

УДК 550.831+550.831.017

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПРЕСС-ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК
НА ТЕРРИТОРИИ БОЛГАРСКОГО ГОРОДИЩА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
«ЕСТЕСТВЕННОГО» ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Э.В. Утёмов, Д.И. Хасанов, В.Е. Косарев, Н.А. Матвеева, А.Э. Утёмов

Аннотация

В статье представлены результаты обработки данных высокоточных гравиметрических съёмок, проведенных летом 2011 г. на территории Болгарского историко-архитектурного музея-заповедника. Построены карты аномалий силы тяжести в редукции Буге. Произведена томографическая реконструкция распределения источников гравитационных аномалий с использованием технологии «естественного» вейвлет-преобразования. Выявлено пространственное расположение объектов, являющихся, возможно, погребенными следами фундамента и остатками древних сооружений.

Ключевые слова: гравиметрия, редукция Буге, плотность, вейвлет-преобразование.

Введение

Гравиразведка успешно применяется при решении многих геологических проблем, однако на сегодняшний день её использование в задачах археологии – незаслуженно редкое явление по сравнению, например, с магнитометрическими, электрическими и электромагнитными методами [1–3].

При условии достаточной плотностной контрастности исследуемых объектов относительно вмещающих пород гравиметрический метод может быть успешно применён для разведки, реконструкции границ и планировки археологических памятников и сооружений.

Летом 2011 г. высокоточные гравиметрические измерения на территории Болгарского городища проводились на двух участках: первый участок, прилегающий к северо-западной части руин Соборной мечети (см. рис. 1) и второй участок, охватывающий руины погребённого мавзолея (предположительно), расположенного в 400 м севернее сторожевой башни южных ворот городища.

Методика полевых гравиметрических измерений

Измерения проводились двумя гравиметрами Scintrex CG5 Autograv. В настройках прибора использовались следующие параметры:

продолжительность одиночного наблюдения:	15 с
фильтр высокочастотных помех:	включен
фильтр низкочастотных помех:	включен



Рис. 1. Схема расположения контура первого участка работ

поправка за лунно-солнечные приливы:	используется
задержка перед измерением:	3 с
число циклов:	1

На каждом участке выполнялась однократная съемка по рядовой сети 2×2 м с замыканием на одном опорном пункте. Количество рядовых точек наблюдений и площадь исследований: первый участок – сеть 23×22 , 483 точки (исключены 23 точки, перекрытые руинами мечети), площадь участка 1848 м^2 ; второй участок – сеть 20×26 , 520 точек, площадь участка 1900 м^2 . Общее число пунктов наблюдений – 1003.

Средняя продолжительность измерений в звене составила около 20 мин (10–12 пунктов наблюдений). Средняя продолжительность измерения на одной точке с учетом процедуры топографической привязки составила чуть менее 2 мин.

Топогеодезическая поддержка осуществлялась электронным тахеометром Trimble M3 DR 5" и ГЛОНАСС/GPS-приемником Trimble R5. Определение координат точек наблюдений выполнялось электронным тахеометром Trimble M3 DR 5" с точек съемочного обоснования, которое создавалось спутниковыми системами ГЛОНАСС/GPS в статическом режиме. Высотная привязка выполнялась тригонометрическим нивелированием с помощью электронного тахеометра. Среднеквадратическая погрешность измерений углов не превышала 5", а погрешность измерений высот и плановых координат – ± 1 см.

Среднеквадратическая погрешность одиночного гравиметрического измерения составила ± 39 мкгал ($\pm 3.9 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$). Для проверки качества съемки осуществлялись контрольные повторные замеры (20 точек, независимые измерения двумя гравиметрами). В процессе первичной обработки производилась отбраковка измеренных значений на основе ряда критериев (значение погрешности одиночного замера на пункте, информация о помехах в полевом журнале,

полученные значения в соседних точках). Количество отбракованных замеров составило 9% от общего числа замеров.

