



ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПОВТОРЯЕМОСТЬ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Д.Р. Колюхин¹, В.В. Лисица¹, Г.В. Решетова²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, 6, Россия

Сейсмический мониторинг является одним из важнейших элементов обеспечения оптимального режима разработки месторождений углеводородов. Необходимым условием его успешного применения является обеспечение повторяемости наблюдений. При проведении работ на суше одним из основных факторов, способным оказывать существенное влияние на повторяемость сейсмических данных, является изменчивость профиля свободной поверхности от сеанса к сеансу. В данной работе приводится детальное исследование влияния вариаций свободной поверхности на повторяемость сейсмических данных. В качестве меры отличия данных здесь используются широко применяемые на практике величины: нормализованное среднеквадратичное отклонение NRMS (Normalized Root Mean Square) и мера предсказуемости PRED (от английского predictability). В работе показано, что даже относительно слабые возмущения профиля свободной поверхности (стандартное отклонение порядка 0.3 м) могут приводить к существенному отличию в данных и давать значения NRMS = 0.6 и выше при сложном строении верхней части разреза.

Топография свободной поверхности, численное моделирование, статистическое моделирование, сейсмический мониторинг

INFLUENCE OF FREE-SURFACE VARIATION ON THE REPEATABILITY OF SEISMIC DATA

D.R. Kolyukhin¹, V.V. Lisitsa¹, G.V. Reshetova²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Acad. Koptyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, SB RAS,
Acad. Lavrentiev prosp., 6, Novosibirsk, 630090, Russia

Seismic monitoring is very important to provide optimal production of hydrocarbon reservoirs. To provide reliable results high repeatability of observations is needed. Variability of the free surface topography is one of the main factors, which violates repeatability of seismic observations. In the paper, we provide results of accurate numerical analysis of this violation. We use two measures to characterize repeatability of seismic observations: NRMS (Normal Root Mean Square) and predictability PRED. The results show that for heterogeneous subsurface weak perturbations of the parameters (standard deviation about 0.3 m) gives NRMS = 0.6 and more.

Free surface topography, numerical simulation, statistical models, seismic monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований для обеспечения приемлемого качества данных сейсмического мониторинга, особенно если речь идет о наблюдении изменчивости месторождения в процессе его разработки, является максимально возможная повторяемость условий эксперимента. Дело в том, что вариативность физических свойств резервуара, вызванная замещением нефти или газа водой или другими флюидами, составляет не более 5–10 %. Достаточно обратиться к известным петрофизическим соотношениям Гассмана, описывающим зависимости упругих свойств породы от состава заполняющего ее флюида [Gassmann, 1951; Mavko et al., 2009]. Пожалуй, одним из немногих примеров более существенного изменения физических параметров породы в процессе разработки месторождения является вытеснение тяжелых нефтей паром [Ciz et al., 2009; Ke et al., 2012; Naugoy et al., 2012]. В остальных же случаях,

изменения упругих свойств крайне малы, что требует чрезвычайно высокой точности компенсации невязки данных, связанной с вариациями иных факторов, под которыми здесь следует понимать, прежде всего, изменение в условиях эксперимента – смещение системы наблюдения и ошибки в ориентации источников/приемников, связанные с миграцией льдов, изменением профиля ледяного покрова, волнением морской поверхности и пр. [Hanson et al., 2003; Swanston et al., 2003; Vakulin et al., 2014]. Одним из способов компенсации подобных эффектов является использование фиксированных расстановок, что применимо для наземных систем наблюдения в пустынных районах [Vakulin et al., 2014], где заглабление на 20 м практически гарантирует неизменность положения приемника.

По этим причинам чрезвычайно актуальной задачей для развития методов сейсмического мониторинга,

особенно в районах Крайнего Севера, является разработка методов компенсации помех, связанных со сложным строением и изменчивостью верхней части разреза. Понятно, что, например, изменения рельефа могут быть зафиксированы с использованием современных геодезических технологий, в том числе с использованием мобильных лазерных деформографов (лидар-технологии), в то время как изменения в структуре верхней части разреза, на границе лед-вода и пр. прямыми методами измерить не представляется возможным. По этой причине подобную изменчивость следует рассматривать как статистическое возмущение относительно некоторой исходной модели с дальнейшей оценкой ее проявлений в волновых полях, при помощи статистического анализа возмущения, с целью дальнейшего учета и компенсации связанных с ней эффектов. Подобный анализ для морских данных, с учетом изменчивости профиля воды приведен в статьях [Laws, Kragh, 2002; Kragh, Laws, 2006]. Представленная работа посвящена исследованию влияния изменчивости профиля свободной поверхности на невязку данных наземных систем наблюдения.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Построение модели для проведения численного исследования влияния вариации свободной поверхности на повторяемость сейсмических данных следует разделить на две составляющие. Во-первых, необходимо определить геометрию свободной поверхности, что будет проводиться на основе статистического моделирования. Во-вторых, следует задать детерминистическую скоростную модель верхней части разреза.

Статистическая модель свободной поверхности

В дальнейшем будем предполагать, что профиль свободной поверхности $Z(x)$ можно представить в виде суперпозиции плавно меняющейся компоненты и накладываемого на нее быстроменяющегося возмущения:

$$Z(x) = \langle Z(x) \rangle + Z'(x),$$

где $\langle Z(x) \rangle$ – средний (плавный) профиль, а $Z'(x)$ – его быстро изменяющаяся вариация. Здесь и в даль-

нейшем предполагается, что вариация поверхности может быть описана однородным гауссовским случайным полем. Это поле полностью определяется своим средним и функцией ковариации $C(r)$, которая выбиралась в виде: $C(r) = \sigma^2 \exp(\pi r^2 I^2 / 4)$, где r – расстояние между рассматриваемыми точками, σ – стандартное отклонение, или STD (от английского Standard deviation), и I – длина корреляции.

