

На правах рукописи



Ака Блаш Ульфред

РАЗРАБОТКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОИДА
НА ТЕРРИТОРИЮ СТРАНЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ
(НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КОТ Д'ИВУАР)

25.00.32 – Геодезия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре высшей геодезии

Научный руководитель – доктор технических наук, старший научный сотрудник Непоклонов Виктор Борисович.

Официальные оппоненты:

Конешов Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук», руководитель научного направления

Лебедев Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геофизический центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству»

Защита диссертации состоится «___»_____ 2020 г в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4, Зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК и на сайте:

<http://www.miiigaik.ru/science/councils/dissertation/>

Автореферат разослан «___» декабря 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ольга Владимировна Вшивкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Практически перед каждой страной мира стоит задача определения на своей территории высот геоида (ВГ) либо высот квазигеоида (ВКГ). Это обуславливается потребностями развития высотной основы страны с использованием технологий спутникового нивелирования. Важную роль спутникового нивелирования в развитии высотной основы отмечали в своих работах В.Н. Баранов, Г.В. Демьянов, А.Н. Майоров, В.Б. Непоклонов, В.З. Остроумов, Г.А. Панаев, Н.И. Рудницкая, Н. Denker, W.E. Featherstone, D.G. Milbert, D.R. Roman, M.G. Sideris, D.A. Smith, W.Torge и др. Развивающиеся страны, в том числе Республика Кот д'Ивуар, сталкиваются с необходимостью построения региональных моделей геоида, отвечающих требованиям спутникового нивелирования, по примеру лучших на сегодняшний день национальных моделей геоида (США, Канада, Австралия, ряд европейских стран). Этому препятствуют относительно низкий уровень обеспеченности территории ряда развивающихся стран в геодезическом и гравиметрическом отношении и недостаточный объем усилий, направляемых на последовательное улучшение их геодезической и гравиметрической изученности.

Сложившееся противоречие между потребностями каждой проблемной, в указанном выше смысле, территории в точных, полных и детальных данных о ВГ (ВКГ) и возможностями получения этих данных на базе существующей системы геодезического обеспечения обуславливает актуальность решения комплекса научно-технических и производственных задач, позволяющих выйти из этой проблемной ситуации. Решению одной из таких задач посвящена данная диссертационная работа.

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день наибольшее распространение получили региональные модели геоида на основе сеточных функций (цифровые модели). Существенный вклад в теорию и практику создания цифровых моделей геоида (ЦМГ) внесли В.А. Бывшев, М.Б. Гувеннов, А.В. Елагин, Е.М. Мазурова, Ю.М. Нейман, В.Б. Непоклонов, Д.И.

Плешаков, О. Andersen, G. Balmino, H. Denker, W. Featherstone, R. Forsberg, C. Hwang, P. Knudsen, D.G. Milbert, R.H Rapp, D.T. Sandwell, K.-P. Schwarz, M.G. Sideris, D.A. Smith, C.C. Tscherning и др.

Основным видом исходной информации для создания моделей геоида в континентальных районах служат гравиметрические данные. Имеются страны, относительно слабо изученные в гравиметрическом отношении. Выполнить на территории страны детальную площадную гравиметрическую съемку в оперативно приемлемые сроки позволит использование технологий аэрогравиметрии. Вопросы получения и обработки аэрогравиметрической информации для определения аномалий силы тяжести (АСТ) исследовали П.С. Бабаянц, Ю.В. Болотин, А.А. Голован, Н.В. Дробышев, Р.С. Кантарович, В.Н. Конешов, В.Е. Могилевский, Н.А. Парусников, Ю.Е.Рожков, D. Becker, J.M. Brosena, R. Forsberg, C.W. Hwang, C. Jekeli, X. Li, A.V. Olensen и др.

