



## ТЕХНОЛОГИИ МНОВОВОЛНОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НАКЛОННЫХ И КРУТОНАКЛОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ГРАНИЦ

Ю. А. Романенко, В. П. Гарин, М. Л. Шемякин, Г. А. Искандарова

Решается обратная кинематическая задача сейсморазведки для субоднородной модели среды путем обзора многомерных исследуемых фрагментов границы с привязкой их к заданным точкам развертки (ТР). По известным координатам ТР и пунктов возбуждений сейсмической энергии (ПВ) путем перебора в ТР  $q$  углов наклона радара и скоростей  $V$  вычисляют координаты  $m$  пунктов приема, длины хода лучей и времена прихода сигналов в точку приема. С каждого из  $mn$  лучей радара (где  $n$  – кратность перекрытий) на  $mn$  сейсмотрассах считывают по  $p$  отсчетов фазы цуга колебаний. В отличие от известных технологий возрастание достоверности отображений исследуемых фрагментов криволинейных и крутонаклонных сейсмической границ обеспечивается за счет подавления случайных ошибок благодаря использованию  $pnm$ -мерного вектора исследуемых фрагментов, а систематические ошибки исключаются заданием уравнения годографа. Гистограммы глобальной целевой функции  $F_{pnm}(q, V)$  используются в моно- и мнововолновой сейсморазведке для обзора совокупности различных типов вторичных волн, исходящих из исследуемых фрагментов, и коррекции углов наклона  $q$  и скоростей  $V$ . Разработка защищена пятью патентами РФ.

**Ключевые слова:** сейсморазведка МОГТ, мнововолновая сейсморазведка, криволинейные границы, крутонаклонные границы, фрагменты границы, обратная кинематическая задача.

## TECHNOLOGIES OF MULTI-WAVE SEISMOLOGY OF CURVILINEAR AND STEEPLY INCLINED SEISMIC BOUNDARIES

Yu. A. Romanenko, V. P. Garin, M. L. Shemyakin, L. A. Iskandarova

Inverse travelttime problem of seismic exploration for subhomogeneous model of an environment is being solved using the survey of multivariate investigated fragments (IF) of boundary with their positioning to given scan points (SP). The calculation of  $m$  coordinates of receiver point (RP), lengths of raypaths and wavelets travelttime in geophone position are made by known coordinates of SP and sources positions (SPos) of seismic energy by sweeping of  $q$  angles of radar incline and  $V$  velocities. From each of  $mn$  of radar beams (where  $n$  is CDPs order) on  $mn$  seismic traces are being read by  $p$  indications of train wave phase. Unlike known technologies the increase of IF image reliability of *curvilinear* and *steeply inclined* seismic boundaries are provided for removal of random errors, owing to the use of  $pnm$ -measured vector of IF, and systematical errors are being eliminated by task of moveout equation. Histograms of global goal function  $F_{pnm}(q, V)$  are used in mono/ multiwave seismology for overview of totality of various types of secondary waves, coming from IF and  $q$  and  $V$  corrections. The development is covered by 5 patents of the RF.

**Keywords:** CDP survey, multiwave seismology, inverse travelttime problem, curvilinear boundaries, steeply inclined boundaries.

Задолго до изобретения лазерной монохроматической голографии, основанной на физическом моделировании, в сейсморазведке использовали принципы аналитического субголографического отображения на разрезах многомерных параметров исследуемых фрагментов (ИФ) сейсмических границ, излучающих вторичные волны в широком диапазоне частот. Фронт волны, принадлежащий ИФ, состоит из ряда лучей, каждый из которых задокументирован в пределах всего волнового поля сейсмограммы, так же как и на голограмме, множеством отсчетов фаз огибающих Гюйгенса. По МОГТ (лучевой методикт общей глубинной точки) число статистических составляющих вектора ИФ не более  $n$ , т. е. числа используемой кратности перекрытий. С помощью общепринятого способа цифровой обработки по МОГТ на временном разрезе возможно отображение приемлемого качества субгоризонтальных сейсмических границ (с наклоном не более  $5^\circ$ ). Предполагается, что по результатам обработки, полученным с помощью МОГТ, возможна

визуализация наклонных и крутонаклонных границ с помощью программных модулей миграции. Они разработаны практически для любого типа сложнопостроенных сейсмогеологических моделей сред на основе способа лучевого трассирования. Однако сложность процесса подбора эффективных параметров (скорости, угла наклона, радиуса кривизны лучей) для каждого элемента среды не позволяет во всех случаях гарантировать точное восстановление разреза.