Наиболее значительным фактором, влияющим на точность наблюдений, являлся ветер, поэтому наблюдения по возможности проводились в тихую погоду.

Методика обработки гравиметрических данных

По данным гравиметрических наблюдений на двух участках были построены карты аномалий силы тяжести в редукции Буге. В силу малых линейных размеров участков поправки за нормальное значение силы тяжести и поправки за рельеф не вводились.

По измеренным значениям наблюденных аномалий силы тяжести и высотных отметок были построены соответствующие графики зависимостей и уравнения регрессии, по которым и были определены плотности промежуточного слоя на обоих участках (см. рис. 2 и 3).

Получены следующие значения плотности: на первом участке оно равно 1.40 г/см^3 , на втором – 1.31 г/см^3 . Найденные значения плотности промежуточного слоя относительно низкие, что объясняется несколькими причинами. Во-первых, значение плотности промежуточного слоя на втором участке получилось низким из-за наличия очень рыхлого искусственного возвышения (насыпь высотой до 1.2 м), занимающего около 20% площади участка (на графике это высоты со значениями более 85.2 м, см. рис. 3). Во-вторых, в данном геоморфологическом районе повсеместно распространены рыхлые солифлюкционно-делювиальные четвертичные отложения [4, 5]. В-третьих, на исследуемых участках перепад высотных отметок не превышает 1.7 м, следовательно, полученные по зависимостям $\Delta g(h)$ оценки плотностей относятся к самому верхнему и наименее плотному приповерхностному слою.

По полученным аномалиям Буге на участках исследований было произведена томографическая реконструкция распределения источников поля с использованием технологии «естественного» вейвлет-преобразования [6, 7]. Кратко суть данной технологии заключается в отыскании распределения точечных источников по «естественным» вейвлет-спектрам аномального гравитационного поля с последующим эквивалентным перераспределением избыточных масс. Термин «естественные» (родные, нативные) вейвлеты выбран в связи с тем, что при их построении используются функции производных гравитационного потенциала точечной массы. Результаты плотностной реконструкции представлены на рис. 4–9.

Как видно из представленных рисунков, избыточная плотность варьируется в достаточно широком интервале: от -0.16 до $+0.16 \text{ г/см}^3$ на первом участке и от -0.08 до $+0.16 \text{ г/см}^3$ на втором участке. Такой перепад избыточной плотности вполне может соответствовать разности между плотностью погребенных плотных (известняков, доломитов) антропогенных объектов и плотностью рыхлых вмещающих пород. На картах распределения избыточной плотности первого участка наблюдаются линейные положительные (до $+0.16 \text{ г/см}^3$) плотностные аномалии протяженностью 10–20 м, пространственная ориентация которых согласуется с ориентацией стен Соборной мечети.

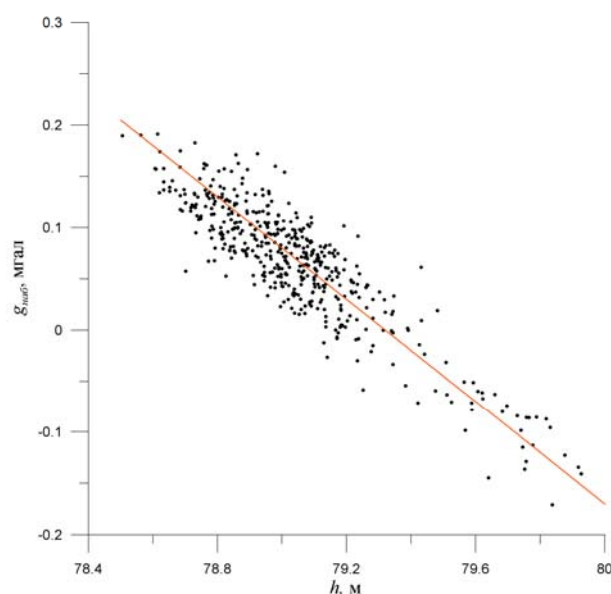


Рис. 2. Зависимость значений наблюдаемых аномалий силы тяжести от высотных отметок на первом участке

