

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕОПОТЕНЦИАЛА
ПО ЦИФРОВЫМ КАРТАМ РЕЛЬЕФА**

В.Ф. Фатеев, Д.С. Бобров

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

fateev@vniiftri.ru,

bobrov@vniiftri.ru

Задача подготовки баз навигационных данных для ассистирующих систем навигации, использующих гравитационное поле Земли, является актуальной. В данной работе проводится анализ возможности использования цифровых карт рельефа для создания баз навигационных данных ускорения свободного падения и гравитационных градиентов.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, ускорение свободного падения, гравитационные градиенты, цифровые карты рельефа.

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY
OF CALCULATING GEOPOTENTIAL DERIVATIVES
FROM DIGITAL TERRAIN MAPS**

V.F. Fateev, D.S. Bobrov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

fateev@vniiftri.ru,

bobrov@vniiftri.ru

The task of preparing navigation data bases for assisting navigation systems for the first and second derivatives of the gravitational potential is an actual one. In this paper, we analyze the possibility of using digital elevation maps to create databases of navigation data for acceleration of gravity and gravitational gradients.

Key words: Earth's gravitational field, gravity acceleration, gravitational gradients, digital terrain maps.

Введение

Для систем навигации по первым и вторым производным гравипотенциала Земли необходимо наличие опорного навигационного сигнала — баз данных параметров ускорения свободного падения и гравитационных градиентов. Создание таких баз данных возможно путём реальных измерений параметров ускорения свободного падения и гравитационных градиентов в предполагаемом районе навигации, однако такой метод требует больших временных и финансовых затрат и не обеспечивает оперативности и глобальности. Другим возможным путём является метод математического моделирования по имеющимся цифровым массивам данных из открытых источников.

Для математического моделирования целесообразно использовать широко известную модель гравитационного поля Земли EGM-2008, а также цифровые карты рельефа. Модель гравитационного поля Земли EGM-2008 имеет глобальное покрытие данными гравипотенциала Земли, однако расстояние между измерительными ячейками модели составляет 9 км, что неприемлемо для построения опорных гравиметрических карт. Вместе с тем цифровые карты рельефа, имеющиеся в свободном доступе, обладают дискретностью в 30 м и лучше, поэтому имеют больший потенциал для построения опорных гравиметрических карт.

Оценка достижимых точностей систем навигации по ГПЗ

В работе [1] проведена предварительная оценка достижимой точности систем автономной навигации по гравитационному полю Земли (ГПЗ). Моделирование выполнялось для систем навигации на основе бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), в состав которых входили бортовой гравиметр и бортовой градиентометр. Результаты моделирования показывают, что для использования бортового гравиметра как основного средства измерений системы автономной навигации по ГПЗ необходимо иметь опорную карту значений ускорения свободного падения (УСП) с погрешностью не хуже 1 мГал, при этом погрешность измерений бортового гравиметра также не должна превышать величину в 1 мГал. В этом случае достижимая точность определения местоположения составит менее 1000 м (рис. 1а).

В случае использования градиентометра необходимо иметь опорную карту значений гравитационных градиентов (ГГ) с погрешностью не хуже 10 Этвеш, при этом погрешность градиентометра не должна превышать 4 Этвеш. При таких условиях достижимая точность определения местоположения составит менее 1000 м (рис. 1б).

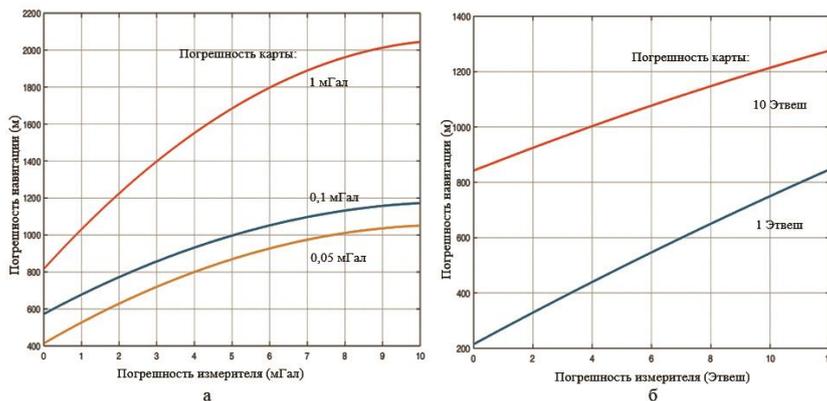


Рис. 1. Графики зависимости ожидаемой точности навигации от погрешности карты УСП и измерителя (а) и от погрешности карты ГГ и измерителя (б)