Вычисление высот геоида (квазигеоида) по АСТ представляет собой одну из основных задач физической геодезии. Приближенное решение дает классическая теория Стокса. Строгое решение задачи определения фигуры Земли обеспечивает теория М.С. Молоденского, обосновывающая возможность вычисления высот квазигеоида исключительно по результатам геодезических измерений. Существенный вклад в развитие теории и практики вычисления гравиметрических высот геоида (квазигеоида) внесли В.В. Бровар, В.А. Бывшев, М.И. Марыч, Е.М. Мазурова, Ю.М. Нейман, О.М. Остач, Л.П. Пеллинен, М.И. Юркина, E.W. Grafarend, W.E. Featherstone, R. Forsberg, P. Holota, P. Meissl, H.Moritz, H. Noë, P. Novak, F. Sanso, K. -P. Schwarz, M.G. Sideris, L.E.Sjoberg и др.

В настоящее время изученность земного шара в гравиметрическом отношении неравномерна. Ряд регионов Азии, Африки, включая территорию Республики Кот д'Ивуар, Южной Америки, Антарктиды обеспечены исходной гравиметрической информацией с недостаточной, по современным меркам, точностью, полнотой и подробностью. В таких районах проблему определения геоида частично может решить метод обратного спутникового нивелирования

(ОСН), суть которого состоит в определении ВГ (ВКГ) как разностей геодезической высоты, полученной спутниковым позиционированием, и ортометрической (нормальной) высоты той же точки, полученной геометрическим или тригонометрическим нивелированием.

Задача построения региональной (локальной) модели геоида по данным ОСН может решаться методами локальной аппроксимации поверхности геоида (квазигеоида) по дискретным данным. В числе специалистов, усилиями которых разрабатывались и доводились до практической реализации эти методы, могут быть названы В.И. Аронов, В.А. Бывшев, Ю.М. Нейман, В.Б. Непоклонов, Н.И. Рудницкая, И.Э. Степанова, В.Н. Страхов, М.Е. Auhan, J.Y. Cruz, R.Kiamehr, R.Rapp, W.H.F. Smith, C.C. Tscherning, P. Wessel и др. Следует отметить также, что заметное влияние на развитие цифрового моделирования ВГ и других параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) оказали и продолжают оказывать работы в области цифрового моделирования рельефа и других геофизических полей, в том числе работы таких авторов, как В.В. Веселов, Ю.А. Кравченко, Д.В. Лисицкий, О.Р. Мусин, С.Н. Сербенюк, R.L. Hardy, E.H. Isaaks, D. Sheppard, R.M. Srivastava и др. Многочисленные публикации (W.E. Featherstone, R. Kiamehr, Y. Kuroihsi, D.H. Lee, D.R. Roman, Smith D.A., Y.M. Wang и др.) показывают, что данные ОСН могут эффективно использоваться в комбинации с гравиметрическим геоидом.

Таким образом, исследования и разработки по проблемным вопросам создания региональных моделей геоида ведутся на протяжении нескольких последних десятилетий. Созданный научно-технический задел включает: общую теорию построения таких моделей по гравиметрическим и спутниковым данным; методы и алгоритмы обработки измерительной информации, включая создание комбинированных моделей по разнородным исходным данным; методические приемы оценки точности создаваемых моделей; базы данных и специальное программное обеспечение. Тем не менее, в регионах могут возникать вопросы, связанные с определением требований к создаваемой модели, ее точностным характеристикам и разрешающей способности;

анализом исходной геодезической, гравиметрической и гипсометрической информации, ее точности, полноты и подробности; разработкой эффективных методик построения и оценки точности модели геоида по имеющейся исходной информации; определением путей улучшения ее точностных характеристик.

Целью диссертации является повышение точности определения высот геоида на территории страны в условиях Республики Кот д'Ивуар путем создания предварительного варианта национальной модели геоида по спутниковым данным.

Для достижения намеченной цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

определение, с позиций методологии системного подхода, общих требований к национальным моделям геоида, как необходимому элементу развития высотной основы страны, и оценка влияния различных физико-географических и геофизических факторов на возможность выполнения этих требований в специфических условиях Республики Кот д'Ивуар;

проведение анализа имеющегося научно-технического задела в области создания моделей геоида в континентальных районах, в том числе на территории стран Африки, с оценкой возможности и разработкой предложений по его использованию применительно к определению высот геоида на территории Республики Кот д'Ивуар;

