

И.П. Башилов, Л.С. Загорский, Д.Л. Загорский, Ю.В. Рязанцев, В.И. Сачков,  
В.Л. Шкуратник, Г.Я. Шутов, С.Ю. Червинчук

## ТЕХНОЛОГИЯ МСП — МАЛОКАНАЛЬНОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ МОВСР\*

**Аннотация.** Рассмотрены теоретические предпосылки и практическая реализация метода пассивной сейсморазведки МОВСР в технологию малоканального сейсмического профилирования (МСП), только с базовой и перемещаемой сейсмостанциями. Для построения вертикального скоростного разреза используются как амплитуды, так и фазовые скорости волн Рэлея. При решении обратной задачи восстановления скорости продольной и поперечной волны, использованы спектральные многочлены Б.М. Левитана и интегральное уравнение Гельфанда-Левитана-Марченко. Использование всего двух сейсмостанций повышает мобильность метода. Технология может применяться для предварительной быстрой оценки скоростного разреза при поиске залежей УВ и других полезных ископаемых в труднодоступных местах, в первую очередь в условиях Крайнего Севера и шельфа Северного Ледовитого океана, где применение многоканальных методик оказывается слишком затратным и трудоемким. Технология иллюстрируется примером разреза по профилю на участке Качугского района Иркутской области.

**Ключевые слова:** метод пассивной сейсморазведки, сейсмостанция, полезные ископаемые, оценка скоростного разреза, сейсмические разрезы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-128-139

### Введение

Пассивные микросейсмические методы, основанные на анализе естественных колебаний земной коры, позволяют проводить ее исследования без использования искусственных источников возбуждения. Эти методы позволяют получать разнообразную информацию о строении и свойствах земной коры, хорошо дополняя стандартные геофизические и дистанционные методы зондирования земных недр. К настоящему времени в мире разработано и используется несколько технологий пассивных микросейсмических исследований [1–18].

Однако, для большинства методов использование слабых сигналов микросейсм на фоне помех, приводит к необходимости удлинения записей от нескольких часов до нескольких суток и, как следствие, к увеличению количества дорогостоящих сейсмостанций, объема записываемой информации и времени обработки. Это существенно снижает оперативность и повышает стоимость работ.

Разработанный недавно в России д.ф.-м.н. Л.С. Загорским и д.т.н. В.Л. Шкуратником пассивный метод определения вертикального скоростного разреза

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0237.

Авторы выражают благодарность за оказанное содействие в выполнении практической части данной работы руководству компании ООО «Нормаль Ойл», которая владеет лицензией на исследуемый участок.

(МОВСР) [1], с использованием регистрируемых на поверхности суши или морского дна волн поляризации типа Рэлея, позволяет оперативно, с минимальными затратами, производить поиск скоростных и плотностных аномалий в земной коре, приуроченных к залежам полезных ископаемых, в частности нефти, газа и воды. Важным преимуществом волн типа Рэлея является их существование при самом широком диапазоне изменения скоростей и плотностей в твердых телах и вблизи границ их раздела с жидкостью.

На базе этого метода разработан программно-аппаратный комплекс для технологии МСП — Малоканального Сейсмического Профилирования, позволяющий проводить исследования с числом сейсмостанций от 2-х и более.

Применение малоканальной методики позволяет оперативно строить сейсмические разрезы в условиях слабых техногенных шумов, что имеет место именно в труднодоступных местах. В дальнейшем, по мере развития малогабаритных сейсмостанций, возможно также дистанционное перемещение базовой и приемной станций с помощью квадрокоптеров на суше и подводных дронов на море.

### **МОВСР — теоретическая основа технологии МСП**

Метод позволяет решать обратную задачу нахождения скоростей продольных и поперечных волн в разрезе, соответствующем массиву с числом расчетных точек, достигающим четырехсот тридцати по результатам профильных измерений длительностью от 300 с с заданным шагом.

Диапазон глубин зондирования от единиц метров до десятков километров в зависимости от типа применяемого оборудования. Алгоритм метода предусматривает применение многомодового дисперсионного анализа и вычисления

опорных точек по скорости волны в алгебраических многочленах Б.М. Левитана. Таким образом решается уравнение:

$$G + A + G * A = 0,$$

где  $G$  — функция Грина,  $*$  означает свертку, а для нулевого приближения  $G = -A$ . Для конечного участка профиля  $L$  будем иметь:

$$G + A + LGA = 0.$$

$G, A$  относятся к интегральной средней точке по теореме о среднем. Откуда следует для удержания нужной глубины требование постоянства общей длины профиля. Для периода получим:

$$G + A(E + LG) = 0. G + A * 2 * E = 0,$$

где  $E$  — единичная матрица. Двухмерное интегральное уравнение Гельфанда-Левитана выглядит так:

