

УДК 550.834

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ
ПРИ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
НА ТЕРРИТОРИИ БОЛГАРСКОГО ГОРОДИЩА**

А.В. Степанов, А.В. Головцов

Аннотация

Впервые на территории Болгарского городища (Республика Татарстан) проведена малоглубинная сейсморазведка. Выполнена оценка информативности зарегистрированного волнового поля для решения некоторых археологических задач: картирования мелких границ, выделения локальных неоднородностей размером меньше длины сейсмической волны. Сделан вывод о благоприятности поверхностных сейсмогеологических условий для использования малоглубинной сейсморазведки при археологических изысканиях на Болгарском городище. При этом информативными следует считать прямые, преломлённые и поверхностные волны, которые доминируют в зоне малых скоростей. Полученная информация позволяет выбирать рациональную методику полевых сейсмических работ при дальнейших археологических изысканиях.

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка, зона малых скоростей, преломляющая граница, локальная неоднородность, спектральная область, двумерный спектр.

Введение

В рамках комплексных мероприятий по возрождению и развитию Болгарского историко-архитектурного музея-заповедника, проводимых под эгидой Республиканского фонда возрождения памятников истории и культуры Республики Татарстан (РТ), действующего на основании Указа Президента РТ № УП-71 от 17 февраля 2010 г., кафедра геофизики и геоинформационных технологий Казанского федерального университета выполняет опережающие геофизические исследования при археологических изысканиях с целью поиска захороненных древних сооружений и реконструкции древнего городища. В составе геофизического комплекса проходит опробование и сейсморазведка в малоглубинной модификации. Следует отметить, что примеры использования малоглубинной сейсморазведки в качестве опережающего геофизического метода при археологических изысканиях в пределах исторических территорий древних архитектурных ансамблей единичны [1] и соответствующая методика полевых работ и интерпретации материалов не разработана.

Малоглубинная сейсморазведка имеет уже длительную историю развития. За это время сформировался круг решаемых ею задач, а также методические особенности её проведения и интерпретации получаемых материалов. К основным

геологическим задачам, решаемым малоглубинной сейсморазведкой, можно отнести [2]:

1) изучение строения верхней части разреза (ВЧР) под обоснование строительства сооружений и поиска подземных вод в инженерной геологии и гидрогеологии, а также при поиске и разведке твёрдых полезных ископаемых;

2) изучение состава, свойств и состояния пород ВЧР, в том числе выявление и изучение включений и неоднородностей в коренных и перекрывающих их осадочных породах;

3) изучение геологических и инженерно-геологических процессов: динамики оползней, колебаний уровня грунтовых вод и т. п.

При этом основным сейсмическим методом для изучения глубин 0–100 м является метод преломлённых волн (МПВ). Характерной особенностью малоглубинной сейсморазведки является то, что выбор методических приёмов при решении той или иной геологической задачи определяется конкретными сейсмогеологическими условиями. Существующее многообразие сейсмогеологических моделей ВЧР вызывает необходимость проведения опытных исследований для выбора типа полезных волн, оптимальных систем их наблюдения, параметров регистрации, средств подавления волн-помех на конкретном объекте.

Возможность применения малоглубинной сейсморазведки в археологии основывается на следующих предпосылках. Древние захороненные сооружения и фундаменты, изготовленные из поделочного камня (известняки, доломиты), представляют собой акустически контрастные локальные неоднородности, расположенные в терригенных горных породах, и должны создавать аномалии в наблюдаемом волновом поле. Культурные слои, насыщенные продуктами человеческой деятельности, должны отличаться упругими модулями от нижележащих геологических слоёв. Это создаёт предпосылки для картирования поверхности раздела между культурным слоем и нижележащей геологической толщей.

Летом 2012 г., сотрудниками кафедры геофизики и геоинформационных технологий были проведены сейсмические исследования с целью выяснения возможностей изучения ВЧР, включая опытное картирование преломляющих границ в зоне малых скоростей (ЗМС) на минимальных глубинах от дневной поверхности, а также выделение локальных неоднородностей в условиях Болгарского городища. Сейсмический измерительный комплекс состоял из невзрывного поверхностного импульсного сейсмоисточника с силовым электромагнитным приводом «Енисей ЭМ-1,6», предназначенного для возбуждения упругих волн путём воздействия на дневную поверхность земли, и телеметрической системы сбора данных XZone® Fly Lander, способной регистрировать сейсмическую информацию с интервалом квантования во времени 0.5–4 мс и разворачивать на местности линейную сеть пунктов приёма до 96 каналов. По своим техническим характеристикам данный сейсмический источник является наиболее мощным в своём классе, однако широкого применения в малоглубинной сейсморазведке он пока не нашёл. В целом по техническим и эксплуатационным характеристикам данный измерительный комплекс, укомплектованный сейсмоприёмниками GS20DX, способен проводить исследования ВЧР. Ниже приведены результаты выполненных исследований.

