

На правах рукописи

Майоров Андрей Николаевич

**Разработка технологии и создание
модели квазигеоида с использованием
спутниковых данных**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) на кафедре высшей геодезии

Научный руководитель: доктор технических наук
Демьянов Глеб Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Нейман Юрий Михайлович

доктор технических наук
Татевян Сурия Керимовна

Ведущая организация: Институт физики Земли РАН

Защита диссертации состоится 18 декабря 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Автореферат разослан 17 ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Ю.М. Климков

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Революционные изменения в геодезической практике, произошедшие за последние два десятилетия, привели к кардинальному изменению основных видов геодезических работ. Центральное место в геодезическом производстве заняли спутниковые методы координатных определений, основанные на использовании сигналов спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Отличительные характеристики этих методов – высокая точность, оперативность, всепогодность, возможность максимальной автоматизации измерений и снижения затрат труда квалифицированных специалистов, автоматизация процессов обработки. Для эффективной реализации потенциальных возможностей современных методов измерений в масштабах страны необходима соответствующая система геодезического обеспечения. Однако в настоящее время состояние системы геодезического обеспечения в нашей стране можно охарактеризовать как переходное. Несмотря на серьезные шаги по ее модернизации, она во многом сохраняет структуру, сформировавшуюся многие десятилетия назад. Выполнение организационных мероприятий по модернизации системы геодезического обеспечения должно сопровождаться серьезной научной проработкой многих направлений современной геодезии.

В частности, геодезические высоты, вычисляемые в результате обработки спутниковых измерений, и нормальные высоты, определяемые геометрическим нивелированием, существуют независимо друг от друга. Спутниковые измерения не позволяют определять разность значений потенциалов точек земной поверхности, а нивелирные измерения не связаны с принятой системой геодезических координат. Но необходимость установления связи между системой нормальных высот и пространственной системой координат прояв-

ляется на всех уровнях топографо-геодезического производства. Так, например, в последнее время большое внимание уделяется проблеме создания условий для формирования единого пространства данных, необходимых для картографирования, ведения кадастров, создания геоинформационных систем. Топографо-геодезические данные, полученные на местах, необходимо уметь передавать заинтересованным организациям и интегрировать с данными из других источников. Здесь возникает проблема унификации систем координат и высот. В одних ситуациях по известным нормальным высотам должны быть получены геодезические высоты, в других - по известным геодезическим высотам должны быть получены нормальные высоты.

Еще одним проявлением необходимости установления точной связи между геодезической системой координат и нормальной системой высот является неоднократно выраженная в документах и планах Роскартографии потребность внедрения метода спутникового нивелирования в геодезическую практику. Геометрическое нивелирование проигрывает определениям геодезических высот с использованием спутниковой аппаратуры по затратам и по производительности. Особенно это заметно в труднодоступных и малообжитых районах, которые занимают большую часть территории нашей страны. Поэтому задача замены геометрического нивелирования методом определения нормальных высот по геодезическим высотам, полученных из спутниковых измерений, является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед геодезическим производством.

Связь между геодезическими высотами в пространственной системе координат и нормальными высотами осуществляют высоты квазигеоида. В структуре системы геодезического обеспечения, которая формируется в настоящее время, модели высот квазигеоида отнесены к отдельному блоку, отвечающему за распространение возможностей спутниковых методов координатных

определений на большинство видов работ топографо-геодезического производства.

На государственном уровне основное внимание уделяется развитию и поддержке единой государственной системы геодезических координат и государственной системы нормальных высот. Поэтому, когда речь идет о моделях высот квазигеоида как об элементе государственной системы геодезического обеспечения, следует понимать, что эти модели высот квазигеоида должны осуществлять связь именно государственной геодезической системы координат с государственной системой нормальных высот. Требования, предъявляемые к точности моделей высот квазигеоида, ограничиваются только реально существующими возможностями.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является создание модели высот квазигеоида, осуществляющей связь общегосударственной системы пространственных координат и государственной системы нормальных высот. При этом необходимо, чтобы модель сопровождалась оценкой точности, которая могла быть использована при решении геодезических задач. Также важно, чтобы модель позволяла определять нормальные высоты по результатам спутниковых измерений с точностью геометрического нивелирования III – IV классов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- уточнена методика вычислений гравиметрических высот квазигеоида;
- выполнена оценка точности гравиметрических высот квазигеоида исходя из точностных характеристик исходной гравиметрической информации;
- выполнена оценка влияния точностных характеристик моделей высот рельефа на точность гравиметрических высот квазигеоида;

- даны конкретные рекомендации для достижения современных требований к точности при построении модели высот квазигеоида.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту

Основу данной диссертации составили работы по созданию модели высот квазигеоида, выполненные автором в ЦНИИГАиК по заказу Роскартографии. Модели высот квазигеоида, осуществляющие связь между геодезическими высотами в системе координат, реализованной на пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и высокоточной геодезической сети (ВГС), и нормальными высотами в Балтийской системе, до этих работ не создавались. Новыми и выносимыми на защиту являются следующие результаты:

- методика вычислений гравиметрических высот квазигеоида, уточненная в части выбора преобразования формулы Стокса;
- характеристики ошибок гравиметрических высот квазигеоида, обусловленных ошибками гравиметрической съемки, допущенными при создании гравиметрической карты масштаба 1:200 000;
- характеристики точности цифровой модели рельефа SRTM, созданной в результате осуществления международного проекта с целью глобального изучения поверхности Земли;
- характеристики ошибок гравиметрических высот квазигеоида, обусловленных ошибками цифровой модели рельефа SRTM, ошибками осредненных аномалий Буге, ошибками осредненных высот рельефа;
- модель высот квазигеоида, созданная на основе выполненных исследований и полученная с использованием спутниковых данных по результатам построения государственных геодезических сетей ФАГС и ВГС.

Практическая значимость результатов

Созданная модель высот квазигеоида может быть использована при решении широкого круга топографо-геодезических задач. Возможно применение модели для выполнения спутникового нивелирования с целью замены геометрического нивелирования III – IV классов. Модель может быть использована при производстве топографо-геодезических работ и работ по созданию кадастра недвижимости, в том числе при выполнении работ в реальном времени, для обеспечения преобразований координат из одной системы в другую. Модель может быть использована в качестве необходимого элемента блока преобразований координат в системе, обеспечивающей поддержку создаваемого в настоящее время в нашей стране единого геоинформационного пространства.

Самостоятельное значение имеют вынесенные на защиту результаты оценки точности гравиметрической информации. В частности, они позволяют выполнять предварительную оценку точности создаваемых моделей высот квазигеоида в зависимости от характеристик гравиметрических данных имеющихся в наличии. И в случае необходимости проектировать работы по подготовке более точных гравиметрических данных и более точных цифровых моделей рельефа.

Также интерес могут вызывать результаты оценки точности цифровой модели рельефа SRTM, так как при решении широкого круга топографо-геодезических и картографических задач существует потребность в использовании моделей рельефа.

Апробация результатов

Результаты исследований представлялись в докладах:

- на заседании Международной рабочей группы «Системы высот, геоид и сила тяжести в азиатско-тихоокеанском регионе» IAG (Internationa-

tional Association of Geodesy), проходившем в июне 2006 г. в гор. Улан-Батор, Монголия;

- на XXIV Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (IUGG), проходившей в июле 2007 г. в гор. Перуджия, Италия.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Диссертация изложена на 107 страницах машинописного текста и включает 37 рисунков, 7 таблиц. Список литературы включает 46 наименований.

Содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, формулировку цели работы, а также выносимые на защиту основные результаты исследований, выполненных автором.

Первая глава посвящена анализу основных этапов определения непрерывного поля геометрических высот квазигеоида, связывающих геодезические высоты в системе координат, реализованной пунктами ФАГС/ВГС, и нормальные высоты в Балтийской системе. В настоящее время на территории нашей страны создана сеть пунктов, на которых эти высоты получены. Такие пункты являются опорными для создаваемой модели высот квазигеоида. Высоты квазигеоида ζ на опорных пунктах могут быть вычислены как разность геодезических высот H и нормальных высот h полученных из измерений

$$\zeta = H - h .$$

Так как геодезические координаты получают в результате реализации геометрического метода космической геодезии, а нормальные высоты получают с использованием геометрического нивелирования, то такие высоты квази-

геоида для краткости можно назвать геометрическими. Введение такого названия необходимо, чтобы отличать их от гравиметрических высот квази-геоида, вычисляемых по гравиметрическим данным в соответствии с теорией Молоденского.

Для формирования непрерывного поля геометрических высот квазигеоида необходимо использование гравиметрических данных. С одной стороны, гравиметрическая информация, так же как в методе астрономо-гравиметрического нивелирования, позволяет учесть нерегулярную часть изменений поверхности квазигеоида так, что для оставшейся части Δ могут быть использованы простые методы интерполяции. С другой стороны, гравиметрическая информация нужна для фильтрации грубых ошибок в полученных на опорных пунктах значениях геометрических высот квазигеоида, а также для независимой оценки точности. Функция Δ восстанавливается по значениям, вычисленным как разность геометрических и гравиметрических высот квазигеоида на опорных пунктах. В результате искомое непрерывное поле геометрических высот квазигеоида получается как сумма непрерывного поля гравиметрических высот квазигеоида ζ_{gp} и непрерывного поля, описываемого согласующей функцией Δ

$$\zeta = \zeta_{gp} + \Delta .$$

В соответствии с теорией Молоденского формулы для вычисления гравиметрических высот квазигеоида принято представлять в виде ряда, члены которого можно подразделить на главный член и поправочные. Главный член ряда совпадает с формулой Стокса и позволяет вычислять высоты квазигеоида ζ в сферическом приближении без учета влияния рельефа

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma ,$$

где R – средний радиус Земли; γ - среднее по Земле значение нормальной силы тяжести; $d\sigma$ - элемент единичной сферы σ ; Δg - аномалии силы тяжести; $S(\psi)$ - функция Стокса; ψ - сферическое расстояние между исследуемой точкой и текущей точкой единичной сферы. В диссертационной работе сделан вывод, что для построения непрерывного поля геометрических высот квазигеоида поправочные члены ряда Молоденского при вычислении гравиметрических высот квазигеоида могут не вычисляться.