$$G(0, 0, t) + A(0, 0, t) + \int_{-\infty}^{\infty} G \cdot A dt = 0,$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} G \cdot A dt = -\lim_{n \rightarrow \infty} (G(0, 0, nT) + A(0, 0, nT)),$$

$$G(x_1, x_2, t) + A(x_1, x_2, t) - G(0, 0, mT) - A(0, 0, mT) + \int_0^{x_1} \int_0^{x_2} \int_0^{mT} G(\xi, t) A(t, \xi) dt d\xi = 0,$$

$$z = 0,$$

$$G(x, 0, t) + A(x, 0, t) - G(0, 0, mT) - A(0, 0, mT) + \int_0^x \int_0^{mT} G(\xi, t) A(t, \xi) dt d\xi = 0,$$

$$t = mT, x = X,$$

$$G(x, 0, t) = G(0, 0, mT),$$

$$A(X, 0, t) - A(0, 0, mT) =$$

$$= -\int_0^X \int_0^{mT} G(\xi, t) A(t, \xi) dt d\xi,$$

$$F(A) - F(A_0) = -F(G) \cdot F(A),$$

$$(F(A_0) - F(A)) / (F(A) + \varepsilon) = F(G),$$

$$(F(A) - F(A_0)) / (F(A_0) + \varepsilon) = F(G).$$

где  $T$  — период;  $A_0$  — шум базы;  $A$  — шум в точках  $x$  профиля.

В методе МОВСР для определения скоростного разреза реализуется под-

ход, при котором на начальном этапе предполагается использование непрерывных функций скорости продольных и поперечных волн и постоянной плотности. Далее путем решения уравнения типа свертки, либо простым нахождением производных осуществляется переход к слоям.

Положительной стороной подхода является большое число восстанавливаемых точек, в которых вычисляется скорость поперечной волны (до 150–430), труднодостижимое слоистыми моделями (для прямой задачи по методу Томпсона-Хаскела), для которых возникнут матрицы большой размерности. Последние могут оказаться неопределенными на фоне погрешностей входных данных.

Другим преимуществом метода является возможность получения входной информации только из наблюдаемых сейсмограмм как для искусственного, так и для естественного (микросейсм) источника. И, наконец, погрешность вычислений отображается графически при самом решении, показывая асимптоты на больших и малых глубинах.

Преимущества метода в улучшении качества входных данных обеспечиваются за счет использования всего профиля измерений при определении фазовой скорости, что приводит к линейному функционалу при вычислении прямого Фурье — преобразования по координате вдоль профиля для уже приведенных к плоскому фронту волн.

В области подготовки данных для обработки используется амплитудный ряд мод волны Рэлея, вычисленных дисперсионным анализом. Трассы нормируются по максимуму амплитуды, а фронт волны от сферического или цилиндрического приводится к плоскому. Применение волн непрерывного спектра позволило получить начальные опорные точки разреза в первом линейном приближении по экстремумам годографа.

В области обработки предложено для волн типа Рэлея использовать: спектральные алгебраические многочлены третьей степени с эффективным нахождением границ дискретных собственных значений — лакун; преобразования вращения и обобщенного сдвига; формулы следов при аналитическом продолжении функции скорости поперечной волны по формуле Тэйлора в варианте Милна-Хэмминга; отдельную регуляризацию высоких и низких частот по Тихонову. Так как использовалась формула Тэйлора, то оказалось удобно взять в качестве первого ее слагаемого величину интегральной скорости первого линейного приближения. Все это позволило с помощью обобщенного сдвига по Левитану для почти периодических функций получить до 430 точек скоростного разреза.

Важным и принципиальным моментом для микросейсм стало доказательство возможности построения функции Грина при рассмотрении кросс — корреляционной функции по одновременным записям на двух станциях.

Сначала на стадии подготовки данных решаются уравнения типа свертки и находятся импульсные характеристики. При этом производится нормировка трасс по их максимуму и вычисление при свертке каждой пары источник-приемник параметра регуляризации.

Далее найденные амплитуды, частоты и фазовые скорости вводятся в специализированную программу вычисления с применением которой обеспечивают нахождение границ лакун в спектре. Центральное место в алгоритме определение помимо указанных границ еще и параметра регуляризации для каждой из введенных элементов матрицы частота фазовая скорость. Программа рассчитывает скорости волны  $SV$ ,  $SH$  и  $P$  по глубине  $Z$  на основе профильных измерений. Она использует в качестве входных данных фазовые скорости, частоты и амплитуды.

литуды, получаемые при многомодовом спектральном анализе. Ее главными преимуществами являются большое число точек (до 430) и точность, а также графический анализ точности и качества получаемого решения. Многомодовость обеспечивается аппроксимацией многочленов произвольной степени  $N$  многочленами третьей степени, которая справедлива при малых отклонениях от интерполяционных узлов.