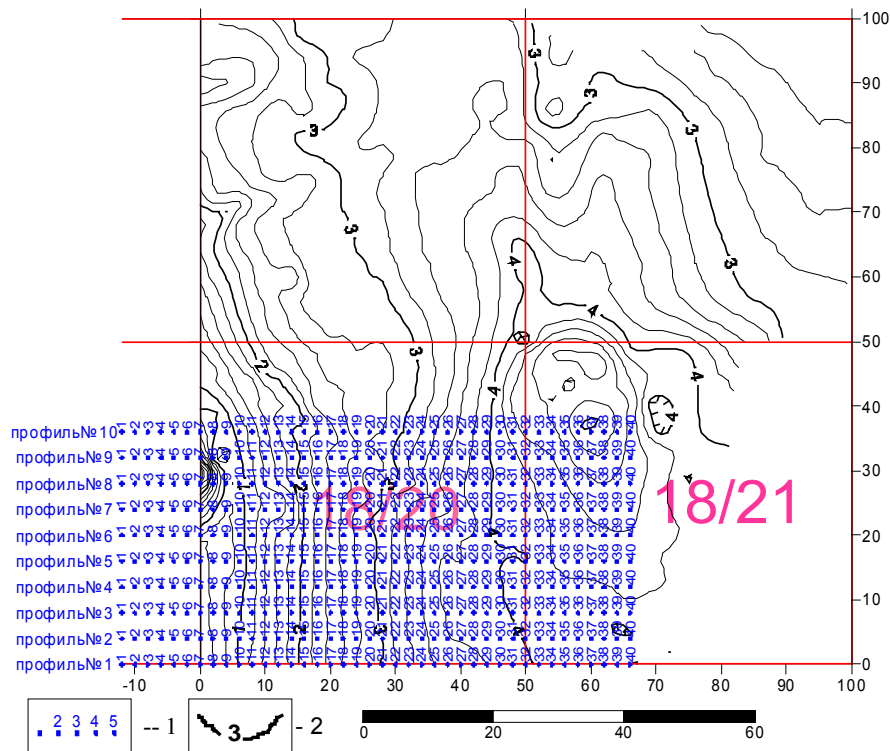


Рис. 1. Схема обработанных сейсмических профилей в квадрате 18/20: 1 – расположение сейсмических каналов на профиле; 2 – изолинии превышений дневного рельефа

1. Опытное картирование преломляющей границы в ЗМС

Опытное картирование преломляющих границ в ЗМС на минимальных глубинах от дневной поверхности было выполнено в сейсмогеологических условиях квадрата 18/20. Использовалась регулярная система наблюдения со следующими параметрами, которые были выбраны по результатам опытных работ. База приёма содержала 40 каналов с интервалами между ними, равными 2 м. Канал № 7 размещался на ПК 18/20, канал № 32 – на ПК 18/21, каналы № 1–6 размещались в квадрате 18/19, каналы № 33–40 – в квадрате 18/21. База приёма занимала фиксированное положение на линейном профиле и обрабатывалась из 40 пунктов возбуждения (ПВ). Положение ПВ совпадало с пунктами приёма. По такой методике было отработано 10 линейных профилей. Расстояние между соседними профилями составляло 4 м. Положение профилей показано на рис. 1.

Возможность (приёмы) построения преломляющей границы рассмотрим на материалах профиля № 1. Сейсмограммы, зарегистрированные при отработке фланговых ПВ № 1 и № 40, представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Их волновые поля образуют встречную систему наблюдений, которая имеет взаимную точку. Как известно, такие системы имеют преимущество, позволяя использовать принцип взаимности при обработке [3].