В большинстве итерационных алгоритмов миграции начальное приближенное значение скорости  $V$  определяют в соответствии с уравнением годографа общей глубинной точки (ОГТ) методом регулируемого направленного анализа (РНА) волнового поля каждой из сейсмограмм, полученных в результате наблюдений отраженных волн по способу многократных перекрытий [1, 2]. Используют субоднородную сейсмогеологическую модель среды, в пределах которой над горизонтальной сейсмической границей прямолинейные лучи рас-



пространяются в зависимости от глубины с переменной скоростью [5].

Инновационные технологии, запатентованные Новосибирским национальным исследовательским государственным университетом (патенты РФ № RU: 2 415 449, 2 445 651, 2 463 628, 2 449 322, 2 454 682), в отличие от МОГТ основаны на использовании достижений современной вычислительной техники и предназначены для высокодостоверного решения обратной кинематической задачи в пределах более сложно построенных сейсмогеологических моделей сред, при которых допустимы крутые наклоны и криволинейность сейсмических границ, а не только их субгоризонтальность. Достоверность отображений многомерного вектора ИФ сейсмических границ повышается за счет подавлений:

– случайных помех в результате статистической и/или пространственной обработки отсчетов всех составляющих вектора ИФ с использованием, если требуется, значительно большего (на порядки) количества отсчетов фаз огибающих Гюйгенса, полученных по способу многократных перекрытий;

– систематических ошибок, возникающих при пересечениях с годографами кратных, дифрагированных и иных волн-помех, в результате синфазной селекции сигналов, принадлежащих заданному уравнению годографа или поля времен (любому аналитическому закону лучевого распространения заданного типа сейсмических волн [3], а не только годографа ОГТ).

Волновое поле субоднородной модели среды формируют из точек развертки (ТР) – узлов прямоугольной равномерной сетки ( $i, j$ ). Координаты ТР задают в метрах  $i$  шагами вдоль профиля по строкам и приращениями глубины по столбцам  $j$ . В каждой ТР размещают вращающиеся радары (площадки) заданного размера, возможно отражающие или излучающие [4] до  $m$  прямолинейных прилегающих к ТР лучей от каждого из  $n$  пунктов возбуждения (ПВ).

Для обеспечения решения прямой кинематической задачи методом лучевого трассирования в соответствии с уравнением годографа ОТВ (общей точки возбуждения) целевой волны по известным координатам ПВ, ТР, заданному углу наклона радара и скорости ее распространения на каждой сейсмограмме вычисляют номер (местоположение) ПП, в котором зарегистрирован сигнал, и маркерное время прихода этого сигнала. В соответствии с заданными  $\{q\}$  углами наклона границы в ТР и скоростями  $\{V\}$  вычисляют длины хода  $\{m\}$  лучей к ПП в пределах ИФ, прилегающих к ТР; находят времена их записи и считывают из  $m$  сейсмотрасс по  $p$  фазных отсчетов колебаний фронта ИФ. Синфазно вдоль годографа суммируют их и вычисляют  $qV$  функционалов статистической обработки (ФСО) с кратностью суммирования  $m$  по каждой фазе. Размещают совокупность ФСО в виде матрицы  $qV$  двумерной целевой функции  $f_{pm}(q, V)$ . При необхо-

димости эту матрицу отображают в виде изолиний или гистограмм и используют для визуального обзора совокупности фронтов различных типов волн, исходящих из данного фрагмента сейсмической границы. С помощью таких же операций строят матрицы для всех  $n$  используемых сейсмограмм, зарегистрированных по способу многократных перекрытий. После поэлементного сложения матриц получают матрицу супернакоплений глобальной целевой функции  $F^{ex}(q, V)$ , в пределах матрицы находят экстремум, корректируют значения  $q$  и  $V$  и документируют его в ТР на разрезе (в виде пространственного или временного волнового поля) с интенсивностью, соответствующей экстремуму  $F^{ex}(q, V)$ . При интерпретации данных многоволновой сейморазведки матрицу  $F_{pm}(q, V)$  также отображают в виде изолиний или гистограмм и используют в качестве окна обзора достоверности (ООД) совокупности фронтов различных типов волн, исходящих из данного ИФ сейсмической границы.

Из  $F^{ex}(q, V)$  принадлежащих заданной по строкам и столбцам совокупности ТР, формируют глубинный и/или временной разрез, попутно получают пространственный и/или временной скоростной разрез и разрез углов наклона в каждой ТР, которые затем могут использоваться в качестве высокодостоверных начальных приближений в итерационных алгоритмах миграции волновых полей или иных алгоритмов для сейсмогеологических моделей сред, построенных более сложно, чем субоднородные.

