

УДК 550.834

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО СДВИГА МЕЖДУ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ТРАССАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Иванченков Виктор Павлович<sup>1</sup>,  
am@am.tpu.ru

Кочегуров Александр Иванович<sup>1</sup>,  
kaicc@tpu.ru

Нгуен Суан Хунг<sup>1</sup>,  
hungnx@tpu.ru

Злобина Елена Вячеславовна<sup>1</sup>,  
elena\_zlobina@list.ru

Лаевский Виктор Евгеньевич (V. Geringer)<sup>2</sup>,  
geringer@dhw-ravensburg.de

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Государственный объединенный университет Баден-Вюртемберга,  
Германия, D-88045, Friedrichshafen, Fallenbrunnen, 2.

**Актуальность работы.** Процедуры определения временного сдвига, получившие широкое распространение на практике, не всегда гарантируют правильность определения статических поправок. Возникающие при этом ошибки приводят к искажению кинематических параметров отраженных волн, что отрицательно сказывается на всех дальнейших построениях. Поэтому разработка эффективного метода определения временных сдвигов является актуальной проблемой, с успешным решением которой связываются перспективы повышения достоверности построения структур, подготавливаемых для разведки на нефть и газ.

**Цель исследования:** разработать и исследовать надежность алгоритма определения временных сдвигов между сейсмическими трассами на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик отраженных волн, регистрируемых при поиске нефтяных и газовых месторождений.

**Методы исследования:** статистический синтез и анализ оптимальных решающих правил, цифровая обработка сигналов, методы дискретного преобразования Фурье, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

**Результаты.** Показана возможность извлечения полезной информации из фазочастотных характеристик сейсмических сигналов для получения эффективных оценок временных сдвигов между трассами. На основе теории статистических решений построен оптимальный алгоритм определения временных сдвигов по мгновенным взаимным фазовым спектрам. Для практической реализации алгоритма предложен переход от оптимальной к субоптимальной обработке компонент мгновенного взаимного фазового спектра путем равновесного суммирования. Показано, что равновесная обработка приводит к уменьшению суммарного отношения сигнал/шум для практически используемой полосы частот почти вдвое. Однако даже такие потери позволяют получать достаточно надежные оценки временных сдвигов при наличии интенсивных нерегулярных помех и симметричных распределениях временных сдвигов с большой дисперсией.

### Ключевые слова:

Сейсмические волны, статические поправки, функция взаимной корреляции, взаимные фазовые спектры, фазочастотное отслеживание.

### Введение

В процессе обработки сейсмических наблюдений учет статических поправок, связанных с рельефом дневной поверхности и неоднородностями верхней части разреза, является одной из важнейших процедур интерпретации данных сейсмозаписи. Качество выполнения этой процедуры непосредственно влияет как на надежность выделения и корреляцию отраженных волн, так и на достоверность последующих глубинных построений. Наличие в наблюдаемых временах статических сдвигов препятствует синфазному суммированию полезных волн, и именно поэтому первой важной проблемой в обработке сейсмических данных явля-

ется устранение этих сдвигов посредством введения процедур коррекции статических поправок [1–6].

Одним из основных этапов при проведении коррекции статических поправок является определение временного сдвига между сейсмическими трассами. Различаясь в деталях, большинство алгоритмов автоматического определения временных сдвигов построены на основе вычисления функций взаимной корреляции (ФВК) между трассами сейсмограммы или трассами сейсмограммы и набором эталонных трасс [7–10]. Вместе с тем такие способы определения временного сдвига, получившие широкое распространение на практике, не всегда гарантируют правильность определения

статических поправок. Возникающие при этом ошибки приводят к искажению кинематических параметров отраженных волн, что отрицательно сказывается на всех дальнейших построениях [7].

Таким образом, разработка новых методов определения временных сдвигов является актуальной проблемой, с успешным решением которой связываются перспективы повышения достоверности построения структур, подготавливаемых для разведки на нефть и газ.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование новых информативных параметров сейсмических сигналов, а именно их фазовых спектров. В фазу сигнала, точнее в сложный закон изменения его фазового спектра, заложена полная информация о временном положении сигнала, поэтому оптимальная обработка фазочастотной характеристики (ФЧХ) сигнала реализует оптимальный метод определения его временного положения [11–13]. Вопросам извлечения информации из фазочастотных характеристик сейсмических сигналов для оценки временных сдвигов между трассами был посвящен ряд работ [14–16]. Например, в [14] показано, что оценки временного сдвига  $\hat{\tau}$  можно определить из следующего выражения:

$$\hat{\tau} = \frac{\sum_{\omega} \omega [\varphi_{\text{эт.}}(\omega) - \varphi_l(\omega)]}{\sum_{\omega} \omega^2}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{эт.}}(\omega)$  – фазочастотная характеристика эталонной трассы;  $\varphi_l(\omega)$  – ФЧХ  $l$ -й трассы сейсмограммы.

Однако, к сожалению, подобные алгоритмы до настоящего времени не нашли широкого применения при обработке и интерпретации реальных сейсмических материалов, что, по-видимому, связано прежде всего с трудностью идентификации реальных ФЧХ сейсмических сигналов [15–17], а вследствие этого – небольшим количеством исследований в области синтеза и анализа фазочастотных алгоритмов [18, 19], для обработки сейсмической информации.