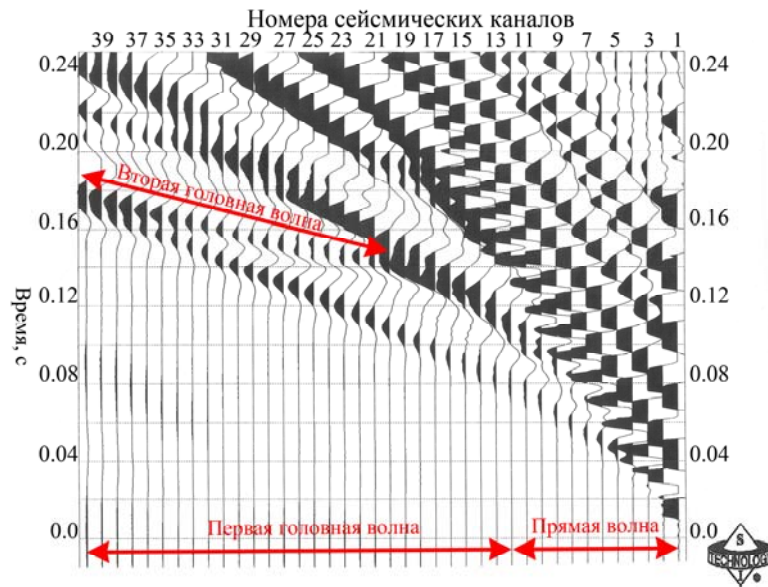


Рис 2. Сейсмограмма МПВ, полученная с флангового ПВ 1

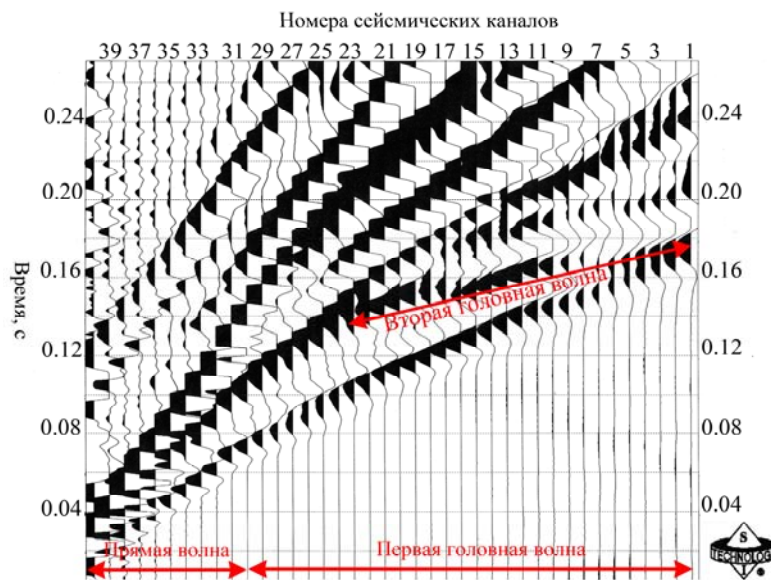


Рис 3. Сейсмограмма МПВ, полученная с флангового ПВ 40

Анализ наблюдаемого волнового поля показал, что в области первых вступлений можно выделить прямую и первую головную волну при выбранном шаге $\Delta X_{\text{пл}}$. Соответствующие области их прослеживания показаны на рис. 2, 3. На волновом поле также достаточно чётко прослеживается и вторая головная волна, однако в пределах применявшейся базы приёма и в сейсмогеологических условиях квадратов 18/19, 18/20, 18/21 она в первые вступления не вышла. Поэтому интерпретация выполнялась в рамках двухслойной модели среды. По исходным сейсмограммам была проведена корреляция первых вступлений и построены наблюдаемые годографы (рис. 4).

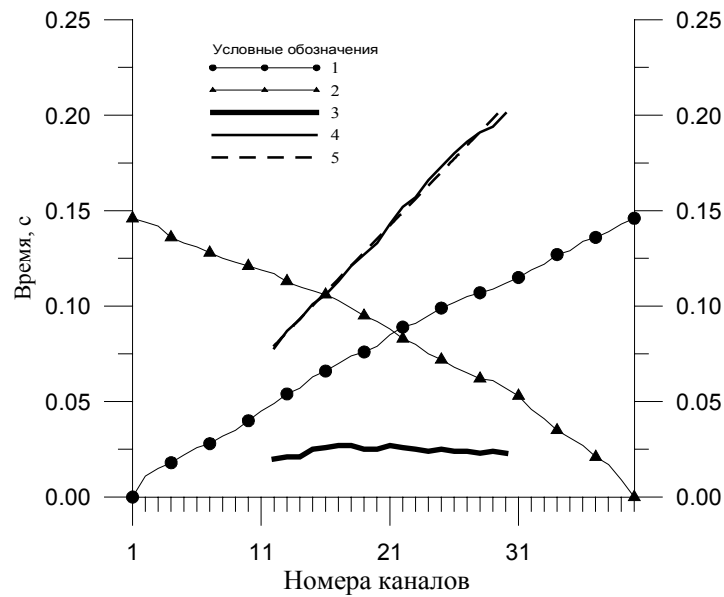


Рис. 4. Построение линии t_0 и разностного годографа θ по встречным годографам МПВ: 1 – прямой годограф, 2 – обратный годограф, 3 – линия t_0 , 4 – разностный годограф, 5 – МНК-аппроксимация разностного годографа θ