Применение разработанных в НГУ технологий сейморазведки позволяет с помощью современных компьютеров реализовать автоматизацию подбора сразу нескольких эффективных параметров среды (не только скорости), поиск на глубинном разрезе (минуя временной) на несколько порядков более достоверных данных о фрагментах криволинейных и крутонаклонных сейсмических границ, а также отображение их с фактически минимальным сносом. Кроме того, эти технологии необходимы для контроля и приемки глубинных разрезов, полученных по технологиям миграции до суммирования по ОГТ.

Более подробно инновационные технологии изложены в описаниях полученных патентов. Согласно патенту РФ № RU 2 415 449, исходя из заданных координат ТР, известных координат  $n$  ПВ и вычисленных координат  $m$  ПП, после получения длин эйконолов и маркерных времен прихода лучей (путем решения прямой задачи лучевого трассирования в соответствии с заданным уравнением годографа) считывают сигналы из  $mn$  сейсмотрасс и вдоль  $n$  годографов синфазно накапливают по  $p$  отсчетов для каждого из  $mn$  цугов колебаний вторичной волны. Выборку  $n$  сейсмограмм осуществляют в соответствии с заданным размером выноса антенны радара (углом облучения ИФ сейсмической радиацией группой из



$n$  ПВ). Из каждой из  $n$  сейсмограмм (патент РФ № RU 2 445 651) считывают по  $m$  сейсотрасс в соответствии с заданием как выноса ИФ относительно ТР, так и апертуры (угла) обзора сейсмической границы группой из  $m$  ПП. В пределах волнового поля каждой из  $n$  отдельной сейсмограммы, решая задачи лучевого трассирования в соответствии с заданными диапазоном  $q$  углов наклона радара и спектром  $V$  скоростей (патент РФ № RU 2 463 628), вдоль годографов (сечений поля времен) осуществляют суммирование, поиск максимума  $pm$ -мерного вектора ИФ с кратностью накоплений  $m$  отсчетов по каждой составляющей. Затем корректируют  $q$ ,  $V$  и с помощью алгоритмов локальной целевой функции находят ФСО (методами корреляции, автокорреляции, свертки и иными), которые в дальнейшем размещают в виде элементов матрицы  $qV$  двумерной локальной целевой функции  $f_{pm}(q, V)$  и без учета сноса луча документируют в ТР разреза субоднородной модели среды с интенсивностью, соответствующей наивысшему экстремальному значению  $F^{ex}(q, V)$ .

Матрицы для всех  $n$  сейсмограмм, зарегистрированных при наблюдениях по способу многократных перекрытий (патент РФ № RU 2 449 322), поэлементно суммируют между собой, получают  $pmn$ -мерные векторы ИФ с кратностью накоплений  $mn$  по каждой из  $p$  составляющих, находят экстремум и корректируют  $q$ ,  $V$ . В поле глобальной целевой функции  $F_{pmn}(q, V)$  вычисляют ФСО и наносят их в ТР на разрез (в виде пространственного или временного волнового поля) с интенсивностью, соответствующей глобальному экстремуму  $F^{max}(q, V)$ .

Расчетные процедуры документирования интенсивности в ТР повторяют для всех ( $i, j$ ) узлов сейсмогеологической модели и формируют глубинный или временной разрез в виде пространственного или временного волнового поля. Попутно получают скоростной разрез и разрез углов наклона в каждой ТР.

Алгоритм (патент РФ № RU 2 454 682) обеспечивает возможность расчета динамического глубинного и/или тотального динамического временного разрезов, а также разреза степени вероятности определения величины эффективных параметров среды в каждой ТР.

Практическая значимость инноваций состоит в том, что использование найденных в соответствии с патентами НГУ высокодостоверных эффективных параметров позволит расширить область практического применения известных алгоритмов миграции при решении обратной кинематической задачи лучевого трассирования сложно построенных моделей сред путем подстановки этих параметров в качестве первых приближений в многомерные матрицы итерационных процедур.

В производственных условиях переход от  $n$ -мерного статистического вектора ОГТ к  $pmn$ -мерному пространственно-статистическому век-

тору ИФ позволит расширить палитру методик интерпретации для широкого класса моделей сред с целью решения задач моно- и многоволновой сейсморазведки. Использование отображений  $F_{pmn}(q, V)$  в интерактивном режиме в виде изолиний и/или гистограмм позволит:

- отображать без сноса фрагменты крутонаклонных и криволинейных сейсмических границ на разрезах, в том числе под объектами, размещенными вне базы наблюдений, посредством задания соответствующих размеров выносов ПВ и ПП относительно ТР;

- увеличить достоверность определения залегания фрагментов сейсмических границ и атрибутов прямых поисков нефти и газа;

- определять области угловых несогласий и примыканий к разломам, а также точки выклинивания пластов, размещая выносы ИФ справа или слева от ТР;

