

УДК 528.2

## О ВЫЯВЛЕНИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

*Р.В. Комаров*

### Аннотация

Для территории Республики Татарстан по материалам наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS и геометрического нивелирования построено несколько моделей локального геоида (квазигеоида). Качество построенных моделей характеризуется погрешностью интерполяции высот геоида, оцениваемой величинами СКО 0.20–0.40 м на независимых контрольных пунктах. Для исключения регионального тренда высот геоида с запада на восток от +5 до –5 м применено вейвлет-преобразование, позволяющее локализовать частотную информацию в пространственной области с выделением источников на различных глубинах. Сравнение полученных моделей с тектонической схемой элементов первого порядка позволило выявить хорошую корреляцию экстремумов модели с тектоническими элементами.

**Ключевые слова:** геодезия, геоид, ГНСС-нивелирование, тектонические элементы.

### Введение

В 2005 г. нами была опубликована [1] карта высот локального квазигеоида GRT-05 территории Татарстана, построенная методом ГНСС-нивелирования по данным спутниковых измерений на 85 пунктах с известными нормальными высотами. Спутниковые измерения выполнены в период с 2000 по 2002 г. на реперах Ромашкинского геодинамического полигона (ГДП) и пунктах государственной геодезической сети (ГГС) на территории Республики Татарстан (РТ). Всего использовано 12 реперов и 73 пункта ГГС. Все измерения были привязаны к двум ближайшим пунктам международной сети IGS, находящимся на расстояниях 500 и 1200 км. Для достижения максимальной точности определения геодезических высот при обработке результатов использовались точные эфемериды спутников. Для указанных пунктов были вычислены аномалии высот и построена модель локального геоида/квазигеоида (рис. 1, а) [2].

Средняя по территории республики ошибка полученной модели квазигеоида, оцениваемая разностями интерполированных по карте аномалий высоты и известных их значений на контрольных пунктах, для модели GRT-05 составила 0.43 м [1]. В 2009 г. выполнена дальнейшая актуализация этой модели, состоящая в увеличении числа использованных пунктов до 130, позволившая уменьшить ошибку актуализированной модели GRT-09 до 0.20 м (рис. 1, б).

Как известно, фигура геоида/квазигеоида отражает региональные особенности гравитационного поля Земли, которые могут быть использованы для определения структуры земной коры и внутреннего строения планеты.

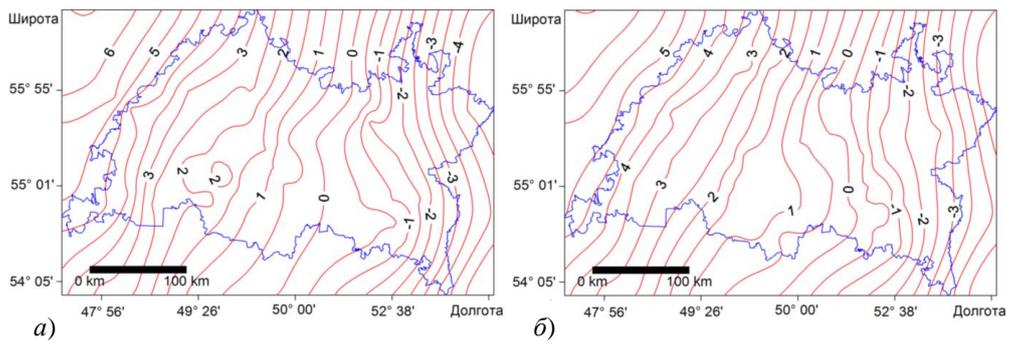


Рис. 1. Карты аномалий высоты (превышений) геоида/квазигеоида GRT-05 (а), GRT-09 (б)