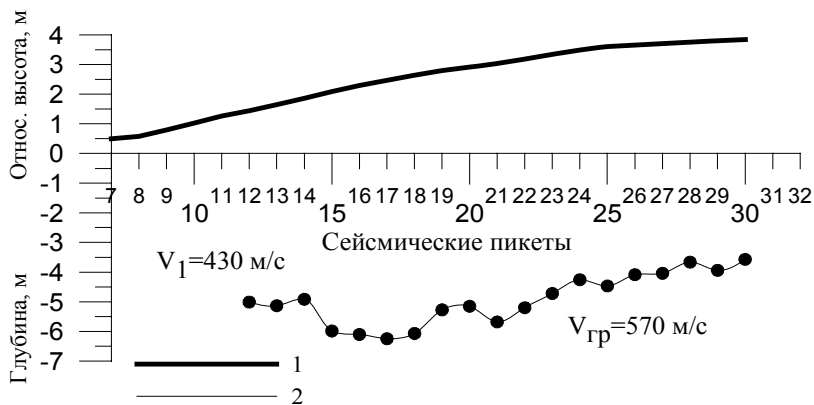


Рис. 5. Сейсмический разрез для профиля № 1, квадрат 18/20: 1 – дневной рельеф, 2 – преломляющая граница

Конфигурация преломляющей границы была построена способом t_0 [4]. Рассчитанные линия $t_0(x)$ и разностный годограф $\theta(x)$ представлены на рис. 4. Как видно, форма разностного годографа мало отличается от прямой. Поэтому граничную скорость V_2 на исследованном участке профиля можно принять постоянной и определить по угловому коэффициенту $\Delta\theta(x)/\Delta x$ линии $\theta(x)$, сглаженной методом наименьших квадратов (МНК). Скорость в толще, покрывающей преломляющую границу, определялась по прямой волне. Построенная с учётом линии $t_0(x)$ преломляющая граница представлена на рис. 5. Как видно из рисунка, преломляющая граница залегает слегка наклонно в интервале глубин 4–6 м от дневной поверхности.

По результатам обработки сейсмограмм МПВ, зарегистрированных по встречной системе наблюдений, можно сделать следующие выводы.

1. Сейсмогеологические условия Болгарского городища благоприятны для проведения сейсморазведки: техногенные шумы имеют относительно малую интенсивность, что позволяет проводить исследования в дневное время; в ВЧР регистрируются одна-две головных волны, необходимых для картирования поверхностей раздела акустически контрастных слоёв; форма годографов прямых и головных волн традиционна, что облегчает их идентификацию и корреляцию первых вступлений.

2. Для обработки сейсмограмм МПВ малоглубинной сейсморазведки на территории Болгарского городища возможно применение экспресс-методов интерпретации для построения криволинейных преломляющих границ.

3. При возбуждении упругих волн источником в каждом пикете профиля имеется возможность изучения скорости прямой волны вдоль профиля для выделения скоростных неоднородностей (захоронённых археологических объектов) в самой верхней части разреза (глубина единицы метров).

2. Прогнозирование локальных неоднородностей в ЗМС

Прогнозирование локальных неоднородностей в ЗМС рассмотрим на материалах сейсмического профиля 20, отработанного напротив центральной базы археологов (рис. 6). Необходимость в проведении исследований за официальной границей Болгарского городища была обусловлена тем, что при проведении земляных работ на этом участке была сделана находка – крупный камень правильной формы со следами его обработки. Методика полевых работ была аналогичной профилю № 1, но интервал между положением ПВ и пунктов приёма был выбран равным 1.5 м, количество каналов в расстановке – 40 шт., длина профиля составила 58.5 м.

Волновые поля, зарегистрированные с фланговых ПВ 1 и ПВ 40, представлены на рис. 7. Для них характерна значительная нерегулярность. В частности, оси синфазности регулярных волн, которые по своей физической природе в слоисто-однородной среде должны иметь гладкий, близкий к линейному годограф, на данном участке характеризуются криволинейной формой осей синфазности с заметным фазовым разбросом между каналами. На временном интервале прослеживания первой головной волны её форма нестабильна. В последующей части записи наблюдается высокий фон рассеянных псевдорелеевских волн. На волновой картине, полученной для ПВ 1 и 40 (рис. 7), в интервале каналов 28–35 отмечается нарушение регулярности годографов головных и псевдорелеевских волн. Эта зона оконтурена красными овалами на рисунке. Такой характер осей синфазности позволил сделать предположение о наличии на этом интервале профиля локальной приповерхностной неоднородности. Последующее детальное изучение особенностей волнового поля на этом интервале по другим сейсмическим материалам в значительной мере подтвердило это предположение. Обратимся к зарегистрированным фактам. При ненарушенном залегании слоёв и их изотропии характер волновой картины для положения ПВ в центре расстановки