Для построения среднего профиля и оценки распределения его возмущений (рис. 1) использовались данные одного из месторождений на Ближнем Востоке. Этот средний профиль был построен на основе сплайн-интерполяции значений координат исходной поверхности на грубой сетке. Здесь важно отметить, что тренд не является постоянной функцией координаты, а имеет минимум при $x \approx 300$ м и максимум при $x \approx 1750$ м, что будет иметь значение при дальнейшем анализе данных. Для оценки стандартного нормального отклонения и длины корреляции возмущений использовался метод оценки в бегущем окне, предложенный в работе [Li, Lake, 1994]. В результате были получены следующие параметры случайного поля: стандартное отклонение $\sigma = 1.16$ м и длина корреляции $I = 46.9$ м. В дальнейшем удобно будет называть эти параметры “базовыми” и обозначать σ_0 и I_0 . При известном среднем тренде и заданных параметрах однородного случайного гауссовского поля различные реализации профилей свободной поверхности могут быть построены на основе подхода, описанного в работе [Sabelfeld, 1991]. Примеры свободных поверхностей, построенных для двух различных параметров случайного поля, приведены на рис. 1.

Поскольку целью данного исследования являлось установление связи между возмущением свободной поверхности и возникающей при этом разницей в регистрируемых волновых полях, то возмущения рассматривались для ряда комбинаций параметров гауссовского случайного поля. Для стандартного отклонения выбиралось пять значений:

$$\sigma_{-2} = \frac{1}{4} \sigma_0 = 0.29 \text{ м}; \quad \sigma_{-1} = \frac{1}{2} \sigma_0 = 0.58 \text{ м};$$

$$\sigma_1 = 2\sigma_0 = 2.32 \text{ м}; \quad \sigma_2 = 4\sigma_0 = 4.64 \text{ м},$$

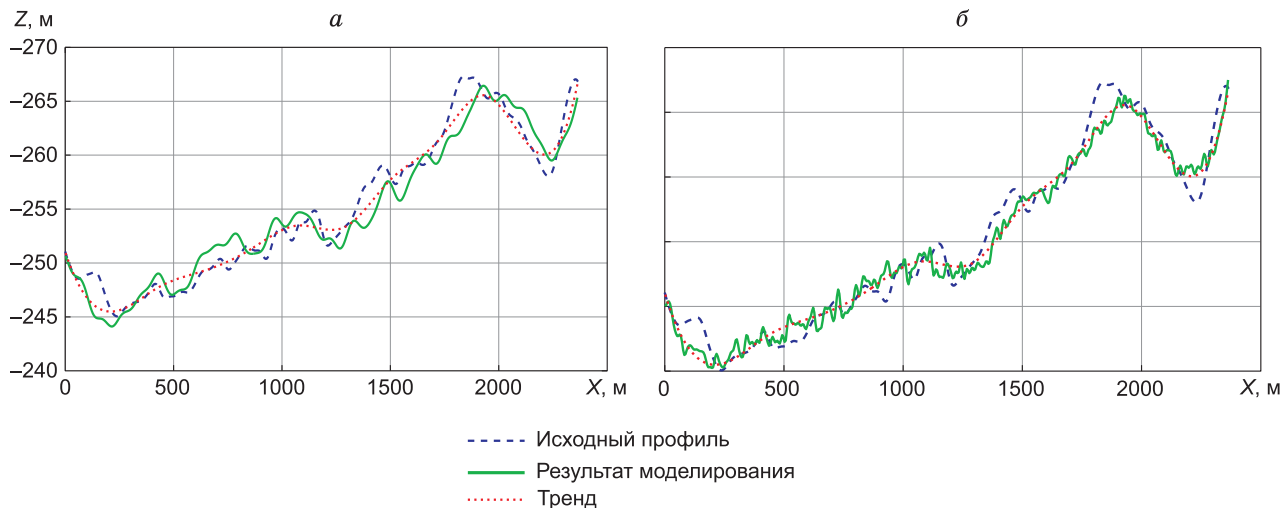


Рис. 1. Профиль свободной поверхности, использованный для оценки статистических свойств (синий), трендовая составляющая (красный) и результат статистического моделирования с двумя разными наборами параметров распределения (зеленый).

и девять значений для длины корреляции:

$$I_{-4} = \frac{1}{16}I_0 = 2.9 \text{ м}; I_{-3} = \frac{1}{8}I_0 = 5.8 \text{ м}; I_{-2} = \frac{1}{4}I_0 = 11.7 \text{ м};$$

$$I_{-1} = \frac{1}{2}I_0 = 23.5 \text{ м}; I_1 = 2I_0 = 93.8 \text{ м}; I_2 = 4I_0 = 187.6 \text{ м};$$

$$I_3 = 8I_0 = 375 \text{ м}; I_4 = 16I_0 = 750 \text{ м}.$$

В дальнейшем любой набор рассчитанных профилей свободной поверхности для фиксированной пары параметров случайного процесса будет называться статистической моделью (всего таких моделей в представляемом исследовании 45), в то время как каждый из получаемых профилей – одна реализация статистической модели.

Скоростная модель

Исследования влияния изменчивости рельефа на сейсмические данные проводились с учетом различного строения верхней части разреза. В частности, в рамках данной работы рассматривались четыре различные модели строения верхней части. Первая и самая простая – однородная, в которой ниже свободной поверхности среда рассматривалась однородной и изотропной с параметрами $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$, $V_P = 750 \text{ м/с}$, $V_S = 312 \text{ м/с}$, что соответствует слабо консолидированной породе верхней части разреза [Prasad, 2002]. Пример модели приведен на рис. 2, а. Вторая модель – двухслойная, она отличается от однородной наличием одной нерегулярной и достаточно контрастной границы раздела, отделяющей слабо консолидированный верхний слой от более плотной цементированной породы с параметрами $\rho = 1822 \text{ кг/м}^3$, $V_P = 1200 \text{ м/с}$, $V_S = 515 \text{ м/с}$. Пример такой модели приведен на рис. 2, б. Третья модель содержит горизонтально-слоистую среду, начиная с некоторой глубины. Скорость продольной волны в слоях меняется от 750 до 3500 м/с. Модель приведена на рис. 2, в. Четвертая модель – полная, соединяет в себе все элементы предыдущих моделей: наличие свободной поверхности, нерегуляр-

ной отражающей границы и пачки горизонтальных слоев (рис. 2, г).

