

УДК 550.34, 550.834

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОРАЗРЫВА НЕФТЕГАЗОНОСНОГО ПЛАСТА НА ФОРМУ И СПЕКТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

© 2011 г. М.А. Краснова, Е.М. Чесноков

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Изменения физических свойств резервуара в процессе гидроразрыва нефтегазоносного пласта, проводимого с целью увеличения продуктивности скважин, изучались на основе анализа сейсмических записей технологических взрывов на двух полигонах в северо-восточной части Техаса (США). Для анализа были отобраны записи, полученные в скважинах, расположенных на расстоянии не более 1000 м от точки взрыва. Процесс гидроразрыва включал несколько стадий; технологические взрывы производились как перед его началом, так и между стадиями. Сигналы регистрировались системой из 12 трехкомпонентных сейсмических датчиков, установленных в скважине по вертикали.

Анализ волновых форм и спектральных характеристик продольных волн показал, что для взрывов, близких по времени (интервал между взрывами <10 мин) и в пространстве (расстояние между пунктами взрыва <15 м), форма регистрируемого сигнала и спектр продольной волны повторяются с высокой точностью (коэффициент корреляции сигналов >0.95). Спектры сигналов, распространяющихся из одной точки, но разделенных во времени процессами гидронакачки пласта и его гидроразрыва, различны; коэффициенты корреляции более низкие (<0.3).

Полученные результаты позволяют утверждать, что процедура гидроразрыва пласта приводит к существенным изменениям физических свойств резервуара, которые могут быть выявлены экспериментально и проанализированы теоретически.

Ключевые слова: сейсмическая анизотропия, межскважинное просвечивание, гидроразрыв пласта.

Введение

Различные процессы, протекающие в земной коре – процесс подготовки землетрясений, гидротермальная активность, разработка гидротермальных резервуаров, заполнение водохранилищ, утилизация вредных отходов, процессы гидронакачки при разработке нефтегазовых месторождений – достаточно сильно влияют на физические свойства геологической среды. Однако до настоящего времени при сейсмических исследованиях, как правило, используется модель, построенная по неким предварительным данным, в которую не вносятся никаких корректив, связанных с протекающими процессами. Это приводит к тому, что с течением времени интерпретация результатов перестает адекватно отражать реальную ситуацию в среде. Теоретические исследования сложнопостроенных сред свидетельствуют, что изменение напряженного состояния и флюидонасыщенности среды приводит к существенному изменению ее физических свойств [Nur, 1971; Rathore et al., 1994; Баяк, Калинин, 1995; Zatsepin, Crampin, 1997]. Существует целый ряд экспериментальных исследований (лабораторных и полевых), демонстрирующих изменение сейсмических свойств среды в результате происходящих в ней процессов, включая процесс подготовки землетрясения [Krasnova, Chesnokov, 1999; Angerer et al., 2002; Gao, Crampin, 2003]. Гидронакачка межскважинного пространства вызывает раскрытие существующих трещин и микроразломов, ощутимо меняет флюидонасыщенность среды, что приводит к изменению физических характеристик в межскважинном пространстве не только за счет изменения геометрии трещиноватости, но и за счет изме-

нения физических свойств флюида, насыщающего породы. Один из способов исследования такого явления в полевых условиях – сопоставление результатов межскважинного сейсмического просвечивания до и после гидронакачки. Однако надо отметить, что если межскважинное просвечивание до гидронакачки проводится практически всегда, то после нее эта процедура выполняется крайне редко.

Микросейсмичность, индуцированная процессом гидронакачки, сама по себе является свидетельством гидроразрыва пласта. Анализируя пространственное распределение очагов микроземлетрясений, выделение сейсмической энергии и ориентацию механизмов очагов микроземлетрясений, можно контролировать течение процесса гидроразрыва. Однако процесс гидроразрыва вызывает постепенное изменение физических свойств среды, в связи с чем естественно предположить, что первоначальная сейсмическая модель среды, построенная по данным, полученным до начала гидронакачки, со временем перестает соответствовать реальным свойствам среды. Поэтому со временем ухудшается точность локации микроземлетрясений, и в ходе накачки становится хуже контроль геометрии процесса гидрорастрескивания. В такой ситуации необходимо введение динамической модели среды, т.е. важно рассматривать параметры скоростной модели, изменяющиеся во времени в соответствии с характеристиками процесса гидроразрыва пласта.

Изменение физических свойств среды в межскважинном пространстве может вызвать изменения не только скоростных параметров, но и диссипативных свойств среды и спектральных характеристик очагов землетрясений, что отразится на записях сейсмических сигналов. В связи с этим поведение кинематических и спектральных характеристик сейсмических записей микроземлетрясений анализировалось во времени.

Главная задача данного исследования – изучение формы и спектров *P*-волн от технологических взрывов для анализа значимости их изменений до и после процедуры гидроразрыва пласта. Необходимость рассмотрения сигналов именно от технологических взрывов обусловлена точной информацией об их положении во времени и пространстве, тогда как локация микроземлетрясений неоднозначна.

Идеальным для такого исследования можно считать тестовый полигон, на котором, во-первых, проведены несколько технологических взрывов одновременно в одной точке – взрывы не разделены процессом накачки, расстояние между ними не превышает длины волны (использование таких сигналов необходимо для контроля повторяемости их формы и анализа спектральных характеристик технологических взрывов в неизменной среде); во-вторых, в одной точке произведены несколько взрывов, разделенных процессом гидронакачки. Второй пункт является ключевым для данного исследования.

Сейсмические данные

Целью исследования было обнаружение свидетельств изменений физических свойств среды, отражающихся в характеристиках волновых полей сейсмических сигналов, распространяющихся в подвергаемом гидронакачке межскважинном пространстве. В первую очередь, нас интересовали такие тестовые полигоны, на которых гидронакачка проводилась в несколько этапов (стадий). Как правило, на тестовых полигонах производится по несколько технологических взрывов перед каждой (или каждой второй) стадией гидронакачки. Для гидронакачки, чаще всего, используется смесь песка и воды, нагнетаемая как в вертикальные, так и в горизонтальные скважины.