На практике область интегрирования по формуле Стокса разбивается на две зоны – ближнюю к исследуемой точке и дальнюю. В результате формула Стокса преобразуется и возникает необходимость введения дополнительной функции $F(\psi)$ в ядро интеграла

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\sigma_0} \Delta g (S(\psi) - F(\psi)) d\sigma + \frac{R}{2\gamma} \sum_{n=0}^N \bar{Q}_n g_n,$$

где \bar{Q}_n - коэффициенты разложения функции $S(\psi) - F(\psi)$ по полиномам Лежандра; g_n - сферические гармоники разложения функции аномалий силы тяжести в свободном воздухе.

В диссертации были исследованы преобразования формулы Стокса, предложенные М.С. Молоденским и О.М. Остачом. Показано, что с точки зрения достижения наименьших ошибок при радиусах ближней зоны до 2.5° предпочтение следует отдавать преобразованию Остача, при радиусах, превышающих 3° - преобразованию Молоденского.

Вторая глава посвящена оценке точности определений высот квазигеоида, основанной на результатах оценки точности исходной информации.

Главное внимание уделено оценке точности гравиметрических высот квазигеоида. В соответствии с разделением всей области интегрирования по формуле Стокса на ближнюю и дальнюю зоны полная ошибка гравиметрических высот квазигеоида складывается из ошибок, вызванных влиянием ошибок

используемых данных в этих зонах. Так как гравиметрические высоты квазигеоида нужны главным образом для интерполяции между опорными пунктами геометрических высот квазигеоида, то основное влияние на точность результата оказывают ошибки гравиметрических данных ближней зоны.

Аномалии силы тяжести в свободном воздухе Δg , необходимые для вычислений гравиметрических высот квазигеоида, получают как сумму аномалий Буге Δg_B и поправок Буге δg

$$\Delta g = \Delta g_B + \delta g .$$

В свою очередь, аномалии Буге, как правило, получают по гравиметрическим картам масштаба 1:200 000, а поправки Буге вычисляют по данным моделей нормальных высот рельефа $\delta g = kh$, где постоянный коэффициент k зависит от принятой плотности топографических масс.

Ошибки непрерывного поля аномалий Буге формируются под влиянием ряда независимых источников ошибок. В диссертации рассмотрены следующие источники ошибок:

- ошибки измерений силы тяжести в гравиметрических сетях I класса;
- ошибки измерений силы тяжести в гравиметрических сетях II класса;
- ошибки измерений силы тяжести в гравиметрических съемочных сетях;
- ошибки аномалий силы тяжести, вызванные ошибками определения высот;
- ошибки интерполяции аномалий Буге между гравиметрическими пунктами.

При составлении списка источников ошибок гравиметрических данных учитывалось, что на величину ошибки гравиметрических высот квазигеоида оказывает влияние не только дисперсия ошибок исходных данных, но и корреляционная зависимость между этими ошибками в различных точках. Например, если ошибки гравиметрических данных в каждой точке являются независи-

мыми, то при любой дисперсии этих ошибок гравиметрические высоты квазигеоида будут безошибочными. Для каждого источника ошибок на основе информации, приведенной в нормативных документах, и существующей практики гравиметрических измерений была смоделирована ковариационная функция. В таблице 1 показаны принятые в диссертации значения существенных параметров ковариационных функций ошибок гравиметрических данных (среднеквадратическое значение ошибки и радиус корреляции r), а также соответствующие им оценки среднеквадратических ошибок гравиметрических высот квазигеоида при радиусах ближней зоны 3° и 5° .

Таблица 1

Источники ошибок	Параметры ковариационной функции ошибок	Ср.кв. ошибки высот квазигеоида (м)
Гравиметрические измерения в сети I класса	0.05 мГал, $r = 4^\circ$	0.002, 0.003
Гравиметрические измерения в сети II класса	0.15 мГал, $r = 40'$	0.006, 0.006
Гравиметрические измерения в съемочных сетях	0.4 мГал, $r = 8'$	0.010, 0.010
Геодезические определения (ошибки определения нормальных высот)	2.5 м (0.5 мГал)/ 3.0 м (0.6 мГал), $r = 8'$	0.005, 0.005
Интерполяция аномалий Буге	0.6 мГал/1.12 мГал, $r = 2'$	0.002, 0.002
Суммарное влияние ошибок данных гравиметрической карты 1:200 000		0.013, 0.013