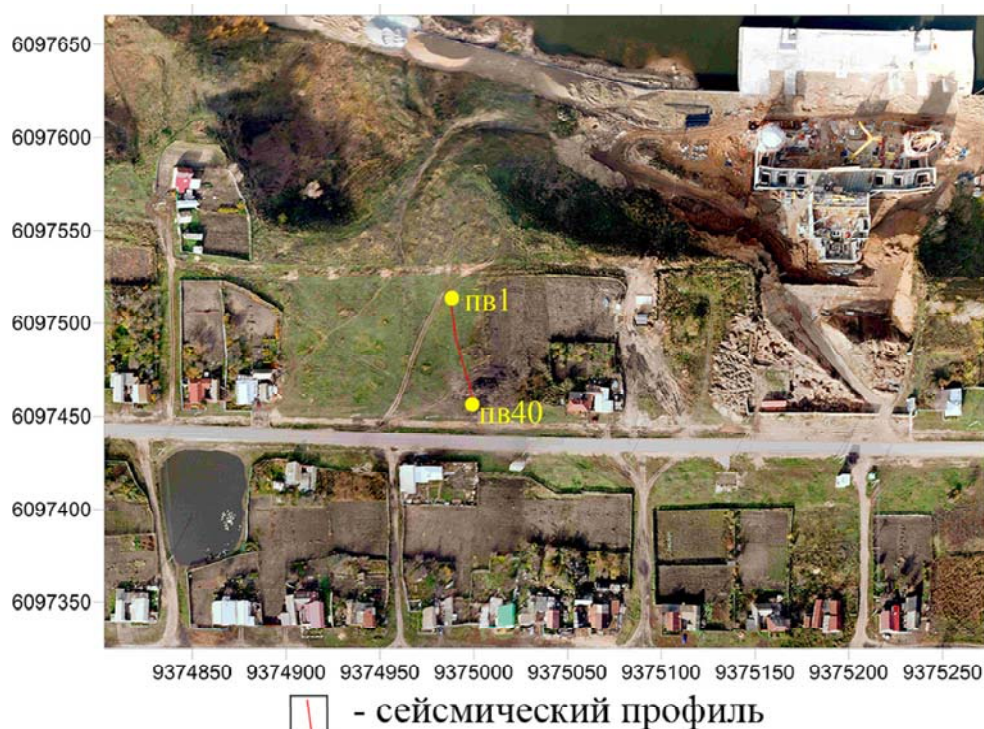


Рис. 6. Пространственное положение профиля 20

должен быть по кинематике и динамике приблизительно одинаковым. Однако на волновой картине для ПВ 20, расположенной в центре профиля (рис. 8, а), чётко видна асимметрия волнового поля относительно расположения ПВ. На каналах 31–35 зарегистрированы рассеянные псевдорелеевские волны, а на интервале регистрации головной волны на каналах 34–36 отмечается резкое изменение её формы вплоть до затухания (канал 35). На рис. 8, б для волновой картины ПВ 32 выделены дифрагированные волны, имеющие гиперболические оси синфазности.

Теперь рассмотрим ситуацию в спектральной области. Были рассчитаны спектры мощности для головной и поверхностной псевдорелеевской волн. Максимум спектра головной волны наблюдается на частотах 38–40 Гц, а поверхностной – на 22–24 Гц. Для сейсмограмм ПВ 29–34 были рассчитаны F-K-спектры Фурье (рис. 9). На этих спектрах выявляется тенденция изменения энергии поверхностных волн на положительных волновых числах, то есть первом квадранте спектральной плоскости F-K. Согласно одномерным спектрам мощности их энергия должна проявляться в виде локальных экстремумов на частотах 22–24 Гц и волновых чисел $K = 0.1–0.2 \text{ м}^{-1}$. Выполненный анализ показывает, что на спектрах ПВ 29, 30, 31 их энергия практически минимальна. И только с ПВ 32 энергия поверхностных волн в виде локального экстремума (красный цвет на рис. 9), распространяющихся в сторону канала 40, начинает постепенно возрастать. На F-K-спектре ПВ 34 и далее по ходу профиля она достигает своего максимума, что соответствует выходу траекторий поверхностных волн из аномальной зоны, рассеивающей и поглощающей энергию.