На северо-востоке штата Техас (США) были выбраны два тестовых полигона, удаленных друг от друга примерно на 30 км, которые удовлетворяли необходимым условиям эксперимента (рис. 1, 2). Скважины накачки на полигонах были горизонтальными,

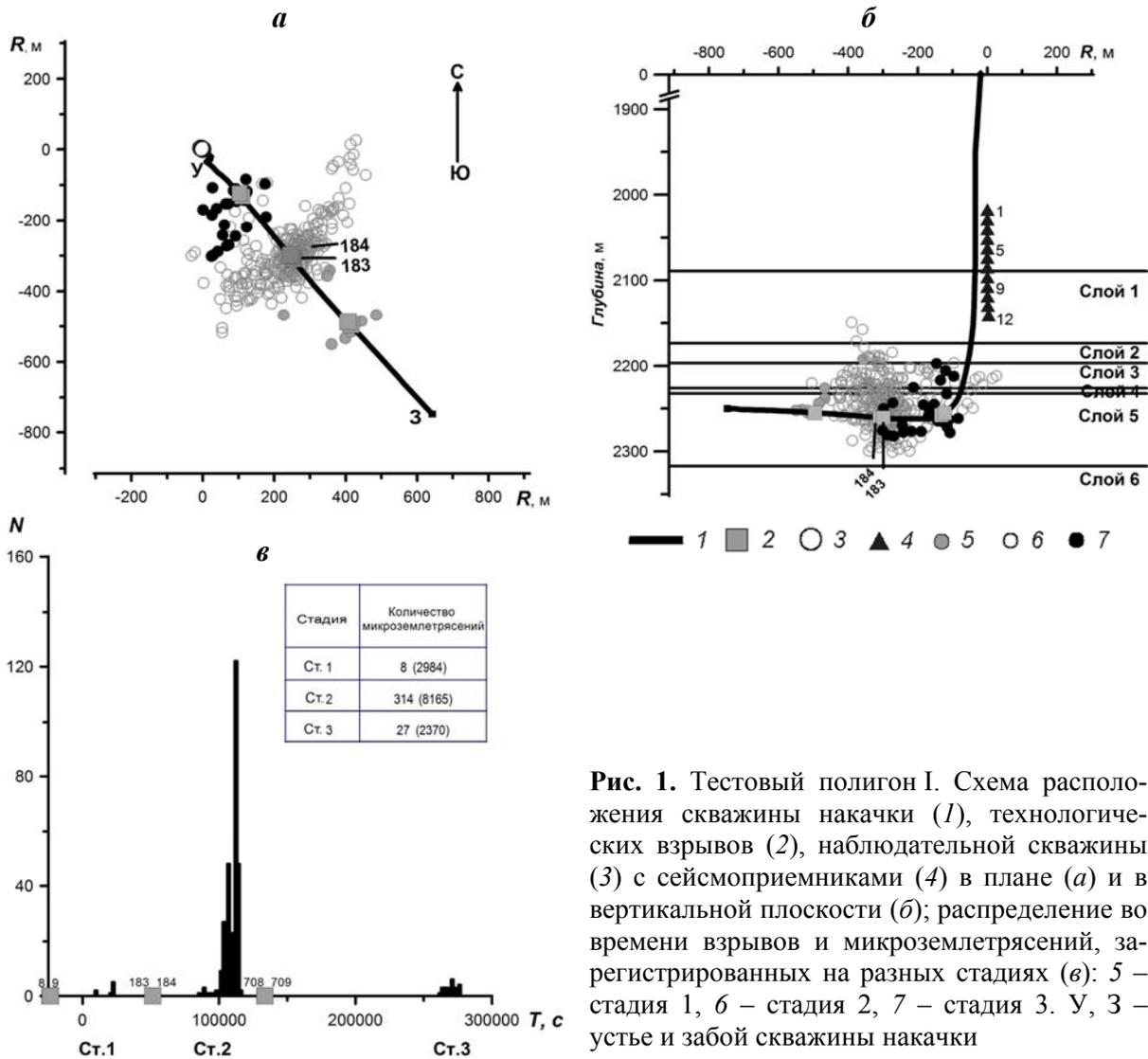


Рис. 1. Тестовый полигон I. Схема расположения скважины накачки (1), технологических взрывов (2), наблюдательной скважины (3) с сейсмоприемниками (4) в плане (а) и в вертикальной плоскости (б); распределение во времени взрывов и микрореметрясений, зарегистрированных на разных стадиях (в): 5 – стадия 1, 6 – стадия 2, 7 – стадия 3. У, 3 – устье и забой скважины накачки

скважины наблюдения – вертикальными. Накачка проводилась в несколько стадий; технологические взрывы выполнялись на разных ее стадиях. Оба полигона расположены в пределах одной и той же геологической структуры и близки по геологическому строению. На интересующих нас глубинах (1800–2500 м) залегают несколько горизонтальных слоев глинистых сланцев, мощностью от 5 до 83 м, переслоенных известняками. Все анализируемые технологические взрывы были произведены в слое глинистых сланцев (слой 1), который на полигоне I имеет мощность 84 м, на полигоне II – 81 м.

Сигналы регистрировались системой из 12 скважинных трехкомпонентных сейсмоприемников, установленных в вертикальных наблюдательных скважинах на расстоянии ~12 м друг от друга; расстояние наблюдательных скважин от скважины накачки – 305–915 м. На обоих полигонах регистрирующие сейсмоприемники были размещены в скважинах перед началом гидронакачки и не переустанавливались до окончания этого процесса. Они располагались на ~122–244 м выше пунктов технологических взрывов в карбонатных слоях, покрывающих исследуемые сланцы. Частотный (100–500 Гц) и динамический диапазоны сейсмоприемников, их чувствительность позволяли уверенно регистрировать сейсмические события с магнитудами от –4 до 2 в цифровом виде с частотой дискретизации 4 кГц.

На тестовом полигоне I (рис. 1) гидронакачка производилась в три этапа, каждый из которых предварялся двумя технологическими взрывами. Все три пары взрывов