В настоящее время наиболее подробную цифровую информацию о рельефе для обширной территории нашей страны можно получить по модели SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), находящейся в свободном доступе в Ин-

тернете по адресу <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/>. В этой модели значения нормальных высот заданы в узлах регулярной сетки с дискретностью 3"×3". Для ее использования при вычислении гравиметрических высот квазигеоида были выполнены исследования точности. Высоты, полученные по модели SRTM, сравнивались с высотами, полученными с топографических карт масштаба 1:25 000 и 1:50 000, для пяти площадных участков, а также с высотами пунктов плановой государственной геодезической сети (ГГС). Анализ результатов сравнения показал, что точность модели высот SRTM в первую очередь зависит от наклонов земной поверхности. В таблице 2 представлены значения среднеквадратических ошибок модели SRTM для исследованных участков, полученные по эмпирическим данным, и предсказанные по превышениям высот рельефа. Участки названы в соответствии с номенклатурой листов карты масштаба 1:25 000, на которых эти участки расположены.

Таблица 2

Участок	Среднеквадратическое значение ошибки (м)	Предсказанное среднеквадратическое значение ошибки (м)
<u><i>K-38-33-A-г</i></u>	6.71	7.0
<u><i>N-37-53-B-б</i></u>	5.12	2.0
<u><i>O-41-114-A-a</i></u>	3.80	5.1
<u><i>K-38-56-A-a</i></u>	35.54	33.2
<u><i>K-38-56-A-г</i></u>	29.65	33.0

Как следует из таблицы 2, величины предсказанных ошибок близки к значениям ошибок, непосредственно вычисленным по результатам сравнения с данными топографических карт.

Сравнение высот SRTM с высотами более чем 80 тысяч пунктов ГГС подтвердило высокую точность модели. На рис. 1 показано распределение величин ошибок высот SRTM, выраженное в процентах от общего количества пунктов. Как сле-

дует из данного распределения, значения ошибок от -5 м до 5 м (среднее значение 0 м) наблюдались почти на 62% пунктов, значения ошибок от 5 м до 15 м (среднее значение 10 м) – на 25% пунктов и т.д.

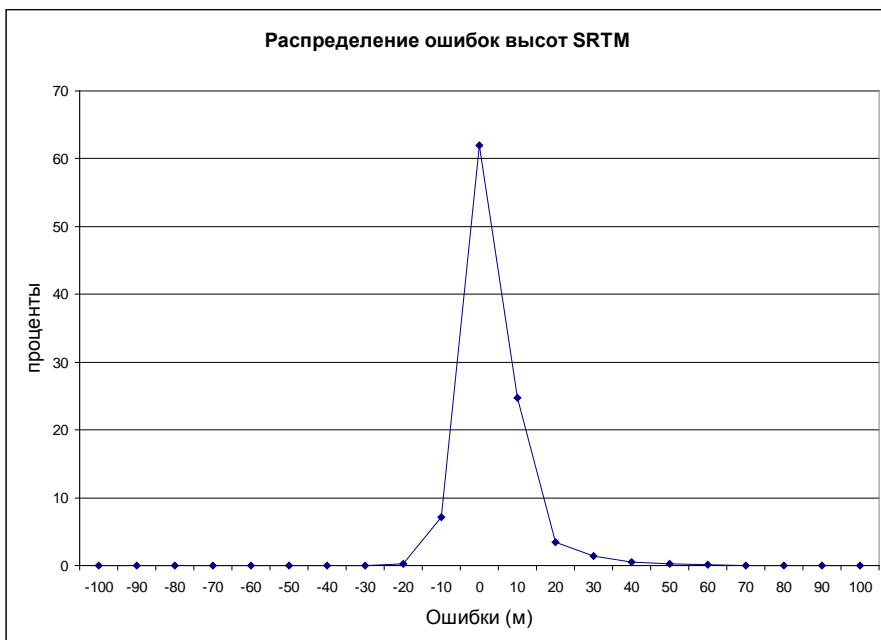


рис. 1

Среднее значение из всех ошибок равно 3.9 м. Величина среднеквадратического отклонения от среднего равна 9.1 м.

По результатам сравнения высот SRTM с высотами пунктов ГГС также была оценена корреляционная функция ошибок модели. Это позволило получить ковариационную функцию ошибок гравиметрических высот квазигеоида, обусловленных ошибками высот SRTM. Зависимость среднеквадратической ошибки гравиметрических высот квазигеоида от среднеквадратической ошибки высот SRTM показана в таблице 3.

