронике может быть пропорционален как скорости колебаний, так и их ускорению, то есть МЭД может работать как велосиметр или как акселерометр.

Чувствительный элемент МЭД помещается поперек диэлектрического канала, заполненного высокопроводящей рабочей жидкостью. Как правило, в преобразующем элементе используется йод-йодидный электролит, представляющий собой высококонцентрированный раствор йодида калия или лития с небольшой добавкой молекулярного йода.

Датчики МЭД обладают тремя важнейшими преимуществами (рис.2): очень высокой чувствительностью (250 В/(м/с)), беспрецедентно широкой полосой регистрируемых частот (от 1 до 300 Гц) и низким уровнем собственных шумов. При этом размеры МЭД не отличаются от размеров одиночного высокочувствительного геофона.

К недостаткам МЭД раньше можно было отнести высокое энергопотребление, что делало нецелесообразным применение таких датчиков в нодальных регистрирующих системах. Однако благодаря совместным усилиям НТЦ компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка» и специалистов компании Р-сенсорс, в короткие сроки удалось адаптировать конструкцию МЭД и многократно снизить энергопотребление этого датчика и сопутствующей электроники. Обновленный МЭД стал главной «изюминкой» разработанной по инициативе компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка» бескабельной системы «Открытие» [5], которая стала первой и пока единственной нодальной отечественной регистрирующей системой. По заказу компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка» на крупнейшем



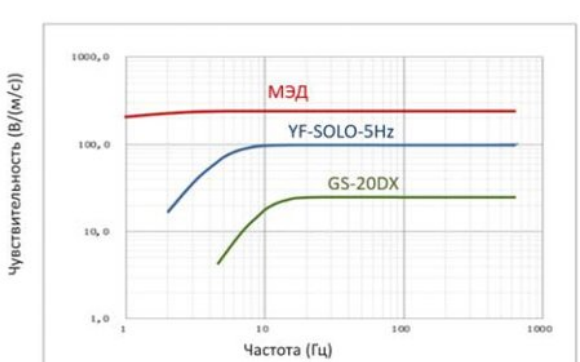
▲ *Рис.1. Конструкция молекулярно-электронного датчика: 1 – фланец нижний; 2 – фланец верхний; 3 – чувствительный элемент с выводами; 4 – резиновая мембрана; 5 – винт.*

в России предприятии по производству сейсморазведочного оборудования – СКБ СП в г.Саратов – в начале текущего года была сконструирована и выпущена первая серия нодов «Открытие» (рис.3) в количестве около 1000 штук.

Опытно-методические работы 2D

В марте текущего года в Западной Сибири (ХМАО), во время производственных работ 3D со стандартной кабельной системой, были также проведены опытно-методические работы (ОМР) с применением нодальной системы «Открытие» (рис.4). Опытные работы должны были решить следующие задачи: определить технологичность новой регистрирующей системы в зимних условиях, проверить влияние низких температур на чувствительность МЭД и на длительность работы аккумуляторов, доказать механическую надежность конструкции нодов «Открытие» и, наконец, сравнить данные, зарегистрированные МЭДами и электродинамическими геофонами, установленными на тех же линиях приема.

▼ *Рис.2. Сравнение амплитудно-частотных характеристик сейсмоприемников различного типа: молекулярно-электронный датчик (МЭД), высокочувствительный геофон YF-SOLO с собственной частотой 5 Гц и стандартный геофон GS-20DX с собственной частотой 10 Гц.*



Все ноды системы «Открытие» были предварительно заряжены и протестированы на стойках, рассчитанных на 64 нода (рис.5). Затем более 500 нодов были установлены в плотно утрамбованный снег на трех линиях приема, с таким же шагом (50 м), как и группы из трех высокочувствительных 5-Герцовых геофонов YF-SOLO, подключенных к кабельной системе. После установки нодов «Открытие» было выполнено их повторное тестирование с помощью планшетных компьютеров.

За 10 дней ОМР температура воздуха колебалась от -20 градусов ночью до +1 градуса днем. За это время значение начального напряжения во встроенных батареях (4,2 В на момент максимальной зарядки 15000 мА*ч) уменьшилось до 3,8

▼ *Рис.3. Общий вид одноканального модуля (нода) бескабельной системы «Открытие». Модуль снабжен веревочной ручкой для переноски и выдергивания из грунта.*

▲ *Рис.4. Проверка функционирования нодов бескабельной системы «Открытие» при опытных работах в Западной Сибири в марте этого года.*

В. При этом следует принять во внимание тот факт, что ноды «Открытие» могут нормально работать и при напряжении встроенных аккумуляторов, равном 2,6 В.