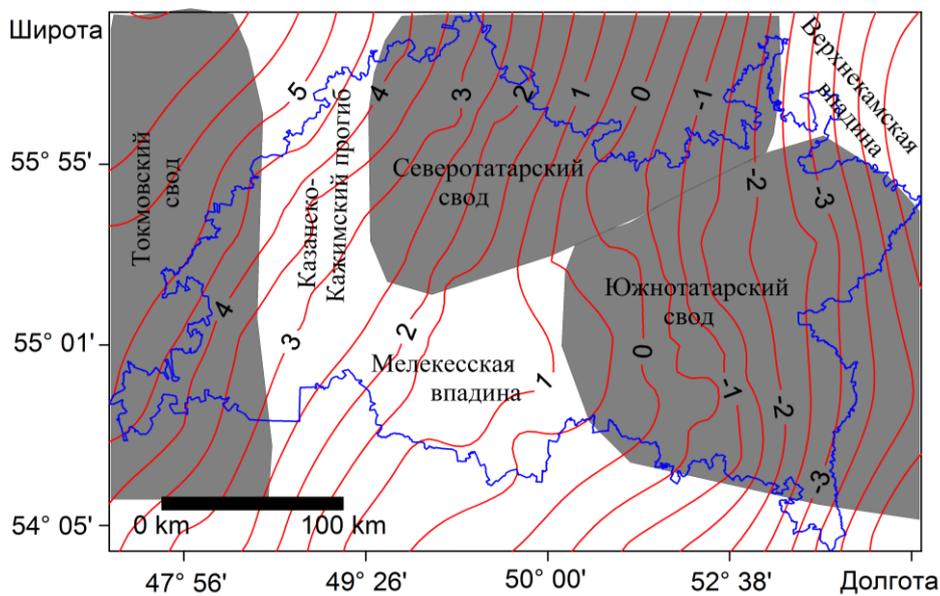


Рис. 2. Тектоническая карта элементов первого порядка на территории РТ на фоне карты геоида/квазигеоида GRT-05

Напомним в этой связи, что территория РТ приурочена к центральной части Волго-Уральской антеклизы, занимающей обширные пространства на востоке Восточно-Европейской платформы. Под Волго-Уральской антеклизой [3] понимают участок платформы, в пределах которого развиты различные по морфологии крупные структурные элементы (своды, прогибы и др.), расположенные на приподнятом по сравнению с обрамляющими регионами дорифейском цоколе (рис. 2). Фундамент антеклизы образован складчато-метаморфическими породами архейского, а также нижне- и среднепротерозойского возраста. Весь комплекс расчленен разломами на крупные и мелкие блоки, опущенные на различные глубины.

На территории РТ выделяются положительные элементы 1-го порядка: Южно-Татарский, Северо-Татарский и Токмовский своды – и отрицательные

элементы 1-го порядка: Мелекесская и Верхнекамская впадины и Казанско-Кировский прогиб [3] (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что изменения высот геоида/квазигеоида РТ слабо коррелируют с расположением тектонических структур, что, по-видимому, является следствием увеличения мощности земной коры с запада на восток по мере приближения к Уральскому хребту. В то же время можно предположить, что исключение этого влияния, носящего характер регионального тренда, позволит добиться повышения этой корреляции.

Исключение регионального тренда выполнялось с помощью вейвлет-преобразования, применяемое для решения различных задач, в том числе и геофизических. Использование этого математического аппарата позволяет извлекать из исходных данных частотную информацию, локализованную в пространстве [4]. Кроме того, вейвлет-преобразования позволяют в качестве базисных функций выбирать бесконечное число функций (вейвлетов), удовлетворяющих определенным условиям [5]. Это дает возможность подбирать именно тот вейвлет, который наиболее точно подходит для изучения исследуемых явлений.

Известно, что вейвлет-преобразование содержит комбинированную информацию как о самом вейвлете, так и об анализируемой функции [6]. Поэтому если при анализе эквипотенциальной поверхности потенциала силы тяжести в качестве анализирующего вейвлета использовать функции, отражающие некоторые свойства источников гравитационного поля, то вейвлет-спектр будет обладать более ясным физическим смыслом и его интерпретация должна существенно упроститься. Что касается поверхности геоида/квазигеоида, в качестве таких функций могут выступать вторые (и высшие) производные гравитационного потенциала точечного источника, поскольку эти функции по своей форме являются солитоноподобными и с помощью соответствующей нормировки приобретают все необходимые признаки вейвлетов.