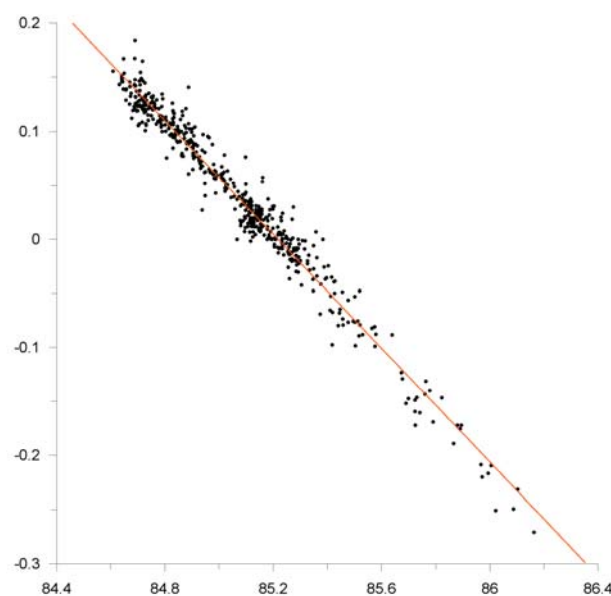


Рис. 3. Зависимость значений наблюдаемых аномалий силы тяжести от высотных отметок на втором участке

На втором участке на карте высотных отметок хорошо видно небольшое возвышение (насыпь) близкой к изометрической формы диаметром 20 м и высотой около 1.2 м. На карте аномалий силы тяжести этому возвышению соответствует отрицательная аномалия порядка -30 мкгал, однако данная аномалия имеет вытянутую эллипсоидальную форму, осложнённую с западной стороны полосовой положительной ($+20$ мкгал) аномалией шириной около 7 м. Данным структурам, как видно из рис. 8, соответствует вариация плотности порядка $0.1\text{--}0.15$ г/см³.

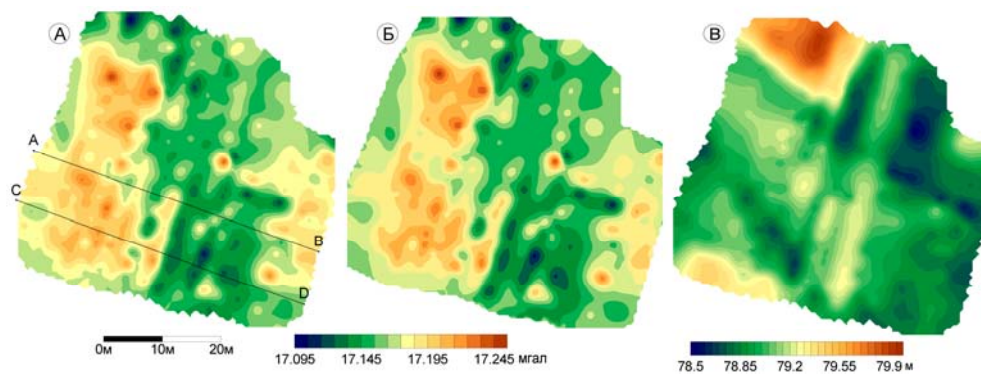


Рис. 4. Результаты обработки гравиметрических данных на первом участке: А – карта аномалий Буге (нанесены линии профилей, вдоль которых построены плотностные разрезы); Б – восстановленные гравитационные аномалии по результатам плотностной вейвлет-реконструкции; В – карта высотных отметок