Алгоритм программы основан на аналитическом продолжении функции скорости волн с использованием выражения для 1-ой и 2-ой производной скорости. Последние зависят от границ первой или приведенной к первой лакуны в спектре, амплитуд волн Рэлея и фазовых скоростей, а также скоростей продольных и поперечных волн на свободной поверхности и на глубине первого шага.

Применение формулы следов позволяет по амплитуде, частоте и волновому числу, определенным по уравнению типа свертки и прямому преобразованию Фурье при удалении вдоль профиля, произвести по 3 сдвига на частоту или волновое число. Это связано с тем, что для почти периодических функций, входящих в потенциал, период определен таким сдвигом по координате, при котором ошибка по модулю не превосходит некоторой малой величины, зависящей от этого периода. Тем самым была решена проблема точности расчета на больших глубинах.

Главным моментом в алгоритме является использование интегрального среднего линейного тренда в качестве первого слагаемого ряда Тэйлора для скорости на всех глубинах. Это позволяет производить вычисления с перемен-

#### **Характеристики АСС, удовлетворяющий требованиям МСП**

#### **Характеристики АСС, удовлетворяющий требованиям МСП**

Тип преобразования сейсмосигнала	по скорости
Рабочий диапазон частот, Гц	0,5–40
Коэффициент преобразования по скорости, В*с/м	2000±5
Порог чувствительности сейсмического канала (собственный шум), М/с	$0,4 \cdot 10^{-9}$
Максимальная амплитуда регистрируемого сигнала, М/с	$4 \cdot 10^{-3}$
Максимальная амплитуда выходного сигнала, В	±10
Количество входов	3 диф
Память накопителя, Гб	2
Количество разрядов АЦП	24
Суммарная частота преобразования по всем включенным каналам	не менее 100 Гц
Динамический диапазон, дБ	120
Максимальное входное напряжение, В	±10
Входное сопротивление, кОм	100
Защита входов при включенном питании, В	±30
Защита входов при выключенном питании, В	±30
Межканальное проникновение, дБ	-90
Потребляемая мощность при $U_{\text{пит. АЦП}} = 5 \text{ В}$ $U_{\text{пит. сенсора}} = \pm 12 \text{ В}$ , Вт	≤ 1,2
Интерфейс связи ПК	USB 2.0
Масса (в зависимости от типа сейсмоприемника), кг	5–10



Рис. 1. Однокомпонентная станция на базе датчика SM-6 и регистратора «Экспресс Т»  
 Fig. 1. One-component station on the basis of sensor SM-6 and recorder Express-T



Рис. 2. Широкополосная трехкомпонентная сейсмостанция на базе датчика SM 5 и регистратора «Экспресс МСП»  
 Fig. 2. Wideband three-component seismic station on the basis of sensor SM-5 and recorder Express-MSP

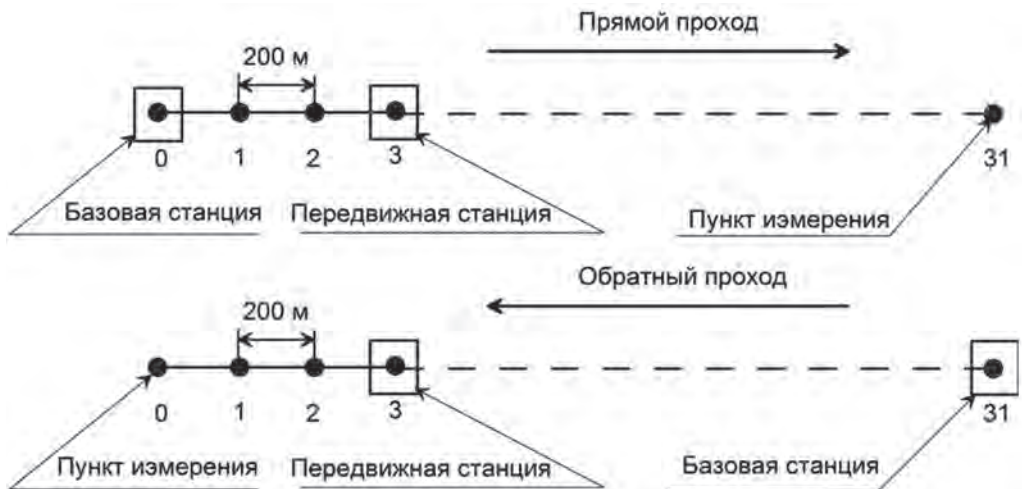


Рис. 3. Вариант схемы измерений на профиле двумя сейсмостанциями для глубин от 3 до 6 км  
 Fig. 3. Alternate profiling scheme with two seismic stations for a depth from 3 to 6 km

ным (возрастающим с глубиной) шагом, зависящим от частоты.

### **Оборудование и методика МСП**

Использование пассивных микросейсмических методов предъявляет повышенные требования к сейсмодатчикам и регистраторам особенно плане чувствительности и шумовых характеристик [19–23].