разработка комплексной методики повышения точности определения высот геоида в условиях Республики Кот д'Ивуар, предусматривающей создание предварительной модели геоида на территорию страны по имеющимся данным ОСН в пунктах государственной геодезической сети и ее поэтапное уточнение с использованием новых гравиметрических данных;

создание комплекса вычислительных программ, реализующего разработанную методику в части обработки данных ОСН, получение на базе созданного программного обеспечения экспериментальных данных, подтверждающих возможность использования методики для создания предварительной модели геоида на территорию Республики Кот д'Ивуар;

разработка и технико-экономический анализ предложений по проведению на территории Республики Кот д'Ивуар геодезических работ в интересах повышения точности национальной модели геоида, предусматривающих проведение на территории страны площадной аэрогравиметрической съемки.

Объектом исследования являются математические модели геоида регионального типа.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы определения параметров региональной модели геоида, наилучшим образом отвечающие реальным условиям.

Методы исследования. Информационной базой служили материалы публикаций ведущих российских и иностранных специалистов в области получения и обработки геодезической и гравиметрической информации в целях построения региональных моделей ВГ, а также информационные ресурсы национальной геодезической службы Республики Кот д'Ивуар, Международного центра глобальных моделей Земли (ICGEM), Центра космических исследований Технологического университета Дании (DTU), Международной службы по изучению геоида (ISG) и др., в том числе глобальные и региональные модели ГПЗ и рельефа земной поверхности.

При разработке методики создания региональной модели геоида по спутниковым данным и определении путей ее уточнения по гравиметрической информации использовались методы математического моделирования, вычислительной математики, высшей геодезии, геодезической гравиметрии.

Создание предварительной модели геоида на территорию Республики Кот д'Ивуар и исследование ее точностных характеристик базировались на использовании методов прикладного программирования, вычислительного эксперимента, прикладной геоинформатики, математической статистики.

Обработка исходной информации в процессе анализа параметров ГПЗ и рельефа земной поверхности, создания предварительной модели геоида на территории Республики Кот д'Ивуар и исследования ее точностных характеристик проводилась с использованием программного обеспечения

Golden Software (пакет программ Surfer), GMT, Microsoft (Excel), МИИГАиК (программа гармонического синтеза) и программ, разработанных автором.

На защиту выносятся следующие положения:

в условиях Республики Кот д'Ивуар создание национальной модели геоида должно осуществляться поэтапно по принципу последовательного наращивания точности, начиная с создания предварительной модели по имеющимся данным ОСН в пунктах государственной геодезической сети;

предварительная модель геоида на территорию страны может быть создана путем интерполяции ВГ из исходных пунктов ОСН в узлы сетки меридианов и параллелей с комплексным использованием различных интерполяционных процедур в целях обеспечения надежности и возможности выбора наилучших по точности результатов, при этом оптимальным по точности вариантом является использование режима косвенной интерполяции на основе глобальной модели ГПЗ;

использование в составе исходных данных для построения предварительной модели геоида дополнительной информации в виде альтиметрических ВГ в прибрежной части акватории Атлантического океана позволяет существенно повысить точность модели на суше, при этом реальным является выход на дециметровый уровень точности определения высот геоида;

дальнейшее повышение точности определения ВГ на территории Республики Кот д'Ивуар требует использования гравиметрической информации, обработку которой применительно к вычислению ВГ обеспечивают аппроксимационный и интегральный подходы. Данные детальной площадной гравиметрической съемки, могут быть получены в оперативно приемлемые сроки с использованием средств и методов аэрогравиметрии.

Теоретическая значимость разработанных положений определяется использованием строгого интерполяционного подхода к построению региональной модели геоида, комплексированием в рамках единой методологии различных методов интерполяции ВГ, классификацией этих

методов в зависимости от интерпретации случайной составляющей интерполятора, использованием в составе исходных данных двух различных видов информации – ВГ, полученных методом ОСН (на суше), и альтиметрических ВГ (в океане), обоснованием путей дальнейшего повышения точности национальной модели геоида с использованием данных гравиметрической съемки территории страны.