Технология использования моделей рельефа должна предусматривать обработку очень больших объемов данных, занимающих многие гигабайты памя-

ти. Сравнительно недавно возможности вычислительной техники не позволяли этого делать. Поэтому использовали другой подход. В узлах регулярной сетки систематизировали не значения аномалий Буге, а осредненные значения аномалий силы тяжести в свободном воздухе. Важно, что осредненные значения аномалий получали не осреднением аномалий в свободном воздухе, наблюдаемых на гравиметрических пунктах, а поэтапно. Сначала для одних и тех же точек отдельно вычисляли осредненные значения аномалий Буге $\overline{\Delta g_B}$ и осредненные значения высот рельефа \bar{h} . Затем по формуле $\overline{\Delta g} = \overline{\Delta g_B} + k\bar{h}$ вычисляли осредненные аномалии в свободном воздухе $\overline{\Delta g}$. При такой технологии имеется возможность учета всех форм рельефа, которые не отражаются в информации, полученной только на гравиметрических пунктах. Данный подход подготовки гравиметрических данных, предложенный несколько десятилетий назад, до настоящего времени является основным для большинства методик вычисления гравиметрических высот квазигеоида. В частности, в ЦНИИГАиК используются аномалии Фая (аномалии в свободном воздухе исправленные поправками за рельеф), осредненные по трапециям с размерами 5' по широте и 7.5' по долготe. Применение осредненных значений вместо значений в точках существенно сокращает объем исходной информации. Однако такой прием приводит к внесению в исходные гравиметрические данные дополнительных ошибок, которые можно называть ошибками осреднения. В диссертации получены оценки корреляционных зависимостей ошибок осреднения для поля аномалий Буге и для поля осредненных высот рельефа. На их основе были вычислены среднеквадратические ошибки гравиметрических высот квазигеоида, обусловленные ошибками осреднения. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Источник ошибок	Интервал ошибок	Влияние на высоты квазигеоида
1	2	3
Влияние ошибок высот SRTM	0 – 40 (м)	1 см / 10 м
Влияние осреднения поля аномалий Буге 5'x7.5'	3 - 7 (мГал)	4 мм / 1 мГал
Влияние осреднения рельефа 5'x7.5'	5 – 500 (м)	1.1 см / 10 м

В столбце 3 таблицы 3 значение в числителе означает ошибку высот квазигеоида, обусловленную ошибкой указанной в знаменателе. Данные таблиц 1 и 3 позволяют получить оценки ошибок гравиметрических высот квазигеоида для конкретных условий.

В третьей главе описывается процесс создания модели геометрических высот квазигеоида для территории европейской части страны, ограниченной параллелями 64° на севере и 43.5° на юге, долготами 30° на западе и 48° на востоке. В настоящее время необходимая для создания модели высот квазигеоида информация систематизирована только для пунктов ФАГС/ВГС. Пункты ФАГС/ВГС, расположенные на данной территории и в ее окрестности, показаны на рис. 2.

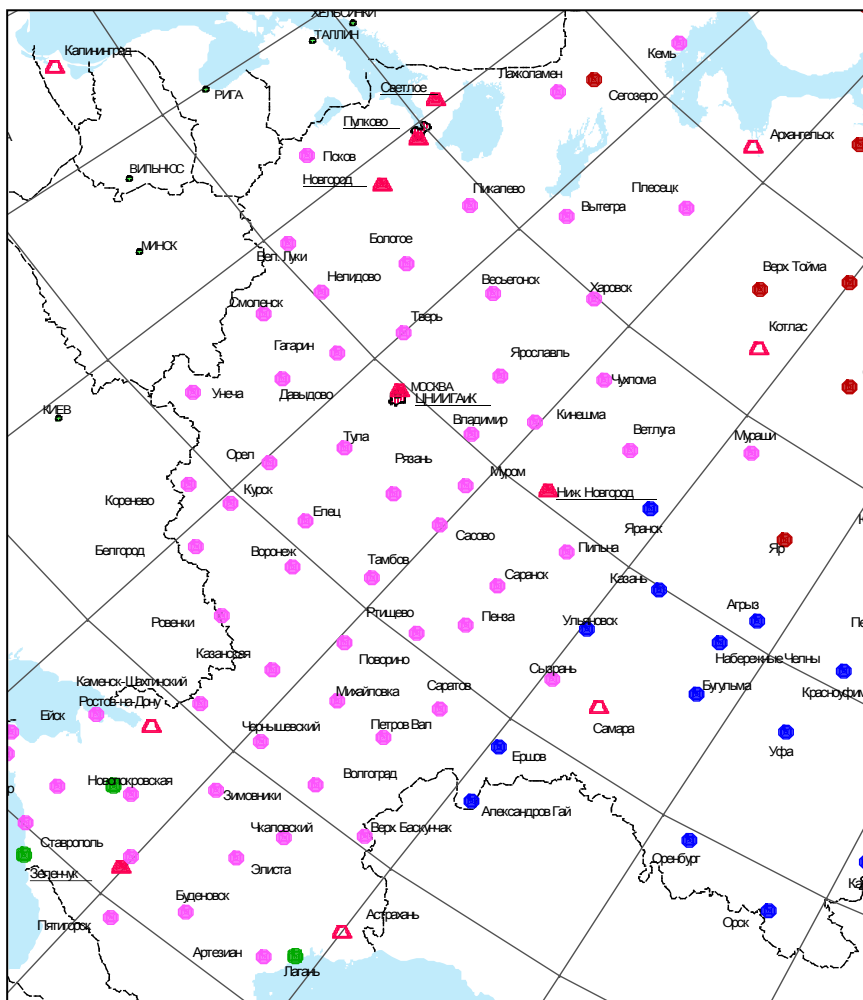


рис. 2

Каждый пункт ФАГС/ВГС связан спутниковыми измерениями как минимум с двумя пунктами главной высотной основы. Это означает, что вся сеть опорных пунктов, использованная для создания модели высот квазигеоида, разбивается на пары пунктов, сравнительно близко расположенных друг относительно друга. Такая схема расположения опорных пунктов позволяет контро-