Оценка современного парка бортовых гравитационных измерителей

Бортовые гравиметры

Самое широкое распространение среди бортовых гравиметров получили гравиметры «Чекан», «Шельф», GT-2A и TAGS-7 Dynamic Gravity Meter. Большой опыт применения этих гравиметров при выполнении аэрогравиметрических съёмок показывает, что достижимая погрешность измерений составляет от 0,5 до 2 мГал. В работе [2] приведён обзор существующего рынка гравитационных градиентометров различных конструкций. В зависимости от особенностей конструкции чувствительной системы существуют как полнотензорные градиентометры, так и более простые, измеряющие только три составляющие гравитационного градиента. Самое широкое распространение получили градиентометры фирмы Lockheed Martin. Погрешность измерений ГГ таких градиентометров находится в диапазоне от 1 до 6 Этвеш.

Оценка возможности использования цифровых карт местности для создания опорных карт УСП и ГГ

Как известно, рельеф местности оказывает существенное влияние на величину измеренного значения ускорения свободного падения и ещё большее влияние на измеренное значение гравитационных градиентов.

На основе использования зависимости ускорения свободного падения и гравитационных градиентов от рельефа местности существует возможность выполнить прямое моделирование их значений, используя цифровые карты рельефа (ЦКР) для территорий, на которых другая информация о ГПЗ отсутствует или не удовлетворяет требованиям к опорным картам параметров ГПЗ. Для оценки возможности применения ЦКР воспользуемся открытыми данными гравиметрических съёмок на территории суши [3], аэрогравиметрической съёмки [4] и аэроградиентометрической съёмки [5].

Предварительная оценка на примере наземной гравиметрической съёмки

Для предварительной оценки влияния рельефа местности на измеренное значение УСП возьмём профиль с известными величинами высот рельефа и измеренными значениями УСП. На рисунке 2 представлены карта рельефа местности (диапазон изменения высот — от 270 до 440 м) и карта УСП в редукции свободного воздуха. Оценку характеристик выполним по одному профилю. Для этого выполним пересчёт измеренных значений УСП вверх на плоскость, проходящую над крайней точкой рельефа, нормируем высоты рельефа и значения УСП, вычислим взаимно-корреляционную функцию и сравним спектры пространственных частот нормированных значений высоты и УСП. Результаты вычислений представлены на рис. 3. На графике взаимно-корреляционной функции чётко прослеживается зависимость УСП от высот рельефа. При этом спектральные составляющие пространственных частот

УСП и высот рельефа полностью совпадают. Полученный результат предварительно подтверждает возможность использования карт местности для создания опорных карт УСП. Для более детального исследования перейдём к результатам аэрогравиметрической и аэроградиентометрической съёмок.