#### Фазочастотный алгоритм определения временных сдвигов

В настоящей работе производится дальнейшее изучение информационных возможностей ФЧХ сейсмических трасс для определения временных сдвигов, создание на этой основе новых алгоритмов и исследования их в ситуациях, где применяемые на практике алгоритмы на основе ФВК не обеспечивают требуемой точности оцениваемых параметров.

Сначала построим процедуру определения временного положения сейсмических сигналов  $\tau$ , когда оптимальной обработке подвергаются лишь их ФЧХ. Для этого примем, что сигнал слабый ( $\rho(\omega_k) \leq 1$ ,  $\rho(\omega_k)$  – отношение сигнал/помеха на частоте  $\omega_k$ ) и регистрируется на фоне аддитивного нормального шума.

Функция правдоподобия в этом случае может быть представлена в виде

$$L(\tau) = W(\Delta\varphi(\omega_1), \Delta\varphi(\omega_2), \dots, \Delta\varphi(\omega_m) / \tau), \quad (2)$$

где  $W(\Delta\varphi(\omega_k) / \tau)$  – многомерная условная плотность вероятности  $\Delta\varphi(\omega_k)$ ;  $\Delta\varphi(\omega_1), \Delta\varphi(\omega_2), \dots, \Delta\varphi(\omega_m)$  – отклонения ФЧХ смеси сигнала с помехой от ФЧХ сигнала при различных значениях  $\tau$ .

Одномерная плотность вероятности для  $\Delta\varphi(\omega_k)$  приведена в [20]. Тогда, рассматривая ее как функцию от  $\tau$  и учитывая, что  $\tau$  является неэнергетическим параметром, запишем:

$$W(\Delta\varphi(\omega_k) / \tau) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\rho^2(\omega_k)}{2}\right) + \frac{\rho(\omega_k)}{\sqrt{2\pi}} \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau) \times \\ \times \Phi[\rho(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)] \times \\ \times \exp\left(-\frac{\rho^2(\omega_k)}{2} \sin(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)\right), \quad (3)$$

где  $\Phi$  – преобразование Лапласа.

Теперь, выбирая  $\Delta\omega$  так, чтобы  $\Delta\varphi(\omega_k)$  ( $k=\overline{1, m}$ ) были статистически независимы, выражение (2) можно переписать в виде

$$L(\tau) = \prod_{k=1}^m W\{\Delta\varphi(\omega_k) / \tau\}, \quad (4)$$

где  $W(\Delta\varphi(\omega_k) / \tau)$  – определяется из (3);  $m = \frac{\Omega}{\Delta\omega}$  – число анализируемых частотных компонент;  $\Delta\omega$  – шаг дискретизации по частоте.

Прологарифмируем (4) и, опуская члены, не зависящие от  $\tau$ , для случая слабого сигнала ( $\rho(\omega_k) \leq 1$ ) получим:

$$\ln L(\tau) = \sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau). \quad (5)$$

Тогда оптимальную оценку  $\hat{\tau}_{\text{опт}}$  можно найти из решения уравнения

$$\left. \frac{\partial}{\partial \tau} \ln L(\tau) \right|_{\tau=\hat{\tau}_{\text{опт}}} = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6), где  $\ln L(\tau)$  описывается (5), не позволяет в явном виде получить  $\hat{\tau}_{\text{опт}}$ . Однако, если учесть, что  $\tau$  принимает конечное число значений из некоторого интервала  $[t_1, t_2]$ , то  $\hat{\tau}_{\text{опт}} = \tau_0$ , при котором

$$\ln L(\tau_0) = \max\{\ln L(\tau)\}, \\ \tau \in [t_1, t_2]. \quad (7)$$

Покажем, что критерий (7) является также оптимальным и для сильных сигналов. При сильном сигнале флуктуации ФЧХ незначительны, поэтому (5) можно представить в виде

$$\ln L(\tau) = \sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) (\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)^2. \quad (8)$$

Тогда из решения уравнения (6) с учетом (8) получим:

$$\hat{\tau}_{\text{опт}} = \frac{\sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) \omega_k \Delta\varphi(\omega_k)}{\sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) \omega_k^2}. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает известную оценку временного положения сильного сигнала [13], когда оптимальной обработке подвергается его ФЧХ. Таким образом, критерий (5) является оптимальным как для случая слабых сигналов, так и для случая сильных сигналов, в то время как критерий (9) оптимальным для слабых сигналов не является. При этом дисперсия оценки  $\hat{\tau}_{\text{опт}}$  по критерию (9) для сильных сигналов совпадает с предельно достижимой и составляет:

$$\sigma_{\hat{\tau}_{\text{опт}}}^2 = [q_{\Sigma}^2(\sigma\omega)^2]^{-1},$$

где  $q_{\Sigma}^2 = \sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k)$  – суммарное отношение сигнал/помеха;  $\sigma\omega$  – среднеквадратическая ширина спектра сигнала.