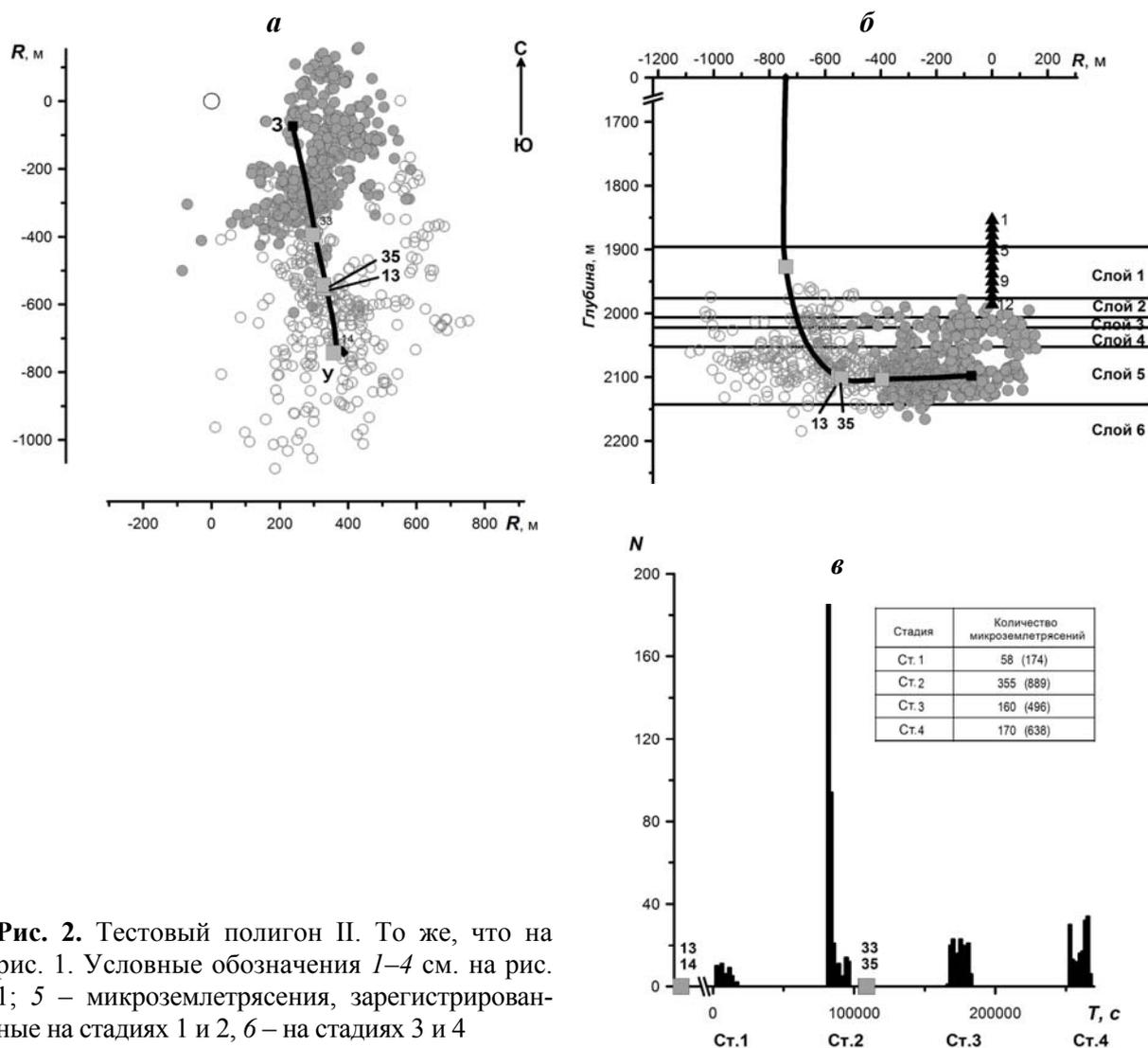


Рис. 2. Тестовый полигон II. То же, что на рис. 1. Условные обозначения 1–4 см. на рис. 1; 5 – микроземлетрясения, зарегистрированные на стадиях 1 и 2, б – на стадиях 3 и 4

были произведены в слое 1. Пункты взрывов, как и сейсмоприемники, находились на расстоянии 12 м один от другого; интервал между взрывами не превышал 2 мин. Первая пара взрывов удалена от наблюдательной скважины примерно на 640 м, вторая – на 390 м, третья – на 165 м. На рис. 1, в приведен график, демонстрирующий количество сейсмических событий, зафиксированных на каждой стадии гидронакачки, и их распределение по времени на разных этапах. Таким образом, полученные на полигоне I данные могут быть использованы для контроля идентичности формы сигналов технологических взрывов, произведенных в одной точке в одно время на разных этапах процесса гидроразрыва пласта.

Гидронакачка на полигоне II включала четыре стадии. Два технологических взрыва были произведены перед ее началом, еще два – перед третьей стадией. Три взрыва выполнены в пределах слоя 1, один в слое 2. Предваряющие процесс гидронакачки взрывы были произведены на расстоянии 257 м один от другого с интервалом ~53 мин (первый – в слое 1, второй – в слое 2). Взрывы перед третьей стадией располагались на расстоянии 150 м один от другого, интервал между ними составлял ~5 мин; оба взрыва были произведены в слое 1. Более поздний из этих взрывов находился на расстоянии 12 м от одного из взрывов, произведенных перед началом гидронакачки. Таким образом, эксперимент на полигоне II позволяет анализировать две ситуации: первая – два взрыва произведены практически в одной точке, но разделены процессом

гидрорастрескивания; вторая – два взрыва разнесены в пространстве, но близки по времени. Схема эксперимента на полигоне II и график количества событий, зарегистрированных в процессе гидрорастрескивания, показаны на рис. 2.

Процесс гидроразрыва пласта приводит к изменению упругих и диссипативных свойств среды, что должно отражаться в характеристиках сейсмического волнового поля. Поскольку выделение поперечных волн на полигоне I было затруднено, эта группа волн в данном исследовании не анализировалась. Основное внимание было уделено исследованию волновых форм и спектральных характеристик для группы продольных волн. При этом рассчитывались корреляционные функции и коэффициенты корреляции для различных сигналов. Названные характеристики вычислялись независимо для каждой из компонент сигнала; спектры сигналов также вычислялись покомпонентно.

На записях всех взрывов на обоих полигонах наблюдаются четкие первые вступления группы *P*-волн. Первичная обработка сейсмограмм заключалась в выделении полезного сигнала и визуальном определении момента первого вступления продольной волны.

Корреляция волновых форм

Для сравнения волновых форм разных взрывов строились временные корреляционные функции и рассчитывались коэффициенты корреляции всего сигнала. Рассматривался некоторый временной интервал каждой из трех компонент сейсмической записи. Покажем это в деталях.

1. Пусть τ – длительность интервала, Δt – шаг дискретизации, N ($\tau = N\Delta t$) – количество точек в выбранной реализации. Тогда сигнал $Z(t)$ может быть представлен в виде последовательности амплитуд $Z_i = Z(t_i)$, где $t_i = t_0 + i\Delta t$, t_0 – момент начала рассматриваемого интервала, $i = 0, 1, \dots, N$. В дальнейшем будут рассматриваться интервалы, на которых среднее значение амплитуды равно нулю.