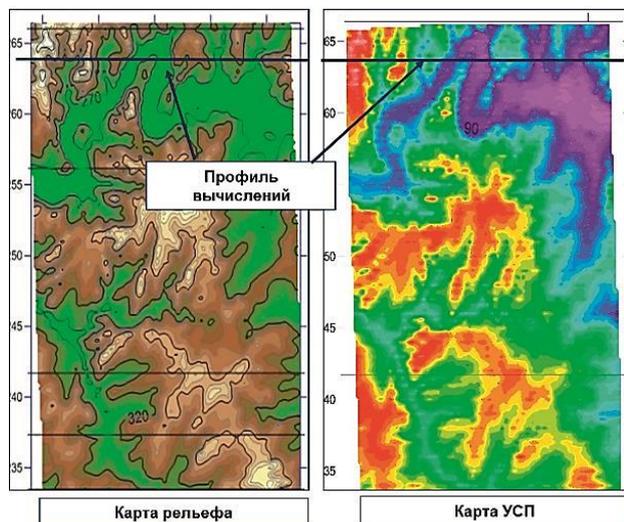


Рис. 2. Схема расположения профиля

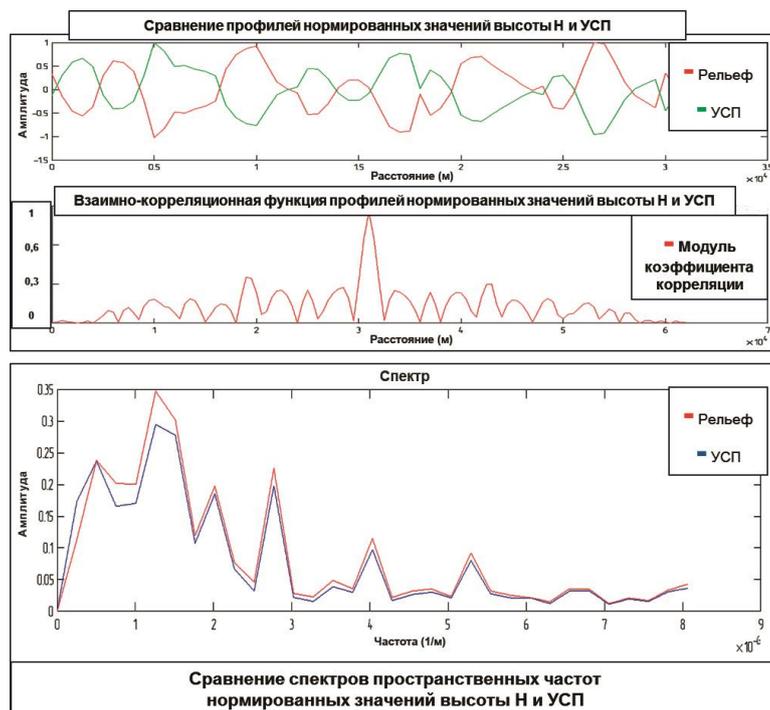


Рис. 3. Корреляционные и спектральные характеристики высот и УСП

Оценка на примере аэрогравиметрической съёмки

Краткая характеристика условий аэрогравиметрической съёмки: измерения УСП выполнялись на борту малого самолёта; режим полёта — с обтеканием рельефа; скорость полёта — 130–160 км/ч. Диапазон изменений высот рельефа — от 170 до 360 м. Диапазон изменений значений УСП в редукции свободного воздуха — от –16 до 18 мГал. Погрешность измерений не более 1 мГал.

Оценку выполним на примере двух профилей (рис. 4). Профиль 1 проходит в меридиональном направлении над характерной возвышенностью, профиль 2 — в широтном направлении и характеризуется типовыми условиями, характерными для всей площади исследований. Выполним аналогичную последовательность действий, как и при обработке наземных данных. Оценку проведём между измеренными сглаженными значениями УСП и значениями УСП, полученными путём моделирования наземных значений УСП и данных о рельефе. Таким образом, мы сравниваем реально измеренное поле, приведённое к одной высоте, и поле, сгенерированное для этой высоты по сторонним данным (рис. 5).