Система наблюдений

В рамках данной работы моделировались сейсмические наблюдения, проводимые на одном из месторождений на Ближнем Востоке [Vakulin et al., 2014]. Одной из особенностей экспериментов является использование фиксированных заглубленных приемников, которые располагаются на глубине 30 м под свободной поверхностью с шагом 30 м. При этом используется густая сетка поверхностных источников (шаг 7.5 м по горизонтали, заглубление на 0.5 м), что обеспечивает достаточную кратность перекрытия. Очевидно, что проведение численных экспериментов для такой системы наблюдения напрямую неэффективно, поскольку требует расчета большого количества прямых задач. По этой причине, на основе принципа взаимности, расчеты проводились для сопряженной задачи, в которой положения источников и приемников взаимозаменялись. В результате для каждой реализации статистической модели проводился расчет поля 20 источников. Однако при дальнейшем обсуждении результатов будет использоваться терминология исходной постановки с малым числом приемников и большим числом источников. Тип используемого при моделировании источника – вертикальная сила, функция источника – импульс Риккера с доминирующими частотами 30 и 15 Гц, то есть проводилось две серии расчетов в зависимости от частоты зондирующего сигнала. Данные регистрировались для всей системы приемников, однако для дальнейшего анализа будут использоваться данные с выносом не более 30 м.

Численное моделирование

Для расчета волновых сейсмических полей в моделях со сложной нерегулярной топографией свободной поверхности использовался алгоритм, основанный на комбинировании разрывного метода Галеркина [Hu et al., 1999] и метода конечных разностей [Vigieux, 1986], представленный в работе [Лисица, Чеверда,

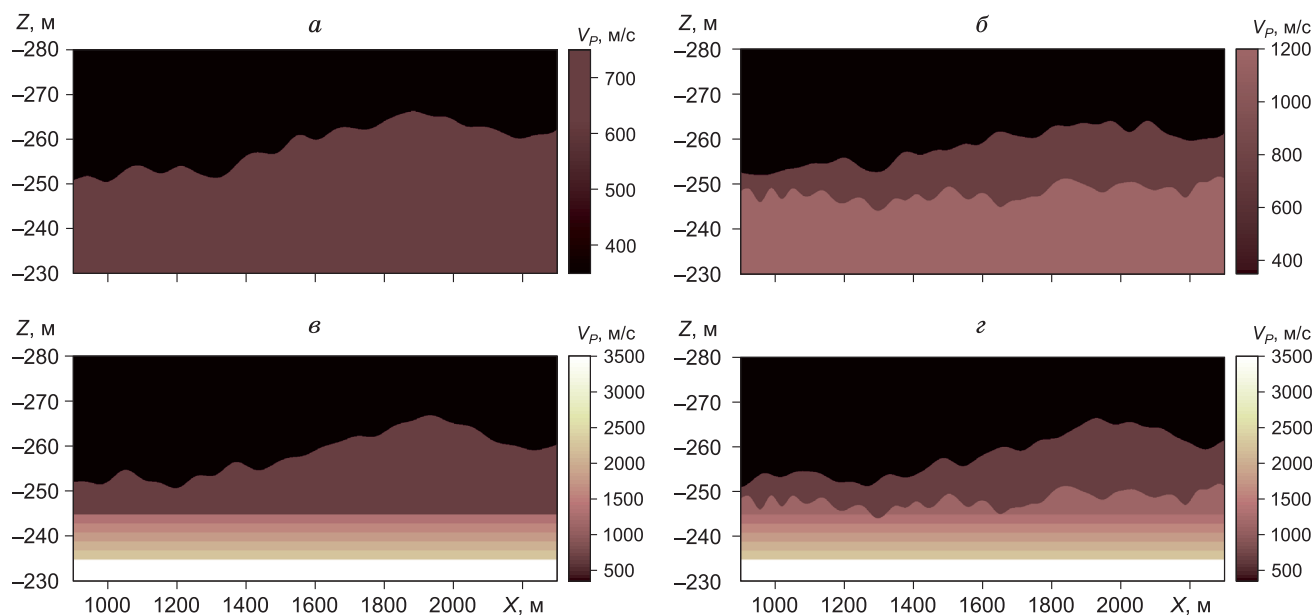


Рис. 2. Модели верхней части разреза: однородная (а), двухслойная (б), слоистая (в) и полная (г).

2014]. При этом первый применялся вплоть до глубины $Z = -240$ м. В остальной части модели до глубины 1000 м применялась стандартная схема на сдвинутых сетках. Для ограничения расчетной области использовались идеально согласованные слои [Решетова, Черверда, 2006; Drossaert, Giannopoulos, 2007].

Шаг сетки выбирался, исходя из расчета 20 узлов конечно-разностной схемы на длину волны, что составляло 0.5 м для источника с частотой 30 Гц и 1 м для источника с частотой 15 Гц. В результате расчет поля одного источника на одном ядре кластера составлял порядка 8 часов для задачи с частотой сигнала 30 Гц и порядка 1 часа для задач с частотой 15 Гц. Распараллеливание вычислений проводилось по положению источников, что полностью исключает необходимость обменов в процессе вычислений. Для оценки вычислительных ресурсов, затраченных на проведение рассматриваемой в работе серии экспериментов, следует учитывать, что использовалось 45 статистических моделей, для каждой из которых бралось 20 реализаций. Для каждой реализации привлекалось 20 источников четырех различных скоростных моделей верхней части разреза. Итак, для каждой доминирующей частоты зондирующего сигнала проводился расчет волнового поля для 72000 источников. Таким образом, на моделирование было затрачено 648000 ядро-часов.

