УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Том 152, кн. 4 Естественные науки *2010*

УДК 550.34.016:550.343.6

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ И НЕФТЕПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ

Д.К. Нургалиев, Э.В. Утёмов, Д.И. Хасанов, Е.В. Еронина

Аннотация

Изложены сейсмодинамические особенности пласта-коллектора и вмещающих пород под влиянием лунно-солнечных приливов. Описаны фазовые задержки отраженных волн, связанные с приливными явлениями. Представлен алгоритм вейвлет-фильтрации, нормировки и дисперсионного анализа данных сейсмического мониторинга. Показаны результаты применения сейсмического мониторинга.

Ключевые слова: гравитационный потенциал, сейсмический мониторинг, фазовые задержки отраженных волн, вейвлет-фильтрация, базисный вейвлет, лоренцев контур, дисперсионный анализ, приливные вариации, амплитудная нормировка.

Введение

Известно, что одним из важнейших факторов, влияющих на напряженное состояние пород продуктивной толщи разрабатываемых нефтегазовых месторождений, дебиты нефти, являются вариации гравитационного потенциала, вызванные твердотельными лунно-солнечными приливами [1–4].

Влияние вариаций гравитационного потенциала, вызванных приливами, на свойства флюидной смеси пласта-коллектора имеет ряд особенностей. Лабораторные испытания флюидосодержащих пород показывают, что скорость сейсмических волн может изменяться под действием температуры, давления и изменения состава флюида. При нагнетании газа значительное снижение скоростей сейсмических волн происходит из-за того, что флюидная смесь становится сжимаемой. При повышении температуры углеводороды становятся менее вязкими, что приводит к уменьшению общей жесткости и, следовательно, к снижению скорости сейсмических волн. Снижение давления флюида вызывает повышение эффективного давления на породу-коллектор, что делает скелет породы более жестким и приводит к повышению скорости [2].

Напряжения и деформации, вызванные лунно-солнечными приливами, влияют на состав и давление флюида. Эти изменения отражаются на скорости сейсмических волн в пласте-коллекторе и плотности коллектора, что приводит к изменению времен пробега, амплитуды и других параметров отраженных сейсмических волн. Математическое моделирование показывает, что изменения времён пробега отраженных волн, связанные с приливными явлениями для продуктивных толщ изучаемых участков, могут иметь значения порядка 0.1÷5 мс [2]. Сейсмический мониторинг, таким образом, позволяет регистрировать изменения

волнового поля, вызванные приливными вариациями характеристик отраженных сейсмических волн пласта-коллектора [1].

Нужно отметить, что эффект понижения времён пробега отраженных от пласта-коллектора волн максимален во время прилива, а трещиноватость геосреды выше во время отлива (Луна в надире), когда увеличивается гравитационный потенциал.

Фазовые задержки отраженных волн, связанные с приливными явлениями

Вычисление изучаемых характеристик на различных временных интервалах регистрации сигнала позволяет проводить глубинное «сканирование», то есть 3D-томографию геосреды [3].

Успешность практической реализации предлагаемой методики зависит от многих факторов, в первую очередь от факторов, влияющих на точность фазовых задержек отраженных волн.

Расчеты [2] свидетельствуют о том, что фазовые задержки отраженных волн, связанные с приливными явлениями, могут иметь величины порядка $\pm (0.1 \div 2)$ мс, что сопоставимо или даже меньше минимального шага дискретизации действующих сейсморазведочных станций. Для проведения измерений нужно применять наименьший шаг дискретизации (1 мс и менее), а также использовать специальный математический инструментарий обработки данных, позволяющий повысить точность определения фазовых задержек.

На точность определения значений фазовых задержек может оказать влияние проседание грунта вокруг групп вибраторов. Эту проблему можно решить, используя две группы вибраторов и вводя соответствующую поправку.

Другим источником погрешностей являются погодные условия. В данном случае страдает точность определения статистических характеристик регистрируемого сейсмического поля. Очевидно, что работы нужно проводить в благоприятных погодных условиях.

Характер приливных вариаций измеряемых характеристик зависит от величины приливно-отливных сил, следовательно, работы нужно проводить в астрономически благоприятный период.

Поскольку отраженные сейсмические волны пробегают различные пути от источника возбуждений до приемника, то возникает необходимость введения нормальных кинематических поправок.