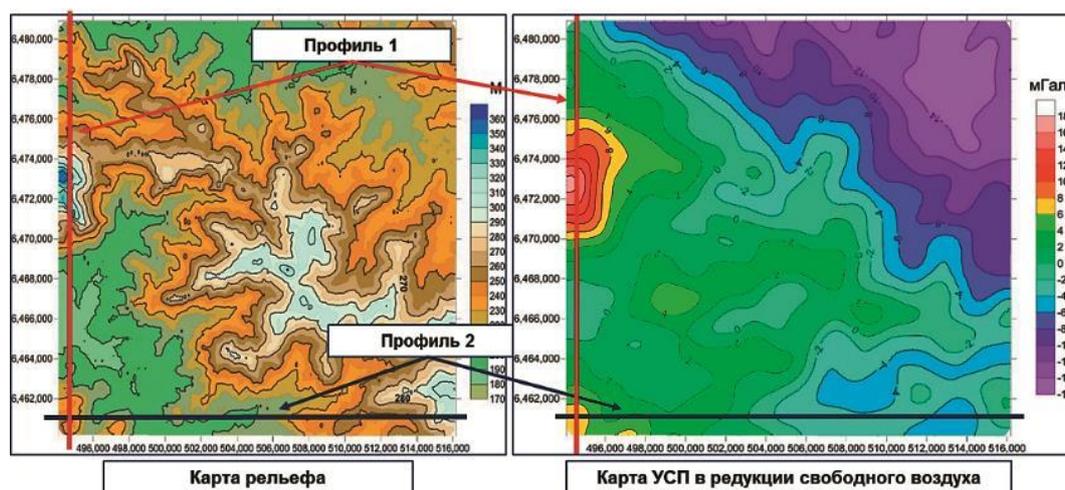
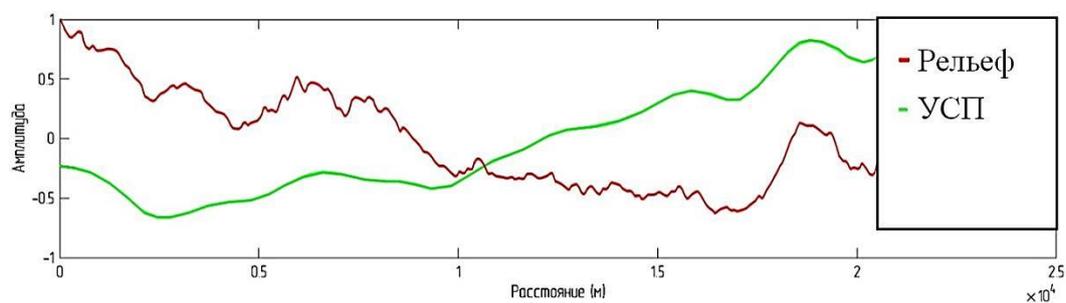


Рис. 4. Карта высот рельефа, УСП, схема расположения профилей

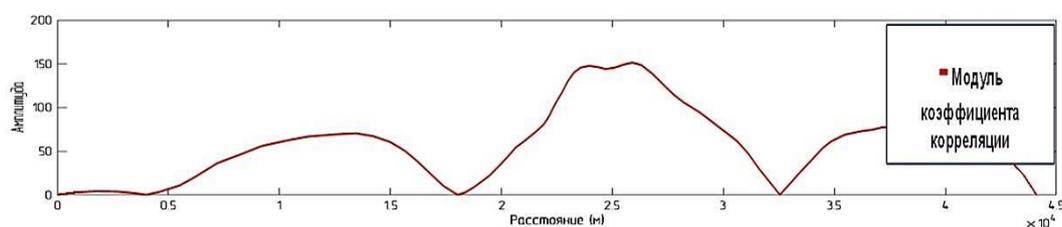
Основные выводы, которые можно сделать по результатам анализа полученных зависимостей:

- УСП коррелирует с рельефом местности в неявном виде для профиля 2 и в явном виде для профиля 1;
- спектральные составляющие пространственных частот УСП и высот рельефа не совпадают;

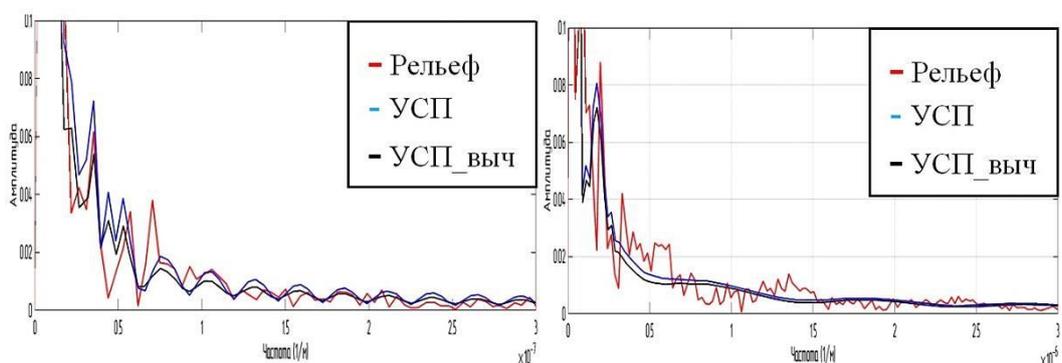
- спектральные составляющие пространственных частот УСП и смоделированных значений УСП совпадают полностью.



а



б



в

Рис. 5. Характеристики высот рельефа и УСП:

- а — изменения высот, УСП и взаимно-корреляционная функция по профилю 2;
- б — спектральные характеристики высот и УСП по профилю 2;
- в — спектральные характеристики высот и УСП по профилю 1

Для оценки степени невязки между измеренными УСП и смоделированными построим карту разности этих величин (рис. 6).