- выделять по отдельности сигнал отсчета фазы и сигнал случайной помехи из последовательностей единичных отсчетов вдоль оси синфазности годографа методами статистической обработки;

- достоверно отображать криволинейную депрессионную воронку в режиме мониторинга водо- и/или газонефтяного контакта, являющегося следствием отбора нефти и газа (для оптимизации режима добычи и предотвращения заводнения эксплуатируемых скважин);

- повысить глубинность методики интерпретации вследствие повышения достоверности и сокращения протяженности области регистрации эйконолов;

- использовать для интерпретации отсчеты слабых сигналов высокой частоты, регистрируемых специальной аппаратурой с интервалом в доли миллисекунды;

- отключать и подключать в процедурах обработки эйконолы отдельных групп ПВ и/или ПП для «сшивки» глубин, полученных в результате бурения и сейсморазведки, а также для поиска окон видности и углов обзора наиболее скрытых под очагами дифракции и рассеивания волн участков и областей глубинного разреза;

- осуществлять отображение глубинных разрезов и их фрагментов по совокупности сейсмограмм непосредственно в полевых условиях с использованием современных персональных компьютеров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондарев, В. И.** Сейсморазведка : учеб. для вузов [Текст] / В. И. Бондарев. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2007. – С. 444–449.
2. **Гарин, В. П.** Использование временных полей отраженных волн для обработки сейсмических данных [Текст] / В. П. Гарин, Г. Н. Лебедева, Н. Н. Пузырев // Геология и геофизика. – 1981. – № 10. – С. 90–99.



3. **Гарин, В. П.** Поля времен Пузырева в задачах сейсморазведки МОВ [Текст] / В. П. Гарин, Г. А. Искандарова, Г. Н. Яшков // Сейсмические исследования земной коры : Сб. докл. Всерос. науч. конф. (Новосибирск, Академгородок, 23–25 ноября 2009 г.). – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2010. – С. 133–138.

4. **Гарин, В. П.** Пространственные поля времен дифрагированных волн [Текст] / В. П. Гарин, Г. Н. Яшков // Геология и геофизика. – 1985. – № 6. – С. 113–119.

5. **Сейсморазведка** : Справочник геофизика [Текст] / Ред. И. И. Гурвич, В. П. Номоконов. – М. : Недра, 1981. – 464 с.

## REFERENCES

1. Bondarev V.I. *Seismorazvedka* [Seismic survey]. *Textbook for colleges*. Yekaterinburg, USMU Publ., 2007, pp. 444–449. (In Russ.).

2. Garin V.P., Lebedeva G.N., Puzyrev N.N. [The use of temporary fields of reflected waves for seismic data processing]. *Geologiya i Geofizika – Geology and Geophysics*, 1981, no. 10, pp. 90–99. (In Russ.).

3. Garin V.P., Iskandarova G.A., Yashkov G.N. [Puzyrev's time fields in reflection exploration tasks]. *Sbornik dokladov Vserossiyskoi nauchnoi konferentsii "Seismicheskiye issledovaniya zemnoi kory"* [Proceedings of All-Russian Scientific Conference, Novosibirsk, Akadem Town, November 23–25, 2009]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2010, 301 p., pp. 133–138. (In Russ.).

4. Garin V.P., Yashkov G.N. [Spacial time fields of diffracted energy]. *Geologiya i Geofizika – Geology and geophysics*, 1985, no. 6, pp. 113–119. (In Russ.).

5. Gurvich I.I., Nomokonov V.P., eds. *Seismorazvedka. Spravochnik geofizika* [Seismic survey. Geophysicist's guide]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 464 pp. (In Russ.).

© Ю. А. Романенко, В. П. Гарин, М. Л. Шемякин,  
Г. А. Искандарова, 2014

### **РОМАНЕНКО Юрий Андреевич**

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), Новосибирск, ст. науч. сотр.

E-mail: pashkova@lab.nsu.ru

### **ГАРИН Виктор Петрович**

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики, и минерального сырья (СНИИГГиМС), Новосибирск, зав. отделом

E-mail: gvp@sniiggims.ru

### **ШЕМЯКИН Марк Леонидович**

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ст. науч. сотр., к.г.-м. н.

E-mail: pashkova@lab.nsu.ru

### **ИСКАНДАРОВА Галина Андреевна**

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики, и минерального сырья (СНИИГГиМС), Новосибирск, зав. лабораторией

E-mail: iskandarova@sniiggims.ru

**ROMANENKO Yuriy**, Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: pashkova@lab.nsu.ru

**GARIN Viktor**, Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

E-mail: gvp@sniiggims.ru

**SHEMYAKIN Mark**, PhD, Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: pashkova@lab.nsu.ru

**ISKANDAROVA Galina**, Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

E-mail: iskandarova@sniiggims.ru