В 2009 г. в пределах нефтегазовых месторождений Республики Татарстан (РТ) были проведены эксперименты по реализации технологии приливного мониторинга в режиме 4D-3C.

Описание методов низкочастотной фильтрации и дисперсионного анализа данных сейсмического сканирования

Использование вейвлет-фильтрации для обработки данных эксперимента позволило решить две задачи. Первая задача, типичная для вейвлет-преобразования, – подавление шумов различного генезиса – решалась удалением вейвлет-коэффициентов соответствующих масштабов. Вторая задача – повышение

точности определения фазовых задержек – решалась, в частности, с помощью амплитудной вейвлет-нормировки.

Информация о временных задержках содержится в фазах волновых сигналов, при этом переменная амплитуда сигнала становится мешающим фактором. Поэтому имело смысл «деликатно» выравнивать значения амплитуд волнового поля, не допуская фазовых искажений.

Суть амплитудной вейвлет-нормировки состоит в следующем. В качестве генератора базисных вейвлетов применяем контур Лоренца:

$$\varphi(x,a)=\frac{2a}{a^2+x^2}. \tag{1}$$

Легко показать, что функции, построенные на производных функции (1), могут являться базисами для вейвлет-преобразования:

$$\begin{gathered}\psi_s(t)=\frac{1}{2a^2}\varphi_x'(x,a)=\frac{2t}{\left(1+t^2\right)^2},\\ \psi_c(t)=\frac{1}{2a^2}\varphi_a'(x,a)=\frac{1-t^2}{\left(1+t^2\right)^2},\\ t=\frac{x}{a}.\end{gathered} \tag{2}$$

Функции $\psi_c(t)$ и $\psi_s(t)$ являются нечетной и четной соответственно, и по своей сути являются вейвлет-аналогами тригонометрических функций синус и косинус. Тогда амплитудно нормированную величину получим следующим образом:

$$W(x,a)=\frac{W_c(x,a)}{\sqrt{W_c^2(x,a)+W_s^2(x,a)}}, \tag{3}$$

где W_s и W_c – вейвлет-коэффициенты, полученные с помощью вейвлет-преобразования с базисными вейвлетами $\psi_c(t)$ и $\psi_s(t)$.

Данное преобразование, производя амплитудную нормировку, не вносит фазовых искажений. На рис. 1 представлен пример вейвлет-фильтрации с амплитудной нормировкой [6].

Дисперсионный способ определения фазовых задержек заключается в следующем. Пусть на карте изолиний, отображающей амплитуды регистрируемых сигналов всех съемок (рис. 2), по горизонтали отложено время *t*, мс, регистраций сигнала на трассе, а по вертикали – мониторинговое время *T* в долях часа. Обозначим данное волновое поле как $f(t,T)$. Тогда если мы будем вычислять дисперсию данной функции в точках $\{t+T\alpha,T\}$, то дисперсия $D_f\{t+T\alpha,T\}$ будет наименьшей, где α – скорость фазового смещения. На рис. 2 этот случай соответствует направлению линии 1.

