



ДЕСЯТЬ ЛЕТ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНОЙ СТАНЦИИ РОСА-А

О. М. Сагайдачная, А. С. Сальников, А. В. Сагайдачный, А. Н. Шмыков, Т. А. Сальников
Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

Десятилетний опыт регистрации сейсмических сигналов с использованием автономных станций РОСА-А (Новосибирск, Россия) при глубинных сейсмических исследованиях на опорных геолого-геофизических профилях (2-ДВ, 2-ДВ-А, 3-ДВ, 1-СБ, 8-ДВ) на удалениях до 300 км свидетельствует об эффективности бескабельных пространственно распределенных сейсмических систем. Станция предназначена для выполнения высокоточных сейсмических измерений, в том числе длительных (сейсмический мониторинг), без предварительной временной настройки при любом заданном режиме работы с источниками различного типа возбуждения упругих колебаний (взрывными, импульсными и вибрационными).

Ключевые слова: автономный сейсмический регистратор, система синхронизации времени, бескабельная сейсмическая система регистрации, глубинные сейсмические исследования, опорный геолого-геофизический профиль.

TEN YEARS OF SEISMIC SIGNAL RECORDING WITH THE ROSA-A AUTONOMOUS STATION

O. M. Sagaydachnaya, A. S. Salnikov, A. V. Sagaydachny, A. N. Shmykov, T. A. Salnikov
Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

Ten years of experience in recording seismic signals using autonomous ROSA-A stations (Novosibirsk, Russia) in deep seismic studies on geological and geophysical reference profiles (2-DV, 2-DV-A, 3-DV, 1-SB, 8-DV) at distances of up to 300 km indicates the effectiveness of cable-free spatially distributed seismic systems. The ROSA-A autonomous station is designed to perform high-precision seismic measurements, including long-term (seismic monitoring), without preliminary time adjustment at any given mode of operation with various sources of elastic vibrations (explosive, pulse and vibratory).

Keywords: autonomous seismic recorder, time synchronization system, cable-free seismic recording system, deep seismic studies, basic geological and geophysical profile.

DOI 10.20403/2078-0575-2018-2-77-92

Десять лет прошло после публикации в 2006 г. в общероссийском научно-техническом журнале «Приборы и системы разведочной геофизики» (№№ 2, 4) первых двух статей об автономных высокоточных регистраторах РОСА-А [2, 9]. Отметим, что первоначально идея автономной регистрации сейсмических данных была оформлена в патенте [11]. В это время СНИИГГиМС, как генеральный подрядчик, выполнял геолого-геофизические работы на опорном профиле 2-ДВ (Магаданская обл., Чукотский АО), в том числе глубинные сейсмические исследования методом ГСЗ с использованием мощных вибраторов и взрывов в водоемах для возбуждения упругих колебаний.

Известно, что при сейсмических исследований в особо удаленных районах, когда приходится дополнительно решать нетривиальные задачи доставки, расстановки и эксплуатации оборудования при отсутствии не только подготовленных сейсмических профилей, но и просто дорог, применение кабельных систем крайне затруднено. В этом случае оптимальным становится использование бескабельной автономной системы сбора и регистрации сейсмических данных.

В сложных сейсмогеологических условиях особенно важны открытость и масштабируемость в пространстве бескабельной системы сбора и реги-

страции сейсмических данных на базе автономных модулей, которые могли бы работать значительное время (несколько суток) в автономном режиме без участия оператора. Возможность использования практически любого заданного количества автономных модулей регистрации, распределенных по площади исследования, обеспечивает проведение сейсмических работ одновременно на нескольких базах наблюдения, в том числе с локальным увеличением плотности пунктов приема на отдельных объектах, определенных целевой задачей.

В начале разработки специалистам СНИИГГиМС была известна реализация автономной сейсмологической станции REFTEK 130–01 американской фирмы Refraction Technology, Inc. В это время стали доступны индустриальные накопители CompactFlash объемом 2 Гб и более. Появились микропроцессоры, способные обрабатывать значительные потоки данных. Повсеместно стали применяться компактные спутниковые GPS-приемники.

Аналоговая часть и дельта-сигма АЦП сейсмического канала регистрации были уже разработаны и протестированы на телеметрической станции РОСА. Тем не менее задача была довольно сложная, так как предстояло до очередного полевого сезона, т. е. за шесть месяцев, подготовить техническое задание и разработать схемотехнику устройства,

сформировать и заказать комплектацию, изготовить печатные платы, корпуса, провести окончательный монтаж, проверку метрологических параметров.

Скажем сразу, что это было успешно выполнено. При разработке автономной сейсмостанции была нарушена обычная последовательность. После обсуждения решений схмотехники в общих чертах была заказана основная комплектация. К сожалению, сроки некоторых поставок, в том числе основных элементов (генераторы, микросхемы дельта-сигма-АЦП), превышали три месяца.

Корпус был заказан одновременно с печатными платами. Проектирование, подготовку производства и дальнейший выпуск взяло на себя ЗАО «Соединитель» (Миасс, Челябинская обл.).

Для ускорения разработки за основу была взята печатная плата телеметрической станции РОСА, а интерфейсная часть заменена на микропроцессор, отвечающий за запись в накопитель CompactFlash и обмен по USB.

В конструкцию были заложены два разъема питания. Это позволяет выполнять «горячую» замену истощенных батарей.

Первым GPS-приемником стал законченный модуль для применения на водном транспорте. Он представлял собой пластмассовый «грибок» с кабелем подключения. «Грибок» этот оказался самым слабым местом станции: было несколько случаев механического повреждения и вследствие этого потеря герметичности прибора. При первой же модернизации он был заменен; GPS-приемник был спрятан в корпус вместе с антенной за поликарбонатное стекло (рис. 1).



Рис. 1. Автономный регистратор РОСА-А (общий вид)

В дальнейшем на протяжении 10 лет эксплуатации не было ни одного случая механического повреждения стекла и нарушения герметичности. Индикация с использованием световодов при первой же модернизации также была убрана под стекло окна GPS-антенны, и визуализация улучшилась. Более того, появилась возможность плотного упаковывания регистраторов в кейсы для транспортировки.

Реализованное решение окна доказало свою надежность. Даже пожары в летние полевые сезоны 2013 и 2015 гг. не нарушили герметичность корпусов приборов.

Полевые испытания автономного регистратора РОСА-А, проведенные в конце 2005 г. на геофизическом полигоне СО РАН (Новосибирская обл.) с использованием центробежного вибратора ЦВП-40, показали, что технические характеристики экспериментальных образцов соответствуют заявленным значениям [2]. К началу полевого сезона 2006 г. была подготовлена пилотная экспериментальная серия из 25 автономных сейсмических регистраторов РОСА-А (100 каналов). В данной комплектации система была апробирована при сейсмических работах методом ГСЗ на опорном геофизическом профиле 2-ДВ (Чукотский АО) и при выполнении наблюдений «суша – море» (Магаданская обл.) [9, 16].

Регистраторы РОСА-А были запрограммированы на автономную работу продолжительностью 10 сут. В рабочем режиме ежедневно включалась запись информации длительностью 1,5 ч в вероятном интервале выполнения взрывов. В ходе проведенных работ регистраторы записали колебания от всех произведенных взрывов. В результате была практически установлена достаточная надежность их работы в условиях высоких широт при повышенном фоне статического электричества.

Первичный материал, полученный от взрывного источника на удаленностях до 300 км, характеризуется достаточно высоким отношением сигнал/помеха. Визуально качество полученных сейсмических данных можно оценить по записям на открытом канале (рис. 2).

Кроме наземных работ методом ГСЗ, в этот же период автономные регистраторы РОСА-А использовались на южномагаданском участке профиля 2-ДВ при проведении наблюдений «суша – море». Этот участок протяженностью в 100 км примыкает к северному окончанию морского опорного профиля 2-ДВ-М, на котором сотрудники «Севморгео» выполняли исследования по государственному контракту № 06/0820–25 (Роснедра). Полученные сейсмограммы ГСЗ характеризовались достаточно высоким уровнем сигнала относительно помехи в целевом диапазоне регистрации (рис. 3).

Были собраны и обработаны большие объемы информации, при этом, благодаря контролю за структурой файла, выявлены незначительные потери отдельных блоков данных при работе CompactFlash. К существенным искажениям данных это не привело, так как временная привязка восстанавливалась при обработке. В последующей версии станции защита структуры файла была усилена и вероятность потери синхронизации уменьшилась практически до нуля.

По результатам сейсмических работ ГСЗ полевого сезона 2006 г. было решено выпускать автономный регистратор РОСА-А, и к 2011 г. было изготовлено 250 приборов (примерно по 50 штук в год).