2. Для анализа возьмем участки записей одноименных компонент двух взрывов – $Z'(t)$ и $Z''(t)$. Временные реализации выбираем так, что $t'_0 = t'_p$, $t''_0 = t''_p$. Оба участка записей в таком случае могут быть представлены в виде:

$$Z'_i = Z'(t'_p + i\Delta t) \quad \text{и} \quad Z''_i = Z''(t''_p + i\Delta t), \quad i = 0, 1, \dots, N.$$

Коэффициент корреляции исследуемых сигналов вычисляется по формуле [Корн, 1968]:

$$K = \frac{\sum_{i=0}^N (Z'_i Z''_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^N (Z'_i Z'_i) \sum_{i=0}^N (Z''_i Z''_i)}}.$$

Нами рассматривались также временные корреляционные функции в скользящем окне. Для временного интервала τ , $\tau = \Delta t N$ и скользящего окна шириной $\tau_{win} = \Delta t n_{win}$, корреляционная функция вычисляется по формуле:

$$\kappa(t_i) = \frac{\sum_{j=i}^{i+n_{win}} (Z'_j Z''_j)}{\sqrt{\sum_{j=i}^{i+n_{win}} (Z'_j Z'_j) \sum_{j=i}^{i+n_{win}} (Z''_j Z''_j)}}, \quad i = 0, 1, \dots, N - n_{win}.$$

Ширина скользящего окна при вычислении временной корреляционной функции выбирается исходя из следующих соображений: во-первых, окно должно быть достаточно широким для того, чтобы среднее значение амплитуды сигнала в пределах окна было

близко к нулю; во-вторых, чем уже скользящее окно, тем более детальной получается корреляционная функция. Нами была выбрана ширина скользящего окна 5.25 мс, что составляет для исследуемых сигналов 1–3 периода.

В настоящей статье приводятся результаты анализа, выполненного по записям сейсмоприемника № 9, установленного в слое 2 (см. рис. 1, б). Для сопоставления были выбраны следующие пары технологических взрывов (см. рис. 1, 2):

- полигон I взрывы 183, 184, близкие в пространстве и во времени (расстояние 12 м, временная разница 71 с);
- полигон II взрывы 13, 35, близкие в пространстве, но разделенные во времени процессом гидроразрыва пласта (в интервале между этими взрывами были зафиксированы 1063 микроземлетрясения).

Для обеих пар событий вычислялись коэффициенты корреляции и строились временные корреляционные функции.

Чтобы выявить влияние процесса гидроразрыва на форму сигнала, в первую очередь, необходимо определить, являются ли сейсмические сигналы, излучаемые взрывами, идентичными. Для этого рассматривались сигналы от первой пары взрывов, которые близки и в пространстве, и во времени – расстояние между ними меньше длины волны, среда остается неизменной.

Пример корреляционных функций для всех трех компонент сигнала, зарегистрированного сейсмоприемником № 9 от первой пары взрывов, приведен на рис. 3. Анализ показал, что на некотором участке сейсмической записи значения корреляционных функций остаются близкими к 1 (во всех анализируемых случаях длительность этого участка более 40 мс). Это говорит о том, что используемые источники имеют идентичную форму сигналов и в качестве полезного сигнала могут быть использованы первые 30 мс записей группы *P*-волн. Последнее связано с тем, что при увеличении временного интервала значения корреляционной функции начинают падать, так как затухание полезного сигнала приводит к тому, что его амплитуда становится сопоставима с амплитудой сейсмических шумов. Для дальнейшего анализа использовались первые 30 мс сейсмической записи от момента вступления *P*-волны.

Анализ показал, что для взрывов, произведенных в одной точке в одно время, значения корреляционных функций близки к 1 (>0.95) для всего рассматриваемого интервала для всех компонент на всех станциях системы наблюдений.

Корреляционная функция, рассчитанная для второй пары взрывов для всех трех компонент, зарегистрированных тем же сейсмоприемником № 9, расположенным в слое 2, показана на рис. 4.

Анализ корреляционных функций для взрывов, произведенных в одном месте, но разделенных процессом гидрорастрескивания (полигон II, взрывы 13, 35), показывает, что в этом случае корреляция между сигналами становится более слабой (значения корреляционной функции <0.5) для всех компонент на всех станциях на всем исследуемом интервале.

Кроме корреляционных функций рассчитывались коэффициенты корреляции для всего сигнала длительностью 30 мс для каждой компоненты и каждого сейсмоприемника системы наблюдения (рис. 5). Сравнение коэффициентов корреляции сигналов, записанных разными сейсмоприемниками, показывает, что для первой пары взрывов для всех трех компонент средний коэффициент корреляции имеет значение не ниже, чем 0.94.

Для второй пары событий средние коэффициенты корреляции, определенные по всем записям, не превышают значения 0.32, причем для сейсмоприемников, установленных в слое 2, средний коэффициент корреляции еще ниже (~ 0.15).