Принимая  $\Delta\varphi(\omega_k) = \varphi_{\text{эт.}}(\omega_k) - \varphi(\omega_k)$ , нетрудно показать, что выражение (1) является частным случаем критерия (9) и дает оптимальную оценку временного положения сильного сигнала только для случая, когда отношение сигнал/помеха в анализируемой полосе частот является константой.

Для слабых сигналов дисперсия оптимальной оценки, по сравнению со случаем сильного сигнала, возрастает в  $4/\pi$  раз:

$$\sigma_{\hat{\tau}_{\text{опт}}}^2 = \frac{4}{\pi q_{\Sigma}^2(\sigma\omega)^2} = \frac{4}{(q'_{\Sigma})^2(\sigma\omega)^2}. \quad (10)$$

Для реализации оптимального алгоритма, как видно из (5), необходимо знать распределение отношения сигнал/помеха  $\rho(\omega)$  в полосе частот  $\Omega$ . На практике получить достаточно надежные оценки  $\rho(\omega)$  для  $\omega \in \Omega$  весьма сложно. Поэтому предлагается принять в (5)  $\rho(\omega) = \text{const}$  для  $\omega \in \Omega$ , т. е. перейти к равновесной обработке компонент фазового спектра. В этом случае, естественно, можно говорить только о квазиоптимальности получаемых результатов.

Оценим точность получаемых оценок временного положения сигналов  $\hat{\tau}$  при переходе к равновесной обработке. Для этого примем в выражении (5)  $\rho(\omega) = \text{const} = 1$  ( $\omega \in \Omega$ ) и получим:

$$\ln L_1(\tau) = \sum_{k=1}^m \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau). \quad (11)$$

Как следует из (10), дисперсия оценки  $\tau$  определяется суммарным отношением сигнал/помеха  $q'_{\Sigma}$  и среднеквадратической шириной спектра сигнала  $\sigma\omega$ . Так как при переходе от (5) к (11)  $\sigma\omega$  не изменяется, найдем чему будет равно  $q'_{\Sigma}$  при использовании критерия (11). Для этого воспользуемся методикой оценки потерь  $\eta$  при равновесной обработке многочастотного сигнала [21]. В нашем случае имеем:

$$\eta = (q'_{\Sigma} / q''_{\Sigma})^2 - 1, \quad (12)$$

где  $q'_{\Sigma}$  – суммарное отношение сигнал/помеха для критерия (5);  $q''_{\Sigma}$  – суммарное отношение сигнал/помеха для критерия (11).

Тогда, как следует из [18],  $\eta_{\text{max}}$  для (12) составляет:

$$\eta_{\text{max}} = \sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2 - 1$$

или

$$(q''_{\Sigma})^2 = \frac{(q'_{\Sigma})^2}{\sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2}.$$

Теперь, заменяя в (10) ( $q'_{\Sigma}$ ) на ( $q''_{\Sigma}$ ), получим дисперсию оценки  $\tau$  для критерия (11):

$$\sigma_{\hat{\tau}}^2 = \frac{4 \sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2}{\pi q_{\Sigma}^2(\sigma\omega)^2}.$$

Как и следовало ожидать, потеря оптимальности приводит к снижению точности получаемых оценок, причем  $\sigma_{\hat{\tau}}^2$  зависит от числа учитываемых гармоник в спектре сигнала. С ростом  $m$  дисперсия оценки  $\sigma_{\hat{\tau}}^2$  по отношению к предельно достижимой для учитываемого числа частотных компонент увеличивается, так, при  $m=3$   $\eta_{\text{max}}=0,27$ , а при  $m=10$   $\eta_{\text{max}}=0,754$ . Однако даже при  $m=20$  точность получаемых оценок достаточно высока. Рассмотрим практическую реализацию критерия с равновесной обработкой (11) для определения временных сдвигов между сейсмическими трассами.

Как следует из (11), для его реализации необходимо вычислить  $\Delta\varphi(\omega_k) = \varphi_{\text{эт.}}(\omega_k) - \varphi(\omega_k)$  для ( $k=1, m$ ) при различных  $\tau \in [t_1, t_2]$  – диапазон возможных значений временных сдвигов. Эту процедуру можно осуществить либо путем вычисления аргументов преобразования Фурье – преобразований отдельно эталонной трассы и трассы сейсмограммы, либо вычислением взаимного фазового спектра между этими трассами. Второй путь требует дополнительного вычисления ФВК между трассами, однако он позволяет получить более надежные оценки  $\hat{\Delta\varphi}(\omega_k)$  для ( $k=1, m$ ). Поэтому остановимся на этом пути. Тогда процедура определения временного сдвига, в соответствии с (11), сводится к вычислению мгновенного взаимного фазового спектра (МВФС) в интервале  $[t_1, t_2]$ . Мгновенный фазовый спектр является функцией, изменяющейся во времени и по частоте, и определяется как

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{эт.}i}(\omega, \tau) &= \Delta\varphi(\omega) - \omega\tau = \\ &= \text{Arg} \int_{\tau}^{T+\tau} R_{\text{эт.}i}(t) e^{-j\omega\left(t - \frac{T}{2} - \tau\right)} dt, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $R_{\text{эт.}i}(t)$  – ФВК между эталонной трассой и  $k$ -й трассой сейсмограммы;  $T$  – интервал расчета взаимного фазового спектра (окно анализа), включающий 3–5 видимых периодов ФВК.