Естественно, в сложных климатических и геоморфологических условиях Северо-Востока России были неизбежны утраты аппаратуры. Практика по-

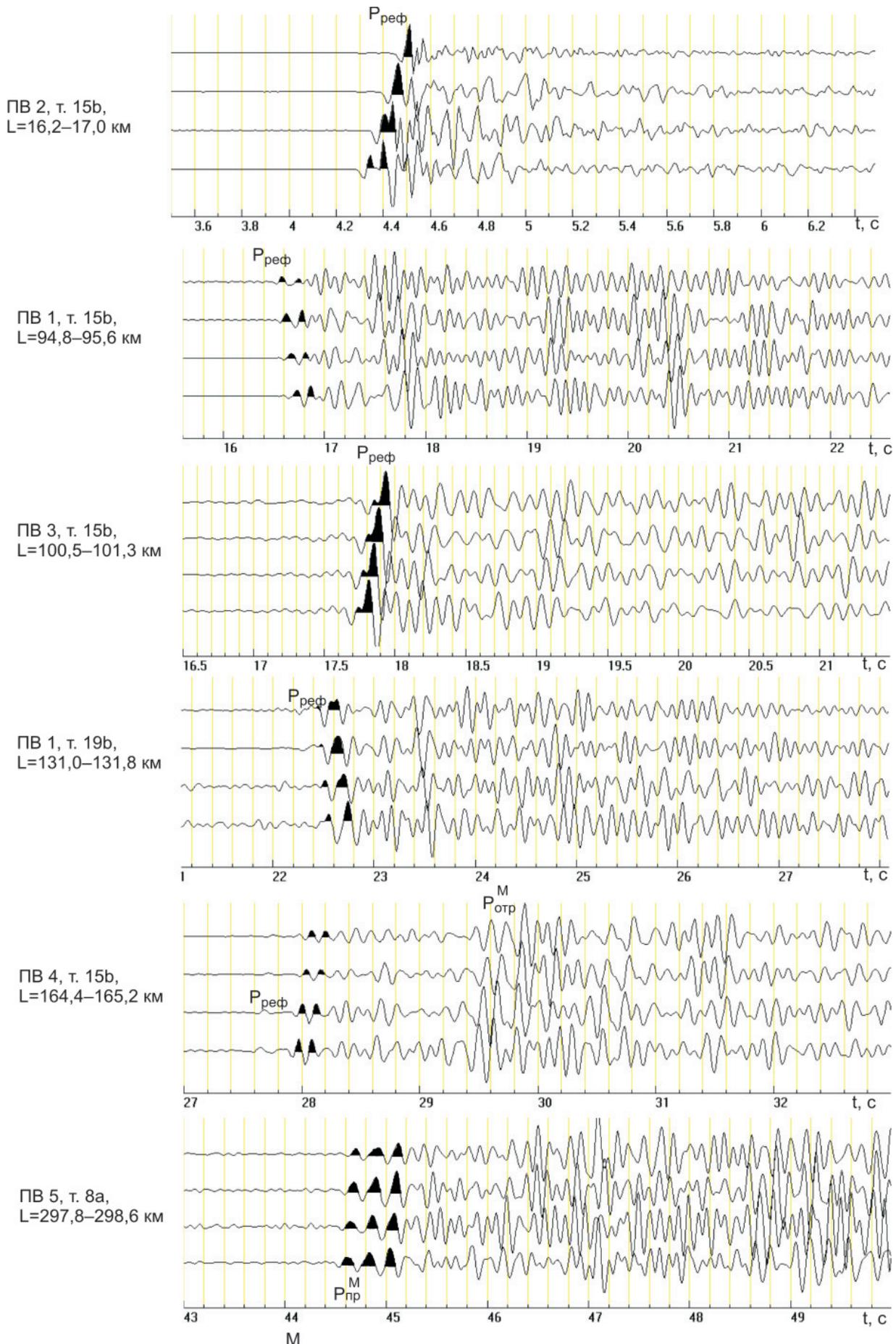


Рис. 2. Примеры волновых полей продольных волн, зарегистрированных на дискретных установках РОСА-А на участке пос. Омолон – р. Малый Анюй профиля 2-ДВ

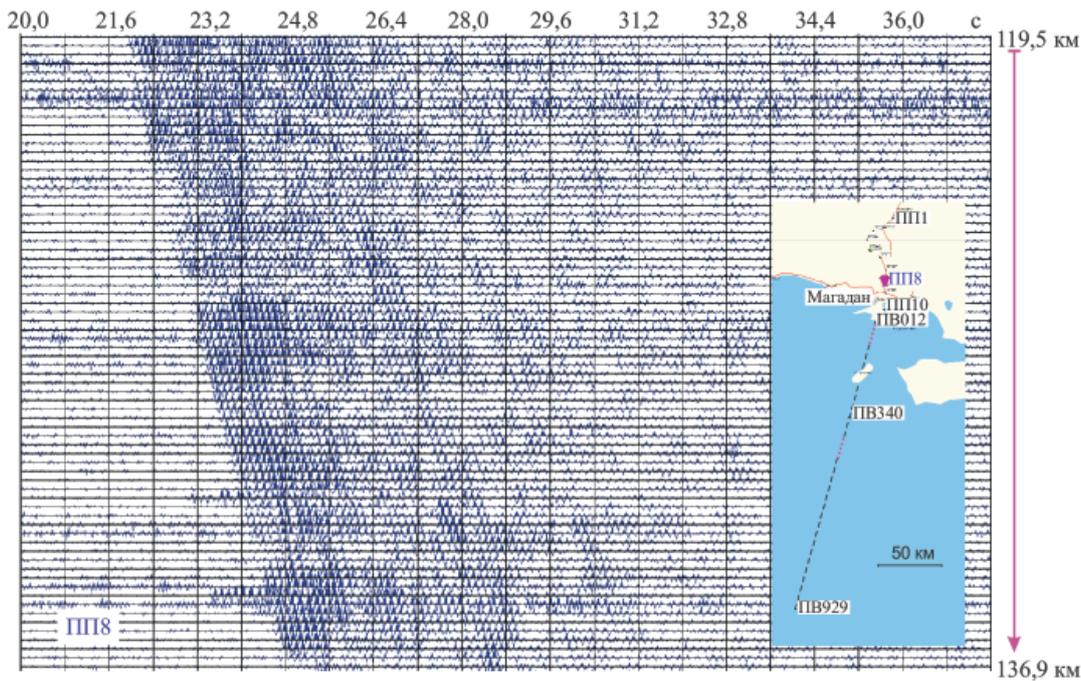


Рис. 3. Фрагмент обращенного годографа при наблюдениях «суша – море»

казала, что особенно большой урон наносят грозы. Особо отметим полевой сезон 2008 г., когда они принесли максимальные материальные потери.

При проведении сейсмических работ методом ГСЗ 4-канальная автономная станция РОСА-А комплектовалась кабелем, имеющим общую длину 900 м между крайними геофонами. Фактически сейсмококс представляла собой антенну, что в условиях гроз приводило к очень серьезным последствиям. Сгоревшие модули имели повреждения аналоговой части (отказ усилителей, АЦП, резисторов и конденсаторов). Некоторые платы не подлежали ремонту из-за разрушения топологии вплоть до разрушения проводников и разъемов. Всего было повреждено до 50 % регистраторов. Понятно, что с таким положением дел мириться не следовало. Для грозозащиты станции в разветвители была установлена дополнительная плата: защита в две ступени – искровой разрядник и ограничитель напряжения на варисторах, и весь излишний заряд стекал на общий провод. Применение защиты уменьшило повреждения модулей на порядки! Если первоначально требовался ремонт 5 % станций, после сезона 2008 г. – до 50%, то теперь менее 1%. Раньше в 80 % случаев приходилось менять входные микросхемы усилителей и даже АЦП за ними (в сумме до 120 дол. за канал), а сейчас замене подлежат лишь резисторы ограничителя. В целом проблема была решена.

Принципы построения системы сбора сейсмических данных на основе автономных регистраторов

Современные цифровые технологии способствуют революционному внедрению бескабельных сейсмических систем на базе автономных высокоточных регистраторов (класса РОСА-А). В настоящее

время уровень микроэлектроники практически снимает ограничения на автономность устройства регистрации данных, связанные с сохранением их больших объемов. В открытом доступе твердотельная flash-память объемом свыше 32 Гб, которая работает в широком температурном диапазоне (от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$). Подобный объем памяти обеспечивает режим непрерывной регистрации в течение 10 сут и более, что позволяет полностью (или частично) отказаться от строго регламентированной по времени работы с искусственными источниками возбуждения различного типа (взрывными, импульсными и вибрационными). Предусмотрена возможность использования SD-карт и USB-накопителей в индустриальном исполнении, и их можно заменять для считывания без нарушения герметизации устройства в полевых условиях.

Временная привязка сейсмических записей осуществляется на этапе обработки, и такая организация регистрации сейсмических данных позволяет исключить радиоканал для синхронизации, телеметрическую систему управления, сбора и передачи значительных объемов данных.

Систему автоматической временной привязки сейсмических наблюдений к мировому времени (UTC) можно построить, используя высокоточный генератор и (или) спутниковые приемники. Каждое из этих решений при определенных условиях правомерно и эффективно. Использование приемников GPS (Глонасс) позволяет получить точность синхронизации не хуже $\pm 1\text{ мкс}$ при условии приема минимум от трех спутников. В настоящее время спутниковые приемники, временная синхронизация которых удовлетворяет достаточно высоким требованиям, относительно недороги и легко встраиваются в любые элементы станции, в том числе и в полевые модули. Высокоточные термостатированные гене-



раторы, у которых погрешность частоты составляет $\pm 10^{-8}$, предполагают временную неопределенность менее ± 1 мс/сут. Использование подобных генераторов позволяет длительное время работать в автономном режиме при отсутствии устойчивого приема спутниковых сигналов с сохранением временной синхронизации заданной точности.

С позиции энергопотребления использование спутниковых сигналов предпочтительнее, чем применение высокостабильного генератора, поскольку в режиме записи потребляемая мощность составляет для спутникового приемника менее 0,1 Вт, а для внутреннего генератора 1 Вт. Соединение указанных элементов в одном устройстве позволяет организовать пространственно распределенные системы регистрации сейсмических данных, не уступающие телеметрическим системам.

Автономная сейсмическая станция РОСА-А построена в соответствии с данной схемой, реализованные решения защищены патентами РФ [3, 4].

Опорный временной сигнал спутникового приемника, так называемый PPS – точный секундный импульс с джиттером 100 нс (фазовое дрожание), используется для точной настройки тактирования. Для уменьшения влияния джиттера используется промежуток синхронизации в 256 с, на котором усреднение джиттера снижает его со 100 до 0,39 нс.

Система синхронизации работает следующим образом. Сравниваются промежутки 256 с от спутникового GPS-приемника и от системы синхронизации, работающей от генератора. По разнице времен вычисляется сигнал ошибки, который на указанном промежутке корректирует (в цифровом виде) систему синхронизации, формирующую тактовые импульсы часов (512 кГц) и дельта-сигма-модуляторов. При реализации системы синхронизации были использованы функциональные возможности матриц фирмы Altera, особенно встроенных синтезаторов частоты. После синхронизации сигналами со спутника точность часов определяется только генератором (а именно 10^{-8}), что составляет суточный дрейф на уровне ± 1 мс/сут. Этот параметр проверяется на приемо-сдаточных и периодических испытаниях. Благодаря цифровой системе подстройки частоты первоначальная настройка генераторов не требуется. После внедрения такой системы взаимный дрейф станций в отсутствие спутников, например в шахте, также не превышает 10^{-8} .