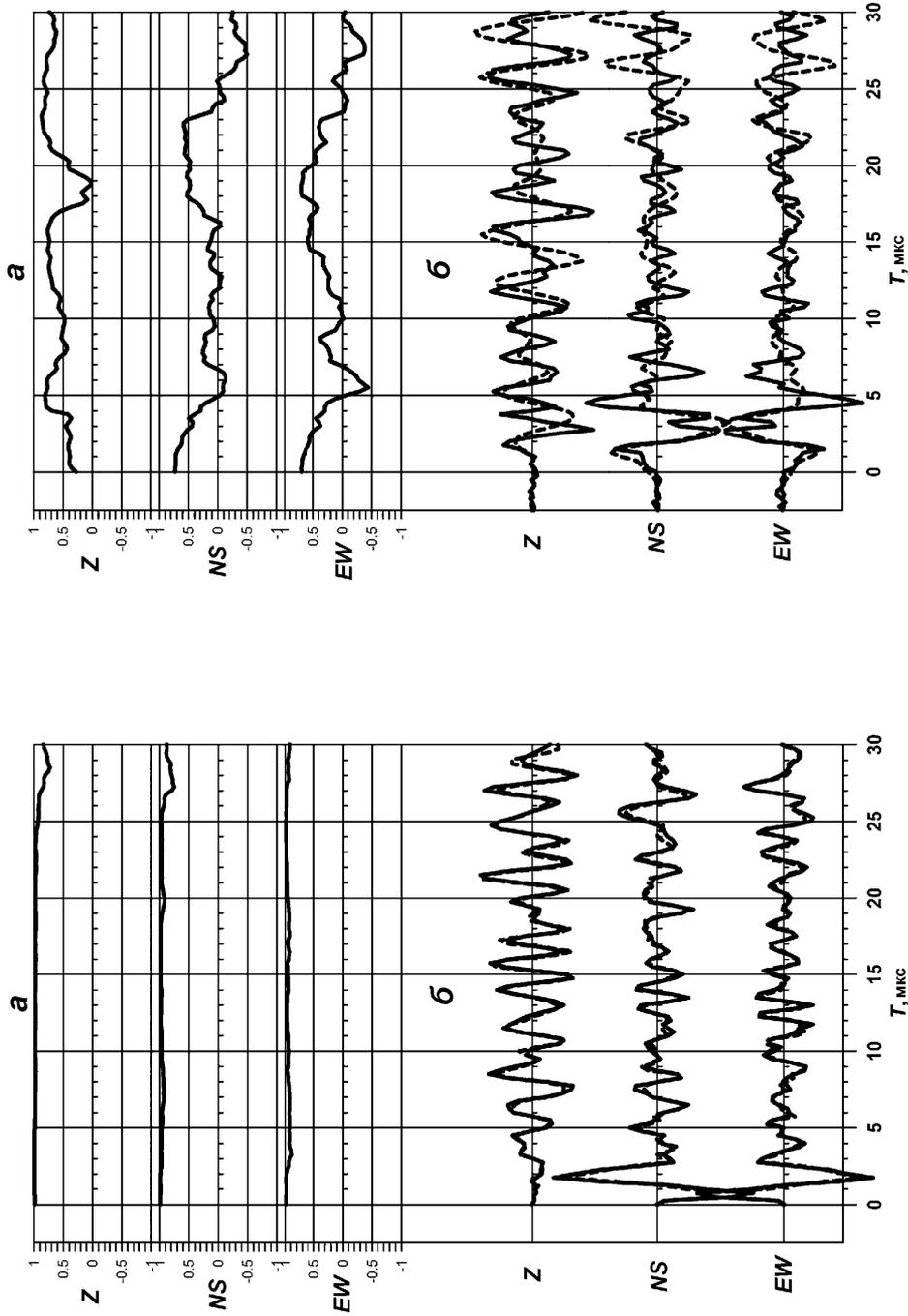


Рис. 3. Корреляционные функции в бегущем временном окне длиной 5.25 мс (а) и волновые формы для вступления P -волн (б). Полигон I, взрывы 183 (сплошная линия) и 184 (штриховая), сейсмоприемник № 9

Рис. 4. Корреляционные функции в бегущем временном окне длиной 5.25 мс (а) и волновые формы для вступления P -волн (б). Полигон II, взрывы 13 (сплошная линия) и 35 (штриховая), сейсмоприемник № 9

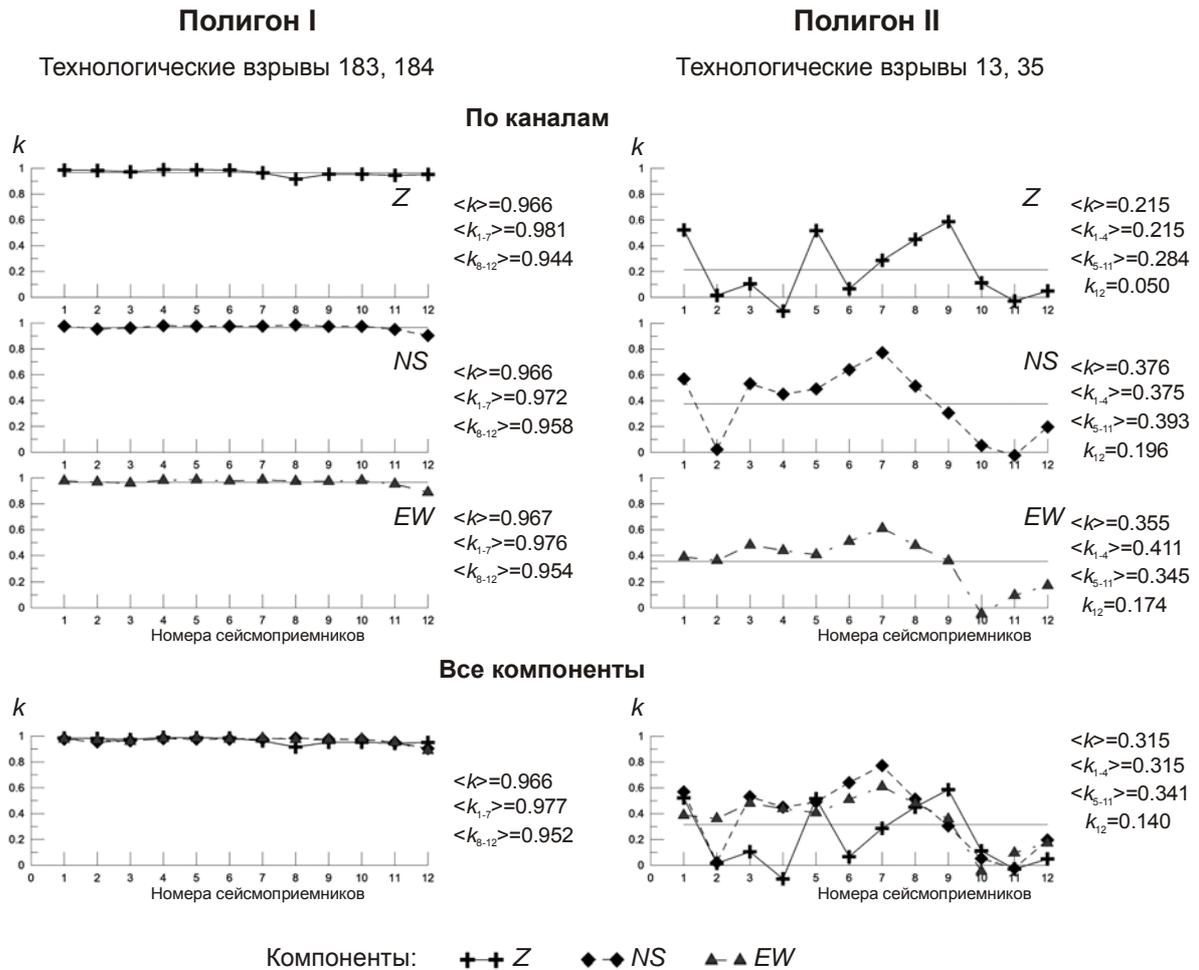


Рис. 5. Коэффициенты корреляции для интервала длительностью 30 мс от момента вступления *P*-волн, вычисленные отдельно по записям компонент *Z*, *NS*, *EW* для всех сейсмоприемников и по всем каналам. $\langle k \rangle$ – средний коэффициент корреляции по всем сейсмоприемникам, $\langle k_{1-7} \rangle$, $\langle k_{8-12} \rangle$, ... – средние коэффициенты корреляции для групп сейсмоприемников 1–7, 8–12, ...

Исследование спектральных характеристик сейсмических сигналов

Для вычисления спектров сигналов в выбранном временном интервале применялась стандартная процедура быстрого преобразования Фурье (БПФ) из библиотеки *Fortran IMSL*. Покомпонентно рассчитывались спектры для выбранных интервалов записи продольной волны, имеющих длительность 30 мс.