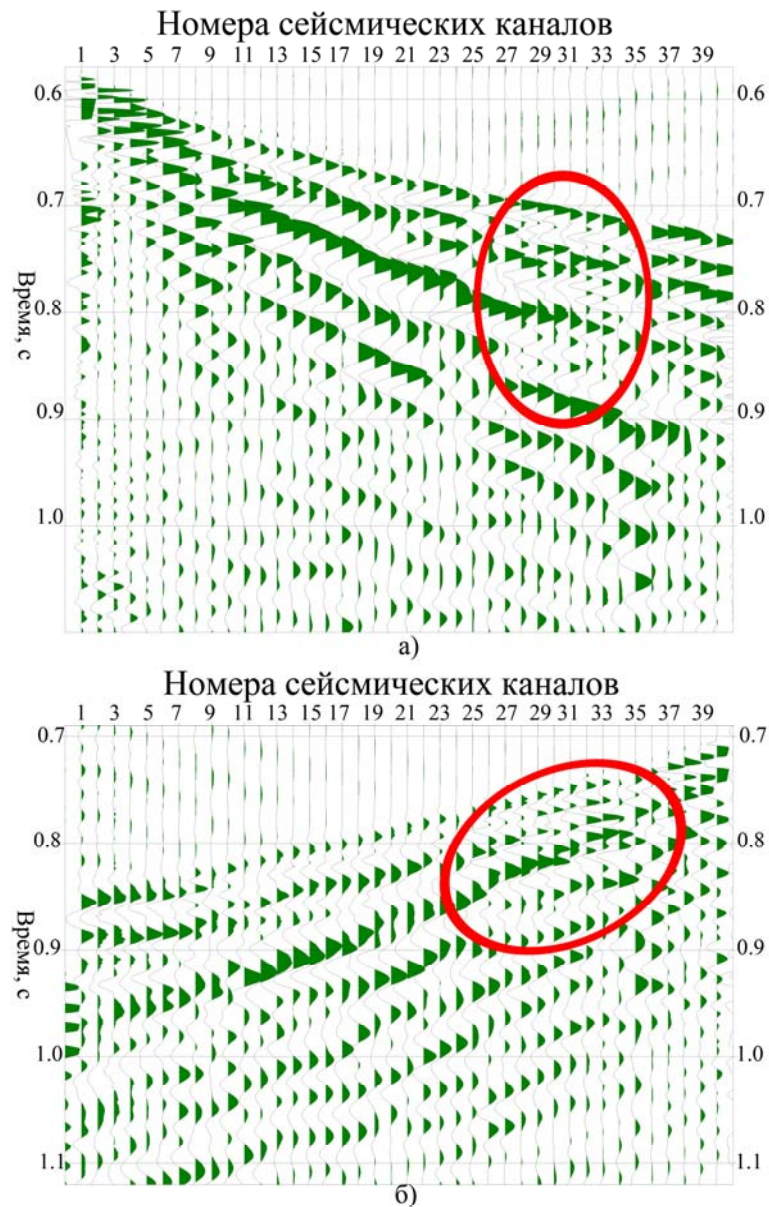


Рис. 7. Сейсмограммы МПВ, полученные с фланговых пунктов возбуждения: *а* – ПВ 1, *б* – ПВ 40

О чувствительности поверхностных волн к неглубоко залегающим неоднородностям с размерами больше и меньше преобладающей длины волны также сообщалось ранее в работах [5, 6].

В результате проведённых исследований на профиле 20 можно сделать следующие выводы.

1. Хотя при достигнутой длине волны контуры объекта не видны, но по ряду кинематических и динамических признаков преломленных и поверхностных волн локальные акустически контрастные неоднородности могут идентифицироваться сейсморазведкой.