К настоящему времени в НТЦ Геотехфизприбор ИФЗ РАН разработано семейство сейсмодатчиков на базе известных СМЗ-СМ6 и регистраторов типа «Экспресс», позволяющих создавать автономные сейсмические станции (АСС), удовлетворяющий требованиям МСП — см. таблицу.

Необходимо отметить, что рабочие образцы АСС для МСП созданы полностью на основе отечественных комплектов — см. рис. 1, 2.

Применение в МСП трехкомпонентных сейсмостанций позволит более надежно выделять из микросейсмического шума волны типа Рэлея, что позволит более точно восстанавливать скоростной разрез.

- Для технологии предлагается специальная методика полевых работ.

- Работы выполняются профилями длиной равной двойной глубине исследуемого разреза.

- Каждый профиль включает не менее 30 точек измерения для обеспечения устойчивой работы алгоритма по вычислению скоростного разреза (рис. 3).

- Базовая станция осуществляет запись непрерывно и синхронно с передвижной станцией на профиле. Базовая станция служит для контроля изменений сейсмического фона в течение работы на профиле, что позволяет учитывать их при расчетах спектров точек профиля записанных не одновременно. Кроме того, синхронные пары записей «база—точка» используются для расчетов дис-

персии скорости волн Рэлея, необходимой для восстановления скоростного разреза при решении обратной задачи.

- Точность определения границ аномалий по горизонтали определяется плотностью сети измерений. (от 1 м до 1 км) и погрешностью привязки по GPS (обычно 5–10 м).

- Точность определения границ скоростных аномалий по вертикали не хуже 5% без учета определения высоты рельефа по GPS.

- Точность определения поперечной и продольной скоростей, а также плотностей пород не хуже 5%.

- Производительность при полевых работах на суше до 6 км в день, бригадой минимального состава из 3 человек, при наличии минимального комплекта оборудования из двух сейсмостанций, плотности сети 200 м и длительности записи от 5 мин в отсутствие существенных помех.

- Контроль качества полевого материала ежедневно.

- Примерная производительность камеральных работ от 5 до 30 точек в день бригадой из 3 человек в зависимости от качества полевых материалов.

Для эффективного анализа пространственного развития ловушек и уточнения места заложения первой разведочной скважины возможно прохождение дополнительных взаимно перпендикулярных профилей в виде сетки. Это позволяет также построить трехмерную пространственную модель скоростного разреза на указанной площади.

### **Пример результата работ по МОВСР-МСП в Восточной Сибири в 2015 г.**

Целью полевых работ, выполненных в период с 20.07.2015 г. по 10.07.2015 г. в Качугском районе Иркутской области являлось проведение серии тестовых измерений микросейсмического низко-



Рис. 4. Карта участка исследования с пунктами измерений по МСП и аномалиями ПМСС  
 Fig. 4. Study site map with the multichannel seismic profiling points and anomalies

частотного волнового поля (МСВП) по технологии МОВСР (метод определения вертикального скоростного разреза) вдоль одного профиля с целью построения скоростного разреза в зоне аномалии свойственной залежам углеводородов. Аномалия была предварительно выявлена и оконтурена по технологии ПМСС компанией «Геоспектр».

На первом этапе выполнено 30 измерений (постановок или пунктов) с интервалом 200 м на субширотном профиле Пр1, протяженностью 6 км согласно карты на рис. 4. Обработка полевых материалов производилась по алгоритму МОВСР.

Анализ регионального разреза ОГТ показывает, что для Качугского и Божеханского валов характерно наличие следующих отражающих границ: надсолевые, солевые, подсолевые отложения. Соляной купол виден неотчетливо, в связи с отсутствием резко отражающих границ в высокоскоростном массиве твердой соли. Рифейские отложения видны отчетливо, так же хорошо прослеживает-

ся фундамент на глубине 3–3,5 км, наблюдается чередование участков с хорошими и неотчетливыми отражениями. Солевые отложения имеют вид валов значительной протяженности, расположенных почти ортогонально плоскости разреза. На разрезе ОГТ возможные ловушки могут располагаться на склонах соляного купола, что характерно для солевой тектоники. Исследованный участок располагается в 40 км от регионального разреза.

Отметим, что уже при прямом прохождении на скоростном разрезе (рис. 5) видна хорошая корреляция основных структурных элементов разреза, из которого следует, что купола, полученные на указанном удалении, и на региональном разрезе ОГТ сдвинуты друг относительно друга приблизительно на 1,5 км. В правой части объединенного разреза (рис. 6) видно продолжение поднятия фундамента, а слева — поднятия, вызванные локальным куполом. Хорошо наблюдаются возможные ловушки на глубине 2,5 км (отмечены желтым цветом).