Статистический анализ данных

Согласно [Bakulin et al., 2014] в данной работе рассматривается только возмущение первых вступлений, зарегистрированных во временном интервале от 0 до 200 мс, в приемниках с выносами до 30 м. Примеры исследуемых сейсмограмм для двух различных статистических моделей свободной поверхности приведены на рис. 3.

Для оценки различия получаемых сейсмических данных и их повторяемости в работе рассматриваются две статистические меры, широко используемые при промышленной обработке данных сейсмического мониторинга [Kragh, Christie, 2002; Kragh, Laws, 2006]:

$$NRMS = \frac{200 RMS(x_t - y_t)}{RMS(x_t) + RMS(y_t)}, RMS(x_t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t_1}^{t_2} x_t^2},$$

где t_1 и t_2 – границы временного окна, внутри которого производится анализ, x_t и y_t – две сравниваемые

трассы, RMS – среднеквадратичное отклонение (Root Mean Square).

Статистическая мера предсказуемости PRED, нормализованная суммированная с квадратом кросс-корреляция трасс, определяется по формуле

$$PRED = \frac{100 \sum C_{xy}^2}{\sum C_{xx} C_{yy}},$$

где C_{xy} – кросс-корреляция трасс x_t и y_t внутри рассматриваемого временного интервала от t_1 до t_2 . Суммирование ведется по количеству рассматриваемых трасс. Заметим, что предсказуемость максимальна для идентичных трасс и падает при уменьшении их корреляции.

Прежде всего, NRMS и PRED измерялись для каждого заглубленного приемника отдельно для двадцати реализаций статистической модели свободной поверхности. На рис. 4–7 приведены графики NRMS в зависимости от положения приемников для различных статистических моделей поверхности (стандартное отклонение фиксировано, варьируется только длина корреляции) и строения верхней части разреза. На тех же рисунках приведены аналогичные графики для PRED.

На рис. 4 видно, что статистические меры для однородной модели практически не зависят от положения приемника, то есть их линейные тренды близки к постоянным. Аналогичное поведение статистических мер наблюдается и для двухслойной модели, приведенной на рис. 5. Для более сложных – слоистой и полной моделей связь между положением приемника и значением статистической меры начинает достаточно четко проследиваться. NRMS выше в районе минимума плавной составляющей свободной поверхности, т. е. в области, где слой песка тоньше, где PRED соответственно ниже (см. рис. 6, 7), что иллюстрирует влияние на повторяемость сейсмических экспериментов не только изменчивости самой свободной поверхности, но и строения верхней части разреза.

Для проверки зависимости между статистическими мерами различия сейсмических данных и положением приемника оценивалось P-значение (P-value) [Krzyszowski, Altman, 2013]. Исследовалась нулевая гипотеза о нулевом коэффициенте их корреляции с положением приемника. В частности, в исследуемых

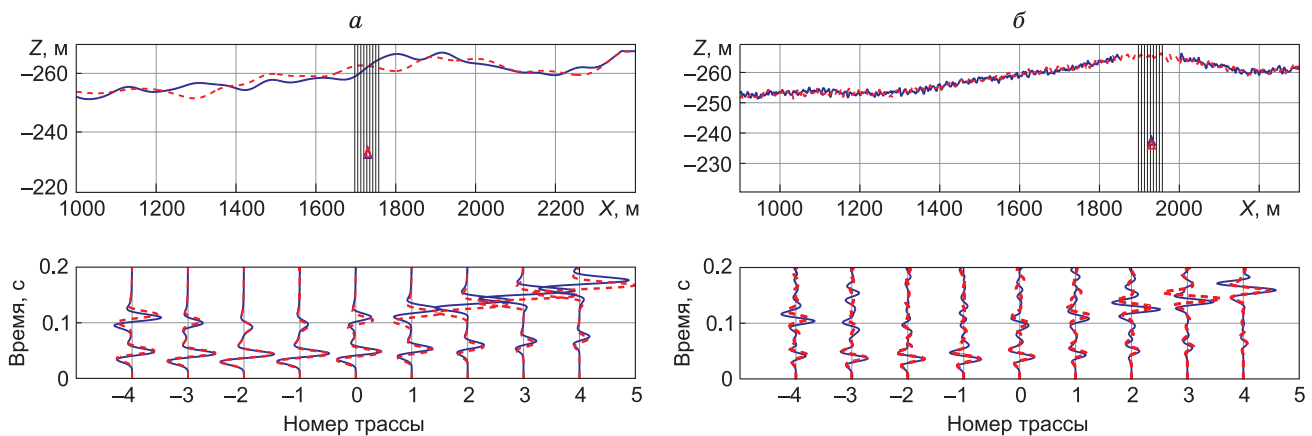


Рис. 3. Примеры профилей свободной поверхности и зарегистрированных сейсмограмм.

Величины стандартного отклонения – 1.16 (а) и 0.58 м (б), длина корреляции Гауссовского случайного процесса – 46.9 (а) и 2.87 м (б).