В нашем случае для поверхности геоида/квазигеоида мы воспользовались базисным вейвлетом, построенным на основе шестой производной гравитационного потенциала точечного источника. Выбор данной базисной функции обусловлен тем, что в этом случае вейвлет-спектр потенциала точечного источника имеет максимум на масштабе, точно совпадающем с положением источника по глубине (см. рис. 3) [7]. Глубина залегания точки экстремума вейвлет-спектра базисной функции совпадает с глубиной расположения точечного источника гравитационной аномалии.

Благодаря такому подходу вейвлет-преобразование позволяет получать сечения модели геоида/квазигеоида на различных глубинах, выделяя тем самым на этих глубинах источники аномальных масс.

В результате обработки описанным выше методом получено несколько моделей локального тренда с выделением источников на глубинах от 60 до 100 км (рис. 4).

На рис. 4 коричневые области соответствуют более плотным, а зеленые и синие области – менее плотным структурам, сплошными линиями показаны основные разломы, которые являются границами элементов первого порядка.

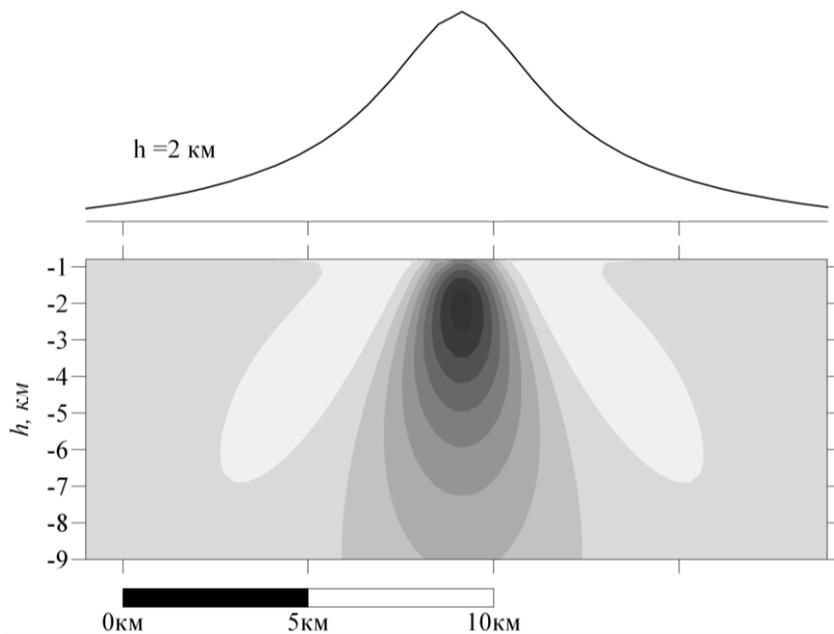


Рис. 3. График аномалий гравитационного потенциала точечной массы, залегающей на глубине 2 км и его вейвлет-спектр с базисной функцией, построенной на основе производной. Максимум вейвлет-спектра приходится на значение масштабного параметра 2 км

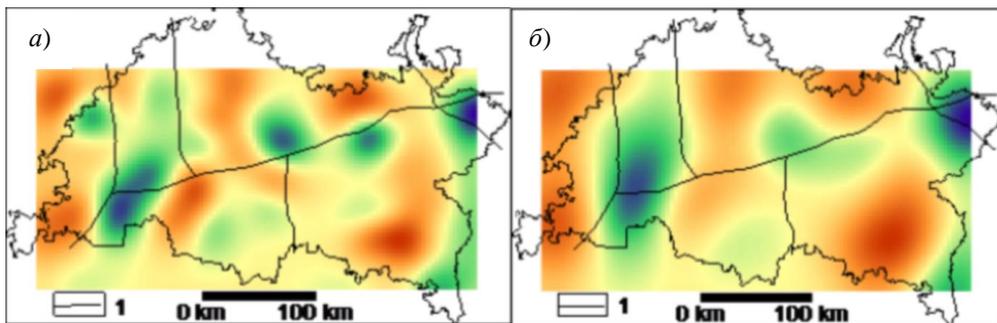


Рис. 4. Сечение модели локального квазигеоида Татарстана с выделением источников аномальных масс на глубине 60 км (а) и 100 км (б)