Описанный механизм настройки часов в настоящее время значительно изменился по отношению к первоначальным. Это вызвано переходом на новые микросхемы АЦП, которым теперь нужно выдавать 4096 кГц частоты меандром. При этом встроенные часы станций должны идти синхронно на всех пунктах наблюдения в реальном времени без каких-либо ограничений. При наличии спутников синхронизация оценивается как абсолютная, при отсутствии спутниковых сигналов она определяется точностью генераторов. Первоначальный разброс

генераторов может достигать до 10^{-6} , автоматика снижает погрешность более чем на два порядка.

Функциональные и технические характеристики регистратора РОСА-А

С начала эксплуатации система регистрации и сбора сейсмических данных на базе автономных регистраторов РОСА-А показала свои функциональные возможности и высокие технические характеристики. К их числу относится отсутствие внешнего кабеля для электропитания и проводной связи с управляющей станцией, а также проводов между полевыми модулями. Система синхронизации времени позволяет выполнять сейсмические исследования в условиях неустойчивого приема спутниковых сигналов или их отсутствия. Реализованы защищенное хранение сейсмических данных и технология высокоскоростной передачи больших объемов информации.

Комплексную проверку функционального состояния модуля регистрации РОСА-А можно провести в любое время с использованием компьютера и с подключением через Ethernet-порт. В реальном времени на мониторе можно проследить и контролировать сигналы, принятые сейсмодатчиками, оценивать состояние системы синхронизации, выполнять мониторинг технических параметров (напряжения питания, тока потребления, температуры). При необходимости с клавиатуры можно запрограммировать режим работы автономной станции, в том числе считать, записать или изменить программу эксперимента, а также передать полевые сейсмические данные на компьютер в реальном времени. Все метрологические параметры цифрового канала регистрации можно оперативно получить, используя встроенный тестовый генератор.

В полевых условиях можно осуществить оперативный многооперационный контроль за системой регистрации сейсмических данных: устройство обладает функциями самодиагностики и самотестирования с документированием результатов в виде файлов внутри встроенной Flash-памяти. При установке на местности оператору доступна индикация подключения геофона по уровню принятого сигнала.

К основным характеристикам цифрового канала регистрации сейсмических сигналов относятся [6]:

- частотный диапазон (Гц);
- максимальный по амплитуде входной сигнал (уровнем максимального входного сигнала считается напряжение (В) ограничения – уровень клиппирования сейсмического канала);
- действующее значение аппаратного шума (мкВ), приведенного к входу усилителя, который определяет минимальный уровень регистрации сейсмических сигналов и рассчитывается через значение среднеквадратического отклонения случайного процесса, зарегистрированного каналом, шунтированным на входе эквивалентом датчика, разделенное на коэффициент усиления канала;



– мгновенный динамический диапазон (мДД), который определяется как производная через отношение максимального действующего напряжения к собственным шумам;

– коэффициент нелинейных искажений канала регистрации;

– коэффициент подавления синфазной помехи.

Проблема с нелинейными искажениями сигнала при регистрации практически решена, поскольку в современных сейсмических станциях уровень нелинейных искажений цифрового канала регистрации на несколько порядков ниже уровня собственных нелинейных искажений канала преобразования геофона.

Применяемые в настоящее время усилители обеспечивают уровень подавления синфазной помехи от –100 дБ.

Базовым параметром, ограничивающим минимальный уровень регистрируемых сигналов, является величина мДД сейсмического канала. Как правило, регистрация полноформатных данных (мДД >120 дБ) обеспечивает достоверное выделение информативной составляющей в общем потоке информации и, следовательно, возможность исследования энергетически слабо выраженных отдельных элементов сейсмического поля [6].

Дельта-сигма-модулятор высокого порядка применяется для достижения требуемого значения мДД цифрового канала регистрации. Обеспечение высокого уровня его цифрового канала регистрации сейсмических данных предполагает снижение эффекта наложения спектров, обусловленного дискретизацией сигнала. Цифровые фильтры современных микросхем построены, как правило, по принципу каскадной фильтрации с последующим прореживанием данных. Аналоговый антиалиасинговый фильтр должен уменьшить все гармоники выше половины частоты прореживания до уровня менее –120 дБ, в противном случае произойдет их перенос в полосу пропускания. Амплитудно-частотную характеристику сквозного канала регистрации необходимо проверять, чтобы исключить влияние эффекта наложения спектров.

Общий динамический диапазон цифрового канала автономного сейсмического регистратора РОСА-А превышает 140 дБ, что обеспечивает высокое качество получаемого сейсмического материала [8, 21].

Тем не менее со временем потребность увеличения времени автономной работы регистратора стало одним из определяющих требований. Объема накопителя данных, как правило, было достаточно, проблема увеличения времени автономной работы заключалась в питании. Для ее решения стали применять по два аккумулятора на один полевой модуль РОСА-А. Периодически (раз в две недели) приходилось объезжать действующую расстановку и заменять аккумуляторы на заряженные. Для особенно труднодоступных точек стали устанавливать

аккумуляторы повышенной емкости. Работа эта была не из легких, так как приходилось перетаскивать все на себе на значительное расстояние от дорог. Проблема была решена с началом применения солнечных батарей в дополнение к единственному аккумулятору [14]. Вес солнечной батареи размером с лист бумаги формата А4 около 200 г, что не идет ни в какое сравнение с весом штатного аккумулятора – 6 кг. Опыт производственных сейсмических работ ГСЗ на опорных профилях показал, что при правильной расстановке (и позиционировании на солнце) время работы автономного регистратора РОСА-А питанием уже не регламентируется. Реальная автономность рабочего сеанса доходила до месяца и более, что существенно увеличило производительность работ и, соответственно, уменьшило сроки их выполнения.

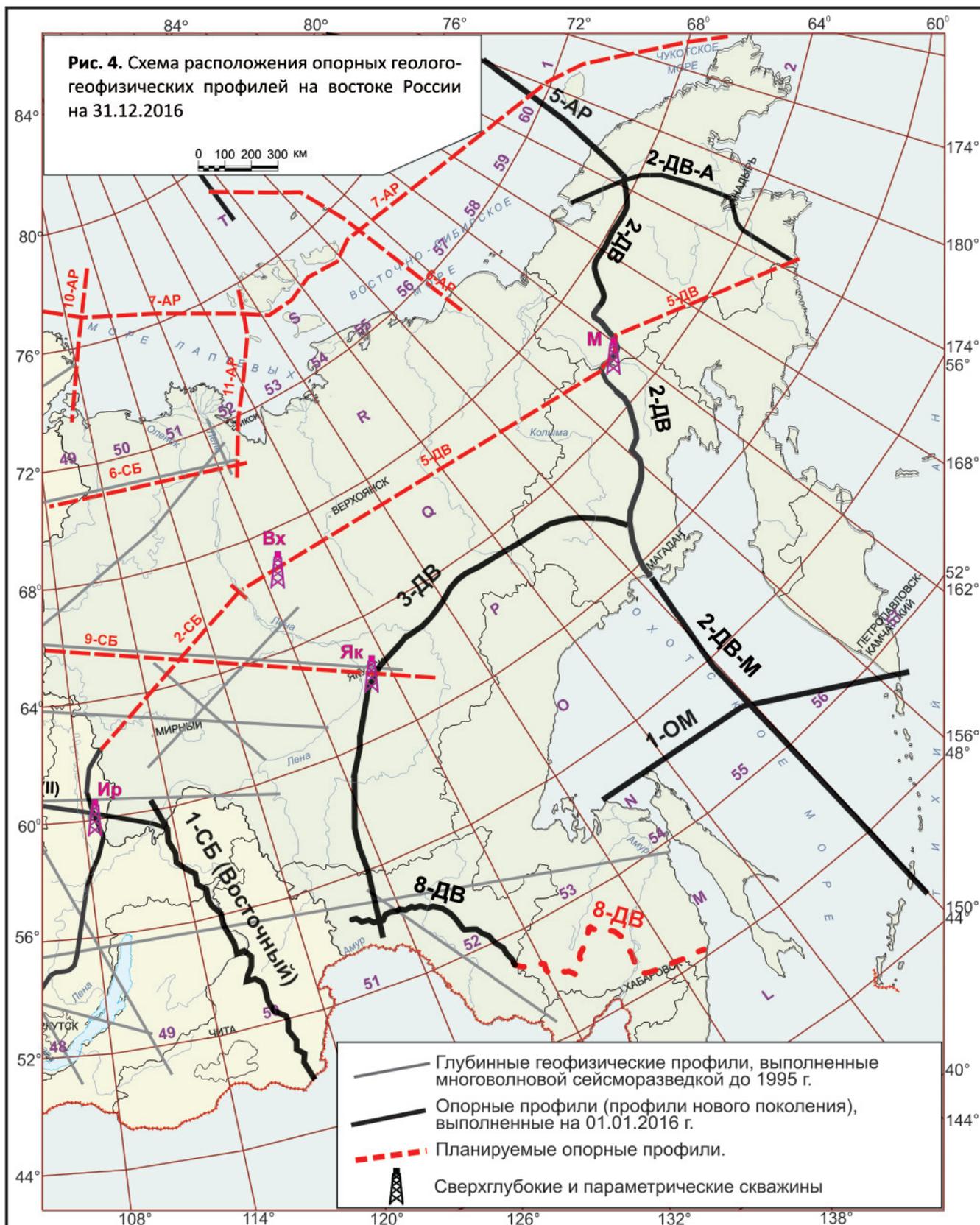
Сейсмические работы с автономными регистраторами РОСА-А

Работы по созданию государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин относятся к одному из приоритетных направлений геолого-геофизических исследований в рамках федерального заказа, ориентированных на комплексное изучение недр Российской Федерации для федеральных нужд и решение основополагающих проблем воспроизводства минерально-сырьевой базы [7]. Новые сейсмические данные на отраженных и преломленных волнах, полученные методами ОГТ, ГСЗ и КМПВ, составляют фундаментальную фактологическую основу геолого-геофизических построений глубинной модели земной коры.