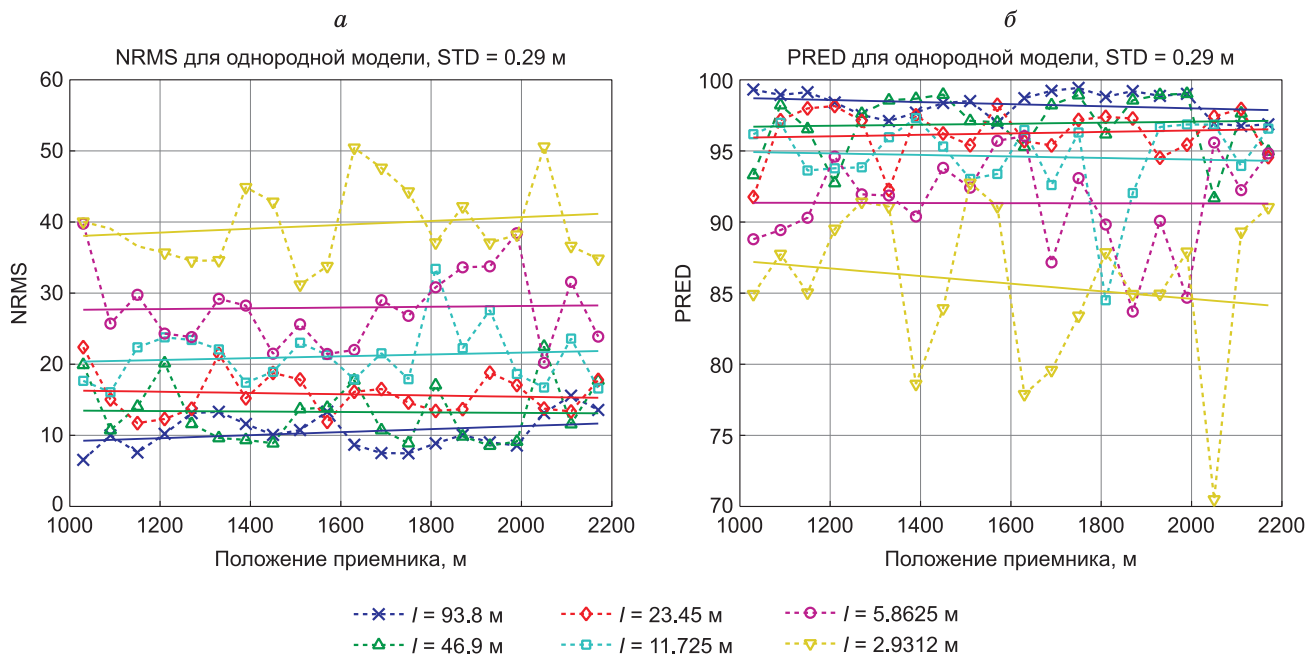


Рис. 4. Нормализованное среднее квадратичное отклонение сейсмограмм (а) и предсказуемость (б) в зависимости от положения приемника для различных длин корреляции возмущения свободной поверхности в однородной модели верхней части разреза.

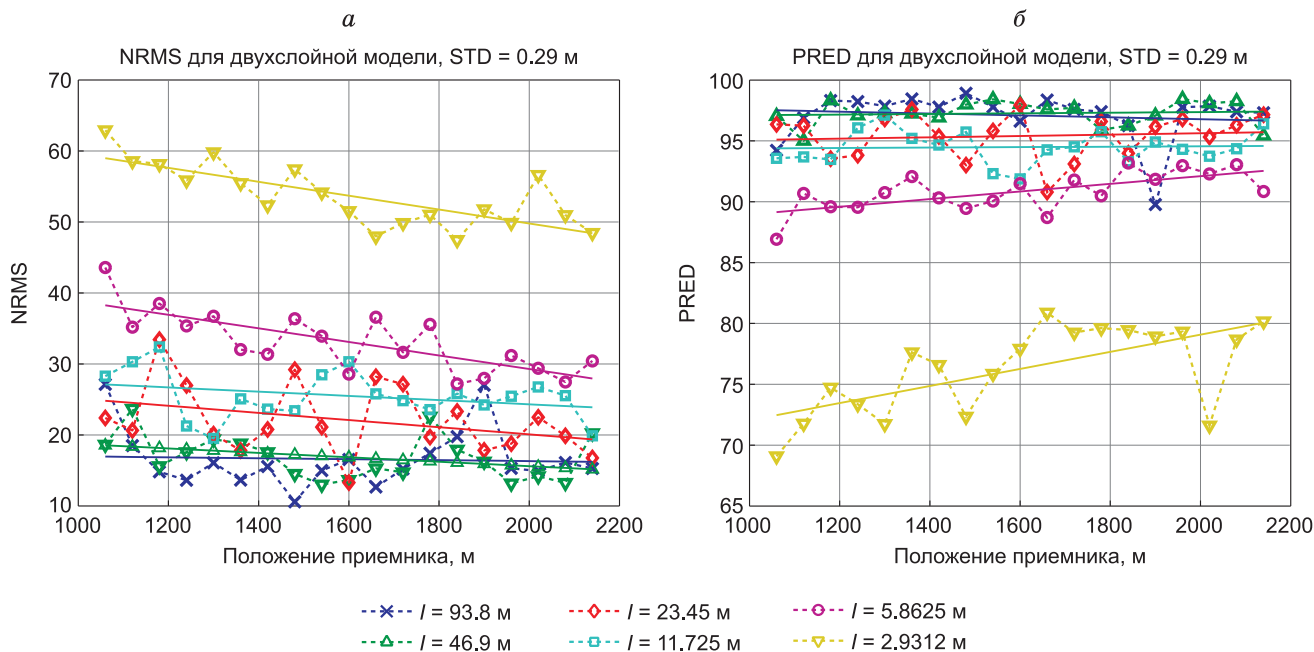


Рис. 5. Нормализованное среднее квадратичное отклонение сейсмограмм (а) и предсказуемость (б) в зависимости от положения приемника для различных длин корреляции возмущения свободной поверхности в двухслойной модели верхней части разреза.

случаях, если полученное Р-значение ниже 5 %, то нулевая гипотеза отвергается. Значения параметров, рассчитанных для всех статистических моделей свободной поверхности для каждого распределения скорости в верхней части разреза, приведены на рис. 8.