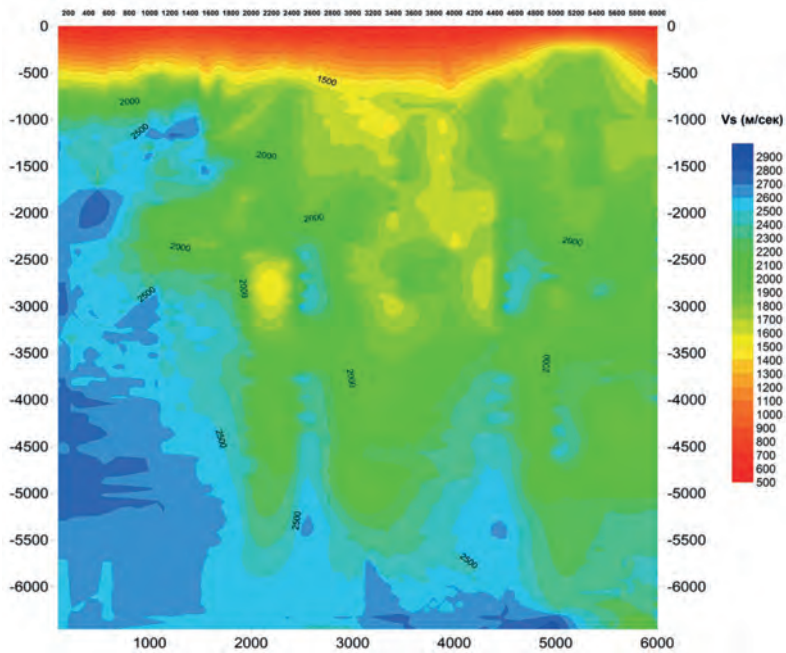


Рис. 5. Первичный скоростной разрез при прямом проходе профиля Пр 1  
 Fig. 5. Primary velocity section in forward profiling Pr 1

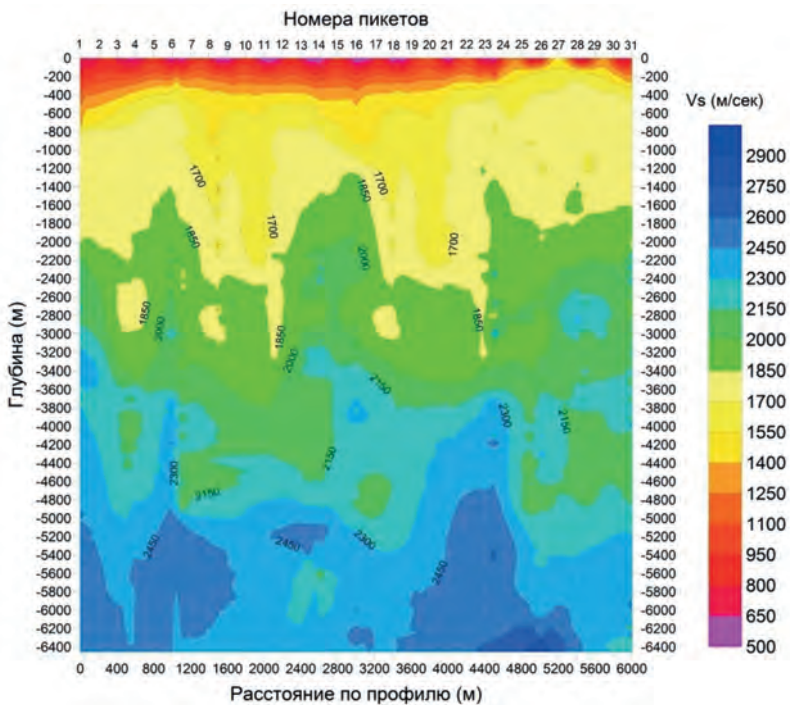


Рис. 6. Результирующий разрез после обратного прохода профиля Пр 1  
 Fig. 6. Final velocity section in backward profiling Pr 1



Проведенные эксперименты показали эффективность применения одной базовой станции в качестве основной в начале профиля и контрольной в конце профиля. Для данного участка, в связи с отсутствием технологических шумов, картина микросейсм хорошо описывается равномерным распределением источников по поверхности, этим же объясняется хорошая стационарность процесса построения разреза. Наблюдения производились на каждой точке в течение 90 мин.

Для определения перспективности газоносности данного участка следует воспользоваться методикой анализа скоростей коллекторов. Таким образом, применение пассивных методов сейсморазведки позволяет получать качественные результаты в диапазоне глубин от 1 до 6–9 км. Отличительной особенностью методики является возможность получать высокоразрешенные скоростные разрезы для малоканальных станций. На мигрированных разрезах ОГТ видны только отражающие или преломляющие границы и области рассеяния.

