

А. С. Сальников¹✉

Автономные сейсмические станции для инженерно-геологических исследований наземно-подземных объектов в угольных шахтах

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: assalnikov@mail.ru

Аннотация. Сейсмические работы в угольных шахтах проводятся с целью выявления зон геологических неоднородностей в лавах, что позволяет снизить издержки при добыче угля и исключить катастрофические последствия при внезапном обнаружении нарушений продуктивного пласта, не вскрытых подготовительными выработками. Сейсмотомографический способ просвечивания углевмещающей среды по латерали на проходящих волнах (каналовых, объёмных продольных и поперечных) позволяет изучать плотностную структуру угольного пласта. Работы по описанной методике выполнены на нескольких шахтах Кузнецкого угольного бассейна. Полученные сейсмотомографические материалы подтверждают приоритет геодинамики в формировании внутренней структуры угольных пластов. Отмечается дискретный (мелкоячеистый) характер структуры пластов и выраженная зависимость от степени дислоцированности углевмещающей среды и метаморфизма угля. Дано обоснование слоисто-мозаичного пространственного распределения метановых ловушек в угольных пластах.

Ключевые слова: сейсмотомографическая обработка, угольные пласты Кузбасса, скорость продольных, поперечных и каналовых волн, геодинамика

A. S. Salnikov¹✉

Autonomous seismic stations for engineering and geological studies of surface-underground facilities in coal mines

The Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics of the Siberian branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: assalnikov@mail.ru

Abstract. Seismic works in coal mines are carried out with the purpose of disclosing of geological heterogeneity zones in lavas, it allows to decrease the expenses of coal production and to exclude the disastrous effects in view of unexpected detection of productive stratum breaking which was not disclose by preparatory excavation. Seismic tomography method of coal measure strata raying on lateral transmitted waves (guided, volume longitudinal and shear waves) allows studying the density structure of coal bed. Works by defined method were carried out in some mines of Kuznetsk Basin. Obtained seismic tomography data confirm a priority of geodynamics for forming the coal bed internal structure. Discrete (close-meshed) nature and pronounced dependence of dislocated degree of coal measure strata and coal metamorphism are noted. Lamellar-mosaic spatial distribution of methane traps in coal beds is substantiated.

Keywords: seismic tomography processing, coal beds of Kuznetsk Basin, velocity of longitudinal, shear and guided waves, geodynamics

Введение

Опережающий контроль условий залегания угольных пластов и выявления зон повышенной трещиноватости позволяет оптимизировать технологию обработки участка шахтного поля, определить местоположение песчаных врезов, ме-

ханически ослабленных зон и зон повышенного метановыделения и исключить катастрофические последствия при внезапном обнаружении нарушений продуктивного пласта, не вскрытых подготовительными выработками. К числу эффективных геофизических методов детального восстановления особенностей структуры угольного пласта в подземных выработках относятся сейсмотомографические исследования на проходящих (каналовых, объемных продольных и поперечных) волнах [1, 2, 3].

Работы по изучению угольных пластов и углевмещающих пород в шахтах имеют свои специфические особенности, которые связаны, во-первых, с минимизацией рисков по охране труда в зонах возможных горных ударов, а также обеспечением необходимой для детальных инженерно-геологических работ временной привязкой (погрешность менее 1мс/сутки) в отсутствии спутниковых сигналов синхронизации, а во-вторых, с оптимальными системами сейсмических наблюдений и способами интерпретации полученных материалов.

Методика исследований

Совместно с ОАО НЦ ВостНИИ (г. Кемерово) были проведены сейсмические исследования в шахтах Кузбасса по способу просвечивания угольных пластов в 2010 – 2013 гг. [4] Полевая методика сейсмических работ включала систему многократных перекрытий на проходящих волнах, которая определяется технологическими схемами эксплуатации угольных месторождений, в том числе размерами выемочного столба и размерами искомого нарушения (Рис.1б). Принципиально важно обеспечивать максимально равномерное просвечивание изучаемого объекта на сейсмических волнах. Пункты возбуждения и приема упругих колебаний располагались в штреках с шагом 5-10 м. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось ударным способом (кувалдой). Запись сейсмического материала осуществлялась с использованием автономной сейсмической станции РОСА-А® (ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск. Рис. 1а [5]).