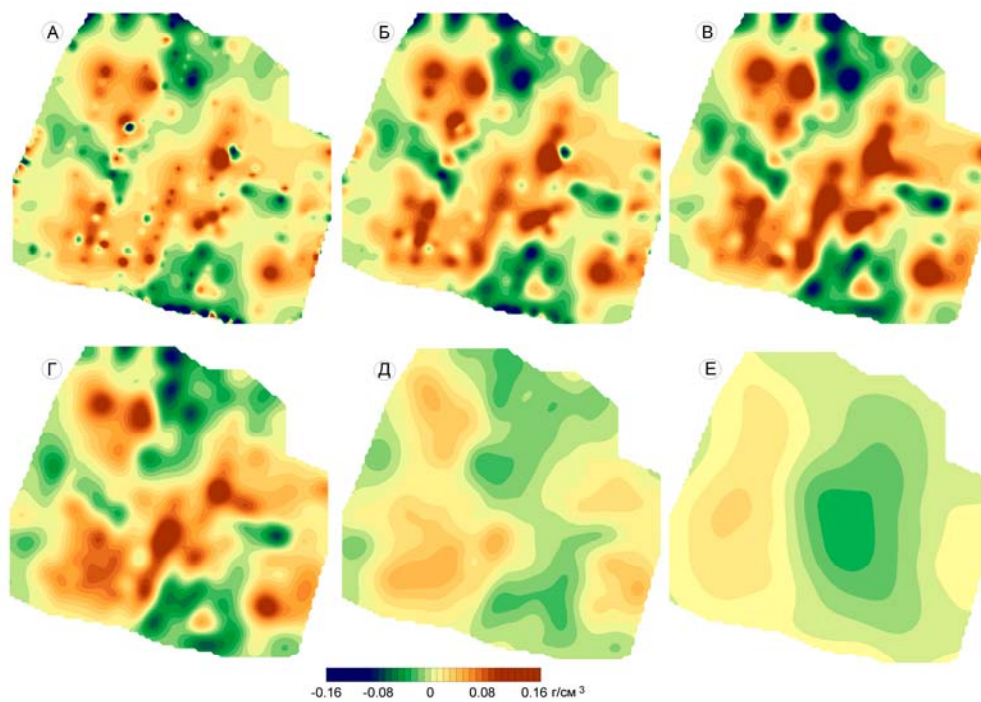


Рис. 5. Карты распределения избыточной плотности на первом участке по данным плотностной вейвлет-реконструкции: А – срез на глубине 0.5 м; Б – 1 м; В – 2 м; Г – 3 м; Д – 5 м; Е – 8 м

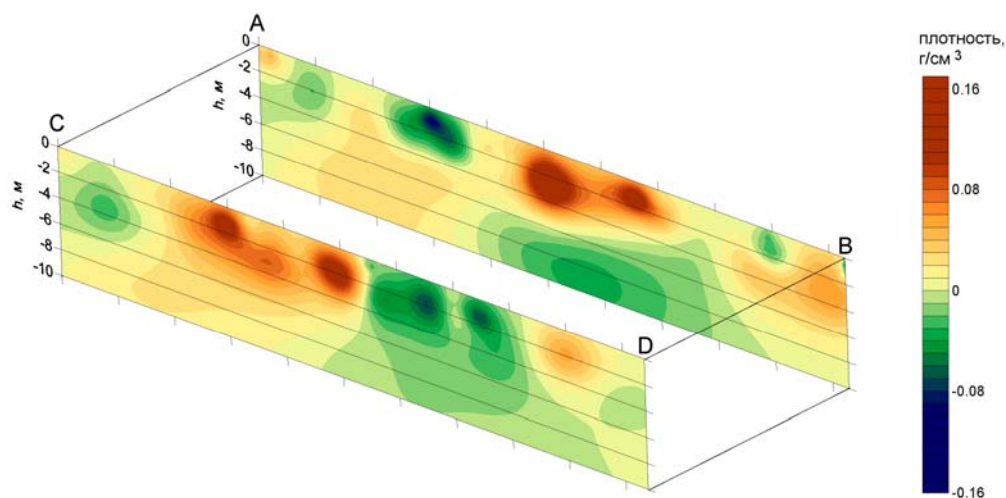


Рис. 6. Плотностные разрезы на первом участке вдоль линий профилей А–В, С–D (см. рис. 4) по данным плотностной вейвлет-реконструкции