Как видно из приведенных графиков, для однородной среды достоверно утверждение об отсутствии корреляции между положением приемника и значением статистических параметров, поскольку все Р-значения превышают пороговые 5 % (лежат выше горизон-

тальной линии) (см. рис. 8, а). В случае двухслойной модели (см. рис. 8, б) зависимость проявляется в экспериментах с частотой зондирующего сигнала 15 Гц, в то время как на более высоких частотах такая зависимость скорее отсутствует, как видно из таблицы. Данный эффект связан с тем, что для сигнала с доминирующей частотой 30 Гц глубина границы раздела близка к мощности зоны проникновения поверхностных волн, а контраст границы недостаточен, чтобы взаимодействие с ней устойчиво проявлялось в реги-

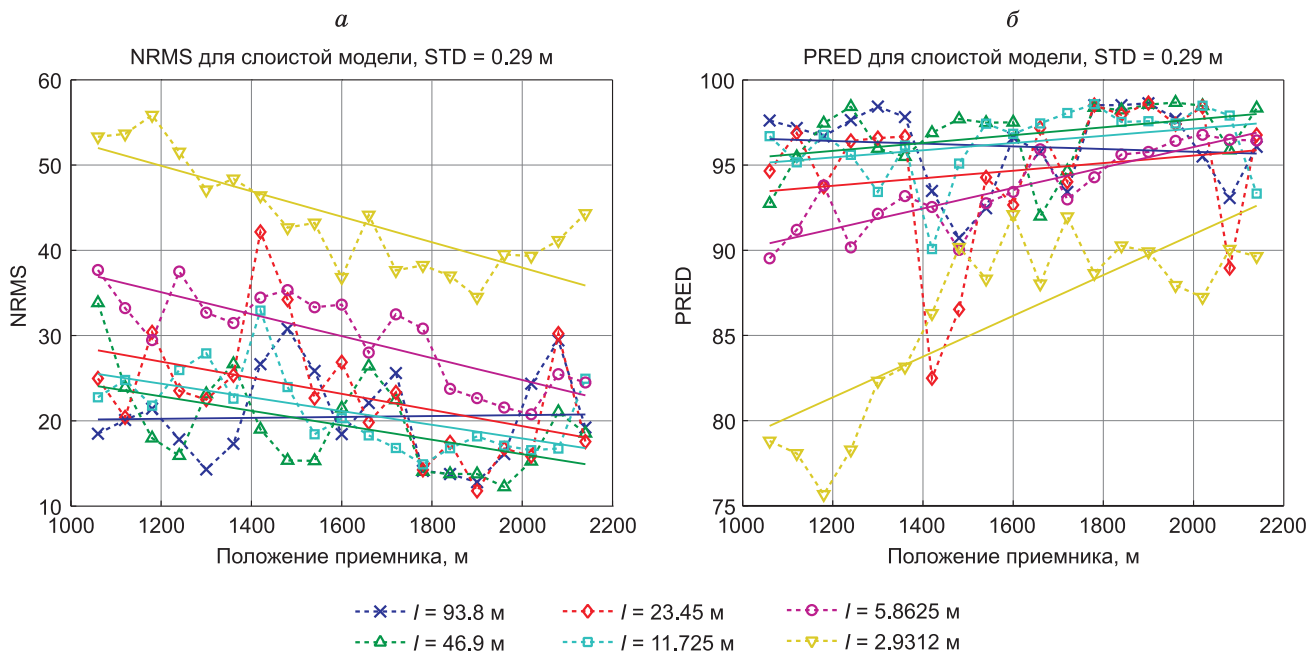


Рис. 6. Нормализованное среднее квадратичное отклонение сейсмограмм (а) и предсказуемость (б) в зависимости от положения приемника для различных длин корреляции возмущения свободной поверхности в слоистой модели верхней части разреза.