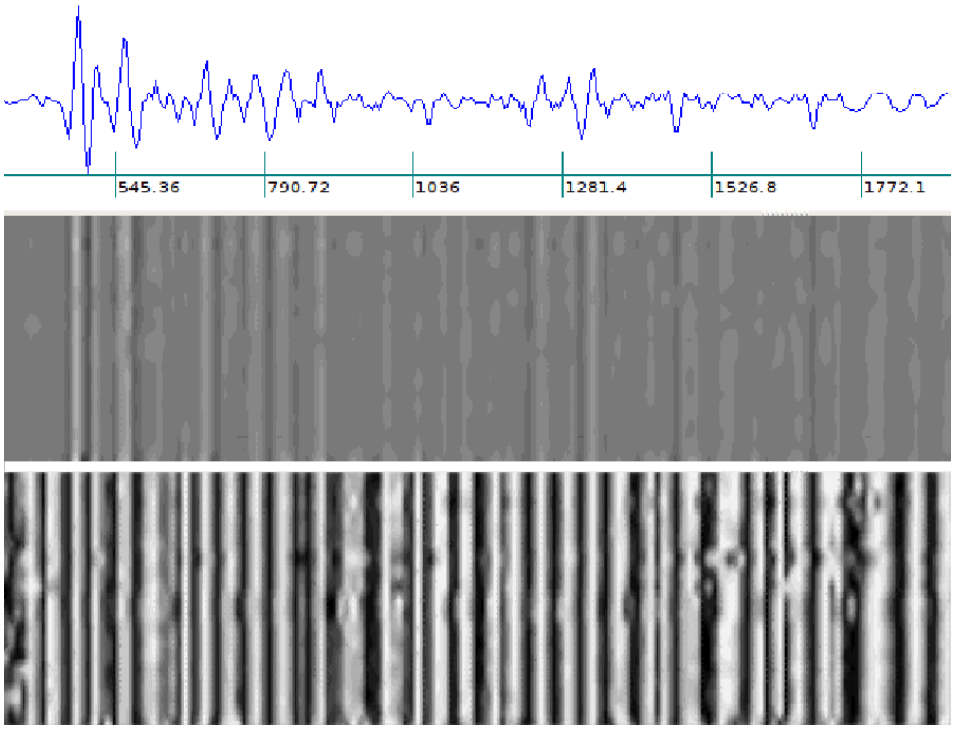

Рис. 1. Пример вейвлет-фильтрации данных с амплитудной нормировкой. Верхний рисунок – график одной из трасс; средний рисунок – временная развертка трассы для первой группы вибраторов; нижний рисунок – те же съемки после амплитудной вейвлет-нормировки

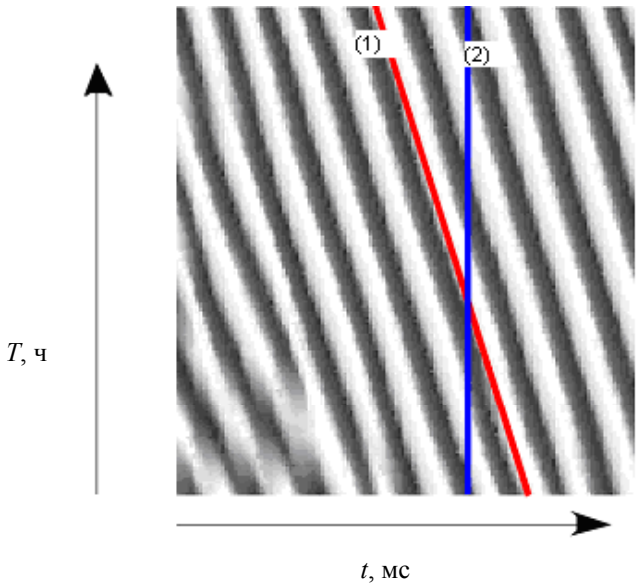

Рис. 2. Иллюстрация к дисперсионному методу определения фазовых задержек

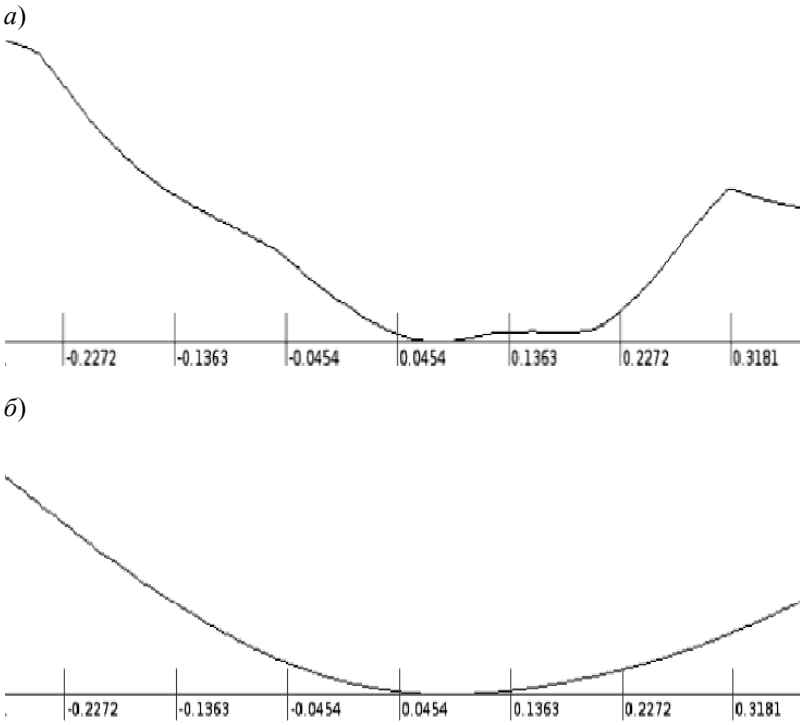

Рис. 3. Пример результата определения скорости фазовых задержек (мс/ч) дисперсионным способом: *а*) до вейвлет-фильтрации, *б*) после вейвлет-фильтрации