Таким образом, как следует из (13), мгновенный взаимный фазовый спектр находится «скользящим» интегрированием: интервал интегрирования имеет постоянную длину  $T$  и перемещается по ФВК с шагом  $\Delta t$  ( $\Delta t$  – шаг дискретизации трассы) в окрестности ее глобального экстремума; для каждого мгновенного положения окна анализа (конкретного  $\tau \in [t_1, t_2]$ ) вычисляется взаимный фазовый спектр, при этом базисные функции, независимы от положения окна, считаются на отрезке  $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ .

В качестве оценки временного сдвига между трассами принимается  $\hat{\tau}$ , при котором достигается максимум логарифма функции качества [16] для рассчитанного мгновенного взаимного фазового спектра в интервале  $\tau \in [t_1, t_2]$ . Нетрудно увидеть, что определяемая таким образом оценка временного сдвига является точкой центра симметрии окрестности ФВК, включающей глобальный экстремум. Поскольку центральная симметричная оценка носит интегральный характер, то она должна быть более устойчивой, чем положение максимума ФВК [22, 23].

Теперь проведем исследование эффективности данного критерия для определения временных сдвигов в ситуациях, где применяемые на практике алгоритмы, основанные на расчете и анализе функций взаимной корреляции (ФВК), не обеспечивают требуемой точности получаемых оценок временных сдвигов.

Рассмотрим ситуации, при которых возникают существенные погрешности при оценке сдвига по положению максимумов ФВК [7]:

- симметричные распределения временных сдвигов  $\tau$  с дисперсией, превышающей половину видимого периода волны;
- распределения с резкой асимметрией;
- наличие интенсивных нерегулярных помех.

Будем считать, что в процессе обработки сейсмических данных производится вычисление ФВК между трассами сейсмограммы и набором эталонных трасс. Тогда взаимная спектральная плотность между трассой сейсмограмм и эталонной трассой без учета нерегулярных помех имеет вид [7]

$$G_{\text{эт.т.}}(\omega) = \gamma \bar{a}^2 (A_s^2(\omega)) \Psi_{\tau}(\omega),$$

где  $\gamma$  – среднее число сейсмических сигналов, появляющихся в единицу времени;  $\bar{a}^2 = M\{a_i^2\}$  – математическое ожидание квадратов амплитуд сигналов;  $A_s(\omega)$  – амплитудный спектр сигнала;  $\Psi_{\tau}(\omega)$  – характеристическая функция временного сдвига  $\tau$  (сопряженное преобразование Фурье от плотности вероятностей  $W(\tau)$ ).

В этом случае взаимный фазовый спектр записывается как

$$\Delta\varphi(\omega) = \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{\Psi_{\tau}(\omega)\}}{\text{Re}\{\Psi_{\tau}(\omega)\}} \right]. \quad (14)$$

Если дисперсия скоростей полезных волн в интервале вычисления ФВК равна нулю, то

$$\Delta\varphi(\omega) = \arctg[\text{tg}\omega\bar{\tau}] = \omega\bar{\tau},$$

и средний сдвиг между трассами  $\tau$  – определяется точно из условия максимизации (11):

$$\hat{\tau} = \bar{\tau}.$$

При наличии дисперсии волн по скорости проанализируем последовательно ситуации симметричного распределения временных сдвигов и распределения с резкой асимметрией. Возьмем в качестве примера симметричного распределения равномерное распределение временных сдвигов. В [7] показано, что при параметре разброса  $\delta > T_{\text{вид}}/2$  определение сдвига по положению максимума ФВК становится ненадежным. Запишем характеристическую функцию для равномерного распределения:

$$\Psi_{\tau}(\omega) = \delta^2 \sin c(2\delta\omega) e^{j\omega\bar{\tau}}, \quad (15)$$

и, подставляя (15) в (14), а найденное выражение в (11), окончательно получим:

$$\ln L_1(\tau) = \sum_{k=1}^m \cos(\omega\bar{\tau} - \omega\tau). \quad (16)$$

Из (16) видно, что максимум  $\ln L_1(\tau)$  независимо от величины  $\delta$  достигается при  $\hat{\tau} = \bar{\tau}$ , то есть сдвиг между трассами определяется верно. Следовательно, в данном случае предлагаемый алгоритм устраняет ошибки, возникающие при определении сдвига по положению максимума ФВК.