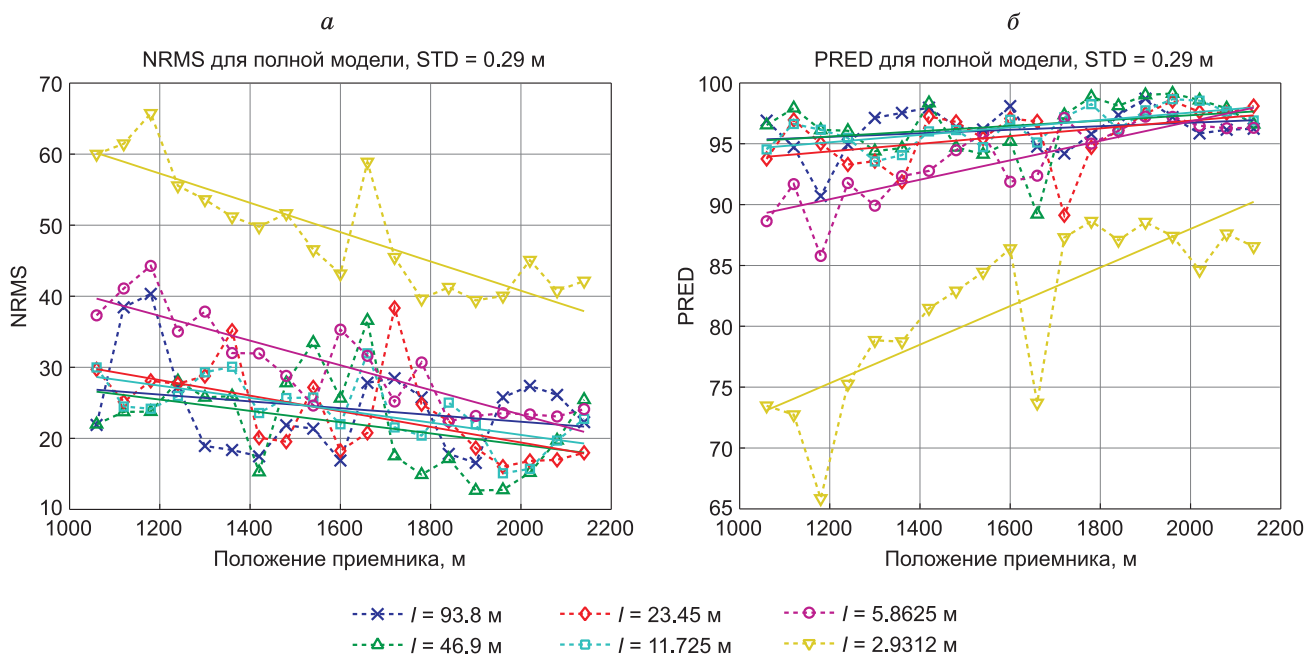


Рис. 7. Нормализованное среднее квадратичное отклонение сейсмограмм (а) и предсказуемость (б) в зависимости от положения приемника для различных длин корреляции возмущения свободной поверхности в неоднородной модели верхней части разреза.

Процент статистических моделей свободной поверхности, удовлетворяющих критерию независимости мер от положений приемников, %

Частота/модель	Однородная	Двух-слойная	Слоистая	Полная
30 Гц	87	78	41	38
15 Гц	97	47	7	11

стрируемых полях. В случае более сложного строения верхней части четко прослеживается зависимость статистических мер от положения приемника (см. рис. 8, в, г). В дополнение в таблице приведен процент статистических моделей, которые удовлетворяют критерию независимости рассматриваемых мер от положений приемников, что подтверждает приведенные выше рассуждения.

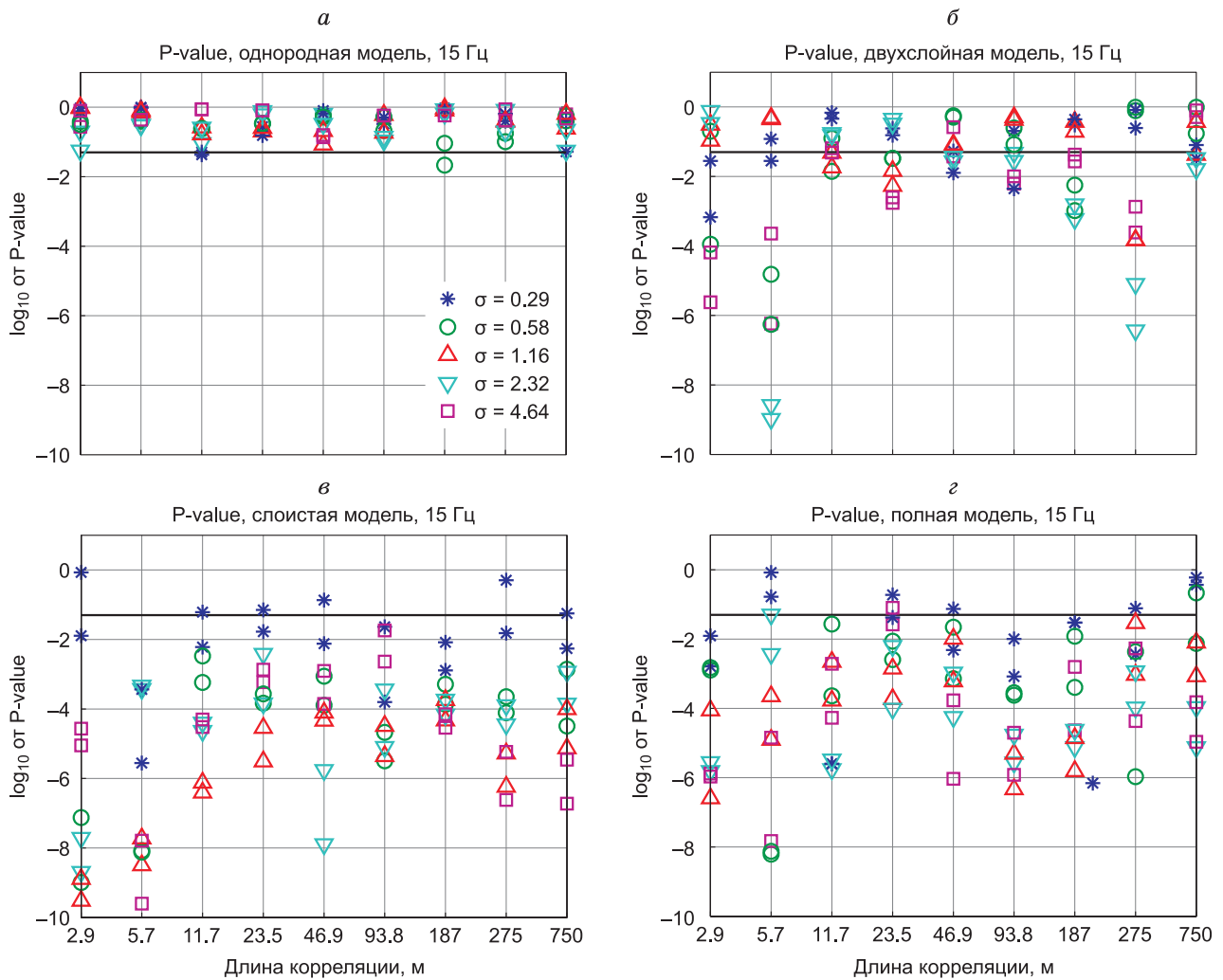


Рис. 8. P-значения в логарифмической шкале для различных длин корреляции и стандартного нормального отклонения возмущения свободной поверхности, для однородной (а), двухслойной (б), слоистой (в) и полной (г) моделей верхней части разреза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты представительной серии численных экспериментов по изучению влияния изменчивости профиля свободной поверхности на повторяемость данных сейсмического мониторинга. При этом основное внимание уделено первым вступлениям, регистрируемым во временном интервале от 0 до 200 мс, поскольку именно эти возмущения в данных обусловлены исключительно изменчивостью верхней части разреза. Вариации свободной поверхности моделировались однородным гауссовским случайным полем со стандартным отклонением, меняющимся в пределах от 0.3 до 4.5 м и длиной корреляции от 2 до 750 м.