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1) разработана методика решения специфической задачи создания и поэтапного уточнения модели геоида на территорию отдельно взятой страны типа Республики Кот д'Ивуар в условиях достаточно жестких ограничений начального этапа по составу и детальности исходной геодезической информации;

2) расширены знания о региональных точностных характеристиках современных глобальных моделей ГПЗ различных классов, в том числе моделей низкого, среднего, высокого и сверхвысокого разрешения, включая модели, полученные с использованием новейших данных космической геодезии, путем проведения экспериментального исследования этих моделей с привлечением результатов геодезических измерений на территории Республики Кот д'Ивуар;

3) теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность создания предварительной модели геоида на территорию Республики Кот д'Ивуар с удовлетворительной для моделей данного класса (дециметровой) точностью.

Новизну полученных результатов обуславливают:

выбор путей решения поставленных задач с учетом опыта России и других стран в области создания моделей геоида в континентальных районах, а также физико-географических, геофизических и иных условий, влияющих на выполнение геодезических работ на территории Республики Кот д'Ивуар;

впервые проведенный детальный анализ состояния работ и последних результатов в области создания национальных и региональных моделей геоида на территории африканского континента;

использование в основе разработанной методики комплексного научно-практического подхода, предусматривающего поэтапное повышение точности восстановления высот геоида по мере расширения состава и наращивания объемов, точности, полноты и подробности исходной геодезической информации с использованием частных методик обработки этой информации;

установление и обоснование таких необходимых для обеспечения дециметровой точности предварительной модели геоида Республики Кот д'Ивуар условий, как использование частной методики, реализующей интерполяционный подход к вычислению высот геоида по данным обратного спутникового нивелирования с комплексным использованием альтернативных методов интерполяции; пересчет исходных высот геоида в узлы сетки в режиме косвенной интерполяции с использованием референцной модели ГПЗ; использование в составе исходной информации в дополнение к данным ОСН альтиметрических высот геоида в прибрежной части акватории Атлантического океана.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика построения и уточнения региональной цифровой модели геоида с использованием интерполяционного подхода позволяет варьировать методы интерполяции в рамках принятой системы для достижения эмпирическим путем наилучших результатов. Полученные экспериментальные данные демонстрируют возможность создания предварительной модели геоида на территорию Республики Кот д'Ивуар с точностью, достаточной для использования модели при передаче высот спутниковым методом на уровне нивелирования IV класса. Разработаны предложения по структуре формата выходных данных сеточных моделей геоида, обеспечивающие удобство их практического использования конечными потребителями. В качестве возможного обеспечения дальнейшего повышения точности национальной

модели геоида предложено использовать, с соответствующими технико-экономическими оценками, данные детальной площадной гравиметрической съемки территории страны, которые могут быть получены в оперативно приемлемые сроки с использованием технологий аэрогравиметрии, в том числе российских.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обусловлена постановкой задач исследования с учетом региональных особенностей, адекватностью используемых методов и алгоритмов поставленным задачам, корректностью применения математического аппарата, экспериментальной проверкой разработанной методики с использованием реальной геодезической информации, проведением вычислительных экспериментов с использованием апробированного программного обеспечения; согласованностью полученных экспериментальных данных с теоретическими оценками точностных характеристик результатов моделирования регионального геоида

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на 72-й и 73-й научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, научно-технической конференции, проводившейся в рамках 1-ой Недели науки, технологий и инноваций «GeoData» - «Геопространственные технологии» и на Международной научно-технической конференции «Пространственные данные как основа развития цифровой экономики России».

Представленные в диссертации теоретические положения, методы, алгоритмы, вычислительные программы, экспериментальные данные, результаты их анализа, а также практические рекомендации разработаны лично автором или при его непосредственном участии.

По материалам диссертации опубликованы 4 статьи, в том числе 2 – в журнале из перечня ВАК.

Работа состоит из введения, четырех разделов основной части, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации 202

страницы. Работа содержит 14 таблиц и 25 рисунка. Список литературы включает 148 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность темы, дана оценка ее разработанности, научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов, степени их достоверности и апробированности.

Первый раздел «Общий анализ факторов, влияющих на выполнение геодезических работ по созданию модели геоида для Республики Кот д'Ивуар» анализу общих требований к региональной модели геоида и факторов, влияющих на возможность выполнения этих требований.