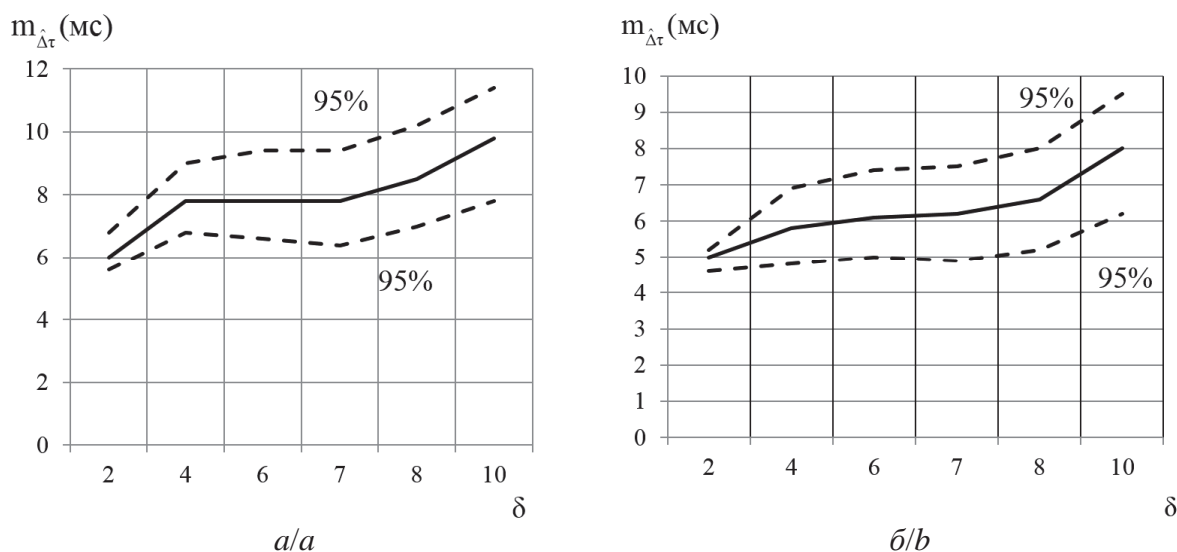
### Результаты экспериментов

Исследование эффективности алгоритма определения сдвигов по МВФС путем максимизации (11) для распределений сдвигов с резкой асимметрией проводилось с помощью статистического моделирования на ЭВМ. При этом в качестве примера распределения с резкой асимметрией было выбрано распределение Рэлея.

На рис. 1 и 2 приведены оценки математического ожидания и дисперсии временного сдвига в зависимости от величины параметра разброса в распределении Рэлея, найденные, соответственно, по положению максимума ФВК и предлагаемому алгоритму. Из рисунков видно, что для обоих алгоритмов получаемые оценки оказываются смещенными относительно среднего временного сдвига между трассами, и тем в большей степени, чем больше разброс распределения Рэлея. Однако смещение оценок и их дисперсии у предлагаемого алгоритма (рис. 1, б и 2, б) несколько ниже, чем в случае использования ФВК (рис. 1, а и 2, а). Следовательно, предлагаемый алгоритм при распределениях сдвигов с резкой асимметрией не устраняет полностью ошибок, свойственных ФВК в этом случае.

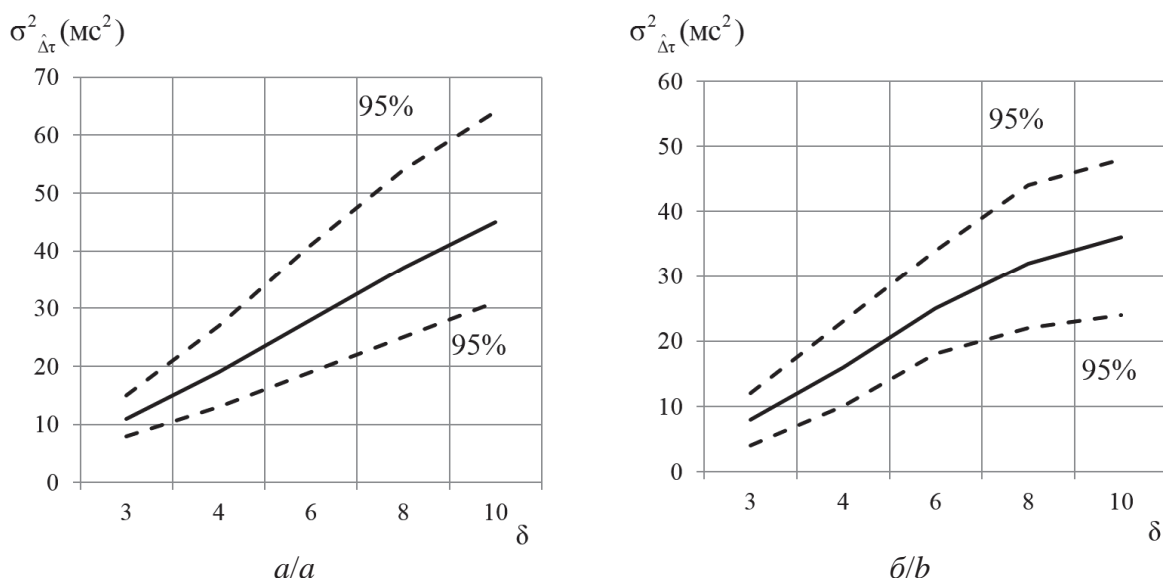
Исследование эффективности предлагаемого алгоритма определения сдвигов при интенсивных нерегулярных помехах проводилось также путем





**Рис. 1.** Оценка математического ожидания временных сдвигов между трассами: а) ФВК; б) МВФС

**Fig. 1.** Assessment of a population mean of temporary shifts between traces: a) mutual correlation functions (MCF); b) instantaneous mutual phase spectra (IMPhS)



**Рис. 2.** Оценка дисперсии временных сигналов между трассами: а) ВКФ; б) МВФС

**Fig. 2.** Assessment of dispersion of temporary signals between traces: a) MCF; b) IMPhS

статистического моделирования на ЭВМ. На рис. 3 показаны оценки дисперсии временного сдвига, найденного по двум сопоставляемым алгоритмам, когда анализируемые трассы содержали аддитивную помеху. Сравнение результатов показывает, что алгоритм определения сдвигов по МВФС (рис. 3, б) обеспечивает более высокую помехоустойчивость при низких отношениях сигнал/помеха ( $\mu \leq 2$ ), чем алгоритм на основе ВКФ (рис. 3, а).