Результаты моделирования показали, что стандартные статистические меры, используемые для определения повторяемости сейсмических наблюдений – NRMS и PRED, существенно зависят как от вариации свободной поверхности, так и от строения верхней части. В частности, для однородной модели различия в данных не зависят от макромасштабного гладкого изменения топографии свободной поверхности (трен-

да). Наличие одного, даже нерегулярного резко контрастного интерфейса, также не оказывает существенного влияния на статистические меры различия данных. Однако, если верхняя часть разреза существенно неоднородна, отчетливо прослеживается увеличение NRMS в данных, соответствующих части модели с тонким верхним слоем слабо сконсолидированной породы, по сравнению с областью, где мощность подстилающего слоя достаточно велика. При этом важно отметить, что в случае сложного строения верхней части разреза значения NRMS данных могут достигать 40–60 % даже при относительно слабой изменчивости профиля свободной поверхности (стандартное отклонение 0.2 м), что делает такие данные малоприспособными для сейсмического мониторинга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Представленные исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ, гранты 14-05-00049, 14-05-93090, 15-35-20022, 15-05-01310, 15-55-20004, 16-05-00800.

Литература

- Лисица В.В., Чеверда В.А.** Комбинирование разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей для учета сложного строения верхней части разреза при численном моделировании сейсмических полей // Технологии сейсморазведки. 2014. № 4. С. 60–67.
- Решетова Г.В., Чеверда В.А.** Использование преобразования Лагерра для построения идеально подходящих поглощающих слоев без расщепления // Математическое моделирование. 2006. № 18(10). С. 91–101.
- Bakulin A., Smith R., Jervis M., Burnstad R.** Near surface changes and 4D seismic repeatability in desert environment: From days to years // SEG Technical Program. Expanded Abstracts. 2014. P. 4843–4847.
- Ciz R., Saenger E.H., Gurevich B., Shapiro S.A.** Temperature-dependent poroelastic and viscoelastic effects on microscale – modelling of seismic reflections in heavy oil reservoirs // Geophys. J. Int. 2009. V. 176, N. 3. P. 822–832.
- Drossaert F.H., Giannopoulos A.A.** nonsplit complex frequency-shifted PML based on recursive integration for FDTD modeling of elastic waves // Geophysics. 2007. V. 72, N 2. P. T9–T17.
- Gassmann F.** Über die Elastizität poröser Medien // Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich. 1951. V. 96. P. 1–23.
- Hanson R., Condon P., Behrens R., Groves S., MacLeod M.** Analysis of time-lapse data from the Alba Field 4C/4D seismic survey // Petrol. Geosci. 2003. V. 9, N 1. P. 103–111.
- Hu F.Q., Hussaini M.Y., Rasetarinera P.** An analysis of the discontinuous Galerkin method for wave propagation problems // J. Computational Physics. 1999. V. 151, N 2. P. 921–946.
- Ke G., Johnston M., Dong H.** Rock-physics models for bitumen-saturated sands: Fractional gradient model and Hashin-Shtrikman iterative model // Geophysics. 2012. V. 77, N 2. P. D7–D15.
- Kragh E., Christie P.** Seismic repeatability, normalized rms, and predictability // The Leading Edge. 2002. V. 21, N 7. P. 640–647.
- Kragh E., Laws R.** Rough seas and statistical deconvolution // Geophys. Prosp. 2006. V. 54, N 4. P. 475–485.
- Krzywinski M., Altman N.** Points of significance: Significance, p-values and t-tests // Nature Methods (Nature Publishing Group). 2013. V. 10. P. 1041–1042.
- Laws R., Kragh E.** Rough seas and time-lapse seismic // Geophys. Prosp. 2002. V. 50, N 2. P. 195–208.
- Li D., Lake L.W.** A moving window semivariance estimator // Water Resour. Res. 1994. V. 30, N 5. P. 1479–1489.
- Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J.** The Rock Physics Handbook. New York: Cambridge University Press, 2009. 511 p.
- Nauroy J.F., Doan D.H., Guy N., Baroni A., Delage P., Mainguy M.** Evolution of Seismic Velocities in Heavy Oil Sand Reservoirs during Thermal Recovery Process // Oil Gas Sci. Technol. Rev. IFP Energies nouvelles. 2012. V. 67, N 6. P. 1029–1039.
- Prasad M.** Acoustic measurements in unconsolidated sands at low effective pressure and overpressure detection // Geophysics. 2002. V. 67, N 2. P. 405–412.
- Sabelfeld K.K.** Monte Carlo methods in boundary value problems. Springer, 1991. 283 p.
- Swanston A.M., Flemings P.B., Comisky J.T., Best K.D.** Time-lapse imaging at Bullwinkle field, Green Canyon 65, offshore Gulf of Mexico // Geophysics. 2003. V. 68, N 5. P. 1470–1484.
- Virieux J.** P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity – stress finite-difference method // Geophysics. 1986. V. 51, N 4. P. 889–901.

*Статья поступила в редакцию 26 декабря 2015 г.,
в окончательном варианте – 21 января 2016 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КОЛЮХИН Дмитрий Романович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНГГ СО РАН.

E-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

ЛИСИЦА Вадим Викторович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИНГГ СО РАН.

E-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

РЕШЕТОВА Галина Витальевна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН.

E-mail: kgv@sscc.ru