Сейсмические работы методом ГСЗ начались на опорных профилях на северо-востоке России (2-ДВ) с 2001 г. (рис. 4). Практически с этого времени началось возрождение метода ГСЗ в нашей стране на основе современных уникальных технических средств российского производства (таких как автономные регистраторы РОСА-А и мощные сборно-разборные виброисточники).

Глубинные исследования с автономными станциями РОСА-А на опорном геофизическом профиле 2-ДВ были начаты в 2006 г. [9]. В статье [10] подробно освещены технология сейсмических работ с автономными станциями РОСА-А на геотраверсах, расположенных на востоке России (2-ДВ, 2-ДВ-А, 3-ДВ), а также работы, выполненные методом ГСЗ по системе наблюдений «суша – море», увязывающие морские опорные профили 2-ДВ-М и 5-АР и сухопутный 2-ДВ (Магаданская обл., Чукотский АО). Возбуждение осуществлялось сотрудниками «Севморгео» на акваториях Охотского (2006 г.) и Восточно-Сибирского (2008 г.) морей с применением морских пневмоизлучателей.

В 2017 г. завершены работы на опорном профиле 1-СБ (Восточный), выполняются полевые работы ГСЗ на профиле 8-ДВ (участок Восточно-Ста-



новой, 800 км) с системой РОСА-А в комплекте из 200 автономных регистраторов на удалениях до 300 км от взрывных источников. Таким образом, к настоящему времени всего было отработано около 9000 пог. км профилей ГСЗ.

Получены полевые материалы высокого качества (рис. 5), позволившие составить глубинные геолого-геофизические разрезы земной коры и верхней части мантии (рис. 6).

Опыт производственного применения автономных регистраторов РОСА-А для глубинных исследований методом ГСЗ в наземном варианте и по технологии «суша – море» показал экономическую эффективность бескабельной системы РОСА-А. На

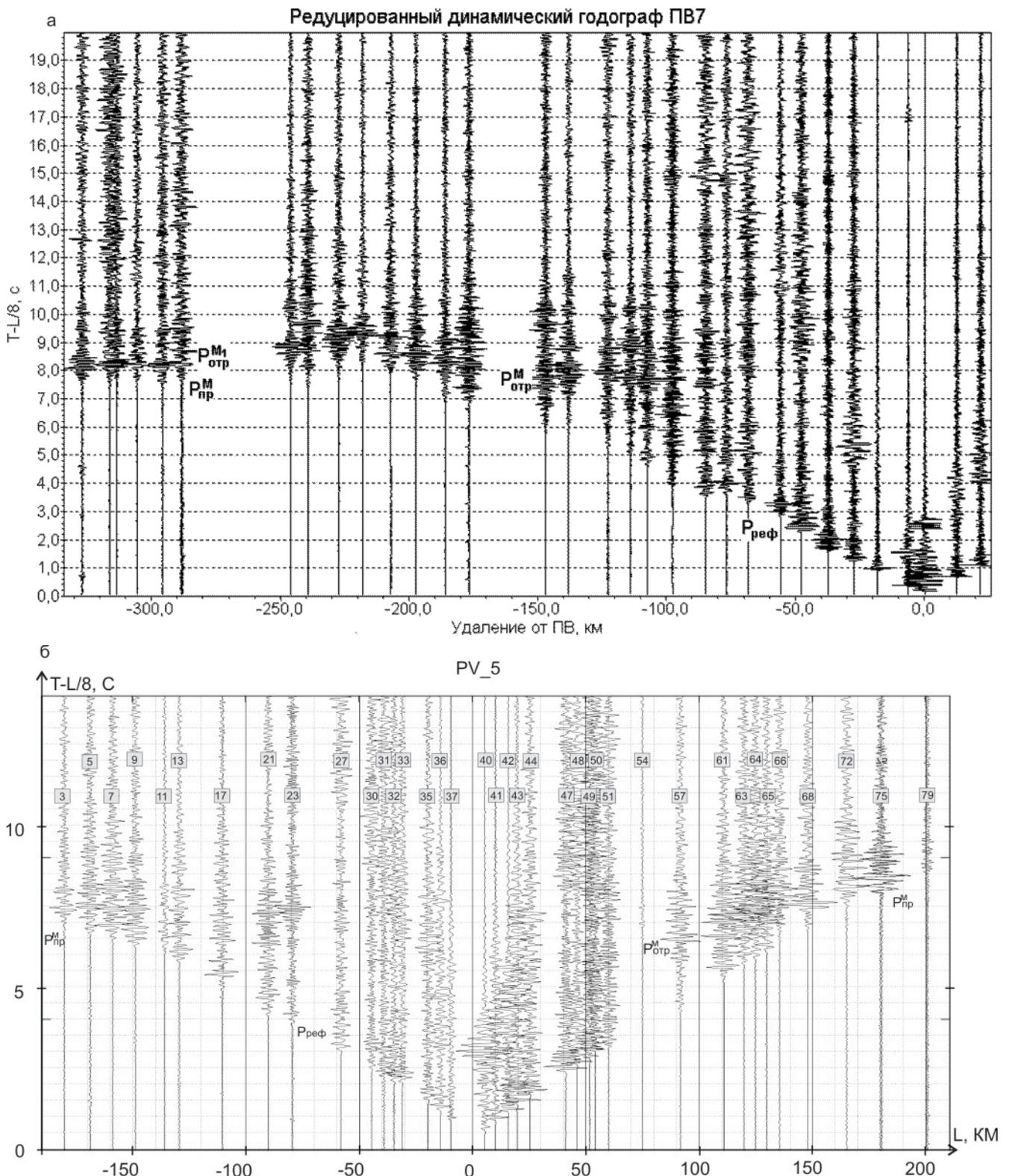


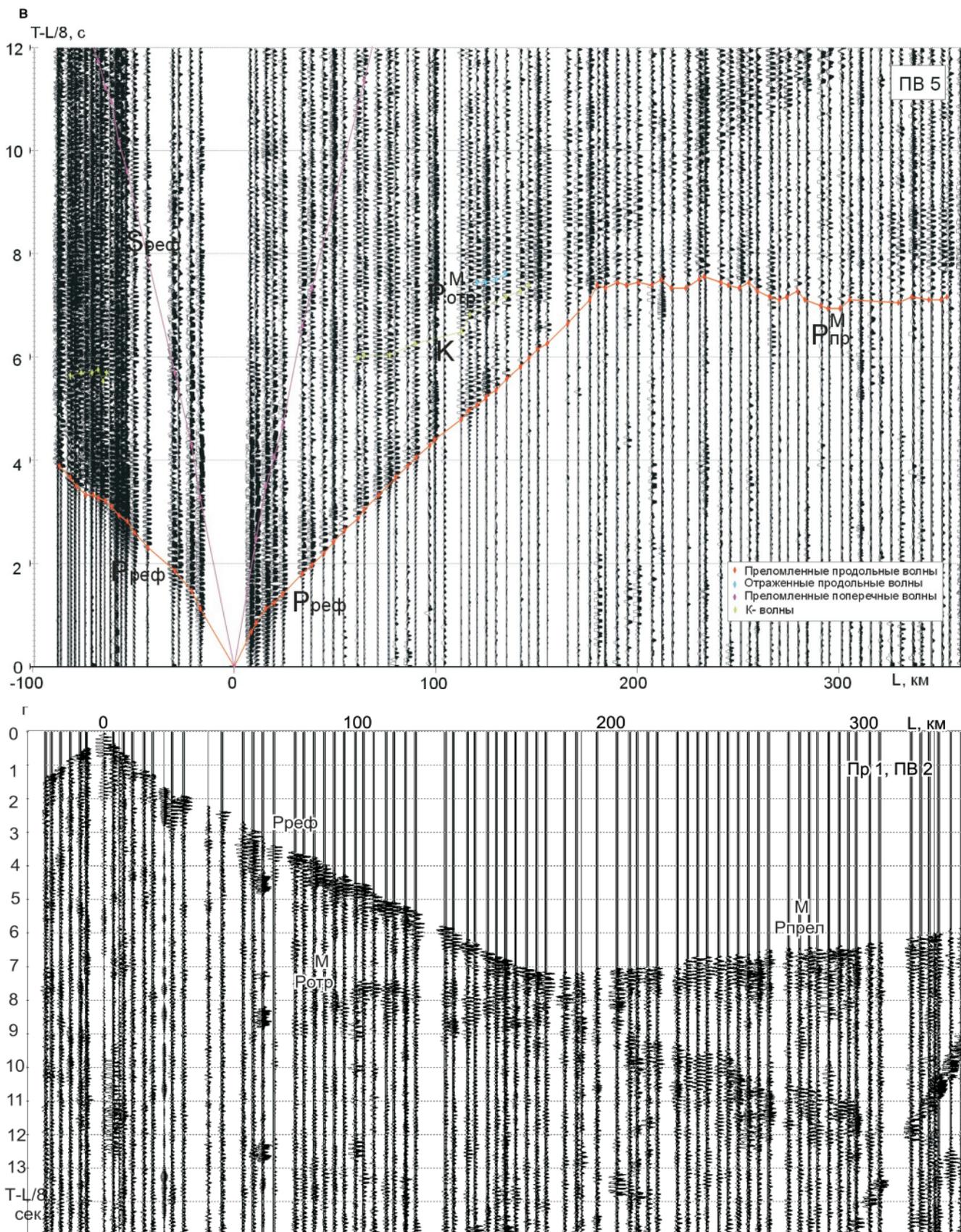
Рис. 5. Редуцированные динамические годографы; профили: а – 2-ДВ, б – 2-ДВ-А, в – 3-ДВ, г – 1-СБ

удалениях до 300 км от источника были зарегистрированы целевые сейсмические волны с высоким отношением сигнал/помеха при взрывном и невзрывном (импульсном и вибрационном) способах возбуждения упругих колебаний.