Таким образом, практическая реализация методики заключается в вычислении дисперсий $D_f\{t+T\alpha,T\}$ в некотором окне $\{t_1,t_2,T_1,T_2\}$ как функции угла соответствующего безразмерной скорости фазового смещения и определении наименьшего значения дисперсии (рис. 2) [6].

Скорости фазового смещения вычислялись в скользящем окне как по параметру *t*, мс, так и по параметру *T*, ч. В первом случае изменяются времена регистрации сигналов отраженных волн, что позволяет «сканировать» фазовые смещения на различных глубинах. Во втором случае появляется возможность локализовать фазовые смещения во времени в течение суток.

На рис. 3 показаны результаты определения скорости фазовых смещений без амплитудной вейвлет-нормировки и с ее помощью. Как видно из рисунка, в последнем случае (рис. 3, *б*) результаты (определение минимума функции) более точны и однозначны.

Общая характеристика результатов сейсмического мониторинга на двух участках в пределах нефтяного месторождения на территории РТ

Полученные в результате этих экспериментов данные, с одной стороны, во многом подтвердили связь приливных вариаций сейсмического поля с расположением выявленных локальных структур, а с другой – позволили уточнить ряд вопросов практической реализации методики.

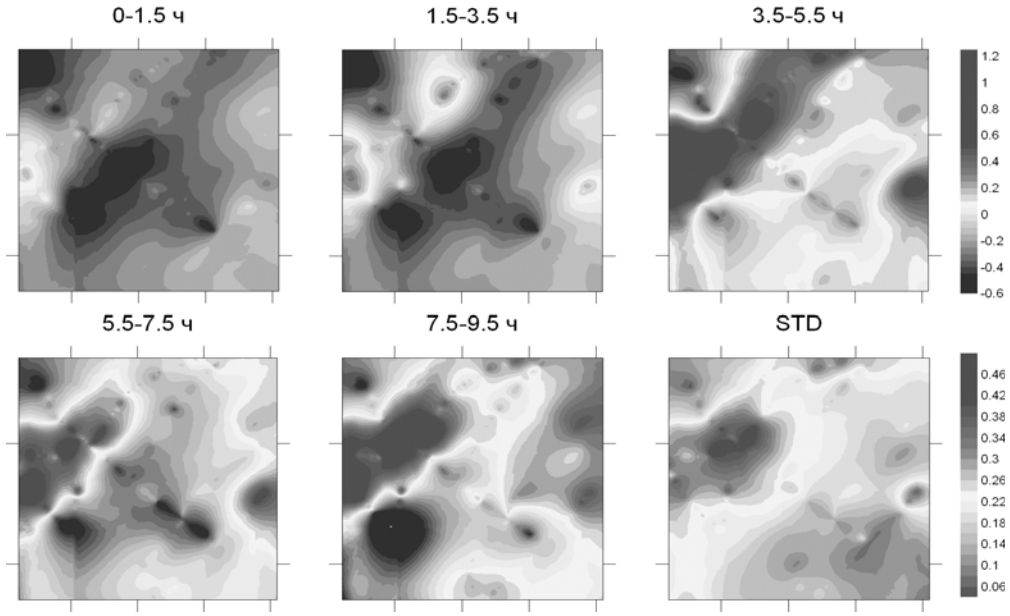

Рис. 4. Результаты определение фазовых задержек (в мс) и их среднеквадратических отклонений (нижний правый рисунок) на временном интервале 500–1000 мс на северном участке. Отсчет мониторингового времени – от 8:30