Обработка данных ОМР

Считывание сейсмической информации, накопленной нодами «Открытие» на трех линиях приема в течение 10 дней, было выполнено в полевом лагере после завершения этапа регистрации данных. Операции считывания сейсмической информации и зарядки встроенных аккумуляторов происходили одновременно (рис.5). В течение нескольких часов на сервере по отметкам момента было сформировано (вырезано из непрерывной записи) порядка 2500 исходных сейсмограмм общим объемом около 50 Гб. Один из нодов был доставлен с линии приема с лопнувшим корпусом после наезда на него транспортного средства, но сейсмическая информация не пострадала и была в полном объеме считана, а датчик МЭД не был поврежден.

На рис.6 представлены исходные сейсмограммы (на открытом канале) с одинаковым усилением. Видно, что запись, полученная с помощью стандартной кабельной системы с группами из трех 5-Герцовых сейсмоприемников YF-SOLO несколько слабее по амплитуде, чем запись, полученная нодами бескабельной системы «Открытие» со встроенными одиночными датчиками МЭД. Благодаря более широкополосной амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) этого датчика, амплитудные различия особенно заметны в конусе поверхностной волны, которая обладает наиболее низкими частотами. Детальный анализ АЧХ показал, что бескабельная система «Открытие» со встроенными датчиками МЭД обеспечила более широкий спектр сигнала – как в сторону низких, так и высоких частот.

В результате экспресс-обработки данных по трем линиям приема были получены временные разрезы высокого качества (рис.7). Несмотря на то, что кратность наблюдений 3D в случае регистрации данных стандартной кабельной системой более чем на порядок превышала кратность наблюдений 2D с тестируемой нодальной бескабельной системой «Открытие», временные разрезы для двух типов регистрирующих систем оказались сопоставимы по информативности.

Заключение: настоящее и будущее бескабельных систем

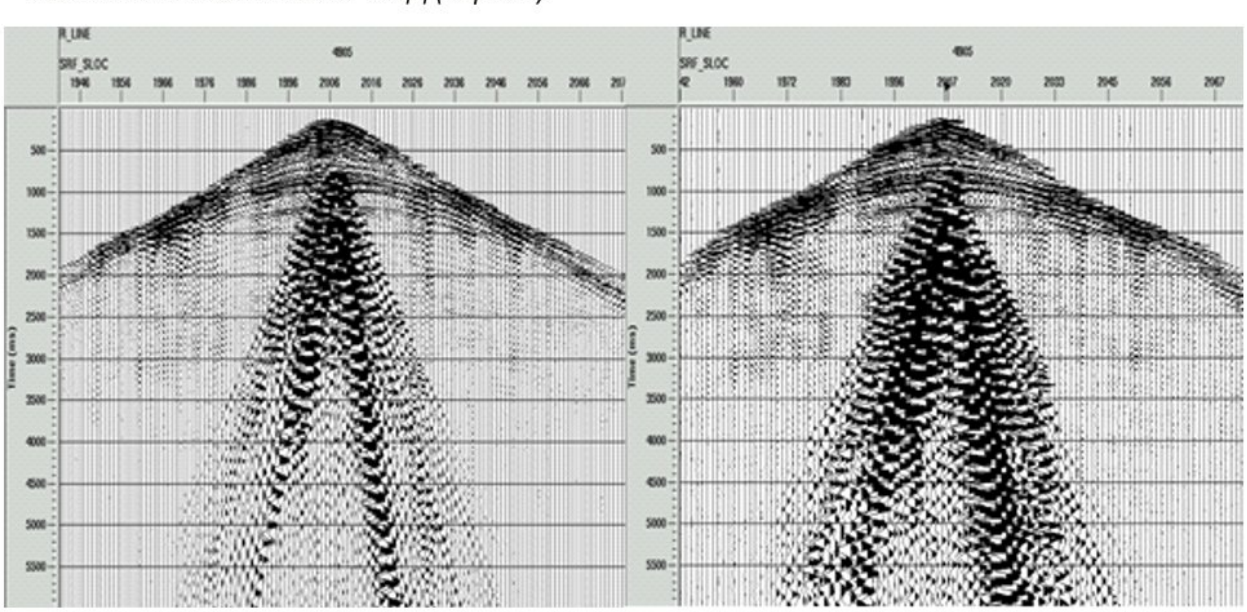
Бескабельные регистрирующие системы, особенно нодального типа, уже завоевали большую популярность за рубежом благодаря тому, что концепция «слепой» сейсморазведки там не встретила отторжения со стороны заказчиков сейсморазведочных работ. На 81-й ежегодной конференции и выставке EAGE в Лондоне, состоявшейся в июне 2019 года, представители компании BP (British Petroleum) выступили с докладом, в котором декларировалось, что при высокой плотности наблюдений 3D нет необхо-