Отмечено, что создание моделей такого рода обуславливается применением спутникового нивелирования. Поэтому одним из основных требований является обеспечение в максимально возможной степени выхода на современный уровень точности и подробности определения ВГ.

Представлен общий анализ факторов, способных оказывать влияние на создание национальной модели геоида. В качестве таких факторов рассмотрены: нормативно-техническая база геодезических работ, географическое положение, административное деление, экономика страны; физико-географические и природно-климатические условия, включая рельеф местности, климат, растительность, гидрографию, транспортную инфраструктуру, отдельно – обеспеченность аэродромами; геолого-геофизические условия, в том числе особенности регионального гравитационного поля и геодинамики.

Существенное значение, согласно полученным оценкам, имеет то, что в Кот д'Ивуаре преобладают районы с относительно спокойным гравитационным полем (рис.1), равнинным и холмистым рельефом (рис. 2).

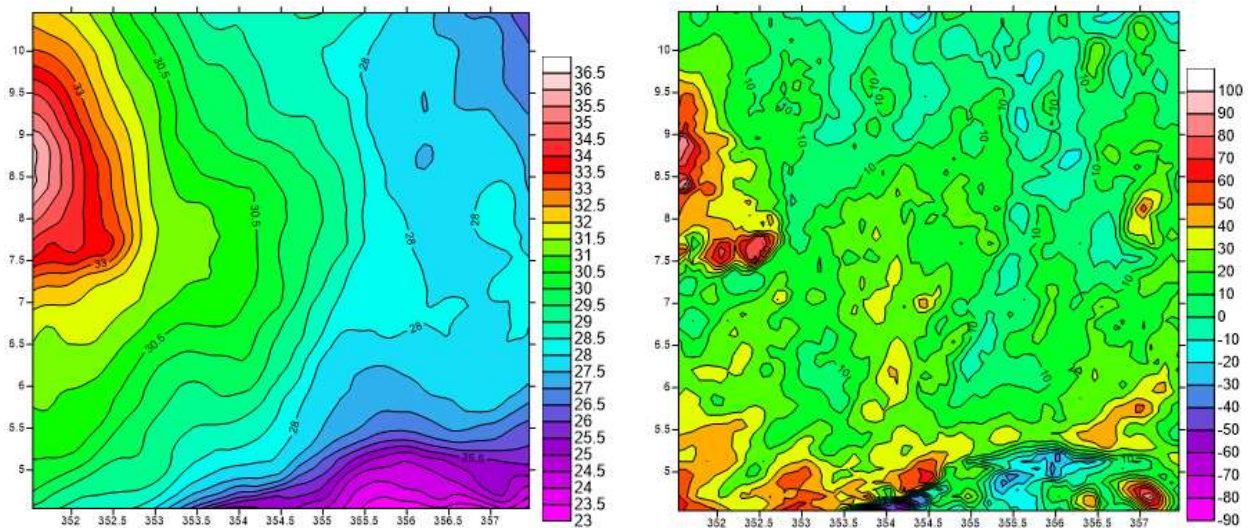
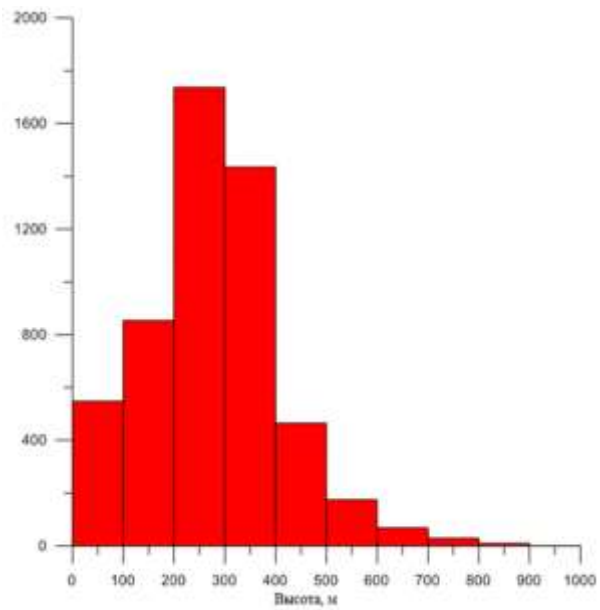


Рисунок 1 – Карты аномального ГПЗ на территории Республики д’Ивуар по данным глобальной модели геопотенциала EGM2008 до 2190-й степени (а – высоты геоида; б – аномалии силы тяжести)



а

б

Рисунок 2 – Характеристики рельефа территории Республики д’Ивуар (а – карта рельефа; б – гистограмма высот по данным глобальной модели рельефа Земли DTM2006 до 2190-й степени)

Данное обстоятельство позволяет ограничиться умеренными требованиями к точности и детальности исходной гравиметрической и гипсометрической информации.