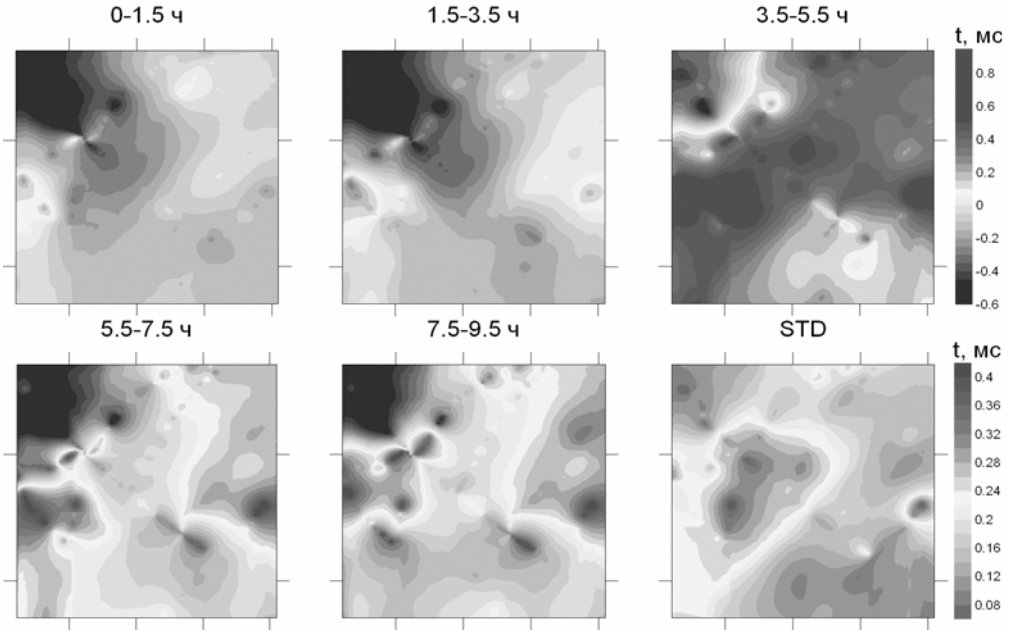

Рис. 5. Временной интервал 700–1200 мс

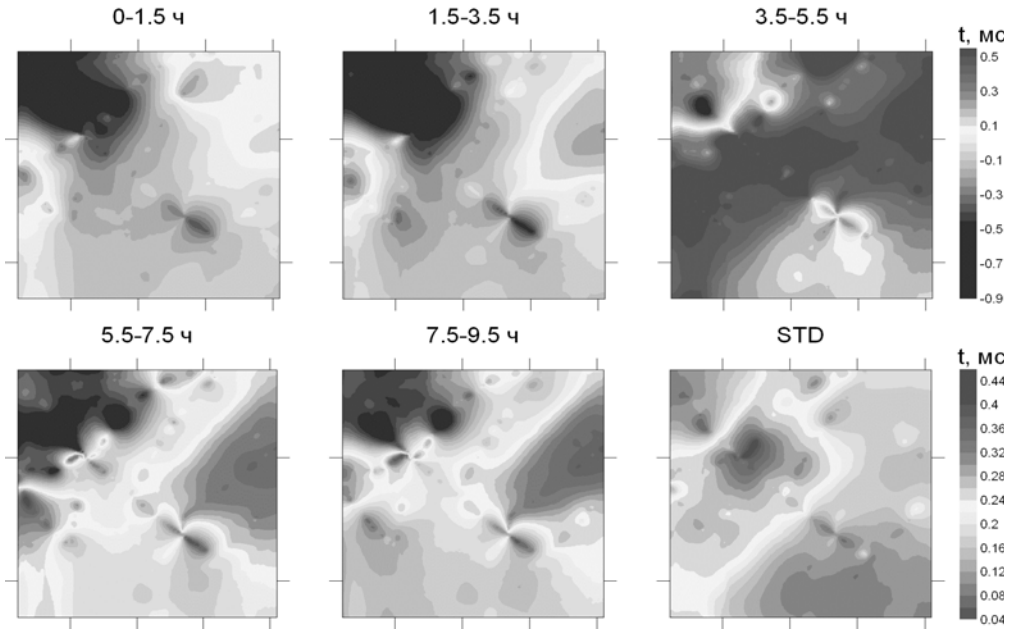

Рис. 6. Временной интервал 900–1400 мс

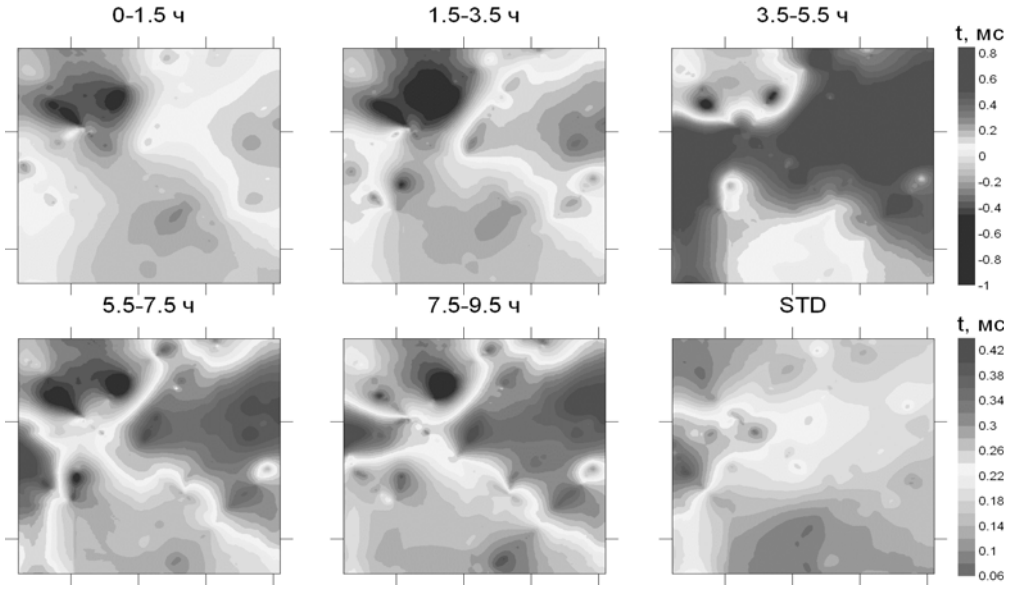

Рис. 7. Временной интервал 1100–1600 мс

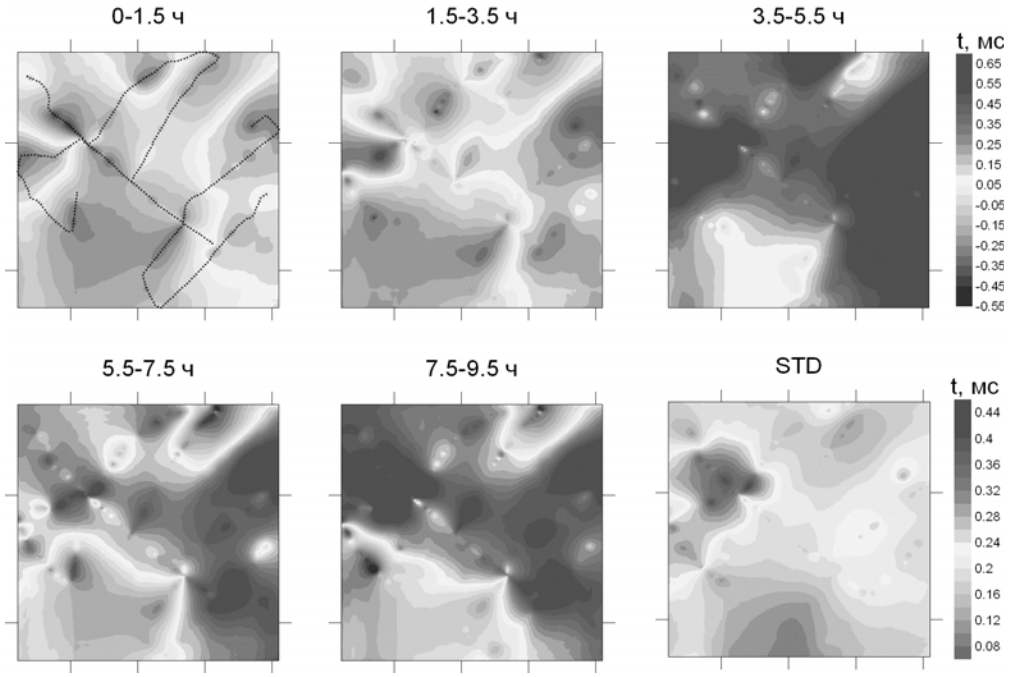

Рис. 8. Временной интервал 1300–1800 мс

Результаты определений фазовых задержек и среднеквадратических отклонений на первом участке изображены в виде карт изолиний (рис. 4–8). Как видно из рисунков, резкие изменения произошли приблизительно через 3.5 ч от начала измерений (около 12 часов дня). В этот период фазовые задержки из отрицательных (порядка –0.4 ÷ –0.2 мс) скачкообразно поменялись на положительные (порядка 0.2÷0.8 мс). В дальнейшем амплитуда фазовых задержек незначительно уменьшилась и к концу времени наблюдений опустилась до значений 0.1÷0.3 мс. На малых временах регистрации сигналов контуры изолиний распределения фазовых задержек хорошо согласуются с рельефом местности данного участка.