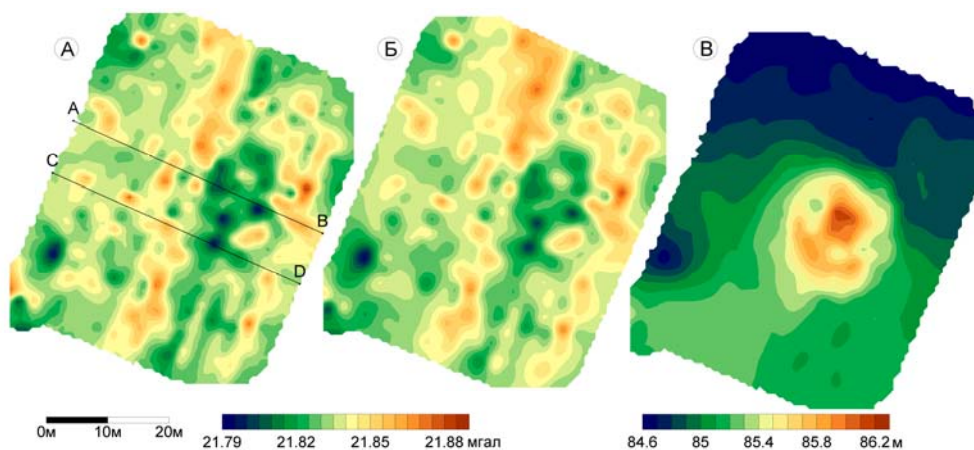


Рис. 7. Результаты обработки гравиметрических данных на втором участке: А – карта аномалий Буге (нанесены линии профилей, вдоль которых построены плотностные разрезы); Б – восстановленные гравитационные аномалии по результатам плотностной вейвлет-реконструкции; В – карта высотных отметок