В соответствии с требованиями Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» было получено временное заключение № 189-7 от 22.12.2009 г. на применение автономных станций РОСА-А в угольных шахтах. Важнейшим условием использования в шахтах сейсмических станций РОСА-А послужила система высокоточной синхронизации времени при отсутствии спутниковых сигналов, которая на базе прецизионного термостатированного генератора обеспечивала работу в автономном режиме с погрешностью менее ± 1 мс/сутки [5].

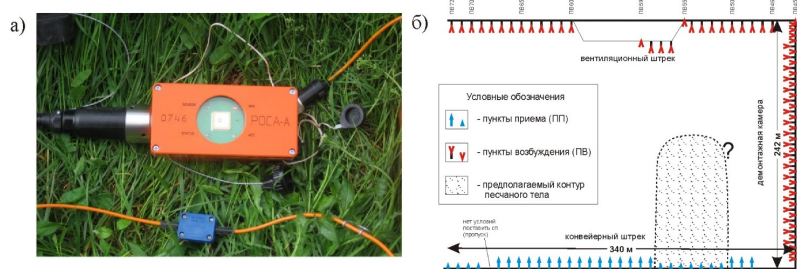


Рис. 1. Оборудование для работы в шахтах
а) автономный сейсмический регистратор РОСА-А; б) принципиальная схема сейсмических наблюдений в угольной шахте;

Системы многократных перекрытий с автономными регистраторами обладают необходимым преимуществом, обусловленным отсутствием проводных линий связи между пунктом возбуждения и пунктом приёма, находящихся в разных штреках. Большой динамический диапазон сейсмического канала станции РОСА-А (мгновенный диапазон до 135 дБ) и широкий частотный диапазон регистрации ($0 \div 1600$ Гц) позволили получить качественный материал в условиях высокого уровня микросейсм при работающих механизмах (Рис. 2).

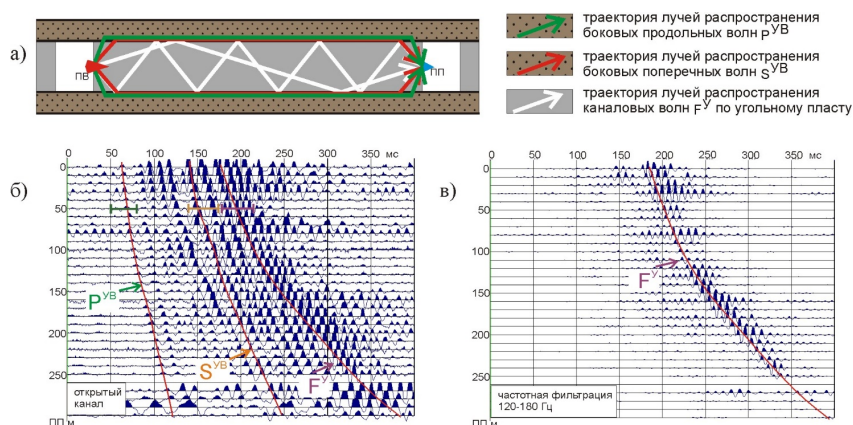


Рис. 2. Типичные сейсмограммы общей точки возбуждения (ОТВ)
а) Лучевая схема для проходящих волн; типичные сейсмограммы ОТВ:
б) на открытом канале, в) после полосовой частотной фильтрации

На полученных сейсмозаписях были выделены три группы волн, которые различались по кинематическим и динамическим характеристикам: времени регистрации, волновой форме записи и преобладающей частотой (Рис. 2б, в). Принимая во внимание модельные расчеты сейсмоакустических полей (лучевая схема для проходящих волн приведена на рисунке 2а), выделенные группы волн были идентифицированы следующим образом:

- продольные объёмные волны P^{UV} , распространяющиеся по вмещающим угольный пласт породам (боковые волны), регистрируются в первых вступлениях;
- поперечные объёмные волны S^{UV} , распространяющиеся по вмещающим угольный пласт породам (боковые волны), регистрируются в последующих вступлениях;
- волноводные (каналовые) волны F^Y , распространяющиеся по угольному пласту, формируются протяженным цугом колебаний, характеризуются особенностями: нет четких первых вступлений; быстро меняется полярность и временная форма по фронту распространения. Наилучшая прослеживаемость каналовых волн F^Y на сейсмограммах достигается при полосовой фильтрации в диапазоне $120 \div 250$ Гц (и выше).