При сравнении спектров различных сигналов рассматривались их разности, нормированные на энергию сигнала. Кроме того, для исследования распределения энергии сигнала по частотам рассматривалась функция

$$d(f) = \frac{\int_{f_{\min}}^f (A(\varphi))^2 d\varphi}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (A(\varphi))^2 d\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n (A(f_i))^2}{\sum_{i=1}^N (A(f_i))^2},$$

где f_{\min} , f_{\max} – границы рассматриваемого интервала частот; $A(f)$ – амплитуда спектра на частоте f , $f_i = f_{\min} + \delta f \cdot i$, $i = 0, 1, \dots, n$, $f = f_n = f_{\min} + \delta f \cdot n$, n – количество точек в выбранном временном интервале.

Функция $d(f)$ нормирована на энергию сигнала (в интервале частот $f_{\min} - f_{\max}$); следовательно, для сравнения спектров двух разных сигналов можно рассматривать разность функций $d(f)$ для них: $D(f) = d' - d''$. $D(f)$ на высоких частотах стремится к нулю. На рис. 6, 7 приведены примеры спектров и функций $d(f)$ и $D(f)$ для обеих пар взрывов, вычисленные для сигналов, зарегистрированных сейсмоприемником № 9.

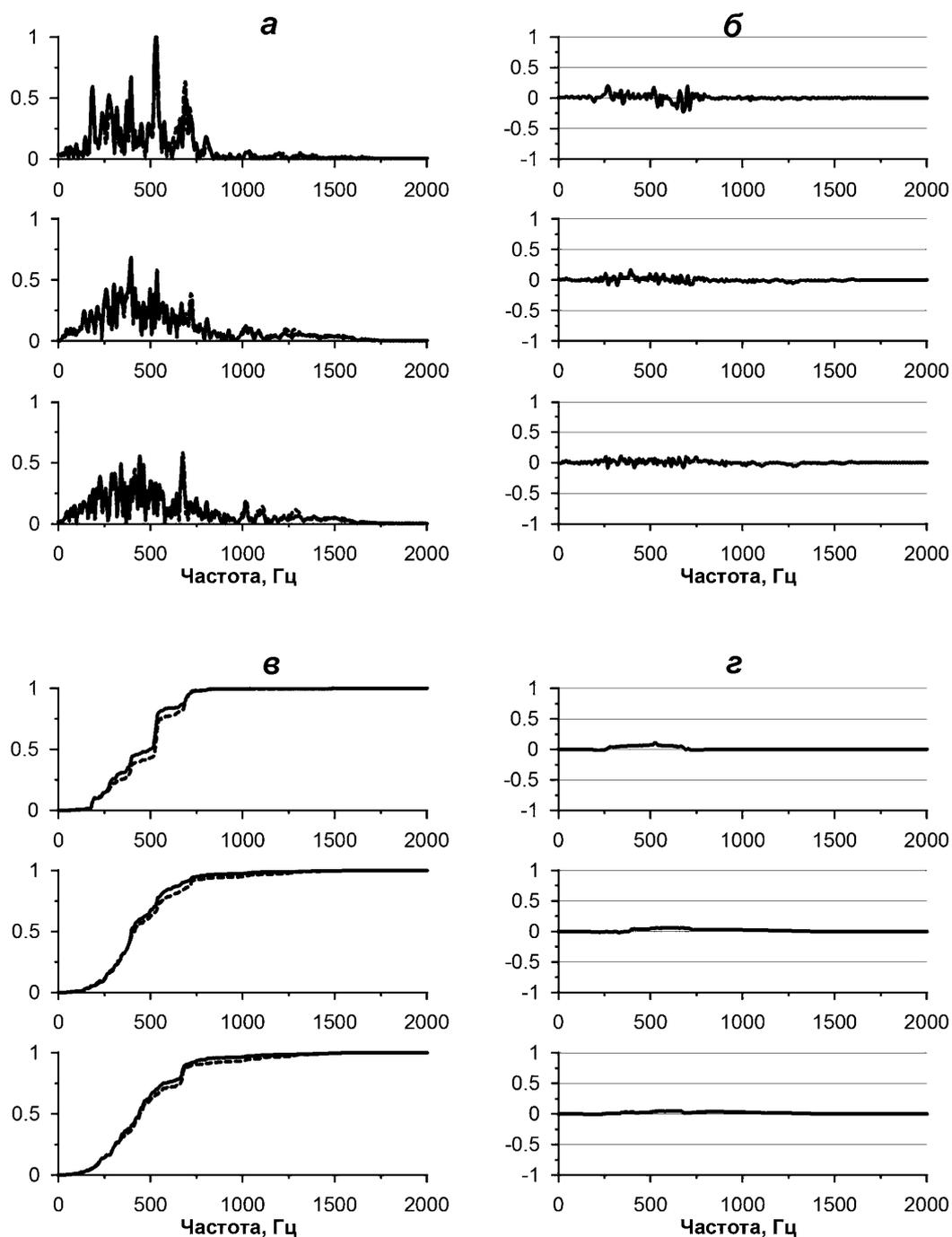


Рис. 6. Спектры сигналов (а), их разности (б), функции $d(f)$ (в) и $D(f)$ (г) для интервала длительностью 30 мс от момента вступления P -волн. Полигон I, технологические взрывы 183 и 184, сейсмоприемник № 9. На в: сплошная линия – взрыв 183, штриховая – 184

По характеру поведения функции $D(f)$ можно судить о разнице распределения энергии первого и второго сигналов по частотам. Для диапазонов частот, на которых функция $D(f)$ возрастает, спектр первого сигнала имеет большие амплитуды. Если функция $D(f)$ не меняет знак на всем интервале, то при ее отрицательных значениях первый сигнал является более высокочастотным, при положительных – менее.