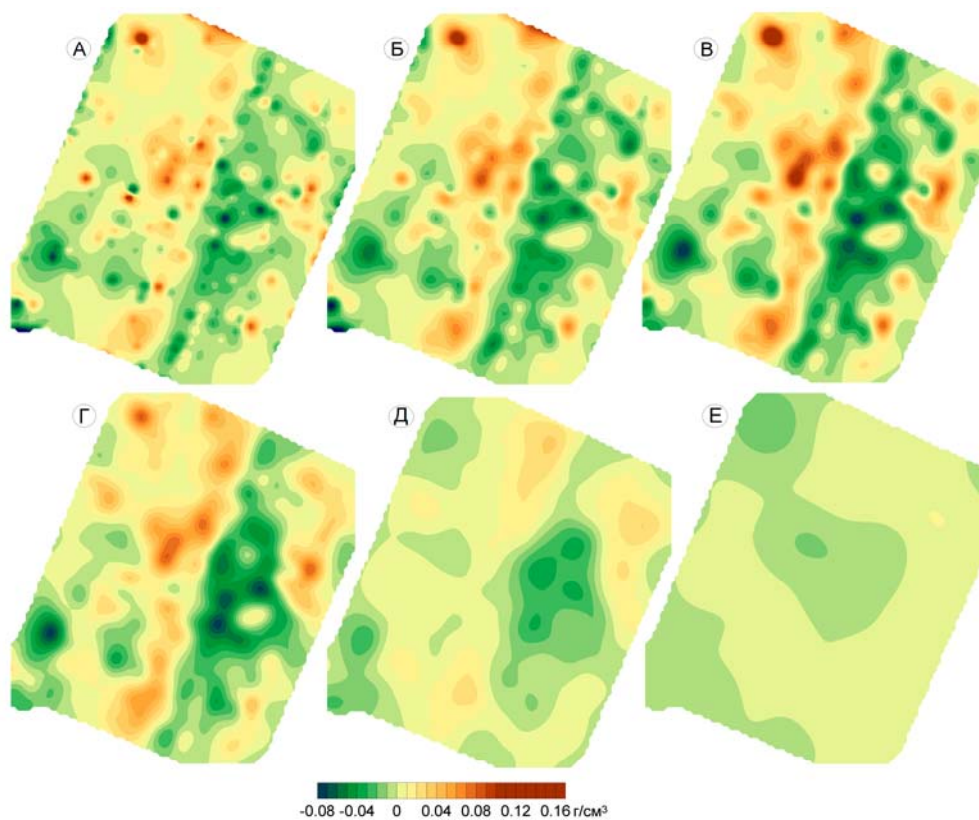


Рис. 8. Карты распределения избыточной плотности на втором участке по данным плотностной вейвлет-реконструкции: А – срез на глубине 0.5 м; Б – 1 м; В – 2 м; Г – 3 м; Д – 5 м; Е – 8 м

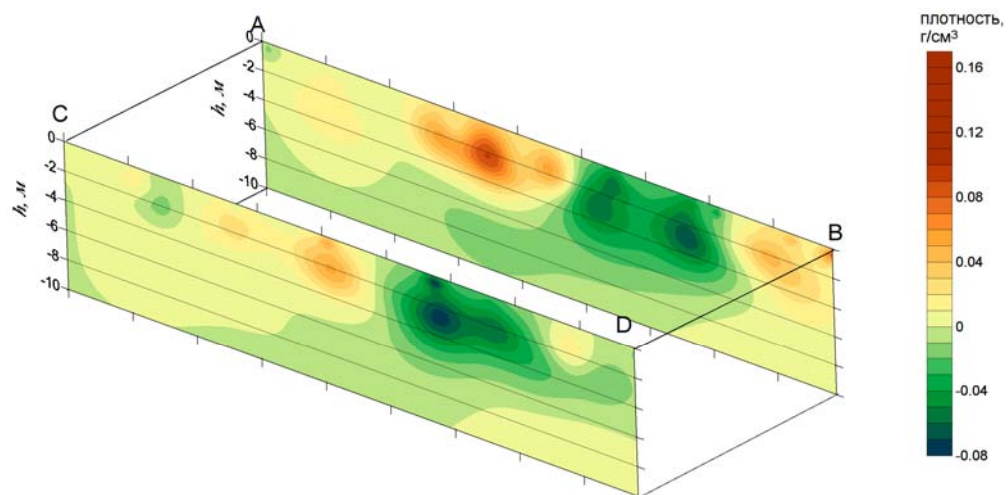


Рис. 9. Плотностные разрезы на первом участке вдоль линий профилей А–В, С–Д (см. рис. 7) по данным плотностной вейвлет-реконструкции

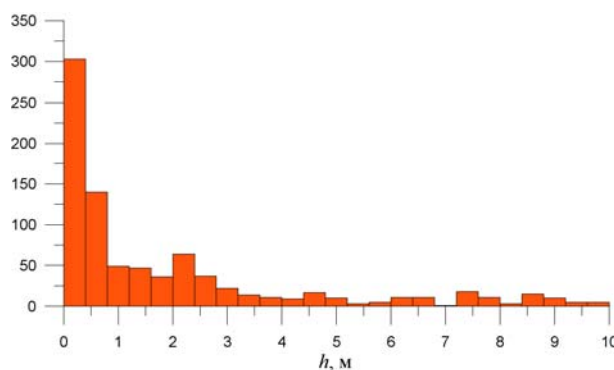


Рис. 10. Гистограмма распределения источников гравитационных аномалий по глубине на первом участке по данным плотностного вейвлет-моделирования