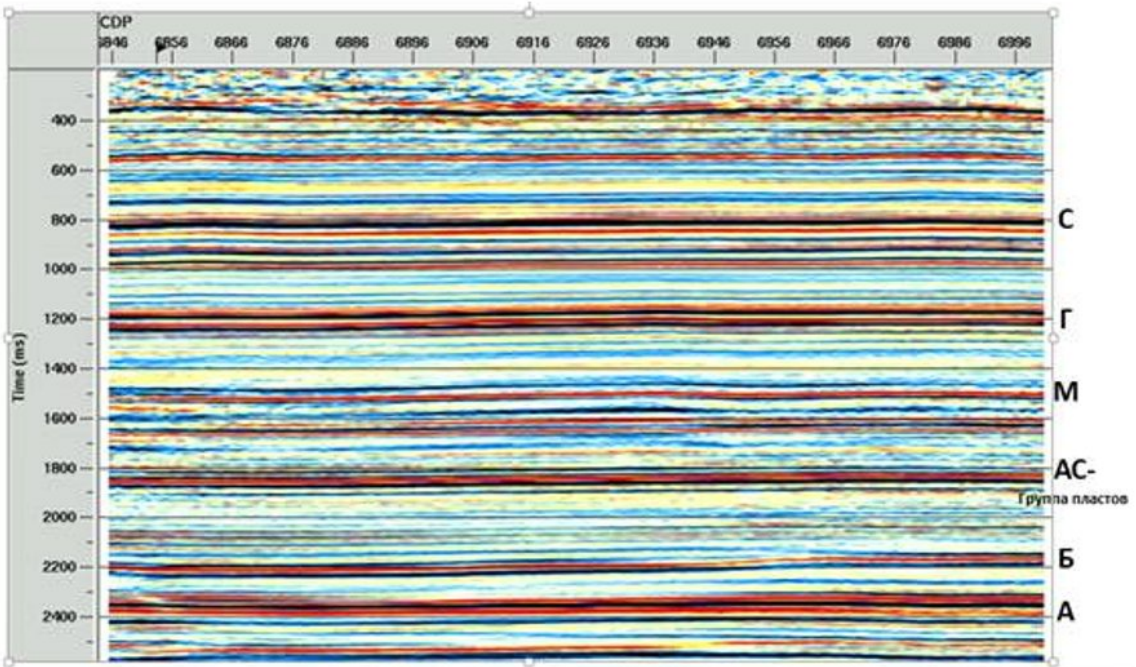
Рис.5. Считывание сейсмической информации и одновременная зарядка встроенных аккумуляторов на стойках, рассчитанных на 64 нода «Открытие».

димости в контроле качества сейсмических данных в реальном времени [3]. Дело в том, что неуклонное увеличение количества регистрируемых каналов (до нескольких десятков и даже сотен тысяч в отдельных случаях), резкое повышение кратности ОГТ и плотности трасс на 1 кв.км в результирующих массивах данных привели к тому, что традиционный контроль качества каждой исходной сейсмограммы обесценился или даже потерял смысл в тех случаях, когда каждые 5 или 10 секунд регистрируется 20, 50 или даже 100 тысяч каналов. Это особенно справедливо для вибрационных мега-партий, работающих по таким высокопроизводительным методикам как Slip-Sweep, HFVS, DSSS и ISS, при которых исходные виброграммы частично или полностью перекрываются во времени, и привычный количественный контроль качества таких полевых материалов невозможен [6].

В то же время представители BP отметили, что «слепая» регистрация данных не

Рис.6. Сравнение исходных сейсмограмм, зарегистрированных кабельной системой 428XL с группами по 3 высокочувствительных электродинамических сейсмоприемника YF-SOLO (слева) и нодами бескабельной системы «Открытие» со встроенными одиночными датчиками МЭД (справа).