Анализ скоростей позволяет стратифицировать ловушки по принципу замкнутости контуров соответствующих изолиний с минимумом скорости при приближении к центру и перекрытием их более высокоскоростными зонами рис. 5, 6.

### **Выводы**

В рамках настоящей статьи приведено описание метода определения глубо-

ких вертикальных двумерных сейсмических разрезов (МОВСР), по регистрируемым на поверхности волнам типа Рэлея, с использованием теории почти-периодических функций для микросейсмических данных, практической реализации этого метода в технологии малоканального сейсмического профилирования (МСП) и результатов первых экспериментальных работ. Преимуществом метода является отсутствие накопления ошибок вычислений, благодаря использованию почти-периодических функций. Метод применим для исследования как субвертикальных, так и горизонтальных скоростных неоднородностей. Использование прямого Фурье-преобразования по горизонтальной координате позволяет существенно сократить (до 5–10 мин) время записи микросейсм, что обеспечивает возможность более оперативного мониторинга изменений строения массива.

Ограничения метода связаны с необходимостью расположения измерительного профиля на равнинных участках. В случае гористой местности это предполагает, что точки профиля находятся на одной отметке относительно уровня моря, например, на плато или горной дороге. При этом колебания высотных отметок не должны превышать шага точек измерения по горизонтали и быть много меньше радиуса кривизны поверхности. Представляется перспективным применение метода для изучения и верхней части разреза, в частности, при решении задач инженерной сейсмологии.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Загорский Л. С., Шкуратник В. Л. Метод определения вертикального сейсмического разреза массива горных пород с использованием волн типа Рэлея // Акустический журнал. — 2013. — Т. 59. — № 2. — С. 222–231.
2. Бреховских Л. М., Годин О. А. Волны в слоистых средах. — М.: Наука, 1989. — 416 с.
3. Загорский Л. С., Шкуратник В. Л., Червинчук С. Ю. Оценка поля морских микросейсм на шельфе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 6. — С. 125–130.
4. Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмологии. — М.: Наука, 1987. — С. 5–20.

5. Николаев А. В., Троицкий П. А., Чеботарева И. Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами // ДАН СССР. — 1986. — т. 282. — № 3. — С. 586–591.
6. Longuet-Higgins M. S. A theory of origin microseisms. Philos. Trans. Roy. Soc. London, 1950. Vol. 257. Pp. 1–35.
7. Zagorskiy L. S., Shkuratnik V. L. Application of almost-periodic functions for seismic profiling. Acoustical physics, New York, 2014.
8. Zagorskiy L. S., Shkuratnik V. L. Method of determining the vertical seismic profile of a rock massive using Rayleigh Type Waves. Acoustical physics. 2013, no 2.
9. Загорский Л. С. Спектральные методы определения строения горного массива / Под ред. В. Н. Страхова. — Люберцы: ПИК ВИНТИ, 2001.
10. Годин О. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С., Веденев А. И., Гончаров В. В., Муханов П. Ю., Заботин Н. А., Brown M. G. Выделение акустических мод во Флоридском проливе методом шумовой интерферометрии // Акустический журнал. — 2017. — т. 63. — № 1. — С. 73–83.
11. Wapenaar K., Broggin F., Slob E., Snieder R. Three-dimensional single-sided Marchenko inverse scattering, data-driven focusing, Green's function retrieval, and their mutual relations: Phys. Rev. Lett., 2013, Vol. 110 (8), 084301. Focus: A Better View Underground (Physics spotlight article).
12. Wapenaar K., van der Neut J., Slob E. Unified double- and single-sided homogeneous Green's function representations: Proceedings of the Royal Society A, 2016, Vol. 472, 20160162.
13. Wapenaar K. Green's function retrieval by cross-correlation in case of one-sided illumination: Geophysical Research Letters, 2006, Vol. 33, L19304.
14. Wapenaar K. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation: Phys. Rev. Lett., 2004, Vol. 93 (25), 254301.
15. Stehly L., Campillo M., Shapiro N. M. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B10306.
16. Wapenaar K., Draganov D., Snieder R., Campman X., Verdel A. Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — Basic principles and applications: Geophysics, 2010, Vol. 75, 75A195–75A209.
17. Аленицы А. Г. О рэлеевских волнах в приповерхностном волноводе / Труды ЛОМИ им. Стеклова. — Л., 1971.
18. Кабанихин С. И. Проекционно-разностные методы определения коэффициентов гиперболических уравнений. — Новосибирск, 1988.
19. Башилов И. П. Аппаратура для геофизических исследований, мониторинга инженерных сооружений и среды обитания по обеспечению безопасности // Научное приборостроение. — 2001. — № 3.
20. Левченко Д. Г. Регистрация широкополосных сейсмических сигналов и возможных предвестников сильных землетрясений на морском дне. — М.: Научный мир, 2005. — 240 с.
21. Башилов И. П., Волосов С. Г., Королев С. А., Меркулов В. А. О внедрении нового поколения сейсмометрической аппаратуры в промышленность / Сборник материалов научно-практической конференции «Научное приборостроение — современное состояние и перспективы развития». — М., 2016. — С. 191–193.
22. Башилов И. П., Волосов С. Г., Королев С. А., Косарев Г. Л., Ризниченко О. Ю., Санина И. А. Широкополосная автономная цифровая сейсмическая станция АЦСС-3 // Сейсмические приборы. — 2013. — т. 49. — № 4.
23. Башилов И. П., Загорский Л. С., Левченко Д. Г., Рыбаков Н. П., Червинчук С. Ю., Шkuratnik В. Л., Ом Астана, Панкадж Рой Гупта. Испытание малогабаритного сейсмического донного модуля и восстановление скоростного разреза транзитной зоны шельфа Аравийского моря // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 9. — С. 145–154. **ГИАВ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Башилов Игорь Порфирьевич<sup>1</sup> — доктор технических наук, главный научный сотрудник,  
 Загорский Лев Сергеевич<sup>2</sup> — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,  
 Загорский Даниил Львович<sup>1</sup> — аспирант,  
 Рязанцев Юрий Валерьевич<sup>1</sup> — ведущий инженер,