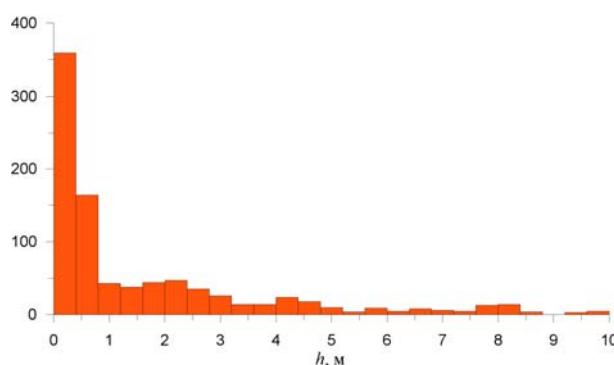


Рис. 11. Гистограмма распределения источников гравитационных аномалий по глубине на втором участке по данным плотностного вейвлет-моделирования

На обоих участках основные источники аномалий залегают на глубинах до 3–3.5 м. Это хорошо видно на гистограммах распределения источников по глубине (см. рис. 10 и 11), что не противоречит предположению об их антропогенной природе.

Заключение

Результаты томографической вейвлет-реконструкции источников гравитационных аномалий свидетельствуют о наличии на участках исследований структур, характеристики которых – избыточная плотность, линейные размеры, форма, простирание и глубина залегания – не противоречат предположению об их антропогенной природе. Некоторые из этих структур вполне могут являться погребенными следами фундамента и остатками древних сооружений.

Summary

E.V. Utemov, D.I. Khasanov, V.E. Kosarev, N.A. Matveeva, A.E. Utemov. Results of Pre-Processing of Data from High-Precision Gravimetric Surveys on Bolgar Site of Ancient Town Using the Technology of Native Wavelet Transform.

The paper presents some results of pre-processing of data from high-precision gravimetric surveys on Bolgar site of ancient town. These surveys were executed during the summer 2011

in the Bolgar State Historical and Architectural Museum-Reserve. Maps of gravity anomalies in the Bouguer reduction were created. Modeling of depth distribution of the sources of gravity anomalies was made using the technology of “native” wavelet transform. Spatial location of the objects that may well be the remnants of ancient buildings was revealed.

Key words: gravimetry, Bouguer reduction, density, wavelet transform.

Литература

1. Слепак З.М. Геофизический мониторинг при сохранении памятников архитектуры на примере Казанского Кремля. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1999. – 176 с.
2. Weymouth J.W. Geophysical surveying of archaeological sites // *Archaeological Geology* / Eds. G. Rapp, J.A. Gilford. – New Haven; London: Yale Univ. Press, 1985. – P. 191–235.
3. Varga M., Novák A., Szarka L. Application of tensorial electrical resistivity mapping to archaeological prospection // *Near Surface Geophysics*. – 2008. – P. 39–47.
4. Батыев С.Г., Ступишин А.В. Географическая характеристика административных районов Татарской АССР. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1972. – 253 с.
5. Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника / Под ред. Б.В. Букова. – М.: ГЕОС, 2003. – 402 с.
6. Утёмов Э.В., Нургалиев Д.К. «Естественные» вейвлет-преобразования гравиметрических данных: теория и приложения // *Физика Земли*. – 2005. – № 4. – С. 88–96.
7. Утёмов Э.В., Нургалиев Д.К., Хамидуллина Г.С. Технология обработки и интерпретации гравиметрических данных на основе «естественного» вейвлет-преобразования // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*. – 2010. – Т. 152, кн. 3. – С. 208–222.

Поступила в редакцию
12.08.11

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

E-mail: eutemov69@gmail.com

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

E-mail: damir.khassanov@mail.ru

Косарев Виктор Евгеньевич – ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: victor.kosarev@ksu.ru

Матвеева Наталья Александровна – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: limonich@mail.ru

Утёмов Александр Эдуардович – студент лицея им. Н.И. Лобачевского при Казанском (Приволжском) федеральном университете.