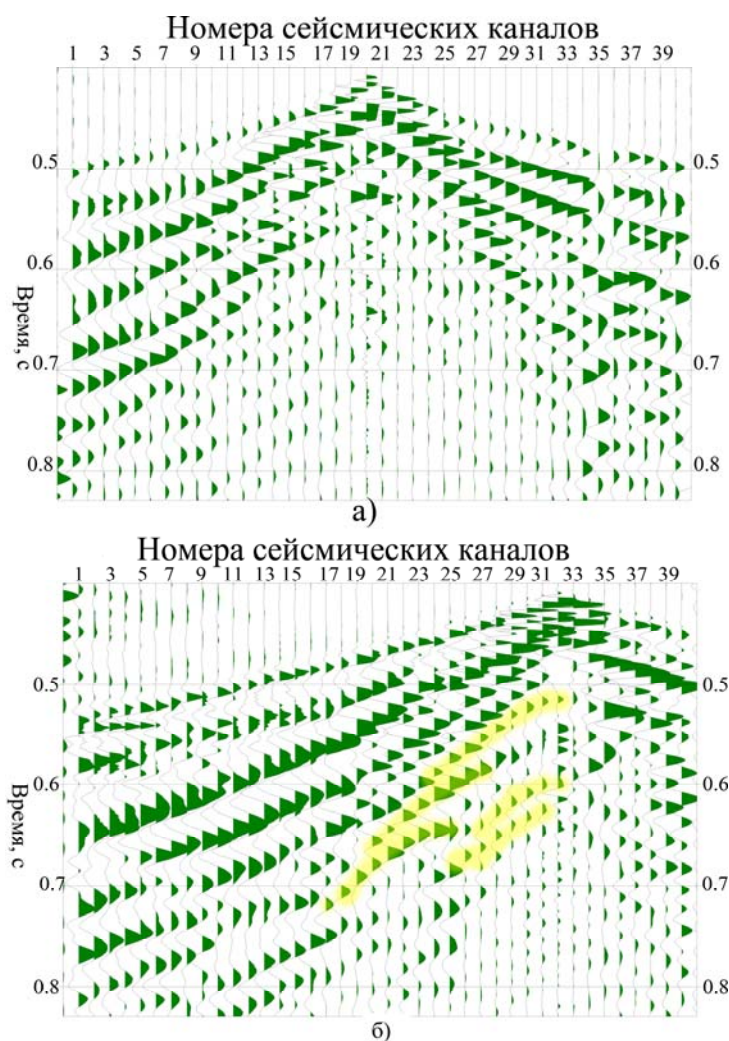


Рис. 8. Сейсмограммы МПВ, полученные на профиле 20: *а* – при воздействии из ПВ 20, *б* – при воздействии из ПВ 32

2. Сопоставление волновых полей профиля 20 с сейсмограммами ПВ 1 и ПВ 40 профиля 1 (рис. 2, 3) показывает, что верхняя часть геологического разреза в районе центральной базы археологов является нарушенной, возможно, антропогенной деятельностью. Поэтому для оценки перспектив этого участка местности для археологических изысканий можно рекомендовать постановку гравиметрической съёмки и георадарных наблюдений.

В результате выполненных сейсмических наблюдений и анализа полученных сейсмических материалов можно сделать вывод, что для изучения археологических объектов, представляющих собой акустические локальные неоднородности, на территории Болгарского городища можно использовать прямые, головные и поверхностные волны. По прямым волнам возможно изучение горизонтального градиента скоростей в приповерхностном слое. С помощью головных волн

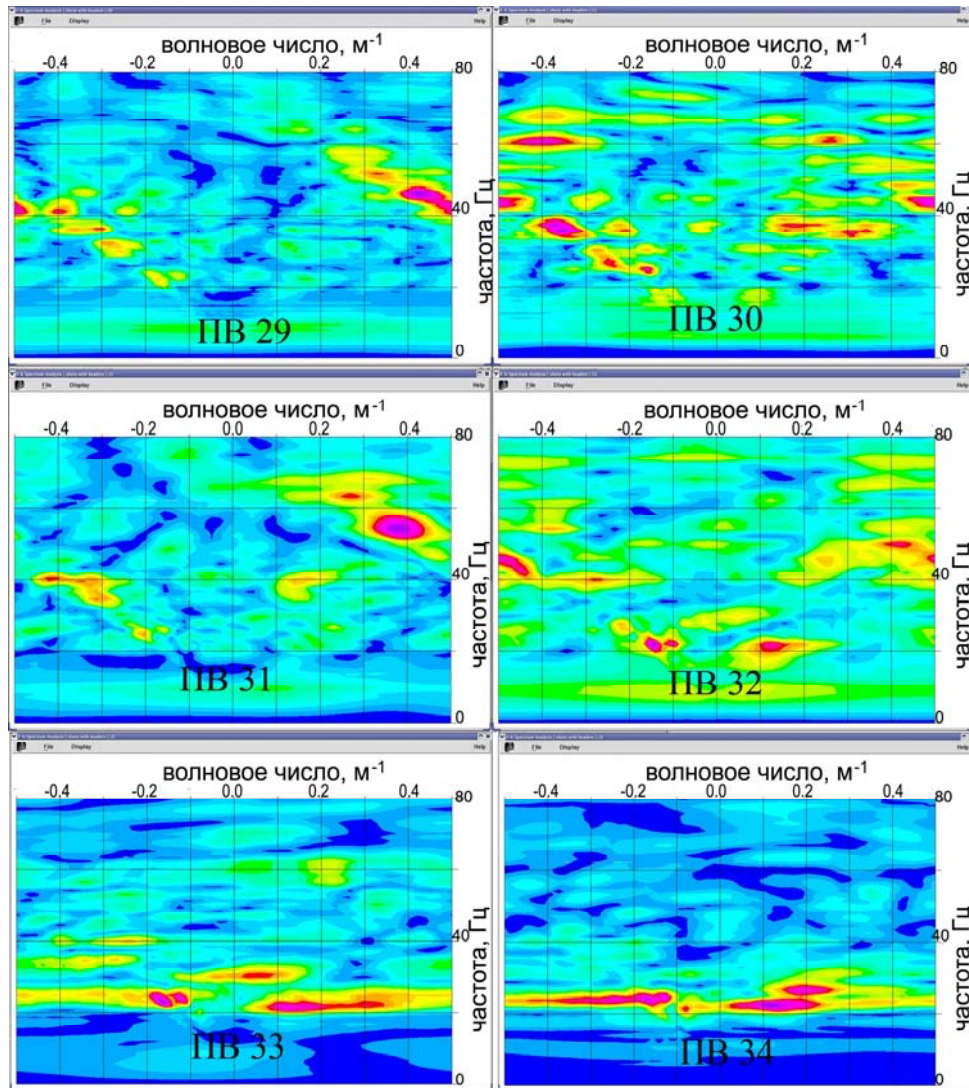


Рис. 9. Амплитудные F-K-спектры по сейсмограммам, полученным при простреле профиля из ПВ 29–34