Детальные исследования по сейсмическому «просвечиванию» угольных пластов были начаты совместно с ОАО НЦ ВостНИИ (Кемерово) в 2008 г. Работы в шахтах Кузбасса продолжались с целью

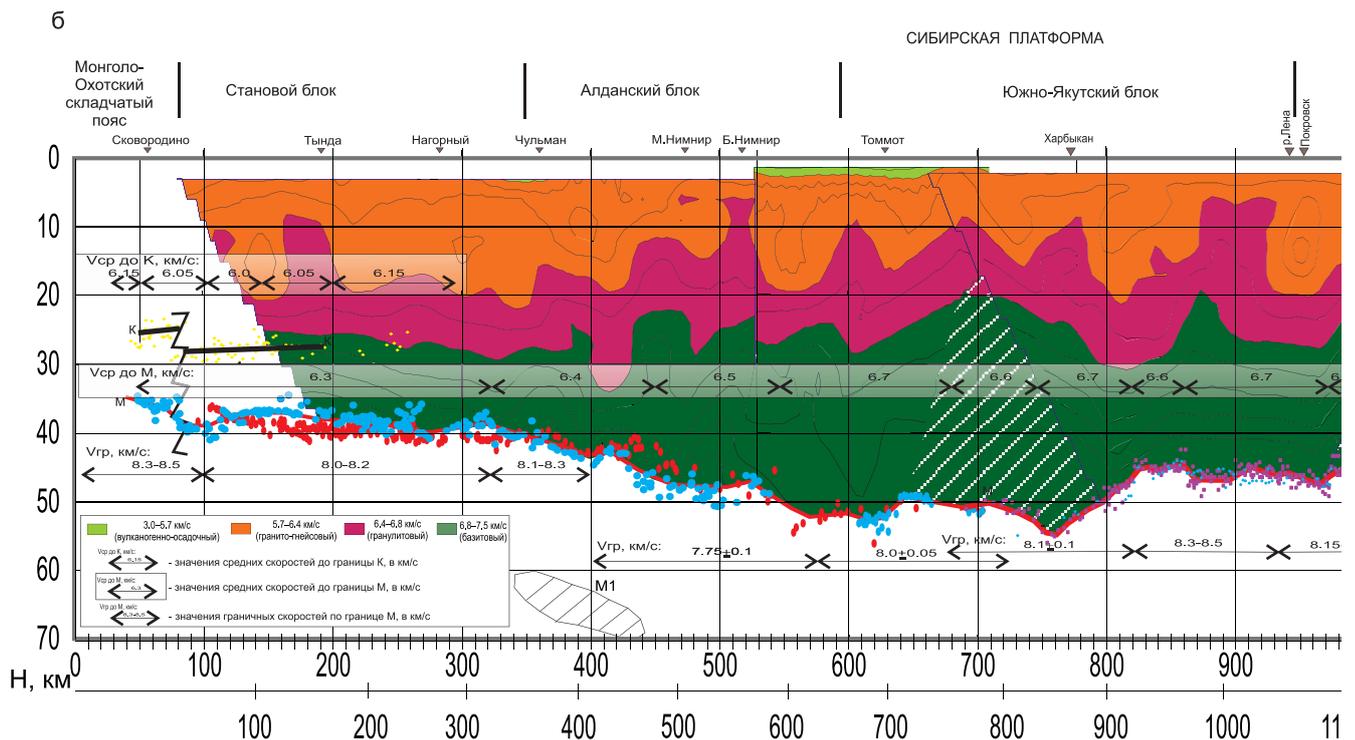
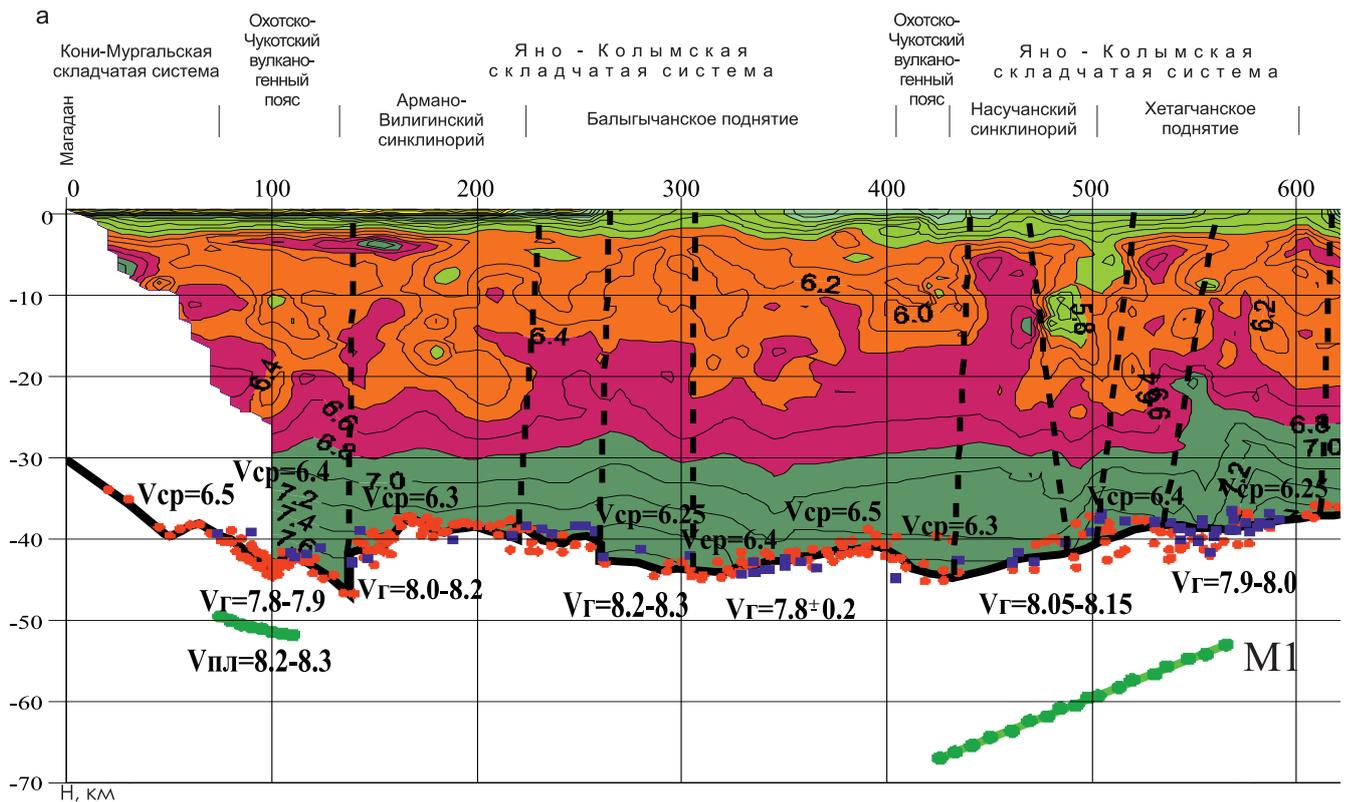
обнаружения и/или исключения в процессе угледобычи «внезапного» обнаружения зон геологических нарушений в угольных пластах в 2009–2010 гг.

Важнейшим условием использования системы сбора и регистрации сейсмических данных с автономными регистраторами РОСА-А в шахтах является обеспечение высокоточной синхронизации времени при отсутствии спутниковых сигналов [1, 13].



Полевая методика работ включала систему многократных перекрытий на проходящих волнах, при которой возбуждение сейсмических колебаний осуществлялось с использованием импульсного источника (ударного типа) из параллельного (конвейерного) штрека (рис. 7).

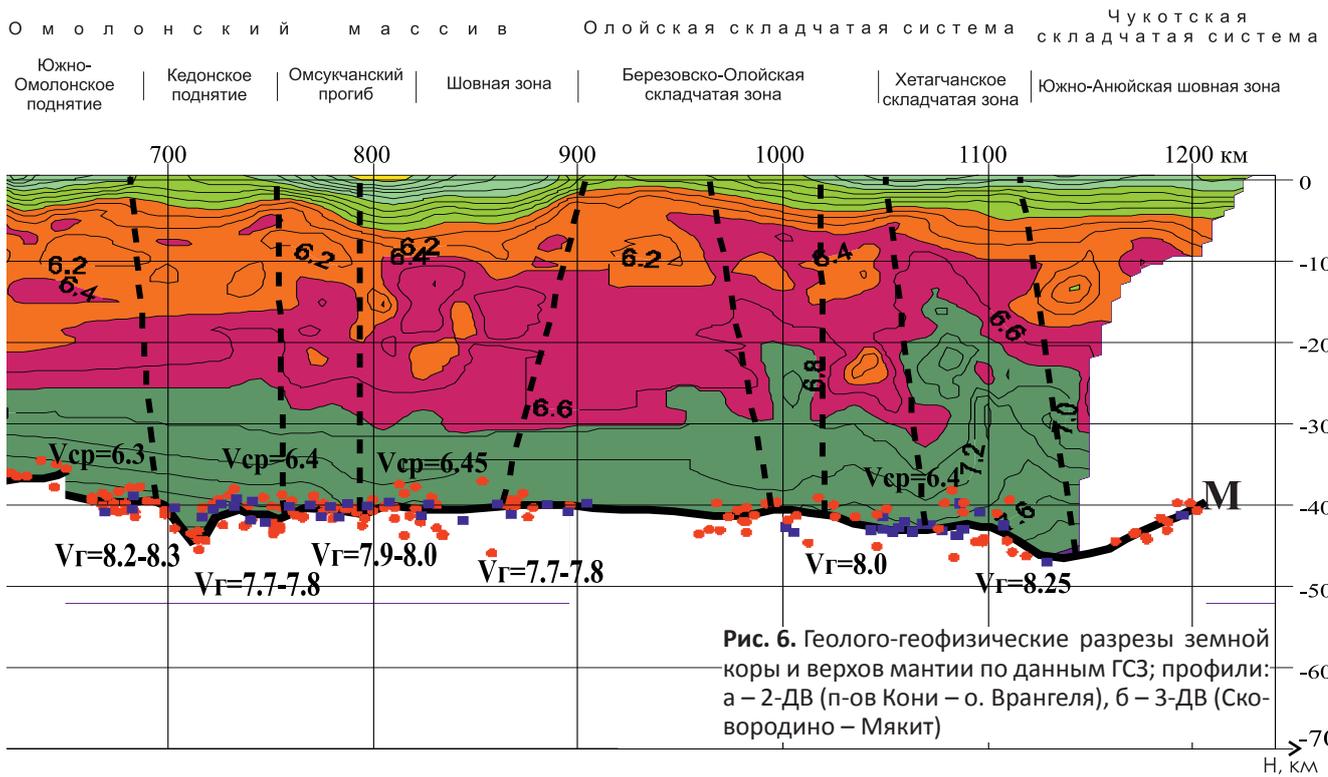
Реализация такой схемы работ с автономными регистраторами обладает важным преимуществом: отсутствие проводных линий между пунктом возбуждения и пунктом приема, находящихся в разных штреках. Динамический диапазон сейсмического канала станции и система временной привязки (по-