Этот эффект объясняется тем, что, как уже отмечалось выше, центральная симметричная оценка (11) носит интегральный характер и, следовательно, является более устойчивой при нерегуляр-

ных помехах по сравнению с положением глобального максимума ФВК.

#### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что предлагаемый фазочастотный алгоритм позволяет в ряде практически важных случаев, а именно при наличии интенсивных нерегулярных помех и симметричных распределений временных сдвигов с большой дисперсией, существенно повысить точность и достоверность определения временных сдвигов по сравнению с методами, базирующимися на анализе ФВК.

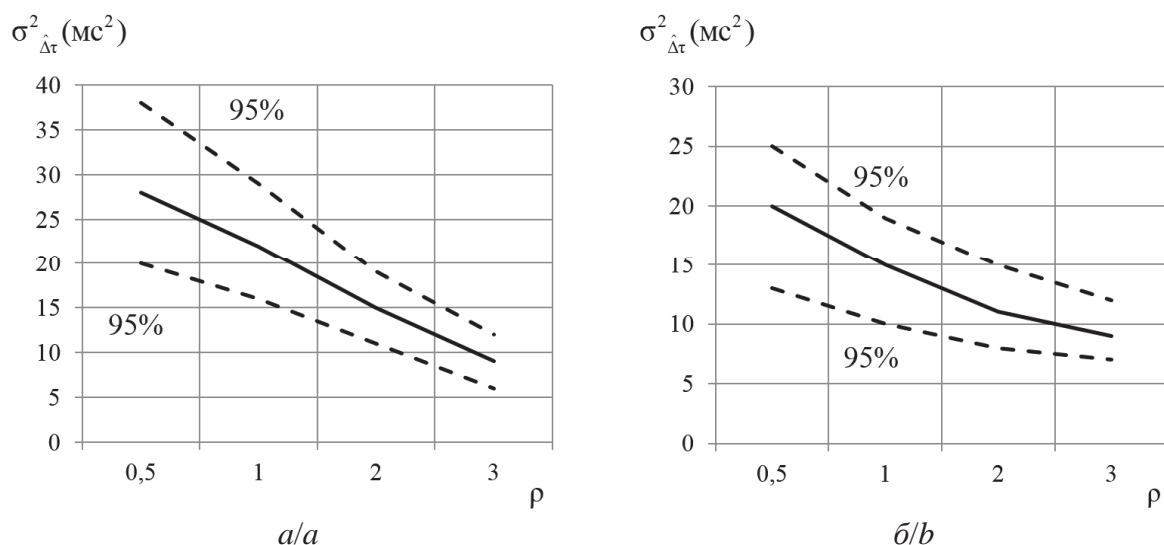


Рис. 3. Оценка дисперсии временных сдвигов между трассами при наличии помех: а) ВКФ; б) МВФС

Fig. 3. Assessment of dispersion of temporary shifts between traces at noises: a) MCF; b) IMPhS