На малых временах регистрации сигналов контуры изолиний распределения фазовых задержек на обоих участках хорошо согласуются с рельефом местности; значения фазовых задержек на южном участке в абсолютном выражении в два-три раза больше, чем на северном участке, при этом и перепады высот также существенно выше на южном участке (рис. 4, 5). Амплитуды фазовых задержек и их дисперсии с увеличением времен регистрации практически не изменяются, наблюдается лишь незначительное увеличение с ростом времен регистрации сигнала. Скачкообразность изменений фазовых задержек и их явно коллективное поведение на обоих участках наблюдений (и, возможно, за их пределами) могут свидетельствовать о блоковой динамике среды, в которой распространялись сейсмические волны во время приливов.

Выводы

Полученные в результате сейсмического мониторинга данные свидетельствуют о значительном изменении морфологии сейсмического поля под действием лунно-солнечных приливов. Кроме того, обнаружено, что отдельные блоки (структуры) осадочного чехла по-разному реагируют на приливные воздействия. Указанные факты позволяют по-новому взглянуть на место сейсмического мониторинга (4D-3C) в практике решения нефтепоисковых задач. С учетом полученных данных в 2011 г. в рамках проекта № 2010-218-01-192 планируется проведение дальнейших исследований в этом направлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2010-218-01-192).

Summary

D.K. Nurgaliev, E.V. Utemov, D.I. Khasanov, E.V. Eronina. Seismic Monitoring for the Solution of Tectonic Problems and Oil Exploration.

The seismodynamic behavior of a collector layer and enclosing rocks under luni-solar tides is considered. The phase delays of the reflected waves as a result of tidal phenomena are described. An algorithm is presented for the wavelet filtration, normalization and variance analysis of the seismic monitoring data. The results of seismic monitoring are shown.

Key words: gravitational potential, seismic monitoring, phase delays of reflected waves, wavelet filtration, base wavelet, Lorentz profile, variance analysis, tidal variations, amplitude normalization.

Литература

1. *Кузнецов О.Л., Графов Б.М., Сунцов А.Е., Арутюнов С.Л.* Технология АНЧАР: о теории метода // Геофизика. – 2003. – Спец. вып. «Технология сейсморазведки – 2». – С. 25–30.
2. *Кипоть В.Л., Тумаков Д.Н.* Частотно-избирательные свойства стратифицированной геологической среды // Георесурсы. – 2008. – № 2. – С. 18–28.
3. *Ali M.Y., Berteussen K.A., Small J., Barkat B.* Low-frequency passive seismic experiments in Abu Dhabi, United Arab Emirates: implications for hydrocarbon detection // Geophys. Prospect. – 2010. – V. 58, No 5. – P. 875–899.
4. *Надежка Л.И. и др.* О связи параметров сейсмодинамического шума с геологическими и геодинамическими особенностями Воронежского кристаллического массива // Геофизика. – 2003. – № 3. – С. 179–185
5. *Кузнецов В.И.* Элементы объемной (3D) сейсморазведки. – Тюмень: Изд-во «Тюмень», 2004. – 272 с.
6. *Утемов Э.В., Нургалиев Д.К.* «Естественные» вейвлет-преобразования гравиметрических данных: теория и приложения // Физика Земли. – 2005. – № 4. – С. 88–96.

Поступила в редакцию
01.11.10

Нургалиев Данис Карлович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, проректор по научной деятельности Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *danis.nourgaliev@ksu.ru*

Утёмов Эдуард Валерьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *utemov@mail.ru*

Хасанов Дамир Ирекович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *Damir.Khassanov@ksu.ru*

Еронина Екатерина Владимировна – старший преподаватель кафедры геофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.