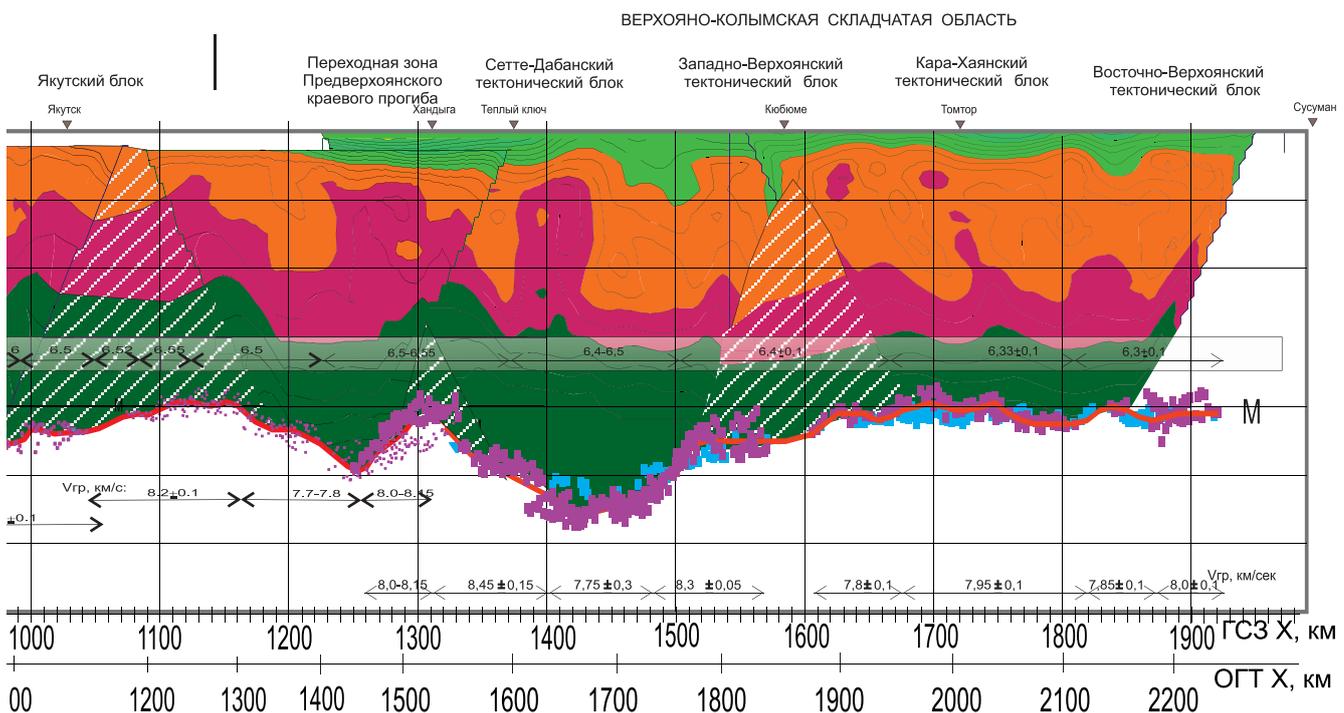
грешность порядка единиц мкс при 8-часовой работе) позволили получить качественный материал в условиях высокого уровня микросейсм от работающих механизмов.

Сейсмотомографическая обработка волнового поля на проходящих объемных и каналовых волнах позволила выявить и проинтерпретировать особенности геологического строения угольного пласта, включая оценку прогноза выделения раз-

мывов угольного пласта в пределах лавы (рис. 8). Практически было показано, что предлагаемый способ оптимизирует процесс отработки угольных пластов за счет опережающего прогноза местоположения песчаных врезов, механически ослабленных участков и зон повышенного метановыделения. Результаты проведенных исследований были подтверждены последующими горнопроходческими работами [12].



№ 2(34) ♦ 2018



Пассивные сейсмические наблюдения. Важным условием для максимально полного извлечения нефти при минимизации эксплуатационных затрат является сейсмический мониторинг месторождения, в том числе с использованием методик пассивных сейсмических наблюдений. В феврале 2008 г. экспериментальные работы на нефтяном месторождении (Ханты-Мансийский АО) по указанной методике с использованием автономных станций

РОСА-А и Reftek (США) проведены Югорским НИИ информационных технологий (Ханты-Мансийск). При обработке полученных сейсмических записей были выделены зоны разуплотнения геологической среды, что позволило оптимизировать разработку залежи. В сложных климатических условиях северных регионов России аппаратура РОСА-А подтвердила заявленные технические характеристики и показала конкурентоспособность при выполнении

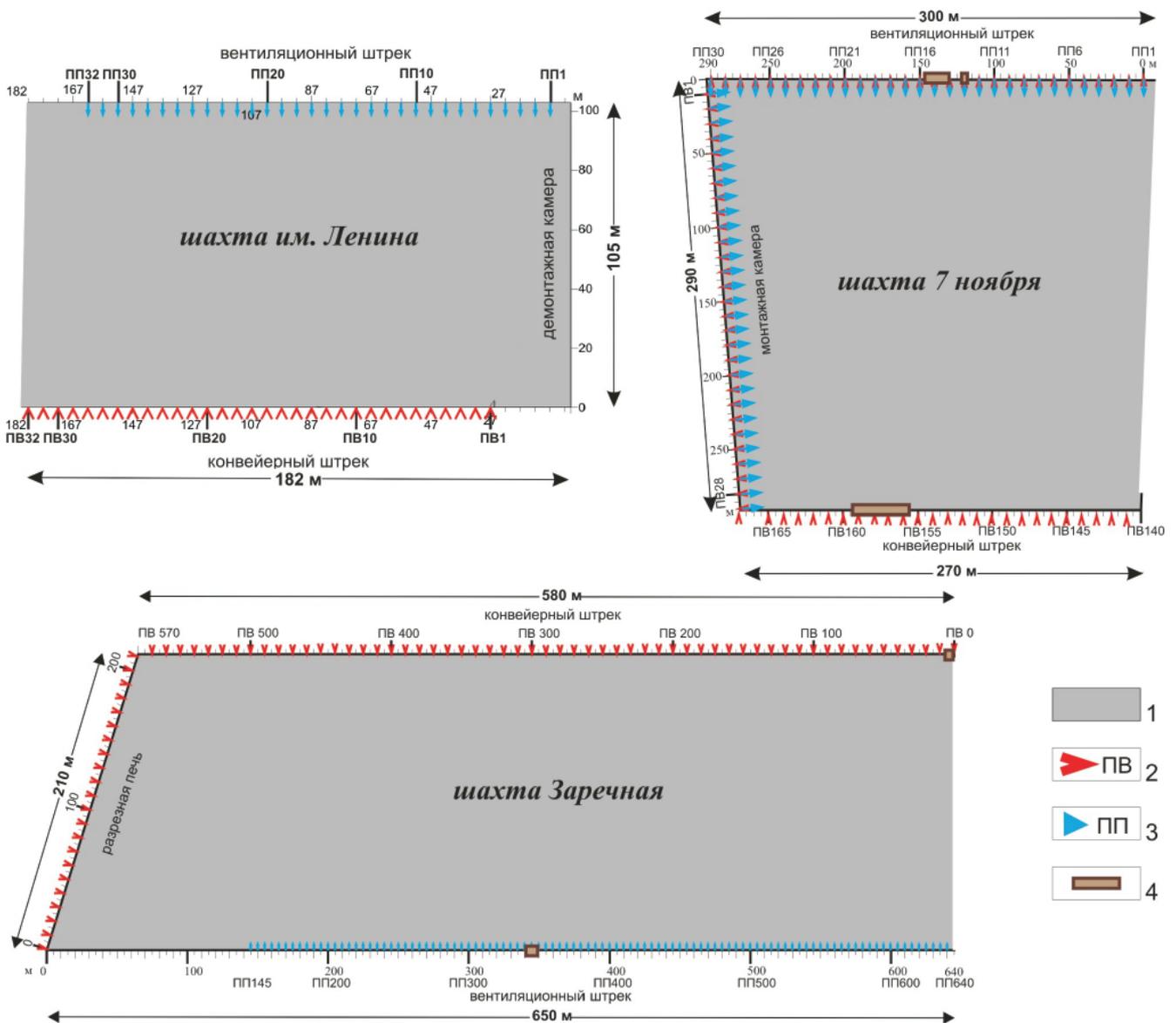


Рис. 7. Системы наблюдений на проходящих сейсмических волнах, реализованные в угольных шахтах Кузбасса
 1 – угольный пласт; 2 – пункты возбуждения в штреке; 3 – пункты приема в штреке; 4 – наблюдаемое обнажение песчаного веза

сейсмического мониторинга в зимних условиях таежной местности [5].

Пассивный сейсмический мониторинг с целью изучения естественного фона микросейсмической активности в зоне главного разрыва Чуйского землетрясения 2003 г. и динамики процесса консолидации горных пород верхней части разреза осуществлялся на протяжении 2004–2007 гг. с использованием автономных регистраторов РОСА-А [5]. Методика экспериментов представляла собой ряды дискретно-непрерывных трехкомпонентных наблюдений волнового поля как в пределах трещиноватой зоны, так и вне ее (рис. 9). В результате проведенных исследований установлено, что сейсмическая активность зоны главного разрыва Чуйского землетрясения продуцируется не только глубинным афтершоковым процессом, но и более слабыми событиями, связанными с блоковым строением трещиноватой зоны. Наиболее информатив-

ными параметрами, характеризующими динамику процесса восстановления среды, являются амплитудно-частотные характеристики как полного волнового поля, так и локальных волновых пакетов от микросейсмических событий.