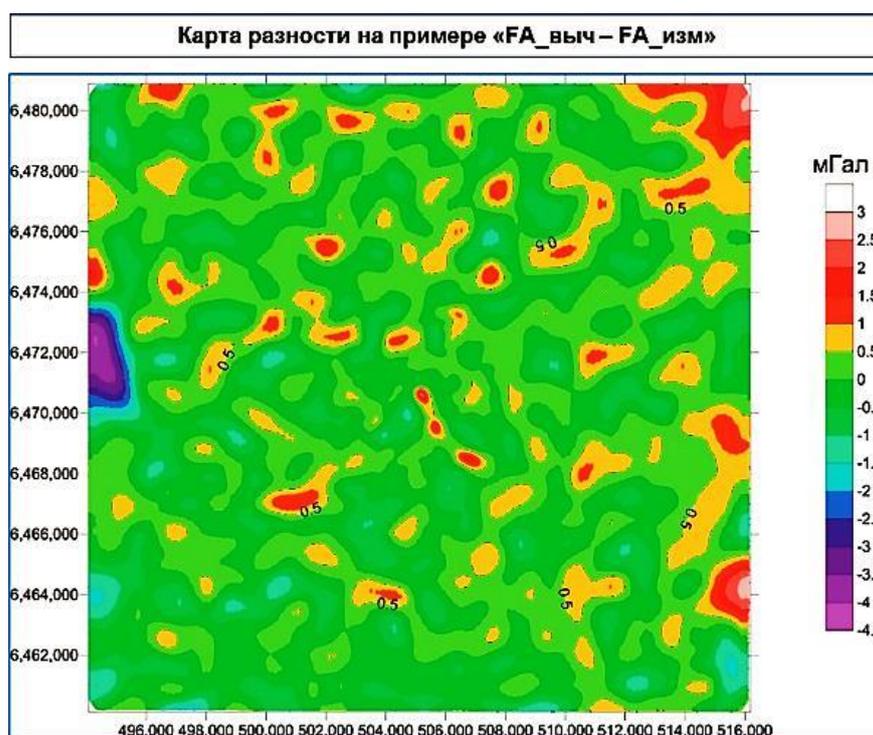


Рис. 6. Карта разности «УСП_вычисленные – УСП_измеренные»

Среднее значение разности «УСП_выч – УСП_изм» составляет 0,01 мГал, при этом СКО разности — 0,6 мГал. Тем самым подтверждается возможность использования данных о высотах рельефа для моделирования УСП.

Оценка на примере аэроградиентометрической съёмки

Краткая характеристика аэроградиентометрической съёмки: измерения гравитационных градиентов выполнялись на борту малого самолёта, режим полёта — с обтеканием рельефа, скорость полёта — 160 км/ч. Диапазон изменений высот рельефа — от 150 до 410 м (рис. 7). Диапазон изменений значений гравитационных градиентов W_{xy} и W_{Δ} ($W_{\Delta} = W_{yy} - W_{xx}$) от -45 до 45 Этвеш. Погрешность измерений не хуже 1 Этвеш.

Выполним аналогичную последовательность действий, как и при обработке аэрогравиметрических данных. Оценку проведём между измеренными сглаженными значениями W_{xy} , W_{Δ} и значениями $W_{xy_выч}$, $W_{\Delta_выч}$, полученными путём моделирования по высотам рельефа. На рисунке 8 представлены графики взаимно-корреляционной функции и спектральные характеристики высот и W_{xy} , W_{Δ} .