Сейсмотомографическая обработка полученных материалов выполнялась с использованием программы «PROFIT» (автор Кулаков И.Ю., Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, [6]). Её алгоритм использует в качестве

входных данных времени пробега рефрагированных и прямых волн (годографы волн P^{VB} , S^{VB} , F^V) для построения двумерных вдольпластовых сейсмотомографических разрезов по значениям параметра скорости. Лучевое трассирование основано на итеративном изгибе луча для достижения минимального времени пробега (принцип Ферма). Реализованный алгоритм обеспечивает абсолютную устойчивость трассирования в средах любой сложности (включая анизотропные), при фиксированном количестве итераций. Томографические расчеты выполняются с применением адаптивных сеток параметризации в соответствии с плотностью лучей.

Результаты исследований

В результате проведенных исследований было установлено, что для ряда шахт Кузбасса сейсмотомографическая латеральная модель углевмещающей среды характеризуется относительной однородностью. В её пределах удастся выделить ограниченное число достаточно протяженных структурных элементов, таких как дизъюнктивные дислокации, содизъюнктивные трещиноватые зоны, зоны повышенной и пониженной плотности, зоны повышенной водонасыщенности (рис. 3).

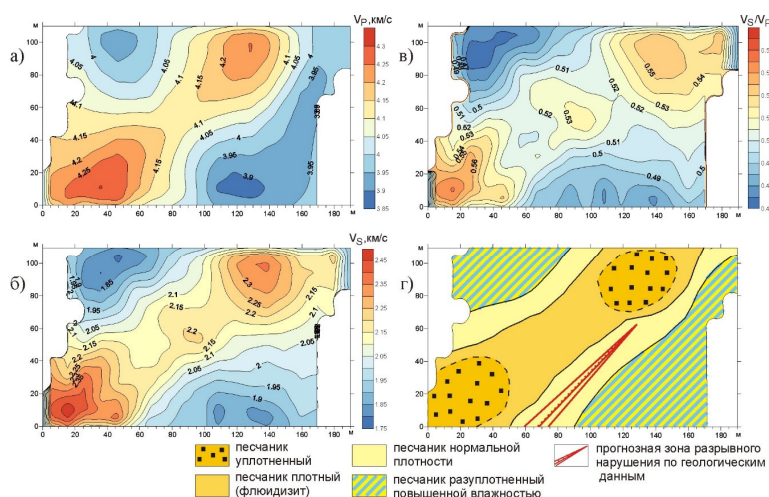


Рис. 3. Сейсмотомографические разрезы в углевмещающей среде: а) по параметру скорости продольной волны P^{VB} , км/с; б) по параметру скорости поперечной волны S^{VB} , км/с; в) по отношению скоростей V_s/V_p ; г) латеральная геологическая модель. Шахта им. Ленина

Сейсмотомографические латеральные модели угольных пластов в целом более расчленены, характеризуются существенно большим набором составляющих их структурных элементов (рис. 4а). В условиях слабой дислоцированности углевмещающей толщи (марки угля Г, Ж) латеральная модель угольного пласта может быть отождествлена со слабо-упорядоченной блочно-трещиноватой средой, расчлененной плотной сетью дислокаций различной природы (рис. 4б). Межблоковые дислокации следует рассматривать как трещиноватые зоны, как фильтрационные каналы. Выделяются также достаточно контрастные и протя-

женные, линейные зоны, которые можно отождествить с дизъюнктивными дислокациями, а содизъюнктивные зоны рассматривать как угольные коллектора, как зоны повышенной проницаемости угля.

Кроме того, практика работ в шахтах выявила определенные недостатки станции РОСА-А, которые следовало минимизировать. Прежде всего, необходимо было модернизировать способ временной синхронизации, предусмотреть возможность быстрого восстановления синхронизации в шахте в случае сбоя рабочего сеанса. Необходимо было уменьшить вес сейсмического оборудования, переносимого в шахтах вручную. Требовалось, как обязательное условие, обеспечить синхронизацию каналов регистрации вне зависимости от спутников, непосредственно в шахтах. Необходимо было отказаться от внешнего питания и кабелей, а также исключить лишние разъемы.