Область применения

Пространственно распределенная бескабельная система регистрации сейсмических данных (в том числе трехкомпонентных) на основе автономных регистраторов предназначена для выполнения высокоточных сейсмических измерений, в том числе длительных, например, при проведении глубинных исследований, сейсмическом и сейсмологическом мониторинге. Но их можно использовать и для сбора и регистрации данных высокоразрешающих съемок [17–20].

Одним из перспективных направлений применения бескабельных систем регистрации и сбора

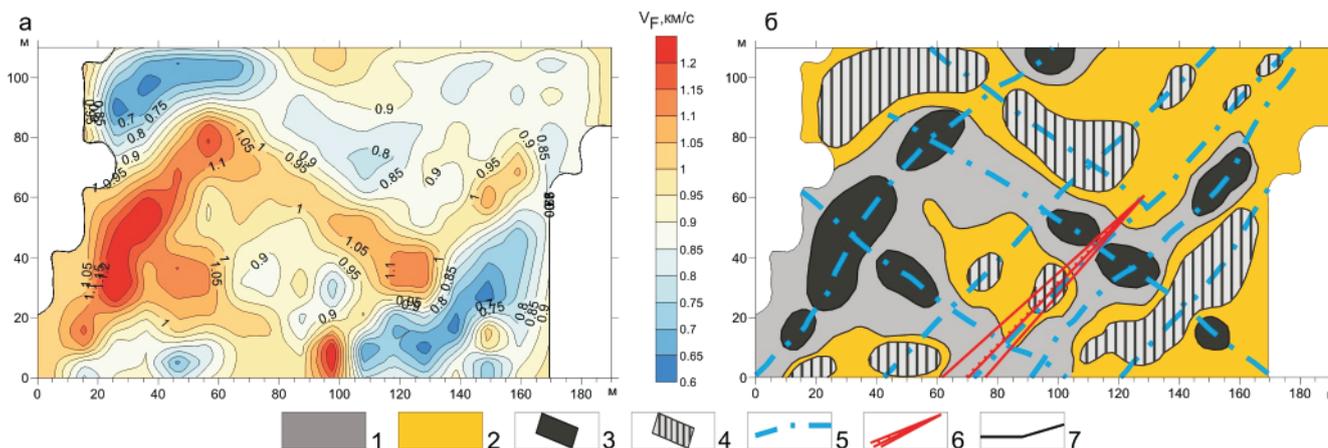


Рис. 8. Геолого-геофизические результаты, полученные при исследованиях в шахте им. В. И. Ленина: а – сейсмотомографический разрез угольного пласта по параметру скорости каналовой волны, км/с; б – латеральная геологическая модель

Зоны плотности угольного пласта: 1 – высокой, 2 – низкой; локальные участки повышенной плотности угольного пласта: 3 – повышенной (повышенной напряженности, пониженной проницаемости, пониженной трещиноватости), 4 – пониженной (повышенной трещиноватости, пониженной напряженности и повышенной проницаемости); 5 – шарниры складчатых структур; 6 – прогнозная зона разрывного нарушения по геологическим данным; 7 – граница углей различной плотности

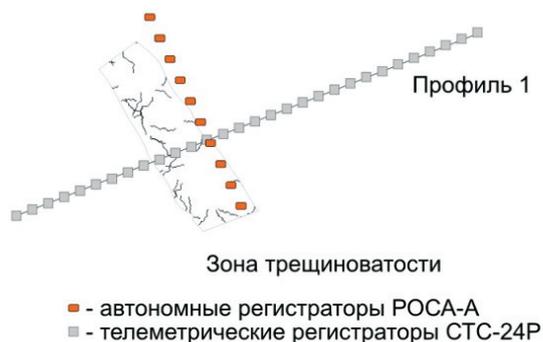
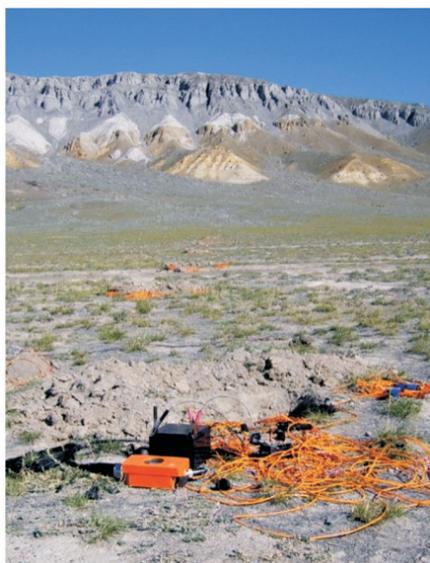


Рис. 9. Схема сейсмического мониторинга (2007 г.) с автономными регистраторами РОСА-А

данных является возможность решения следующих задач:

- локальное увеличение кратности наблюдения на площади, например около скважины, и/или для детального изучения верхней части разреза;
- организация одновременной записи однокомпонентных (1С) и многокомпонентных (3С) данных с использованием различного типа датчиков (аналоговых и/или цифровых);
- обеспечение сейсмических работ в особо сложных геоморфологических условиях, например на заболоченных участках, в речной сейсморазведке или на больших удалениях при ГСЗ;
- проведение сейсмических исследований в условиях неустойчивого приема спутниковых сигналов или их отсутствия, в том числе на горнодобывающих предприятиях (наземных и подземных);
- выполнение активного и пассивного сейсмического мониторинга, обеспечение организации не-

прерывной записи микросейсмического процесса (пассивный сейсмический мониторинг).

Выводы

За 10 лет эксплуатации автономной сейсмической станции РОСА-А не было отказа полевого оборудования с потерей информации, все работы были выполнены в полном объеме и в требуемые сроки. Заметим, что первые автономные регистраторы, изготовленные в 2006 г., используются до сих пор. Потенциал технических решений и идей развития не исчерпан и постоянно пополняется одновременно с развитием уровня техники [15].

В результате исследований в области регистрации слабых сейсмических сигналов показано, что малошумящий высокочувствительный цифровой канал автономной станции РОСА-А позволяет регистрировать сигналы в широком частотном диапазоне – практически от нуля до 3,2 кГц.



Экспериментально подтверждено, что низкий уровень собственных аппаратурных шумов позволяет отказаться от группирования геофонов. Качественный цифровой канал записи служит определяющей основой для реализации современного класса сейсмической аппаратуры – автономного регистратора, совмещенного с геофоном, при этом синфазная помеха устраняется практически полностью посредством экранирования геофона.

Высококачественный цифровой 24-разрядный канал автономных регистраторов РОСА-А имеет динамический диапазон, достаточный для регистрации слабых сейсмических сигналов (на уровне микросейсм), и позволяет провести широкий спектр сейсмических и сейсмологических исследований, включая методики пассивной сейсморазведки и режим наблюдения в реальном времени.

Обобщая результаты работы, можно определить **требования к перспективной системе для последующей разработки и внедрения.**

Для повышения производительности работ и, следовательно, уменьшения времени расстановки в поле оборудования, облегчения этапа настройки и контроля необходимо перейти к использованию одноточечных станций. Станция должна быть одно-, двух-, трехканальной в зависимости от типа сейсмодатчика.

В этом случае при отсутствии косы нет дополнительной процедуры смотки и размотки кабелей. Важно отметить, что исчезает и проблема грозозащиты.

Необходимо укомплектовать станцию встроенным современным литий-ионным аккумулятором, при этом использование внешнего аккумулятора или солнечной батареи не отменяется.

Для повышения синхронизации станций в отсутствие спутников, например в шахте, следует добавить скоростную проводную синхронизацию. Опыт такой синхронизации имеется. Время синхронизации составляет всего 8 с против 256 с по спутниковым сигналам.

Что касается элементной базы для построения такой станции, то использовать нужно последние достижения в электронике в части как аналоговых микросхем, так и микропроцессоров и логических матриц. Пластмассовый корпус можно признать более практичным и удобным, чем металлический. Переход на SD-карту с возможностью механического съема накопителя – обязательное условие наряду с наличием USB, Wi-Fi, Ethernet (по заказу пользователей). В дальнейшем, с учетом появления новейшей элементной базы, важно сосредоточиться на вопросах снижения себестоимости, уменьшения веса и энергопотребления, повышения надежности и качества сервисных функций сейсмических систем регистрации и сбора данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автономная** система сбора сейсмических данных: Патент № 103937 (RU) на полезную мо-

дель / А. В. Вершинин, О. М. Сагайдачная, А. В. Сагайдачный и др. – Приоритет от 22 декабря 2010 г., опубл. 27.04.2011. Бюл. № 12.

2. **Автономные** регистраторы РОСА-А для высокоточных сейсмических наблюдений / О. М. Сагайдачная, А. В. Сагайдачный, А. С. Сальников и др. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 40–43.

3. **Автономный** регистратор сейсмических сигналов: Патент № 2331087 (RU) на изобретение / О. М. Сагайдачная, А. В. Сагайдачный, А. С. Сальников и др. – Приоритет от 09.01.2007, опубл. 10.08.2008. Бюл. № 22.

4. **Автономный** регистратор сейсмических сигналов и устройство автоматической настройки и коррекции тактовой частоты автономного регистратора сейсмических сигналов: Патент № 2366981 (RU) на изобретение / А. Н. Шмыков, О. М. Сагайдачная, А. В. Сагайдачный, А. С. Сальников. – Приоритет от 08.04.2008, опубл. 10.09.2009. Бюл. № 25.

5. **Бескабельная** система регистрации РОСА-А – техническая основа активного и пассивного сейсмического мониторинга / О. М. Сагайдачная, А. С. Сальников, А. В. Сагайдачный, А. Н. Шмыков // 5-я Международная выставка «НЕДРА-2008». Тез. науч.-техн. конф. «Техно-технологическое обеспечение геолого-разведочных работ. Проблемы и перспективы», 1–4 апреля 2008 г.: официальный каталог ВВЦ, Москва. – М., 2008. – С. 135–138.

6. **Ермаков Б. Д.** Особенности регистрации слабых сигналов в сейсморазведке. – М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1995. – 46 с.