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев В.С., Коротков И.П., Жуков А.П. Способы учета сложно построенной верхней части разреза в Западной Сибири // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 3. – С. 66–78.
2. Kearey Ph., Brooks M., Hill I. An Introduction to Geophysical Exploration. – 3<sup>rd</sup> ed. – US: Wiley-Blackwell, 2002. – 272 p.
3. Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A. Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – V. 39. – P. 441–463.
4. Douma H., Haney M. Surface-wave inversion for nearsurface shear-wave velocity estimation at Coronation field // 81<sup>st</sup> SEG Annual Meeting. Expanded Abstracts. – San Antonio, 2011. – P. 1411–1415.
5. Finite Difference Modeling to Evaluate Acquisition and Processing Parameters on Resolution of Land Seismics / O. Adamovich, K. Epov, I. Korotkov, P.C.H. Veeken // 72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2010. – Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401101.
6. Korotkov I., Veeken P.C.H., Kozyrev V. Interactive Static Corrections to Avoid Mis-interpretation of Seismic Data Due to Near-surface Velocity Changes // 72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2010. – Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401294.
7. Яновский А.К. Использование функций взаимной корреляции сейсмических трасс для увязки сейсмических наблюдений // Дискретная корреляция сейсмических волн. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 50–72.
8. An interactive solution for resolving mid-wavelength static anomalies / V. Kozyrev, Al. Zhukov, I. Korotkov, Ar. Zhukov // The Leading Edge. – 2004. – V. 23. – № 3. – P. 270–274.
9. Салищев М.В., Сысоев А.П. Уточнение модели коррекции статистических поправок // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 3. – С. 61–65.
10. Shaun Strong, Steve Hearn. Statics correction methods for 3D converted-wave (PS) seismic reflection // Exploration Geophysics. URL: <http://dx.doi.org/10.1071/EG15115> (дата обращения: 05.03.2016).
11. Худяков Г.И. О потенциальной точности определения временного положения флюктуирующих сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники. – 1984. – Вып. 8. – С. 55–60.
12. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. – 1988. – № 9. – С. 77–83.
13. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium processing // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – V. 342. – P. 27–36.
14. Зенов А.А. Вычисление оптимального временного сдвига между сейсмическими трассами // Разведочная геофизика. – 1977. – Вып. 76. – С. 18–21.
15. Данквардт Э., Патцер У. Проблемы использования фазовых спектров сейсмических данных // Труды 30-го Международного географического симпозиума. Стендовые доклады. – М., 1985. – Ч. 2. – С. 132–142.
16. Митрофанов Г.М. Обработка фазовых спектров многоканальных сейсмограмм // Геология и геофизика. – 1986. – № 10. – С. 99–109.
17. Каныгин М.Ю., Петрова Н.В. Согласование фазовых спектров сигналов при формировании обобщенных сейсмических проектов // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 1. – С. 56–59.
18. Методы фазочастотного прослеживания отраженных волн и их применения в задачах обработки сейсмической информации / В.П. Иванченков, А.И. Кочегуров, Н.А. Купина, О.В. Орлов // Технология сейсморазведки. – 2013. – № 3. – С. 5–10.
19. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения окоскважинного пространства // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 58–63.
20. Гольдин С.В. К теории спектрально-статистического метода обработки сейсмограмм // Геология и геофизика. – 1976. – № 1. – С. 138–149.
21. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Советское Радио. – 1975. – 296 с.

22. Hezo A., Schwatz S. Alternatives cross correlation for time delay estimation // ICA SSP 84; IEEE Int. conf. Acoust., Speech, and Signal Process. – San Diego, Calif., 1984. – V. 1. – P. 15.411–15.414.
23. Miller L.E., Lee J.S. Error analysis of time delay estimation using a finite integration time correlator // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1981. – V. 29. – P. 490–496.

*Поступила 26.04.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Иванченков В.П.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кочегуров А.И.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Нгуен Суан Хунг**, аспирант кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Злобина Е.В.**, магистрант кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Лаевский В.Е. (V. Geringer)**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Регенеративные источники энергии и автомобильная электроника» Государственного объединенного университета Баден-Вюртемберга.

UDC 550.834

## DEFINITION OF TEMPORARY SHIFT BETWEEN SEISMIC TRACES ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF THEIR PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS

Viktor P. Ivanchenkov<sup>1</sup>,

am@am.tpu.ru

Alexander I. Kochegurov<sup>1</sup>,

kaicc@tpu.ru

Nguyen Xuan Hung<sup>1</sup>,

hungnx@tpu.ru

Elena V. Zlobina<sup>1</sup>,

elena\_zlobina@list.ru

Viktor Geringer<sup>2</sup>,

geringer@dhw-ravensburg.de

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Baden-Wuerttemberg Cooperative State University,  
2, Fallenbrunnen, Friedrichshafen, D-88045, Germany.

**The relevance of the study.** The procedures for determining temporary shift, which are widely spread in practice, do not always guarantee the accuracy in defining static corrections. The arising errors lead to a distortion of kinematic parameters of the reflected waves. This affects adversely all subsequent constructions. Therefore, development of the effective method for determining the temporary shift is the relevant issue. The prospects of increasing the reliability of designing the structures, prepared for oil and gas exploration, are related to the successful solution of the problem.

**The aim** of the study is to develop and explore the reliability of the algorithm for determining the temporary shifts between seismic traces based on the optimal and suboptimal processing of phase-frequency characteristics of the reflected waves recorded when searching for oil and gas fields.

**The methods** used in the study: statistical synthesis and analysis of optimal decision rules, digital signal processing, methods of discrete Fourier transform, mathematical modeling and computer experiment.

**The results.** The authors showed the possibility of extracting useful information from the phase-frequency characteristics of seismic signals for obtaining the effective estimates of temporary shifts between traces. Based on the theory of statistical solutions the optimal algorithm for determining the temporary shifts by the instantaneous mutual phase spectra was built. For practical implementation of the algorithm, the authors proposed a transition from optimal to suboptimal processing of the components of the instantaneous mutual phase spectra by summing the equilibrium. It is shown that the equilibrium processing leads to almost twice reduction of the total signal/noise ratio for practically used strip of frequency. Even such losses allowed obtaining rather reliable estimates of temporary shifts at the intense irregular interference and symmetric distributions of temporary shifts with large dispersion.

### Key words:

Seismic waves, static corrections, function of mutual correlation, mutual phase ranges, phase-frequency tracing.