от мелких преломляющих горизонтов может быть реализована профильная методика просвечивания локальных неоднородностей, а также картирование подошвы культурного слоя и других неглубоко залегающих преломляющих границ. Значительный интерес вызывает изучение кинематических и динамических характеристик поверхностных волн. По энергии они доминируют в полученном волновом поле, распространяются на существенно большие расстояния, чем прямая и головные волны, и оказались чувствительными к приповерхностным неоднородностям. В результате проведенных исследований получена информация, позволяющая выбирать рациональную методику сейсмических полевых работ при дальнейших археологических изысканиях.

Исследования выполнены за счёт финансовых средств по теме № 41(20-12) Республиканского фонда возрождения памятников истории и культуры РТ «Модифицированное комплексное изучение археологических объектов по датированию и реконструкции древних городищ Болгара и острова-град Свияжск».

Литература

1. *Слепак З.М.* Геофизический мониторинг при сохранении памятников архитектуры на примере Казанского Кремля. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1999. – 175 с.
2. *Палагин В.В., Попов А.Я., Дик П.И.* Сейсморазведка малых глубин. – М.: Недра, 1989. – 210 с.
3. *Боганик Г.Н., Гурвич И.И.* Сейсморазведка. – Тверь: Изд-во АИС, 2006. – 744 с.
4. *Метод преломлённых волн / Под ред. А.М. Епинатьевой.* – М.: Недра, 1990. – 297 с.
5. *Blonk B., Herman G.C., Drijkoningen G.G.* An elastodynamic inverse scattering method for removing scattered surface waves from field data // *Geophysics.* – 1995. – V. 60, No 6. – P. 1897–1905.
6. *Herman G.C., Milligan P.A., Huggins R.J., Rector J.W.* Imaging shallow objects and heterogeneities with scattered guided waves // *Geophysics.* – 2000. – V. 65, No 1. – P. 1897–1905.

Поступила в редакцию
18.01.13

Степанов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *Andrey.Stepanov@ksu.ru*

Головцов Антон Владимирович – инженер кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *zloy_21@mail.ru*

* * *

PROSPECTS OF USING SHALLOW SEISMIC SURVEY FOR ARCHAEOLOGICAL EXPLORATIONS IN THE TERRITORY OF THE BOLGAR SITE IN TATARSTAN

A.V. Stepanov, A.V. Golovtsov

Abstract

A shallow seismic survey was for the first time carried out at the site of the ancient town of Bolgar, Tatarstan. The informational content of the registered wave field was estimated for solving some archaeological problems such as mapping of shallow subsurface boundaries and imaging of shallow heterogeneities with size less than a wave length. A conclusion was made that near surface seismic conditions are favorable for the use of shallow seismic survey for archaeological purposes. It was found that both first-arrival (guided) waves and Rayleigh waves, dominating in the shallow weathered layer, should be considered informative. The obtained data make it possible to select a rational seismic acquisition technique for further archaeological investigations.

Keywords: shallow seismic survey, shallow weathered layer, refracting boundary, local heterogeneity, spectral domain, two-dimensional spectrum.

References

1. Slepak Z.M. Geophysical Monitoring for the Preservation of Architectural Monuments by the Example of the Kazan Kremlin. Kazan, Kazan Gos. Univ., 1999. 175 p. (In Russian)
2. Palagin V.V., Popov A.Ya., Dik P.I. Shallow Seismic Survey. Moscow, Nedra, 1989. 210 p. (In Russian)
3. Boganik G.N., Gurvich I.I. Seismic Survey. Tver, AIS, 2006. 744 p. (In Russian)
4. A Method of Refracted Waves (Ed. by A.M. Epinateva). Moscow, Nedra, 1990. 297 p. (In Russian)
5. Blonk B., Herman G.C., Drijkoningen G.G. An elastodynamic inverse scattering method for removing scattered surface waves from field data. *Geophysics*, 1995, vol. 60, no. 6, pp. 1897–1905.
6. Herman G.C., Milligan P.A., Huggins R.J., Rector J.W. Imaging shallow objects and heterogeneities with scattered guided waves. *Geophysics*, 2000, vol. 65, no. 1, pp. 1897–1905.

Received
January 18, 2013

Stepanov Andrei Vladimirovich – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: Andrey.Stepanov@ksu.ru

Golovtsov Anton Vladimirovich – Engineer, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: zloy_21@mail.ru