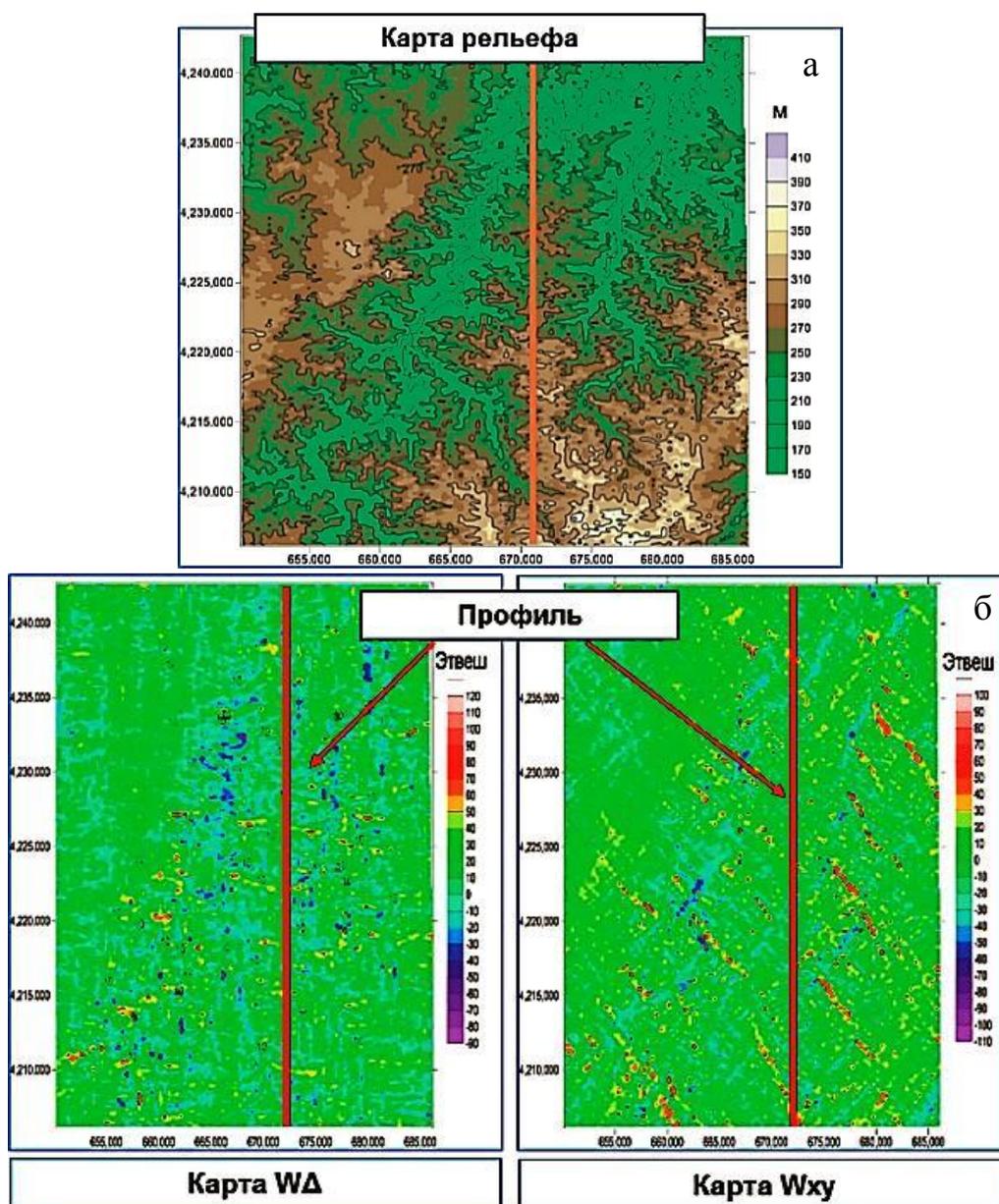


Рис. 7. Схема расположения профиля: а — изменение высот рельефа; б — карта составляющих W_{xy} , W_{Δ}

Основные выводы, которые можно сделать по результату анализа зависимости между высотами рельефа и W_{xy} , W_{Δ} :

- корреляция между высотами рельефа и W_{xy} , W_{Δ} в явном виде отсутствует;
- корреляция между измеренными W_{xy} , W_{Δ} и смоделированными $W_{xy_выч}$, $W_{\Delta_выч}$ сильная;

- спектральные составляющие пространственных частот W_{xy} , W_{Δ} и высот рельефа не совпадают;
- спектральные составляющие пространственных частот W_{xy} , W_{Δ} и смоделированных $W_{xy_выч}$, $W_{\Delta_выч}$ полностью совпадают.