лизовать наличие грубых ошибок в значениях геометрических высот квази-геоида, вычисленных по формуле $\zeta = H - h$ и оценивать их точность.

Для каждой пары близко расположенных опорных пунктов были вычислены превышения геометрических высот квазигеоида, которые затем были сопоставлены с соответствующими превышениями гравиметрических высот квазигеоида. Гравиметрические высоты квазигеоида вычислялись с использованием аномалий Фая, осредненных по трапециям 5'x7.5'. Допустимое расхождение δ между превышениями высот геометрического квазигеоида и гравиметрического квазигеоида вычислялось с учетом оценок точности

$$\delta \leq 2.5 \sqrt{m_{\Delta H}^2 + m_{\Delta h}^2 + m_{\Delta \zeta}^2} + 10^{-6} D_{км},$$

где $m_{\Delta H} = 7 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-7} D_{км}$ - среднеквадратическая ошибка разности геодезических высот; $m_{\Delta h} = 2.0 \text{ мм} \sqrt{D_{км}}$ - среднеквадратическая ошибка разности нормальных высот; $m_{\Delta \zeta} = m_{\zeta} \sqrt{2(1 - Cor_{\zeta})}$ - среднеквадратическая ошибка разности гравиметрических высот квазигеоида, выраженная в миллиметрах; m_{ζ} - среднеквадратическая ошибка гравиметрических высот квазигеоида; Cor_{ζ} - корреляция ошибок гравиметрических высот квазигеоида; $D_{км}$ - расстояние между точками, выраженное в километрах. Последнее слагаемое учитывает влияние согласующей функции Δ , градиент которой оценивается величиной 10^{-6} . Зависимость среднеквадратической ошибки разности гравиметрических высот квазигеоида от расстояний между пунктами представлена на рис. 3.

Если разность превышений оказывалась больше величины δ , то оба пункта исключались из списка опорных пунктов.

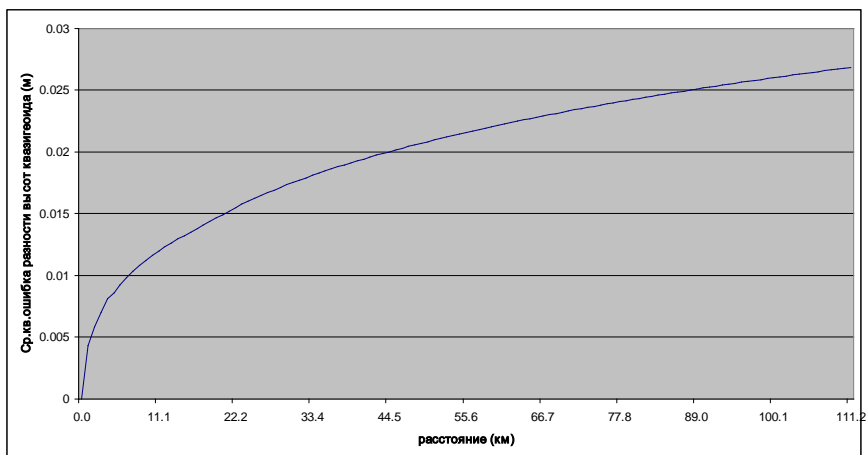


рис. 3

Значения разностей геометрических и гравиметрических высот квазигеоида, вычисленные для опорных пунктов, использовались для восстановления согласующей функции Δ . В качестве математического метода восстановления использовался дифференциальный сплайн, имеющий вид

$$\Delta = \sum_{i=1}^K a_i l_i^2 \ln l_i + \tau_1 + \tau_2 x + \tau_3 y,$$

где K – количество опорных пунктов; l – расстояние между текущей точкой и i -м опорным пунктом; a_i и τ_1, τ_2, τ_3 – коэффициенты, вычисляемые по известным значениям функции Δ в опорных точках. При вычислении коэффициентов сплайна учитывалась точность значений функции Δ в опорных точках. Среднеквадратическая ошибка определения значений функции Δ дифференциальным сплайном составила 10 см.

Модель геометрических высот квазигеоида, полученная как сумма гравиметрических высот квазигеоида и согласующей функции Δ , показана на рис. 4. Изолинии проведены через 5 м.