Сачков Виктор Иванович — доктор химических наук, заведующий ЛХТНУ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Шкуратник Владимир Лазаревич<sup>2</sup> — доктор технических наук, профессор, Шутов Геннадий Яковлевич — кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог ООО «Нормаль Ойл», Червинчук Сергей Юрьевич<sup>1</sup> — старший научный сотрудник, <sup>1</sup> НТЦ «Геотехфизприбор» Институт Физики Земли РАН, <sup>2</sup> МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 9, pp. 128–139.

## Multichannel seismic profiling based on the passive seismic method

Bashilov I.P.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher,  
Zagorskiy L.S.<sup>2</sup>, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Leading Researcher,  
Zagorskiy D.L.<sup>1</sup>, Graduate Student,  
Ryazantsev Yu.V.<sup>1</sup>, Leading Engineer,  
Sachkov V.I., Doctor of Chemical Sciences, Head of Laboratory,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
634050, Tomsk, Russia,  
Shkuratnik V.L.<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Shutov G.Ya., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
chief geologist, ООО «Normal Oyl», Moscow, Russia,  
Chervinchuk S.Yu.<sup>1</sup>, Senior Researcher,  
<sup>1</sup> STC «Getentities» Institute of Earth Physics,  
Scientific-technical center «Getentities»,  
branch of Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences,  
119334, Moscow, Russia,  
<sup>2</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

**Abstract.** The theoretical prerequisites and implementation of transformation of the passive seismic method MOVSR [1] and the multichannel seismic profiling technique with background and relocatable seismic stations are discussed. The construction of vertical velocity section uses both amplitudes and phase velocities of Rayleigh waves. The inverse problem on recovery of P- and S-waves is solved with the help of the Levitan polynomials and Gelfand–Levitan–Marchenko integral equation. The application of only two seismic stations facilitates mobility of the method. This technology is applicable in the preliminary express-estimation of velocity sections in prospecting not easily accessible hydrocarbons and other minerals, for the first turn, in the Far North and on continental shelf of the Arctic Ocean of Russia, where multi-channel procedures consume much money and labor. The application of the technology is illustrated in terms of velocity section constructed in the Kachurg area of the Irkutsk Region.

**Key words:** Passive seismic method, seismic station, minerals, velocity section estimation, seismic cross-section, independent seismic station characteristics conformable with the multichannel seismic profiling requirements.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-128-139

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Unique Project Identifier RFMEFI57817X0237.

The authors express their gratitude for the practical work implemented within the project to the management of Normal Oil holding the study area license.

## REFERENCES

1. Zagorskiy L.S., Shkuratnik V.L. *Metod opredeleniya vertikal'nogo seysmicheskogo razreza massiva gornykh porod s ispol'zovaniem voln tipa Releya* [Method to determine vertical seismic section in rock mass using Rayleigh-type waves]. *Akusticheskiy zhurnal*. 2013, vol. 59, no 2, pp. 222–231. [In Russ].