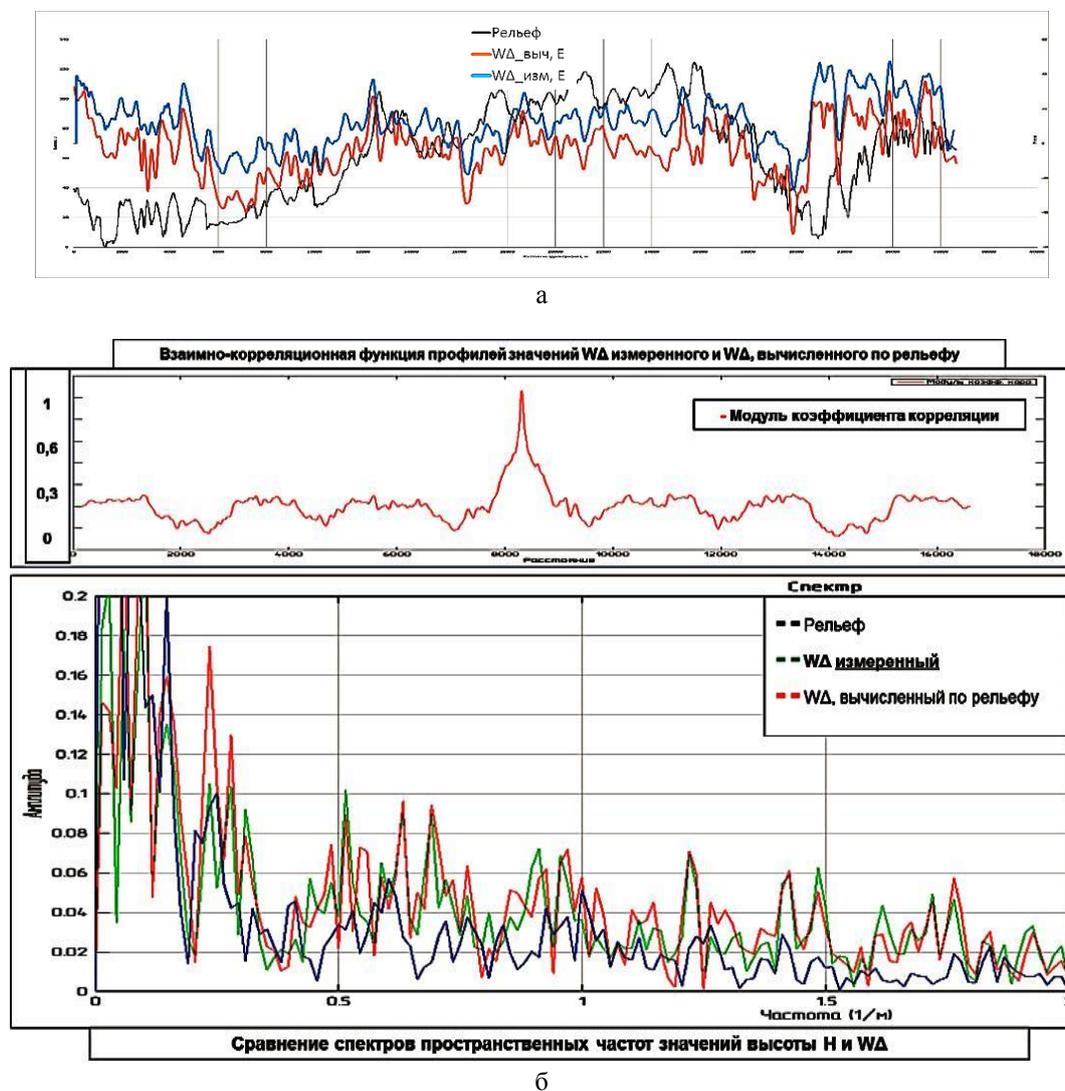


Рис. 8. Характеристики высот рельефа и составляющих W_{xy} , W_{Δ} :
 а — изменения высот и W_{xy} , W_{Δ} ; б — взаимно-корреляционная функция
 и спектральные характеристики высот и W_{xy} , W_{Δ}

Для оценки степени невязки между измеренными W_{xy} , W_{Δ} и смоделированными $W_{xy_выч}$, $W_{\Delta_выч}$ построим карту разности (рис. 9). Среднее значение разности между измеренными W_{xy} , W_{Δ} и смоделированными

$W_{ху_выч}$, $W_{\Delta_выч}$ составляет +12 Этвеш, при этом СКО разности –6 Этвеш. Пространственное распределение разности $W_{\Delta_изм}$ и $W_{\Delta_выч}$ носит линейный характер. Зависимости между концентрацией зон повышенной разности и характерными формами рельефа не наблюдается. Эти зоны приурочены к особенностям градиентометрической съёмки для каждого конкретно взятого профиля, например повышенная турбулентность во время полёта. При этом малая величина СКО разности позволяет утверждать, что вычисленные по рельефу местности значения $W_{ху_выч}$, $W_{\Delta_выч}$ могут быть использованы в качестве опорной карты ГГ.