Для проверки возможностей применения построенной модели в геодезической практике были использованы материалы экспериментального хода спут-

никового нивелирования, выполненного по заказу Роскартографии Южным астрономо-геодезическим предприятием в 2005 году. В ходе этой работы были сделаны спутниковые измерения на пунктах линии нивелирования I класса длиной около 300 км. Из обработки спутниковых измерений для всех пунктов были получены пространственные координаты в системе координат, реализованной на пунктах ФАГС/ВГС.

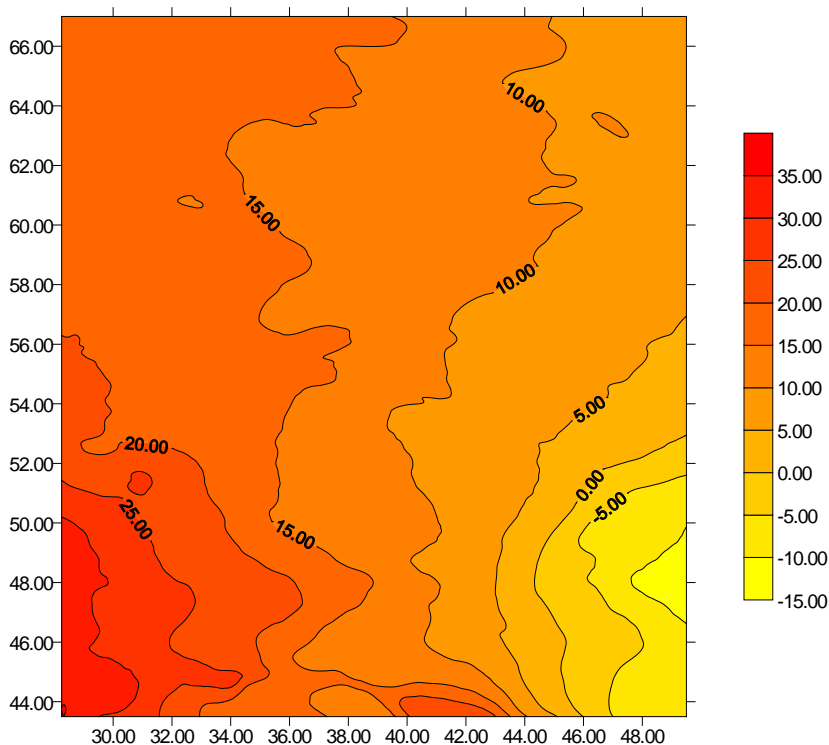


рис. 4

В ходе проверки модели линия спутникового нивелирования была разбита на участки протяженностью примерно 50 км. Пункты нивелирования, попавшие на границы участков, были выбраны в качестве исходных пунктов спутникового нивелирования, отметки нормальных высот которых полагались извест-

ными и безошибочными. Нормальные высоты остальных пунктов полагались подлежащими определению.

На первом этапе для всех пунктов были вычислены значения нормальных высот как разность геодезических высот, полученных по спутниковым измерениям, и высот квазигеоида, полученных по модели. На втором этапе для пунктов, выбранных в качестве исходных, были получены невязки между значениями нормальных высот, известных из нивелирования I класса, и вычисленными значениями нормальных высот. Окончательные отметки нормальных высот были получены после распределения невязок на все пункты хода спутникового нивелирования. Невязки распределялись линейно, пропорционально расстоянию от исходных пунктов.

В результате для всех пунктов были вычислены разности нормальных высот, полученных с помощью модели высот квазигеоида, и эталонных значений нормальных высот. Величины разностей показаны на рис. 5 ромбами.

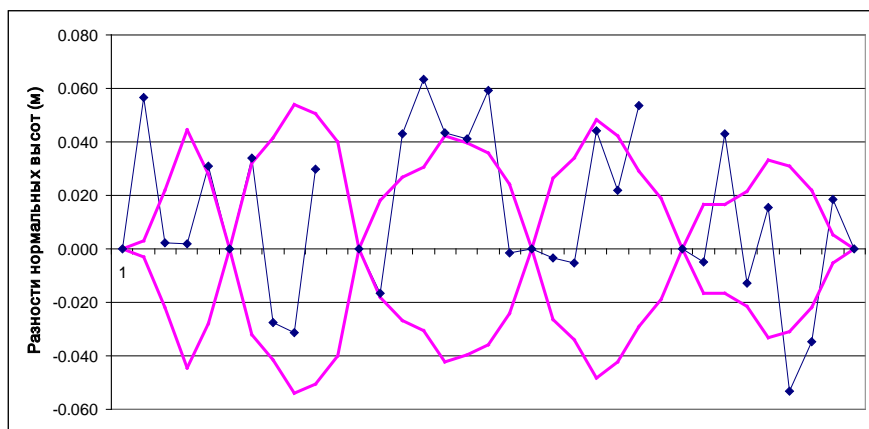


рис. 5

Так как пункты на рис. 5 расположены на равномерной шкале, а расстояния между ними существенно отличаются друг от друга, для сравнения там же

непрерывными кривыми показаны значения ожидаемых среднеквадратических ошибок нивелирования III класса, вычисленные по формуле

$$m_{III} = \pm 5 \text{ мм} \sqrt{D_{\text{км}}},$$

где D – расстояние от ближайшего исходного пункта.