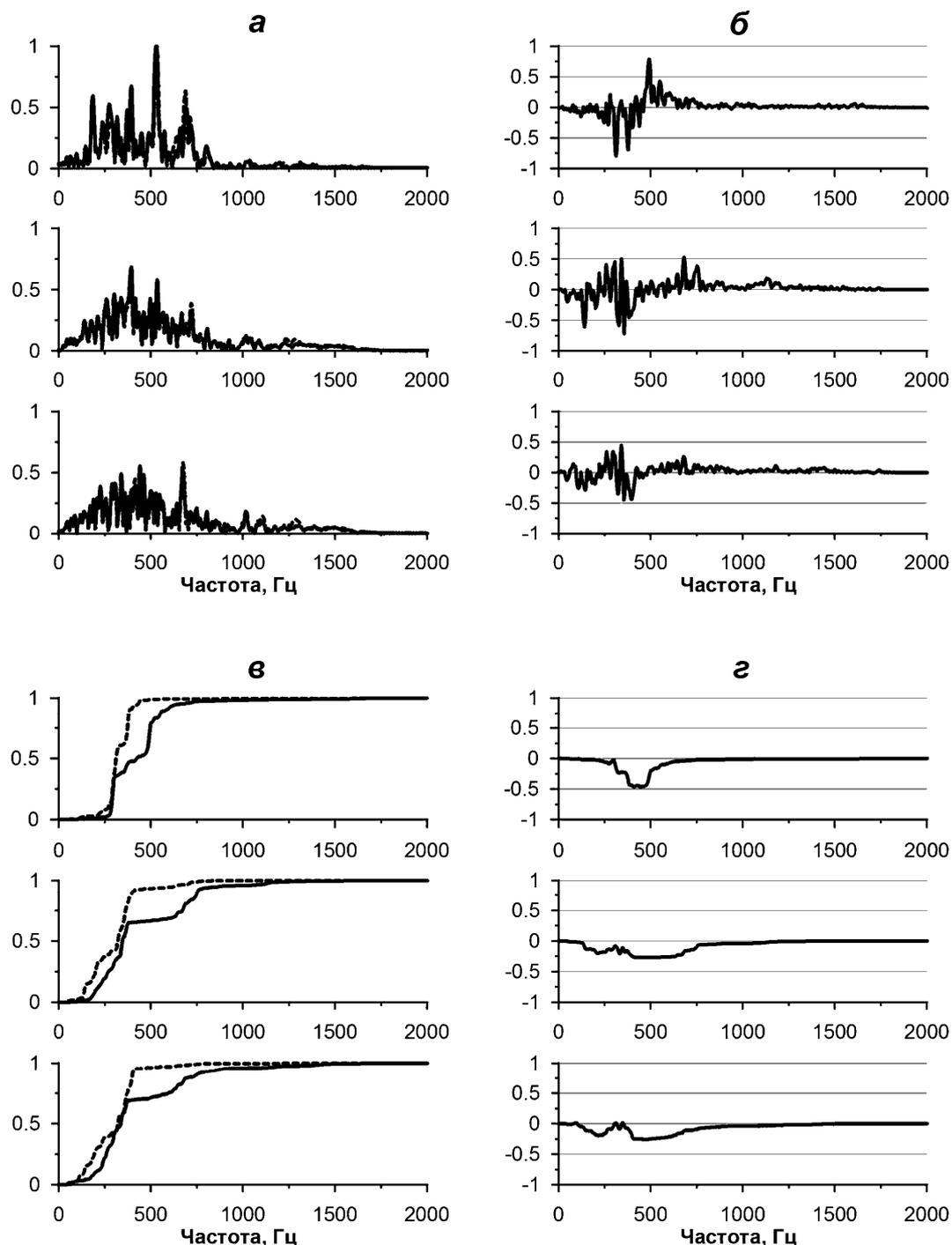


Рис. 7. Спектры сигналов (*а*), их разности (*б*), функции $d(f)$ (*в*) и $D(f)$ (*г*) для интервала длительностью 30 мс от момента вступления P -волн. Полигон II, технологические взрывы 13 и 35, сейсмоприемник № 9. На *в*: сплошная линия – взрыв 13, штриховая – 35

Частотно-временной анализ волновых форм

Для более детального исследования частотного состава записей технологических взрывов был проведен частотно-временной анализ записей группы продольных волн и построены СВАН-диаграммы сигналов, примеры которых для технологических взрывов 183, 184 (полигон I) и 13, 35 (полигон II) приведены на рис. 8. СВАН-диаграммы строились