2. Brekhovskikh L. M., Godin O. A. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media], Moscow, Nauka, 1989, 416 p.
3. Zagorskiy L. S., Shkuratnik V. L., Chervinchuk S. Yu. Otsenka polya morskikh mikroseyms na shel'fe [Estimation of field of the shelf sea microseisms]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 6, pp. 125–130. [In Russ].
4. Nikolaev A. V. *Problemy nelineynoy seysmiki* [Nonlinear seismic problems], Moscow, Nauka, 1987, pp. 5–20.
5. Nikolaev A. V., Troitskiy P. A., Chebotareva I. Ya. Izuchenie litosfery seysmicheskimi shumami [Analysis of lithosphere using seismic noise]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1986, vol. 282, no 3, pp. 586–591.
6. Longuet-Higgins M. S. *A theory of origin microseisms*. Philos. Trans. Roy. Soc. London, 1950. Vol. 257. Pp. 1–35.
7. Zagorskiy L. S., Shkuratnik V. L. Application of almost-periodic functions for seismic profiling. *Acoustical physics*, New York, 2014.
8. Zagorskiy L. S., Shkuratnik V. L. Method of determining the vertical seismic profile of a rock massive using Rayleigh Type Waves. *Acoustical physics*. 2013, no 2.
9. Zagorskiy L. S. Spektral'nye metody opredeleniya stroeniya gornogo massiva. Pod red. V. N. Strakhova [Spectrum-based method for determining rock mass structure. Strakhov V. N. (Ed.)], Lyubertsy, PIK VINITI, 2001.
10. Godin O. A., Sergeev S. N., Shurup A. S., Vedenev A. I., Goncharov V. V., Mukhanov P. Yu., Zabolin N. A., Brown M. G. Vydelenie akusticheskikh mod vo Floridskom prolive metodom shumovoy interferometrii [Detection of acoustic modes in the Florida Gulf by the ambient noise interferometry], *Akusticheskiy zhurnal*. 2017, vol. 63, no 1, pp. 73–83. [In Russ].
11. Wapenaar K., Broggin F., Slob E., Snieder R. Three-dimensional single-sided Marchenko inverse scattering, data-driven focusing, Green's function retrieval, and their mutual relations: *Phys. Rev. Lett.*, 2013, Vol. 110 (8), 084301. Focus: A Better View Underground (Physics spotlight article).
12. Wapenaar K., van der Neut J., Slob E. Unified double- and single-sided homogeneous Green's function representations: *Proceedings of the Royal Society A*, 2016, Vol. 472, 20160162.
13. Wapenaar K. Green's function retrieval by cross-correlation in case of one-sided illumination: *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, L19304.
14. Wapenaar K. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation: *Phys. Rev. Lett.*, 2004, Vol. 93 (25), 254301.
15. Stehly L., Campillo M., Shapiro N. M. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. B10306.
16. Wapenaar K., Draganov D., Snieder R., Campman X., Verdel A. Tutorial on seismic interferometry: Part 1 Basic principles and applications: *Geophysics*, 2010, Vol. 75, 75A195–75A209.
17. Alenitsy A. G. O releevskikh volnakh v pripoverkhnostnom volnovode [Rayleigh waves in subsurface waveguide], *Trudy LOMI im. Steklova*, Leningrad, 1971.
18. Kabanikhin S. I. *Proektsionno-raznostnye metody opredeleniya koeffitsientov giperbolicheskikh uravneniy* [Finite-element methods to determine coefficients of hyperbolic equations], Novosibirsk, 1988.
19. Bashilov I. P. Apparatura dlya geofizicheskikh issledovaniy, monitoringa inzhenernykh sooruzheniy i srede obitaniya po obespecheniyu bezopasnosti [Equipment for geophysical surveying and engineering monitoring of structures and living environment with the purposes of safety improvement], *Nauchnoe priboroostroenie*. 2001, no 3. [In Russ].
20. Levchenko D. G. *Registratsiya shirokopolosnykh seysmicheskikh signalov i vozmozhnykh predvestnikov sil'nykh zemletraseniy na morskoye dne* [Recording of undersea wideband seismic signals and signs of strong earthquakes], Moscow, Nauchnyy mir, 2005, 240 p.
21. Bashilov I. P., Volosov S. G., Korolev S. A., Merkulov V. A. O vnedrenii novogo pokoleniya seysmometricheskoy apparatury v promyshlennost' [Industrial introduction of new-generation seismic instruments]. *Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnoe priboroostroenie sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya»*, Moscow, 2016, pp. 191–193.
22. Bashilov I. P., Volosov S. G., Korolev S. A., Kosarev G. L., Riznichenko O. Yu., Sanina I. A. Shirokopolosnaya avtonomnaya tsifrovaya seysmicheskaya stantsiya ATSS-3 [Wideband independent digital seismic station ATSS-3]. *Seysmicheskkiye pribory*. 2013, vol. 49, no 4. [In Russ].
23. Bashilov I. P., Zagorskiy L. S., Levchenko D. G., Rybakov N. P., Chervinchuk S. Yu., Shkuratnik V. L., Om Astana, Pankadh Roy Gupta. *Ispytanie malogabaritnogo seysmicheskogo donnogo modulya i vosstanovleniye skorostnogo razreza tranzitnoy zony shel'fa Araviyskogo morya* [Tests of small-size undersea seismic system and recovery of velocity section in the transient zone of the Arabian Sea Shelf]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 9, pp. 145–154. [In Russ].