Второй раздел «Оценка состояния и перспектив улучшения геодезической обеспеченности Республики Кот д’Ивуар» посвящен анализу

современного состояния и перспектив улучшения обеспеченности Кот д'Ивуара в геодезическом отношении в аспекте построения региональной модели геоида.

Проведен анализ геодезической основы в историческом аспекте, затем рассмотрено современное состояние геодезического обеспечения страны, включая облик национальной геодезической службы, характеристики государственной геодезической сети и ее спутниковой составляющей, а также государственной нивелирной сети. Показано, что узкими местами существующей геодезической, высотной и гравиметрической основы являются недостаточная полнота, подробность, точность и открытость гравиметрических данных, а также относительно малое, в масштабах страны, количество пунктов с известными геодезическими и абсолютными (ортометрическими) высотами – только геодезические пункты 1 класса (рис.3).



Рисунок 3 - Схема расположения геодезических пунктов 1 класса на территории Республики Кот-д'Ивуар

Впервые выполнены анализ современного состояния и оценка глобальных моделей ГПЗ на территории страны, включая модели низкого (40), среднего (38), высокого (15) и сверхвысокого (7) разрешения, в том числе двух российских моделей ПЗ-2002/360 и ГАО-2008 (обе – до 360-й степени), а также анализ современного состояния изученности регионального геоида на африканском континенте (на примере таких стран как ЮАР, Танзания, Уганда,

Алжир, Гана и других), продемонстрировавшие достаточно высокие точностные характеристики современных глобальных моделей ГПЗ и принципиальную возможность, по опыту других стран, выхода на субдециметровый уровень точности определения ВГ.

Третий раздел «Исследование путей повышения точности региональной модели геоида на территории Республики Кот д'Ивуар» содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований различных путей повышения точности региональной модели геоида. В основу этих вариантов положена комплексная методика построения национальной модели геоида, позволяющая оптимизировать выбор методов решения этой задачи в зависимости от исходной информации. Методика объединяет два подхода – интегральный и аппроксимационный. Интегральный подход предусматривает получение ВГ по АСТ на основе интегральной формулы Стокса, однако ввиду отсутствия необходимой исходной гравиметрической информации в настоящее время он не может быть реализован. Аппроксимационный подход обеспечивает приближенное определение ВГ в определенной системе базисных функций с эмпирическими коэффициентами. На сегодняшний день для Республики Кот д'Ивуар такой подход является единственно возможным. При этом наиболее подходящий вариант – построение сеточной модели геоида путем интерполяции дискретно заданных исходных ВГ по предложенной частной методике. Интерполятор выражается суммой тренда (низкостепенной многочлен) и флюктуации - случайной величины (центрированная) с заданной автоковариационной функцией (АКФ) $C(r)$, зависящей только от расстояния. Вместо АКФ может использоваться так называемая вариограмма $V(r) = C(0) - C(r)$. Соответственно, методы интерполяции делятся на методы С-класса и методы V-класса (табл.1). Общая схема применения аппроксимационного подхода приведена на рис. 4.

Экспериментальным путем с помощью созданного автором программного обеспечения обоснована целесообразность использования косвенной интерполяции с опорой на модель EGM2008 до 2190-й степени в сочетании с

интерполяторами С-класса, а также дополнения исходных ВГ на суше данными спутниковой альтиметрии в прибрежной части акватории Атлантического океана. При этом точность определения ВГ может быть повышена до дециметрового уровня. Точностные характеристики различных методов интерполяции, полученные способом перекрестной проверки, приведены в табл. 2. Наиболее точные, практически не различающиеся между собой варианты региональной модели геоида представлены на рис. 5.