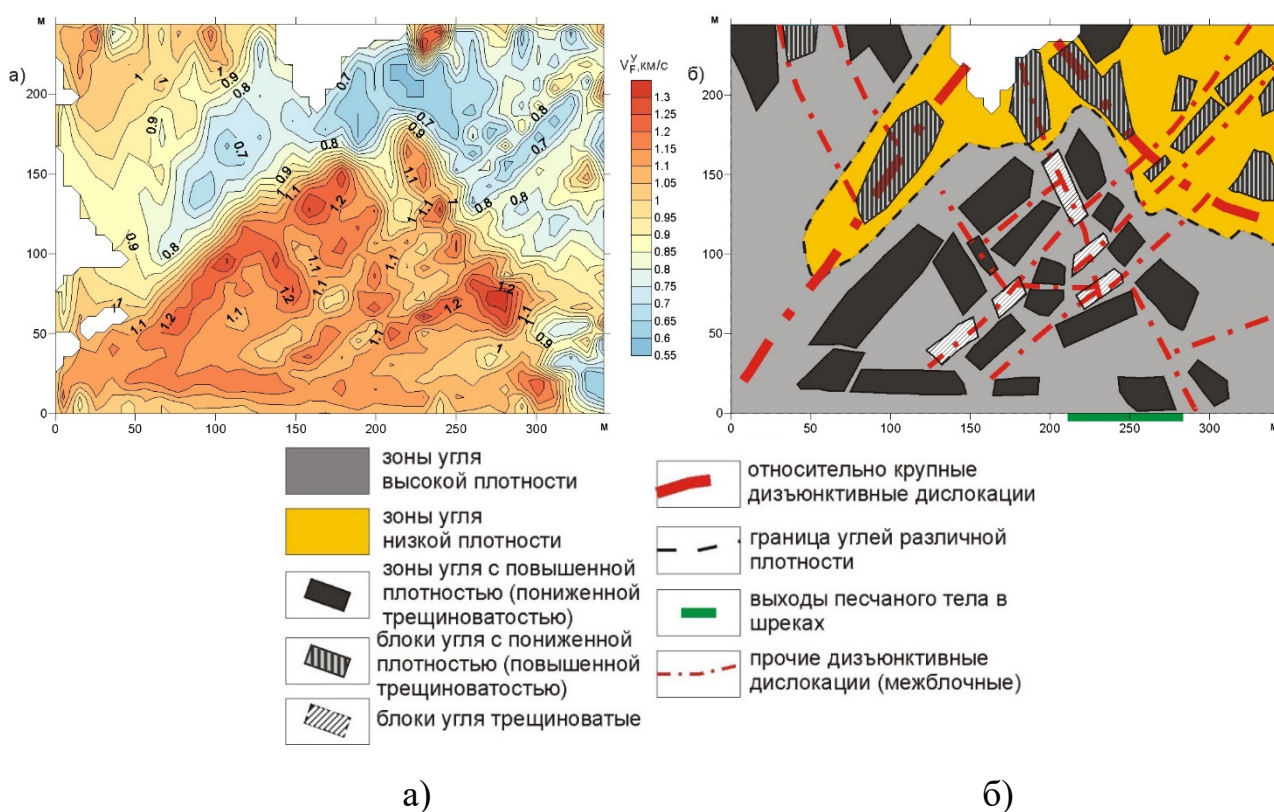


Рис. 4. Результаты работ в шахте Байкаимская а) Сейсмотомографический разрез по значениям скорости каналовых волн V_F^y ; б) латеральная геологическая модель.

Автономный одноканальный сейсмический регистратор Р1 (с маркировкой взрывозащиты РО Ex ia I Ma) был разработан в 2016 г [7]. Регистратор предназначен для проведения сейсмических наблюдений в особо сложных климатических и геоморфологических условиях, когда неустойчиво функционируют стандартные способы синхронизации станции. Регистратор выполнен в корпусе шахтерского фонаря типа НГР (Рис. 5).



Рис. 5. Автономный одноканальный сейсмический регистратор Р1 а) и пульт оператора б)

В 2017 г. была изготовлена партия из 30 автономных одноканальных сейсмических регистраторов по заказу Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово). Получен сертификат соответствия требованиям Технического регламента Таможенного союза № ТС RU C-RU.MH04.F.00540. Данные регистраторы успешно работают в шахтах Кузбасса по настоящее время, обеспечивают высокую производительность и надёжность сейсмических исследований в подземных выработках шахт и наземных строений, опасных по рудничному газу и/или горючей пыли.