Сравнивая рис. 2 и 4, обнаруживаем, что представленные на рис. 4 карты отражают геометрию и пространственную структуру крупных тектонических элементов земной коры на территории РТ. В частности, на юго-востоке Татарстана хорошо выделяется плотная положительная структура Южно-Татарского свода, на востоке – Верхнекамская впадина, четко проявляется серия Камских разломов. Цветами пониженной плотности масс отмечается Казанско-Кажимский прогиб, простирающийся в западной части Татарстана с юга на север от Мелекесской впадины. Интересно, что расположенная на юго-западе Мелекесская впадина не выделяется на рис. 4. Можно предположить, что наша методика является более чувствительной к тектоническим элементам, причиной возникновения которых является распределение масс аномальной плотности в верхней

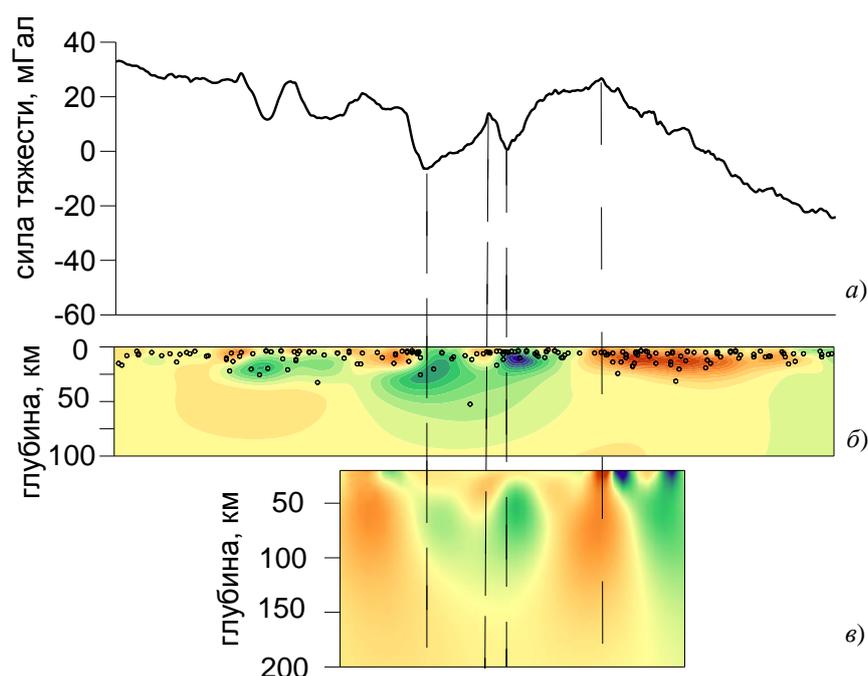


Рис. 5. Сравнение профиля аномалий силы тяжести (а), построенного по гравиметрической карте аномалий силы тяжести (б) с сечением модели локального квазигеоида до глубин 200 км (в)

мантии Земли и менее чувствительной к элементам, образованным в результате геодинамических процессов. По-видимому, именно к этим последним и относится Мелекесская впадина.

Показательным, на наш взгляд, является сопоставление профиля аномалий силы тяжести, построенного по данным детальных гравиметрических измерений на территории Татарстана с сечением модели локального квазигеоида до глубин 200 км (рис. 5). На рисунке сверху изображен профиль (а), построенный по расположенной в середине рисунка гравиметрической карте аномалий силы тяжести (б), ниже которой приведено сечение нашей модели локального квазигеоида до глубин 200 км по тому же профилю (в). Сравнение данных рис. 5, а и б свидетельствует о хорошей корреляции положений центров областей с более и менее плотными структурами мантийных пород. Это еще раз подтверждает правильность выводов о хорошей корреляции модели квазигеоида (после ее фильтрации) со структурой и геометрией тектонических элементов территории Татарстана.