Таблица 1 - Классификация методов интерполяции

С-класс		V-класс	
Метод	Ковариационная функция	Метод	Вариограмма
Метод средне-взвешенной интерполяции	$C(r) = w_i / (w_1 + \dots + w_m)$ Обратные расстояния: $w_i = r_i^{-p}$. Обратные экспоненты: $w_i = \exp(-pr_i)$; p – показатель влияния	Метод мультиквадриковой интерполяции	$V(r) = \sqrt{r^2 + d^2}$ (квадрик) d - параметр сглаживания; $d = 0,815t$ (Харди); $d = 1,6t$ (Франке); t - среднее расстояние между исходными пунктами
Метод потенциальных функций	Функция Хирвонена $C(r) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + d^2}}$; d - параметр сглаживания	Метод сплайн-интерполяции	Сплайн наименьшей кривизны
			$V(r) = \begin{cases} r^2 \ln(r^2) & \text{при } r > 0 \\ 0 & \text{при } r = 0 \end{cases}$ Естественный сплайн $V(r) = r^3$
Метод коллокации	Глобальный вариант $C(r) = \sum_{n=2}^{\infty} D_n P_n(\cos\psi)$ D_n - степенные дисперсии ВГ (модели Пеллинена, Раппа, Чернинга, Джекели) Локальный вариант Пример: функция Джордана (марковская модель 3-го порядка) $C(r) = D \left[1 + \frac{r}{\mu} + \frac{1}{3} \left(\frac{r}{\mu} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{r}{\mu} \right)$ D и μ - дисперсия и характеристический радиус ВГ	Метод кригинга (Д.Ж. Криге)	Линейная: $V(r) = D \frac{r}{\mu}$ Логарифмическая: $V(r) = D \left(\frac{r}{\mu} \right)^2 \left[1 - 2 \ln \left(\frac{r}{\mu} \right) \right]$ Экспоненциальная: $V(r) = D \left[1 - \exp \left(-\alpha \frac{r}{\mu} \right) \right]$ Гауссовская: $V(r) = D \left[1 - \exp \left(-\alpha \frac{r^2}{\mu^2} \right) \right]$ α - параметр сглаживания

Полученная модель геоида, представляющая собой результат детализации глобальной модели ГПЗ на территории отдельно взятой страны, по сути, является предварительной, подлежащей дальнейшему поэтапному уточнению с использованием более точной, полной и подробной исходной информации, как это схематично показано на рис. 6. Схема, приведенная на рис. 6, показывает, что для создания национальной модели геоида, отвечающей современным требованиям, в условиях Республики Кот д'Ивуар необходимо сгущение пунктов обратного спутникового нивелирования и выполнения на территории страны детальной площадной гравиметрической съемки.