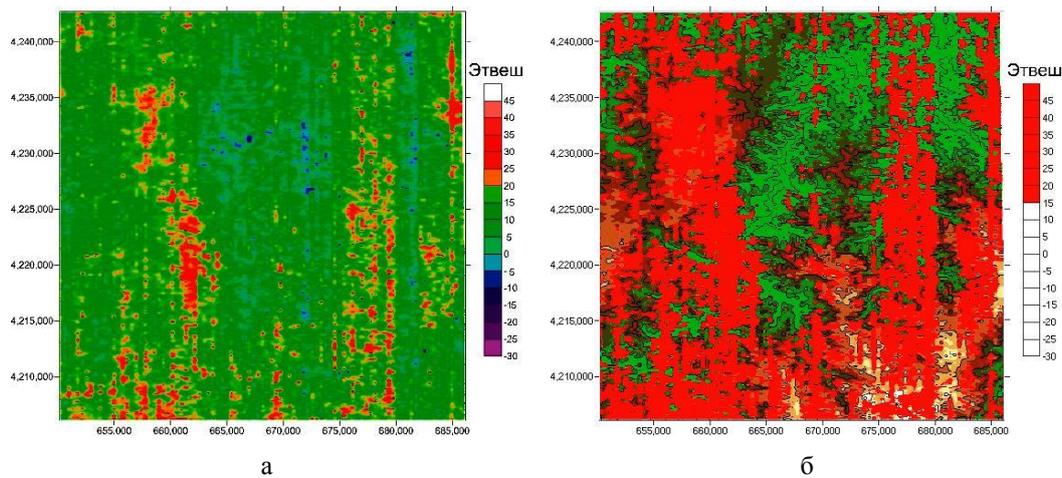


Рис. 9. Карта разности между $W_{\Delta_изм}$ и $W_{\Delta_выч}$ (а) и пространственное распределение невязок (б), красным отмечены зоны, где значение разности превышает 10 Этвеш

Заключение

Созданные по ЦКР карты УСП имеют величину СКО опорных значений 0,6 мГал при требованиях в 1 мГал. Созданные по ЦКР карты гравитационных градиентов имеют величину СКО опорных значений гравитационных градиентов 6 Этвеш при требованиях в 10 Этвеш. Такие величины СКО удовлетворяют требованиям, предъявляемым к погрешностям опорных карт параметров ГПЗ, что, в свою очередь, подтверждает возможность использования ЦКР для создания опорных карт значений УСП и гравитационных градиентов.

Литература

1. Денисенко О.В., Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Ассистирующая технология глобальной навигации на основе геофизических полей Земли и оценка её точности // Мир измерений. 2018. № 1. С. 24–27.

2. Difrancesco D. Advances and Challenges in the Development and Deployment of Gravity Gradiometer Systems [Electronic resource] // EGM 2007 International Workshop «Innovation in EM, Grav and Mag methods: a new perspective for exploration». Capri, April 15–18, 2007. URL: https://eageseg.org/data/egm2007/Sessione%20C/Oral%20papers/C_OP_02.pdf.
3. EarthExplorer — Home [Электронный ресурс] // USGS.GOV: сервер Геологической службы США. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>.
4. Technical Report [Electronic resource]. Kauring Gravity Test Site. Western Australia, 2012. URL: <https://www.dmp.wa.gov.au/News/GSWA-releases-latest-airborne-25333.aspx>.
5. McCafferty Anne E. Helicopter magnetic and gravity gradiometry survey over the Pea Ridge iron mine and surrounding area, southeast Missouri, 2014 [Electronic resource]. U.S. Geological Survey data release, 2016. URL: <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5730a3a0e4b0dae0d5db1eab>.