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы о геофизической интерпретации особенностей фигуры локального геоида/квазигеоида территории РТ:

- после исключения регионального тренда изменения высот геоида/квазигеоида с запада на восток корреляция локальных особенностей геоида с контурами основных тектонических элементов проявляется более отчетливо;

• результаты сравнения модели локального геоида, построенной методом GNSS/levelling, с известными геологическими структурами показывают, что модели геоида могут быть использованы для получения независимой геофизической информации о глубинном строении малоизученных территорий.

### Литература

1. Комаров Р.В., Загреддинов Р.В., Кащеев Р.А. Фигура локального квазигеоида Республики Татарстан // Геодезия и картография. – 2005. – № 12. – С. 40–43.
2. Komarov R.V., Kascheev R.A., Zagretdinov R.V. Geoid determination by GPS/levelling method in the Republic of Tatarstan // Georesources. – 2007. – No 2 (10). – P. 43–45.
3. Буров Б.В. Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника. – М.: ГЕОС, 2003. – 402 с.
4. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Усп. физ. наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
5. Чуи Ч. Введение в вэйвлеты. – М.: Мир, 2001. – 412 с.
6. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
7. Утёмов Э.В., Нургалиев Д.К. «Естественные» вейвлет-преобразования гравиметрических данных: теория и приложения // Физика Земли. – 2005. – № 4. – С. 88–96.

Поступила в редакцию  
24.09.14

---

**Комаров Руслан Викторович** – ассистент кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.  
E-mail: rkomarov@kpfu.ru

\* \* \*

### ON IDENTIFICATION OF TECTONIC STRUCTURES IN TATARSTAN BY GNSS METHOD

R.V. Komarov

#### Abstract

Several models of the local geoid (quasigeoid) were constructed for the Republic of Tatarstan according to the data of the GPS/GNSS survey and geometric levelling. The quality of the models was characterized by the geoid height interpolation error estimated by the values of the mean-square deviation of 0.20–0.40 m on independent control stations. To exclude the regional trend of the geoid heights from West to East from +5 to –5 m, the wavelet transform was applied, which allowed us to localize the frequency information in the spatial domain with the distinguishing of the sources at various depths. The comparison between the obtained models and the tectonic maps of the first-order elements revealed a good correlation of the model extrema with the tectonic elements.

**Keywords:** geodesy, geoid, GNSS levelling, tectonic elements.

#### References

1. Komarov R.V., Zagretdinov R.V., Kascheev R.A. The figure of the local quasigeoid of the Tatarstan Republic. *Geodeziya i kartografiya*, 2005, no. 12, pp. 40–43. (In Russian).
2. Komarov R.V., Kascheev R.A., Zagretdinov R.V. Geoid determination by GPS/levelling method in the Republic of Tatarstan. *Georesources*, 2007, no. 2 (10), pp. 43–45.

3. Burov B.V. Geology of Tatarstan: Stratigraphy and Tectonics. Moscow, GEOS, 2003. 402 p. (In Russian).
4. Astafeva N.M. Wavelet-analysis: theoretical foundations and some applications. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145–1170. (In Russian)
5. Chui C.K. An Introduction to Wavelets. Moscow, Mir, 2001. 412 p. (In Russian)
6. Dobeshi I. Ten Lectures on Wavelets. Izhevsk, NITs “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2001. 464 p. (In Russian)
7. Utemov E.V., Nurgaliev D.K. Natural wavelet transformations of gravity data: Theory and Applications. *Fizika Zemli*, 2005, no. 4, pp. 88–96. (In Russian)

Received  
September 24, 2014

---

**Komarov Ruslan Viktorovich** – Assistant Lecturer, Department of Astronomy and Space Geodesy, Kazan Federal University, Kazan, Russia.  
E-mail: [rkomarov@kpfu.ru](mailto:rkomarov@kpfu.ru)