Технология работы автономной станции (в состав оборудования входят собственно одноканальные автономные сейсмические регистраторы Р1, пульт оператора один на группу, кабели зарядные и синхронизации) происходит следующим образом. Настраивается первый регистратор Р1, эталон, в соответствии с требованиями полевого эксперимента. Далее все настройки эталона переносятся в ведомые регистраторы. Процедура подготовки к работе 30 регистраторов занимает по времени менее 10 минут. При этом гарантируется перенос времени с погрешностью менее 10⁻⁸, копирование текущих параметров регистрации. Восстановление синхронизации от любого рабочего регистратора автономной станции возможно в любом месте за время менее 10 с, достаточно соединения кабелем синхронизации с другим работающим регистратором.

Текущее состояние регистраторов, напряжение аккумуляторов, готовность синхронизации к работе отслеживается по светодиодной индикации. Подготовленные регистраторы заносятся в шахту. Все регистраторы пишут сейсмические данные без перерывов в течение всего рабочего времени. Считывание данных по окончании работ производится на дневной поверхности через USB порт. Перед выключением можно снять при помощи пульта относительный временной дрейф часов за время работы с точностью до микросекунд.

Функцию отметчика момента берет на себя один из регистраторов, допускается подключать к нему внешний датчик. Контактный/бесконтактный датчик подключается к внешнему искробезопасному разъему регистратора.

Заключение

Сейсмотомографический способ просвечивания углевмещающей среды по латерали на проходящих волнах (каналовых, объёмных продольных и поперечных) позволяет изучать плотностную структуру угольного пласта.

Отмечается приоритет геодинамики в формировании внутренней структуры угольных пластов. Установлена блочно-трещиноватая структура угольных месторождений Кузнецкого бассейна, обусловленная складчатыми процессами углевмещающей толщи и особенностями её литологии. Отмечается выраженная зависимость структуры угольного пласта от степени дислоцированности углевмещающей среды и метаморфизма угля.

Многолетний опыт в разработке, изготовлении и эксплуатации автономных сейсмических станций РОСА-А позволил создать эффективную аппаратуру. Была обеспечена высокоточная синхронная работа нескольких устройств, удалось значительно упростить способ взаимной синхронизации, как по времени, так и по процедуре.

Синхронизация в автономном одноканальном регистраторе основана только на высокостабильном термостатированном генераторе с цифровой коррекцией частоты и времени. Точность переноса секундного импульса составляет ± 10 нс. Реализованный в устройстве способ использования высокостабильного термостатированного генератора (суточный уход менее 1 мс/сутки) обеспечил проведение сейсмических работ в особо сложных условиях, где прокладка кабелей вызывает не преодолимые трудности.

Одноканальный автономный сейсмический регистратор отвечает требованиям Технических регламентов Таможенного союза по безопасности, разрешающим работать в угольных шахтах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азаров Н.Я., Яковлев Д.В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений - М.: Недра, 1988. 199 с.
2. Сейсмический способ выявления геологических неоднородностей в угольных пластах: Патент №2455663 (RU) / А.С. Сальников, О.М. Сагайдачная [и др.] // *приоритет от 15.04.2011*, опубликовано: 10.07.2012. Бюл. №19.
3. Жуков Е. М., Кропотов Ю. И., Лугинин И. А., Полошков С. И. Обоснование актуальности выполнения сейсмических работ для прогнозирования аномальных зон в углепородном

массиве при детальной разведке угольных месторождений // Молодой ученый. — 2016. — № 3 (107). — С. 95-98. — URL: <https://moluch.ru/archive/107/25627/> (дата обращения: 15.01.2025).

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

5. Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Сальников А.С., Шмыков А.Н., Щегольков А.В. Автономный регистратор сейсмических сигналов // Патент №2331087 (RU), опубликовано: 10.08.2008 Бюл. 22.

6. Koulakov, I. Ur. Finding a realistic velocity distribution based on iterating forward modeling and tomographic inversion [Text] / I. Koulakov, H. Kopp, T. Stupina // Geophys. — 2011. — P. 349–358.

7. Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Шмыков А.Н. Автономный регистратор сейсмических данных // Патент №183333 (RU), опубликовано 18.09.2018 Бюл. 26.

© А. С. Сальников, 2025