Только для одного пункта полученная разность превысила среднеквадратическую ошибку нивелирования III класса больше чем в 3 раза. Этот пункт расположен на расстоянии около 100 м от исходного пункта. Поэтому величина разности 0.057 м для него оказалась недопустимой. Для остальных пунктов разности не превышают допустимых требований, предъявляемых к нивелированию III класса. Среднее квадратическое значение для всех ошибок, полученных в результате сравнения, составило 0.037 м.

В заключении диссертации выполнено обобщение результатов исследований:

1. Уточнена методика вычислений гравиметрических высот квазигеоида в части выбора преобразования функции Стокса в зависимости от размеров ближней к исследуемой точке зоны, в которой задана детальная гравиметрическая информация. Показано, что для зон, сферическим радиусом до 2.5° предпочтительнее использовать вспомогательную функцию, предложенную О.М. Остачем. В случаях, когда сферический радиус ближней зоны превышает 3° , следует использовать вспомогательную функцию, предложенную М.С. Молоденским.
2. Выполнены исследования ошибок гравиметрических данных, формируемых по результатам гравиметрической съемки масштаба 1:200 000. Показано, что на точность гравиметрических высот квазигеоида оказывает влияние не только величина дисперсии ошибок гравиметрических данных, но и корреляционная зависимость ошибок. Получены численные оценки существенных параметров ковариационных функций ошибок, вызванных независимыми источниками.

Установлено, что суммарное влияние ошибок гравиметрических данных, полученных с гравиметрических карт масштаба 1:200 000 на гравиметрические высоты квазигеоида, не превышает 1.5 см.

3. Выполнены исследования точности цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Показано, что точность высот рельефа, полученных по модели, коррелирует с максимальными величинами углов наклона земной поверхности, наблюдаемых в окрестности исследуемых точек. В целом, точность модели рельефа SRTM сопоставима с точностью отображения рельефа на карте масштаба 1:50 000. Получена аппроксимация корреляционной зависимости ошибок высот рельефа SRTM. Установлено, что при использовании высот SRTM для вычислений гравиметрических высот квазигеоида каждые 10 м среднеквадратической ошибки в высотах рельефа приводят к 1 см среднеквадратической ошибки в высотах квазигеоида.
4. Получены численные оценки влияния осреднения аномалий силы тяжести и высот рельефа по трапециям $5' \times 7.5'$ на точность гравиметрических высот квазигеоида. Показано, что в равнинной местности влияние ошибок осреднения невелико. В горной местности влияние осреднения рельефа на гравиметрические высоты квазигеоида может приводить к ошибкам до 0.5 м.
5. Создана модель высот квазигеоида, связывающая геодезические высоты в системе, реализованной на пунктах ФАГС/ВГС, пространственных координат и нормальные высоты в Балтийской системе 1977 года.
6. Выполнены исследования точности созданной модели высот квазигеоида. Полученные оценки показали, что среднеквадратическая ошибка определения абсолютных значений высот квазигеоида для исследованного района составляет 10 см. Точность определения превышений высот квазигеоида позволяет использовать модель для вы-

полнения спутникового нивелирования, сопоставимого по точности с геометрическим нивелированием III – IV классов.

Публикации по теме диссертации

1. Майоров А. Н. О выборе преобразования формулы Стокса. Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. Физическая геодезия. Москва, ЦНИИГАиК, 1996.
2. Майоров А.Н. Поправки за эллипсоидальность при вычислении гравиметрических высот квазигеоида комбинированным методом. Геодезия и картография, №2, 1997.
3. Демьянов Г.В., Майоров А.Н. К вопросу об установлении единой общеземной системы нормальных высот. Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. Физическая геодезия. Москва, ЦНИИГАиК, 2004.
4. Юркина М.И., Бурша М., Пик М.В., Майоров А.Н. О развитии теории и практики определения земного гравитационного поля. Геодезия и картография, №1, 2006.
5. Demianov G., Maiorov A., Medvedev P. Comparison and evaluation of the new Russian global geopotential model to degree 360. International Association of Geodesy Symposia, vol. 121, 2004.
6. Demianov G.V., Mayorov A.N. Role of global gravity model in modern satellite geodesy. Analytical Representation of Potential Field Anomalies for Europe (ARORA), Luxemburg, pp. 13-16, 2001.

Подписано в печать 10.11.2008. Гарнитура Таймс
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем 1,5 усл.печ.л.
Тираж 80 экз. Заказ №318 Цена договорная
Отпечатано типография «Фиорд»
113396, Москва, Свободный проспект, д. 39, корп. 1