### REFERENCES

1. Kozyrev V.S., Korotkov I.P., Zhukov A.P. Method of accounting complicated constructed top part of a section in Western Siberia. *Tekhnologii seismorazvedki*, 2014, vol. 3, pp. 66–78. In Rus.
2. Kearey Ph., Brooks M., Hill I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3<sup>rd</sup> ed. US, Wiley-Blackwell, 2002. 272 p.
3. Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A. Estimation and correction of near-surface time anomalies. *Geophysics*, 1974, vol. 39, pp. 441–463.
4. Douma H., Haney M. Surface-wave inversion for nearsurface shear-wave velocity estimation at Coronation field. *81st SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*. San Antonio, 2011. pp. 1411–1415.
5. Adamovich O., Epov K., Korotkov I., Veecken P.C.H. Finite Difference Modeling to Evaluate Acquisition and Processing Parameters on Resolution of Land Seismics. *72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401101.
6. Korotkov I., Veecken P.C.H., Kozyrev V. Interactive Static Corrections to Avoid Mis-interpretation of Seismic Data Due to Near-surface Velocity Changes. *72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2010*. Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401294.
7. Yanovskiy A.K. Ispolzovanie funktsiy vzaimnoy korrelyatsii seysmicheskikh trass dlya uvyazki seysmicheskikh nablyudeniy [Use of functions of mutual correlation of seismic routes for coordination of seismic supervision]. *Diskretnaya korrelyatsiya seysmicheskikh voln* [Discrete correlation of seismic waves]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1971. pp. 50–72.
8. Kozyrev V., Zhukov A.I., Korotkov I., Zhukov A.R. An interactive solution for resolving mid-wavelength statics anomalies. *The Leading Edge*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 270–274.



9. Salishchev M.V., Sysoev A.P. Specification of correction model of statistical amendments. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2014, vol. 3, pp. 61–65. In Rus.
10. Shaun Strong, Steve Hearn. Statics correction methods for 3D converted-wave (PS) seismic reflection. *Exploration Geophysics*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1071/EG15115> (accepted: 5 March 2016).
11. Khudyakov G.I. O potentsialnoy tochnosti opredeleniya vremennogo polozheniya fluktuiruyushchikh signalov [About the potential accuracy of defining provisional regulations of fluctuating signals]. *Voprosy radioelektroniki. Seriy: Obshchie voprosy radioelektroniki*, 1984, no. 8, pp. 55–60.
12. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I. Opredelenie vremennogo polozheniya seysmicheskikh signalov po otsenkam ikh fazochastotnykh kharakteristik [Determination of temporal position of seismic signals to measure their phase response]. *Russian Geology and Geophysics*, 1988, vol. 9, pp. 77–83.
13. Kochegurov A. I., Kochegurova E. A., Kupina N. A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, vol. 342, pp. 27–36.
14. Zenov A.A. Vychislenie optimalnogo vremennogo sdviga mezhd seysmicheskimi trassami [Calculation of optimum temporary shift between seismic routes]. *Razvedochnay geofizika*, 1977, no. 76, pp. 18–21.
15. Dankvardt E., Pattser U. Problemy ispolzovaniy fazovykh spektrov seysmicheskikh dannyykh [Problems of using phase spectra of seismic data]. *Trudy 30 Mezhdunarodnogo geograficheskogo simpoziuma* [Proc. of the 30 International geographical symposium]. Moscow, 1985. No. 2, pp. 132–142.
16. Mitrofanov G.M. Obrabotka fazovykh spektrov mnogokanalnykh seysmogramm [Processing of phase ranges of multichannel seismographic records]. *Russian Geology and Geophysics*, 1986, vol. 10, pp. 99–109.
17. Kanygin M.Yu., Petrova N.V. Soglasovanie fazovykh spektrov signalov pri formirovani obobshchennykh seysmicheskikh proektov [Coordination of signal phase ranges when forming generalized seismic projects]. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2009, vol. 1, pp. 56–59. In Rus.
18. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Kupina N.A., Orlov O.V. Phase/frequency picking of reflection events: method and application to cmp data processing. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2013, vol. 3, pp. 5–10. In Rus.
19. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. Application of the phase-frequency analysis methods of seismic waves to study borehole environment. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, vol. 10, pp. 58–63. In Rus.
20. Goldin S.V. K teorii spektralno-statisticheskogo metoda obrabotki seysmogramm [To the theory of a spectral and statistical method of processing seismographic records]. *Russian Geology and Geophysics*, 1976, vol. 1, pp. 138–149.
21. *Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh* [Search, detection and measurement of parameters of signals in radio navigational systems]. Ed. by Yu.M. Kazarinov. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975. 296 p.
22. Hezo A., Schwatz S. Alternatives cross correlation for time delay estimation. *ICA SSP 84; IEEE Int. conf. Acoustics, Speech, and Signal Process.* San Diego, Calif., 1984. Vol. 1, pp. 15.411–15.414.
23. Miller L.E., Lee J.S. Error analysis of time delay estimation using a finite integration time correlator. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981. Vol. 29, pp. 490–496.

*Received: 26 April 2016.*

#### Information about the authors

**Viktor P. Ivanchenkov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander I. Kochegurov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nguyen Xuan Hung**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Elena V. Zlobina**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Viktor Geringer**, Dr. Sc., Head of the Laboratories, Baden-Wuerttemberg Cooperative State University.