7. **Липилин А. В., Никитин А. А., Черемисина Е. Н.** Проблемы комплексной интерпретации геофизических данных по региональным профилям и пути их решения. – Геофизика. – 2002. – № 4. – С. 3–6.

8. **Многомерная** система наблюдений на основе сейсмических регистраторов семейства РОСА® / О. М. Сагайдачная, А. С. Сальников, А. В. Сагайдачный и др. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2010. – № 2. – С. 32–33.

9. **Первые** результаты производственного опробования автономных регистраторов РОСА-А при работах ГСЗ / О. М. Сагайдачная, А. В. Сагайдачный, А. С. Сальников и др. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 4. – С. 43–47.

10. **Полевые** сейсмические работы на опорных профилях северо-востока России / А. С. Сальников, О. М. Сагайдачная, А. В. Липилин и др. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2009. – № 2. – С. 46–54.

11. **Сагайдачный А. В., Шмыков А. Н.** Бескабельное устройство для регистрации сейсмических данных: Патент РФ № 41376 (полезная модель). – Приоритет от 24.05.2004 г., опубл. 20.10.2004. Бюл. № 20.



12. **Сейсмические** исследования в шахтах с использованием автономной системы регистрации РОСА-А / О. М. Сагайдачная, К. А. Дунаева, Б. А. Канарейкин и др. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2011. – № 4. – С. 40–45.

13. **Устройство** автономной регистрации сейсмических сигналов: Патент № 90223 (RU) на полезную модель / А. Н. Шмыков, А. В. Вершинин, О. М. Сагайдачная и др. – Приоритет от 10.09.2009, опубл. 27.12.2009. Бюл. № 36.

14. **Устройство** регистрации сейсмических сигналов: Патент № 142337 (RU) на полезную модель / А. С. Сальников, Т. А. Сальников, А. Н. Шмыков и др. – Приоритет от 04.02.2014, опубл. 27.06.2014. Бюл. № 18.

15. **Шмыков А. Н., Сагайдачная О. М., Сальников А. С.** Автономный высокочастотный сейсмический регистратор: Патент № 161816 (RU) на полезную модель. – Приоритет от 31.12.2015, опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13.

16. **A distributed** data recording system as a basis for modem seismic Research Technologies / О. М. Sagaidachnaya, А. V. Sagaidachny, А. S. Salnikov et al. // 69th EAGE Conference & Exhibition, London, Abstracts P187. – London, 2007. – 4 p.

17. **Flavell Smith J.** How a new cable-less land seismic survey acquisition system was born // FIRST BREAK – An EAGE Publication. – 2006. – February, vol. 24. – P. 79–82.

18. **Heath B.** Land seismic: the move towards the mega-channel // FIRST BREAK – An EAGE Publication. – 2008. – February, vol. 26. – P. 53–58.

19. **Heath B.** Weighing the role of cableless and cable-based systems in the future of land seismic acquisition // FIRST BREAK – An EAGE Publication. – 2010. – June, vol. 28. – P. 69–77.

20. **Mougenot D.** Land cableless systems: use and misuse // FIRST BREAK – An EAGE Publication. – 2010. – February, vol. 28. – P. 55–58.

21. **Seismic** channel basic characteristics for weak signal registration by point group of geophones / О. М. Sagaidachnaya, А. S. Salnikov, А. V. Vershinin et al. // 72th EAGE Conference & Exhibition, Barcelona, Abstracts P292. – Barcelona, 2010.

REFERENCES

1. Vershinin A.V., Sagaidachnaya O.M., Sagaidachny A.V., Salnikov A.S., Shmykov A.N. *Autonomnaya sistema sbora seismicheskikh dannykh* [Autonomous system of seismic data acquisition]. Patent RF, no. 103937 (RU), priority of December 22, 2010, published 27.04.2011, bul. no. 12. (In Russ.).

2. Sagaidachnaya O.M., Sagaidachny A.V., Salnikov A.S., et al. [Autonomous recorders ROSA-A for high-precision seismic observations]. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki – Instruments and systems of exploration geophysics*, 2006, no. 2. (In Russ.).

3. Sagaidachnaya O.M., Sagaidachny A.V., Salnikov A.S., Shmykov A.N., Shchegolkov A.V. *Autonomnyy registrator seismicheskikh signalov* [Autonomous seis-

mic signal recorder]. Patent RF, no. 2331087 (RU), priority of 09.01.2007, published 10.08.2008, bul. no. 22. (In Russ.).

4. Shmykov A.N., Sagaidachnaya O.M., Sagaidachny A.V., Salnikov A.S. *Autonomnyy registrator seismicheskikh signalov i ustroystvo av-tomaticheskoy nastroyki i korrektsii taktovoy chastoty avtonomnogo registratora seismicheskikh signalov* [An autonomous seismic signal recorder and a device for automatic tuning and correction of the clock frequency of an autonomous seismic signal recorder]. Patent no. 2366981 (RU), priority of 08.04.2008, published 10.09.2009, bul. no. 25. (In Russ.).

5. Sagaidachnaya O.M., Salnikov A.S., Sagaidachny A.V., Shmykov A.N. [The ROSA-A cable-free recording system is the technical basis for active and passive seismic monitoring]. *5-ya mezhdunarodnaya vystavka «NEDRA-2008», tezisy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhniko-tekhnologicheskoe obespechenie geologorazvedochnykh работ. Problemy i perspektivy», 1–4 aprelya 2008 g., Moskva* [The 5th international exhibition “NEDRA-2008”, theses of the scientific and technical conference “Technical and technological support of geological exploration. Problems and prospects”, April 1–4, 2008, Moscow]. *Ofitsial’nyy katalog VVTs – Official catalog of All-Russia Exhibition Center*. Moscow, 2008. (In Russ.).

6. Ermakov B.D. *Osobennosti registratsii slabyykh signalov v seysmorazvedke* [Features of recording weak signals in seismic surveys]. Moscow, AOZT Geoinform-mark Publ., 1995. 46 p. (In Russ.).

7. Lipilin A.V., Nikitin A.A., Cheremisina E.N. [Problems of complex interpretation of geophysical data on regional profiles and ways to solve them]. *Geofizika – Geophysics*, 2002, no. 4, pp. 3–6. (In Russ.).

8. Sagaidachnaya O.M., Salnikov A.S., Sagaidachny A.V., Shmykov A.N., Vershinin A.V. [Multidimensional field geometry of the basis of the ROSA® family seismic recorders]. *Geologiya i mineral’no-syr’evye resursy Sibiri – Geology and mineral resources of Siberia*, 2010, no. 2, pp. 32–33. (In Russ.).

9. Sagaidachnaya O.M., Sagaidachny A.V., Salnikov A.S., Shmykov A.N., Shchegolkov A.V. [The first results of production testing of autonomous ROSA-A recorders in the DSS operations]. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki – Instruments and systems of exploration geophysics*, 2006, no. 4, pp. 43–47. (In Russ.).

10. Salnikov A.S., Sagaidachnaya O.M., Lipilin A.V., et al. [Field seismic surveys on the basic profiles of the northeast of Russia]. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki – Instruments and systems of exploration geophysics*, 2009, no. 2, pp. 46–54. (In Russ.).

11. Sagaidachny A.V., Shmykov A.N. *Beskabel’noe ustroystvo dlya registratsii seismicheskikh dannykh* [Cable-free device for recording seismic data]. Patent RF, no. 41376 (utility model), priority of 24.05.2004. Published 20.10.2004, bul. no 20. (In Russ.).

12. Sagaidachnaya O.M., Dunaeva K.A., Kanareykin B.A., Salnikov A.S., Shmykov A.N. [Seismic stud-



ies in mines using an autonomous ROSA-A recording system]. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki – Instruments and systems of exploration geophysics*, 2011, no. 4, pp. 40–45. (In Russ.).

13. Shmykov A.N., Vershinin A.V., Sagaydachnaya O.M., Sagaydachny A.V., Salnikov A.S. *Ustroystvo avtonomnoy registratsii seysmicheskikh signalov* [Device for autonomous rerecording of seismic signals]. Patent no. 90223 (RU), priority of 10.09.2009, published 27.12.2009, bul. no. 36. (In Russ.).

14. Salnikov A.S., Salnikov T.A., Shmykov A.N., Sagaydachnaya O.M., Sagaidachny A.V. *Ustroystvo registratsii seysmicheskikh signalov* [Seismic signal recorder]. Patent no.142337 (RU), priority of 04.02.2014, published 27.06.2014, bul. no. 18. (In Russ.).

15. Shmykov A.N., Sagaydachnaya O.M., Salnikov A.S. *Avtonomnyy vysokochastotnyy seysmicheskyy registrator* [Autonomous high-frequency seismic recorder]. Patent no. 161816 (RU), priority of 31.12.2015, published 10.05.2016, bul. no. 13. (In Russ.).

16. Sagaydachnaya O.M., Sagaydachny A.V., Salnikov A.S., Shmykov A.N., Shegolkov A.V. A distributed

data recording system as a basis for modern seismic research technologies. *69th EAGE Conference & Exhibition, London, Abstracts P187*. London, 2007. 4 p.

17. Flavell Smith J. How a new cable-less land seismic survey acquisition system was born. *FIRST BREAK – An EAGE Publication*, 2006, February, vol. 24, pp. 79–82.

18. Heath B. Land seismic: the move towards the mega-channel. *FIRST BREAK – An EAGE Publication*, 2008, February, vol. 26, pp. 53–58.

19. Heath B. Weighing the role of cableless and cable-based systems in the future of land seismic acquisition. *FIRST BREAK – An EAGE Publication*, 2010, June, vol. 28, pp. 69–77.

20. Mougnot D. Land cableless systems: use and misuse. *FIRST BREAK – An EAGE Publication*, 2010, February, vol. 28, pp. 55–58.

21. Sagaydachnaya O.M., Salnikov A.S., Vershinin A.V., Sagaydachny A.V., Shmykov A.N. Seismic channel basic characteristics for weak signal registration by point group of geophones. *72th EAGE Conference & Exhibition, Barcelona, Abstracts P292*. Barcelona, 2010.

© О. М. Сагайдачная, А. С. Сальников,
А. В. Сагайдачный, А. Н. Шмыков, Т. А. Сальников, 2018