▲ *Рис.7. Временной разрез, полученный после экспресс-обработки данных, зарегистрированных в Западной Сибири нодальной регистрирующей системой «Открытие» со встроенными молекулярно-электронными датчиками. На разрезе прослеживаются все опорные горизонты.*

подходит для маленьких сейсмопартий, в которых «паранойя контроля качества объясняется использованием небольшого количества каналов и низкой плотностью наблюдений», что предопределяет необходимость получения достаточно высококачественных исходных данных. Но в случае наблюдений высокой плотности не обязательно стремиться к высокому соотношению С/П на исходных данных, поскольку можно эффективно применять разнообразные статистические методы подавления помех на этапе обработки.

Если концепция смягчения требований к допустимому уровню шума окружающей среды (микросейсмам) и к соотношению С/П на исходных записях при высокой плотности наблюдений будет принята российскими Заказчиками, то относительно дешёвые нодальные бескабельные системы получат распространение в России, как это уже произошло в Северной и Южной Америке, а также в Австралии и Китае.

Инновационная отечественная нодальная система «Открытие», разработанная по инициативе НТЦ компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка» и успешно протестированная весной этого года, имеет все шансы на широкое применение в нефтегазовой сейсморазведке не только в России, но и за рубежом благодаря важному конкурентному преимуществу, а именно благодаря уникальному высокочувствительному и широкополосному датчику МЭД.

Полевые работы с нодами «Открытие» более технологичны, чем с традиционными кабельными системами и с минимально-кабельными системами (с внешними группами сейсмоприемников, а иногда и с внешними аккумуляторами). Компактная конструкция нодальной бескабельной системы позволяет проводить процедуры смотки-размотки производительнее и с меньшим количеством персонала.

В настоящее время компания «ГЕОТЕК Сейсморазведка» планирует изготовить серию нодов бескабельной системы «Открытие» в количестве нескольких десятков тысяч штук для проведения производственных работ 2D и 3D в следующих полевых сезонах.

Литература

1. Campman X., Behn Ph., and Faber K., Sensor density or sensor sensitivity? – The Leading Edge, July 2016, pp.578-585.
2. Durham, L.S., Nodal Seismic Passes Frigid Siberia Tests. – AAPG Explorer, Sept. 2011.
3. Manning T., Stone J., Ourabah A. et al., Could you use one million nimble channels? – 81st EAGE Conference & Exhibition, London, 3–6 June 2019.
4. Абдулвалиев М.Т., Тиссен А.П., Череповский А.В., Контроль качества в современных бескабельных регистрирующих системах. – Приборы и системы разведочной геофизики, Саратов, №1(64)/2020, С.31-40.
5. Тиссен А.П. Результаты ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» в развитии новых сейсморазведочных технологий. – Материалы геолого-геофизической конференции и выставки «Геоевразия-2020», Москва, 3–6 февраля 2020 г.
6. Череповский А.В. Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. Издание второе, дополненное. – Москва, ЕАГЕ Геомодель, 2017, 252 с.

Подробнее об авторах

Абдулвалиев
Марат Талгатович

Технический директор НТЦ компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», к. т. н. Автор и соавтор 15 изобретений, автор и соавтор более 40 научных статей и докладов, обладатель звания и нагрудного знака «Изобретатель СССР». Награжден 2 серебряными и 2 бронзовыми медалями ВДНХ за представленные научные разработки.

Тиссен
Артур Петрович

Вице-президент по науке компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», к. т. . Автор и соавтор более 10 научных статей и докладов, награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» 2 степени.

Толкачев
Владимир Михайлович

Президент ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» к. э. н. Окончил РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, магистр Государственного университета имени Сэма Хьюстона, Хантсвиль, Техас, США. На протяжении длительного времени занимал руководящие посты в российских и международных компаниях нефтегазовой сферы, включая ОАО «НК «РОСНЕФТЬ», Marathon Oil Corporation, Foster Wheeler International, Deloitte & Touche, а также сотрудничество с компанией Baker Hughes. Автор и соавтор 3-х книг и 42-х публикаций.

Череповский
Анатолий Викторович

Главный специалист НТЦ компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», к. т. н. Автор и соавтор 36 научных публикаций и докладов, двух монографий по наземной сейсморазведке и англо-русского словаря по прикладной геофизике.