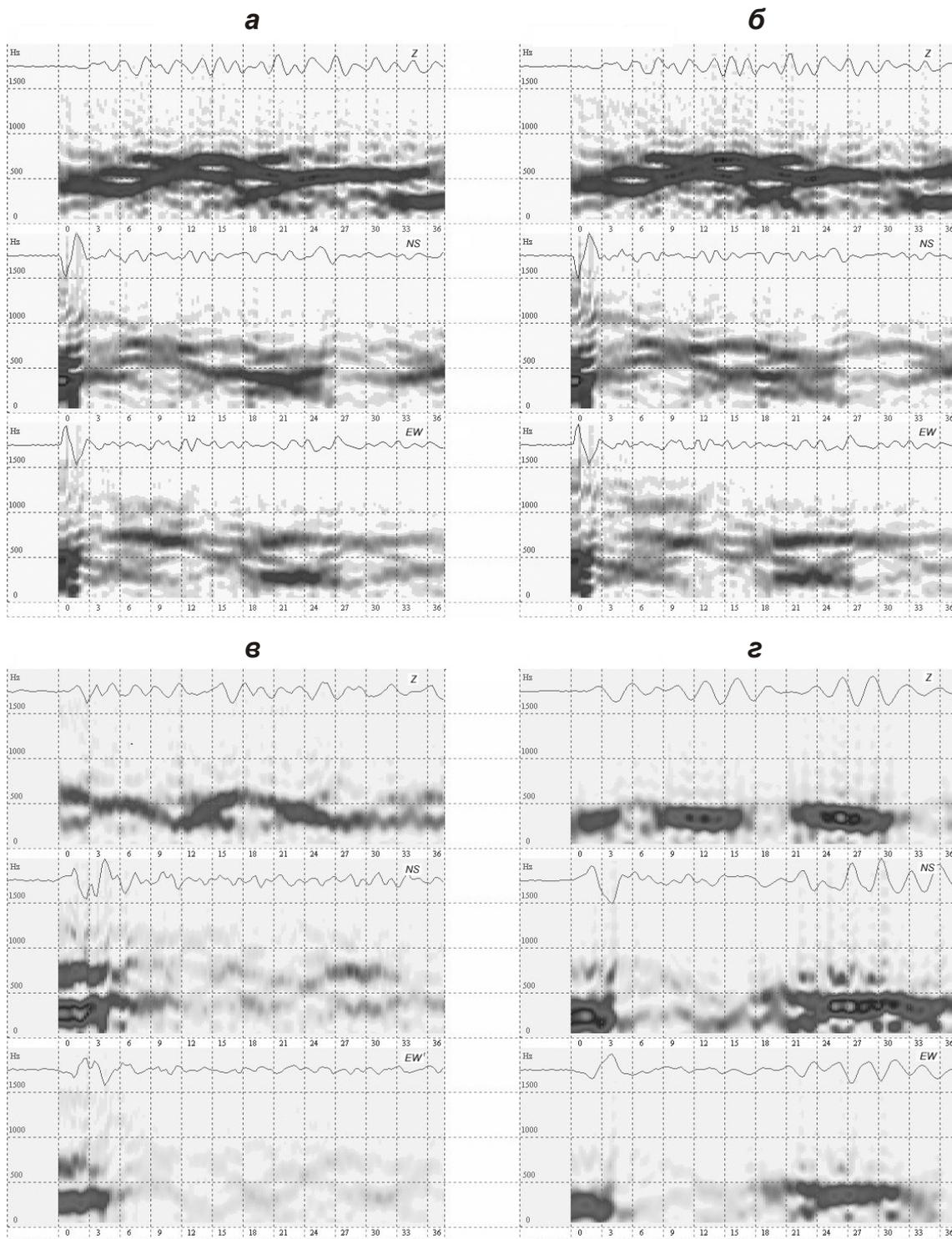


Рис. 8. СВАН-диаграммы, построенные по записям сигналов технологических взрывов 183 (а), 184 (б), 13 (в), 35 (з). Сейсмоприемник № 9; временной интервал – 30 мс от момента вступления *P*-волн; длительность скользящего окна – 7.75 мс

для интервала ~ 30 мс от момента первого вступления продольной волны. Суть частотно-временного анализа состоит в вычислении оконного преобразования Фурье, т.е. спектры рассчитываются в бегущем окне, длина которого в нашем случае была выбрана равной 7.75 мс. Для расчета спектров сигналов использовались алгоритм БПФ из библиотеки *Fortran IMSL*. При расчете спектра с помощью этого алгоритма шаг по частоте определяется как $1/T$ Гц, где T – общая длительность сигнала. Для обеспечения необходимой детальности спектра выбранный участок сейсмограммы дополняется до 500 мс (2048 дискретов) участками нулевого уровня, что позволяет получить шаг 2 Гц. Максимальная частота в получаемом спектре определяется частотой дискретизации сигнала и равна половине частоты дискретизации исходного сигнала.

В результате расчета мы получаем набор спектров, который может быть представлен в виде массивов $t(i), f(j), A_{ij} = A(t(i), f(j))$, где $t(i)$ – момент начала i -го окна, $1 \leq i \leq N$, $N=150$ – общее количество дискретов в исходном временном интервале записи; $f(j)$ – частота, $1 \leq j \leq M$, $M = N_{point}/2+1$, $N_{point} = T/\Delta t$ – общее количество точек в реализации, $A(t(i), f(j))$ – значение амплитуды спектра для i -го положения бегущего окна на частоте $f(j)$.

Для наглядности амплитудный спектр $A(t(i), f(j))$ может быть представлен в виде спектральной поверхности $A(t, f)$, изображаемой как карта изолиний. Таким образом, по каждой записи мы получаем набор покомпонентных изображений спектральной поверхности для всех сейсмоприемников. При построении СВАН-диаграмм спектры нормировались на общий максимум.

Заключение

Выполненное сравнение сейсмических записей серии технологических взрывов позволяет сделать три основных вывода.

1. Сейсмические сигналы технологических взрывов, произведенных в одном месте и не разделенных процессом гидрорастрескивания, имеют хорошо коррелированную форму и совпадающие спектры, что доказывает идентичность источников.

2. Коэффициенты корреляции сейсмических сигналов технологических взрывов, произведенных в одной точке, но разделенных процессом гидрорастрескивания, идентичность которых показана в данном исследовании, существенно ниже (< 0.4), что позволяет утверждать – процесс гидрорастрескивания вызывает значимые изменения скоростной структуры среды.

3. Анализ СВАН-диаграмм позволяет сделать предположение об усилении затухания высоких частот в результате гидроразрыва пласта.

Литература

- Баюк И.О., Калинин В.А. Упругая анизотропия горных пород. II. Ориентированная система трещин произвольной формы и концентрации // Физика Земли. 1995. № 3. С.10–16.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. 720 с.
- Краснова М.А., Чесноков Е.М. Об изменении поляризации поперечных волн в земной коре камчатского региона по данным местных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4/5. С.138–148.
- Angerer E., Crampin S., Li X.-Y., Davis T.L. Processing, modelling, and predicting time-lapse effects of over pressured fluid-injection in a fractured reservoir // Geophys. J. Int. 2002. V. 149. P.267–280.
- Gao Y., Crampin S. Temporal variation of shear-wave splitting in field and laboratory in China // J. Appl. Geophys. Spec. Issue. 2003. V. 54. P.279–287.

- Nur A.* Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks // JGR. 1971. V. 76, N 8. P.2022–2034.
- Rathore J.S., Fjaer E., Holt R.M., Renlie L.* P- and S-wave anisotropy of a synthetic sandstone with controlled crack geometry // Geophysical Prospecting. 1994. V. 43. P.711–728.
- Zatsepin S.V., Crampin S.* Modelling the compliance of crustal rock: I - response of shear-wave splitting to differential stress // Geophys. J. Int. 1997. V. 129. P.477–494.

Сведения об авторах

КРАСНОВА Мария Александровна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-90-42. E-mail: mkrasnova@ifz.ru

ЧЕШОКОВ Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-90-42. E-mail: emchesno@mail.uh.edu

THE INFLUENCE OF HYDRAULIC FRACTURING DURING WELL STIMULATION ON THE WAVEFORMS AND SPECTRA OF FRAC EVENTS

M.A. Krasnova, E.M. Chesnokov

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Changes in physical characteristics of a reservoir's medium as a result of the process of hydraulic fracturing (frac job), performed in order to increase productivity of oil-and-gas bearing wells, were studied using analyses of seismic recording of perfshots. Seismic recordings from two test wells, on which the process of frac job was performed in several stages, were selected for the analysis. Perfshots on both wells were set off immediately before the process of hydraulic fracturing as well as between the stages. Signal records was conducted by a system of 12 three-component seismic well sensors, installed in the vertical well at a distance not exceeding 1000 m from the source. Analysis of the wave form and of the spectral characteristics of *P*-waves showed that for sources closely spaced in time (with the interval between explosions not exceeding 10 minutes) and closely arranged in space (with the distance between explosions not exceeding 15 m), the signal form of the *P*-wave and the spectra repeats with high accuracy (with the signal correlation coefficient of >0.95). Lower signal correlation coefficients (<0.3) are observed for signals dispersing from a single point (with the distance between sources – 12 m) that are also separated in time by the process of hydraulic fracturing. Obtained results indicate that the frac job changes physical characteristics of the reservoir, that these changes are reflected in the shape of seismograms, and that their spectra can be determined experimentally.

Keywords: seismic anisotropy, hydraulic fracturing, crosswell seismology.