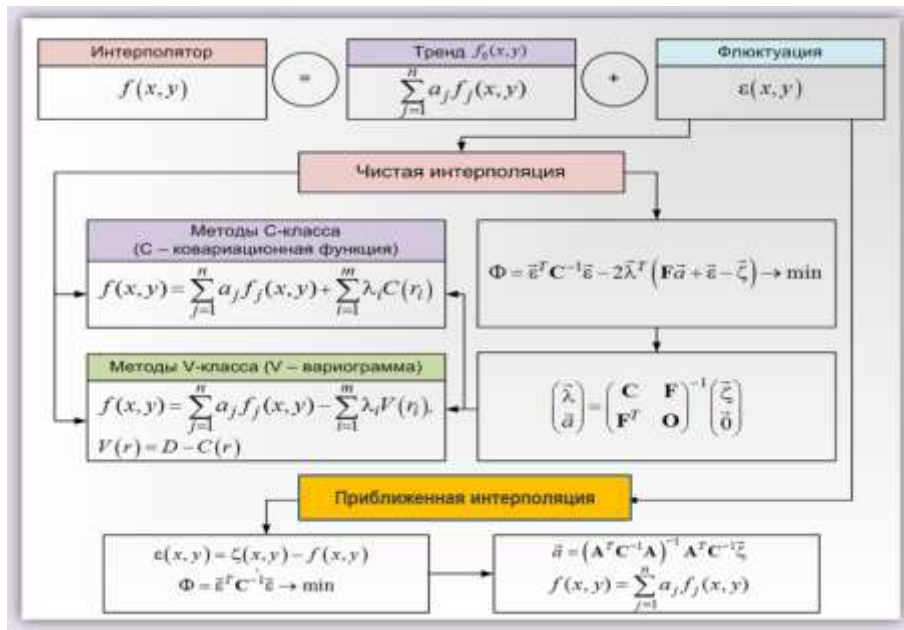


Рисунок 4 – Общая схема методов пересчета исходных высот геоида на регулярную сетку с использованием интерполяционного подхода

Таблица 2 - Статистика погрешностей интерполяции ВГ

Метод	без альтиметрии (43 точки)				с использованием альтиметрии (63 точки)			
	Мин.	Макс.	Средн.	Сигма	Мин.	Макс.	Средн.	Сигма
Метод сплайнов наимен. кривизны	-0.743	0.529	-0.001	0.213	-0.516	0.905	0.000	0.184
Метод обратных расстояний	-0.379	0.290	0.000	0.138	-0.447	0.210	-0.001	0.122
Метод потенциальных функций	-0.460	0.229	0.001	0.141	-0.474	0.235	0.000	0.125
Метод мультиквадриков	-0.567	0.463	0.001	0.176	-0.503	0.445	0.000	0.140
Метод натуральных сплайнов	-0.943	0.588	-0.004	0.250	-0.615	1.240	-0.002	0.232
Метод Кригинга	-0.381	0.290	0.000	0.135	-0.475	0.233	0.001	0.127
Метод коллокации	-0.402	0.291	0.001	0.140	-0.456	0.210	0.000	0.123

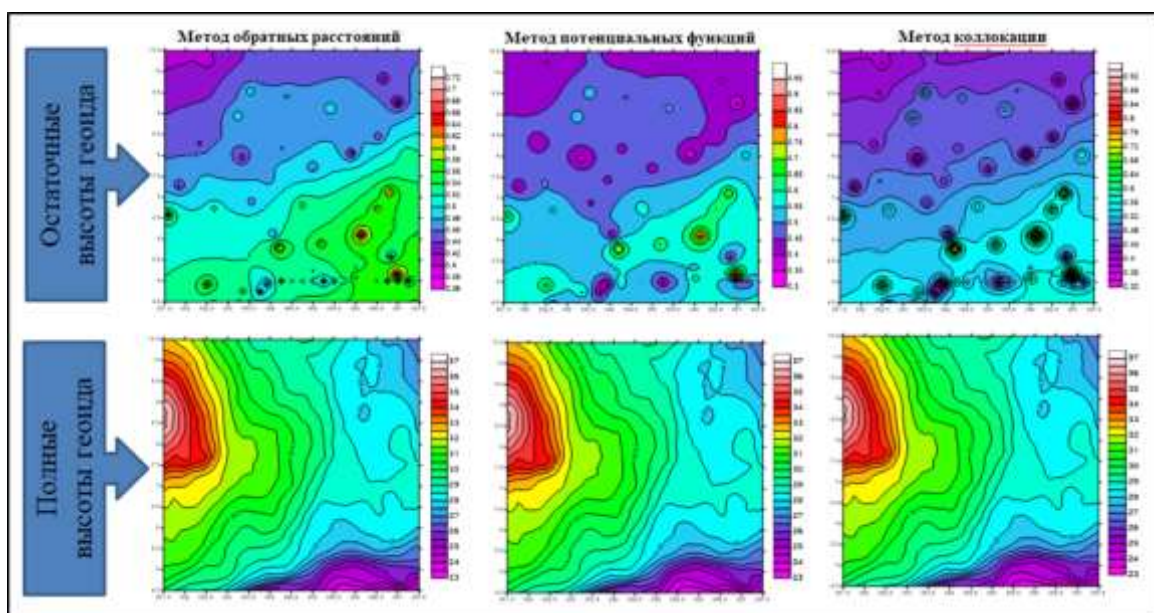


Рисунок 5 - Графическое представление цифровых моделей ВГ (в метрах)

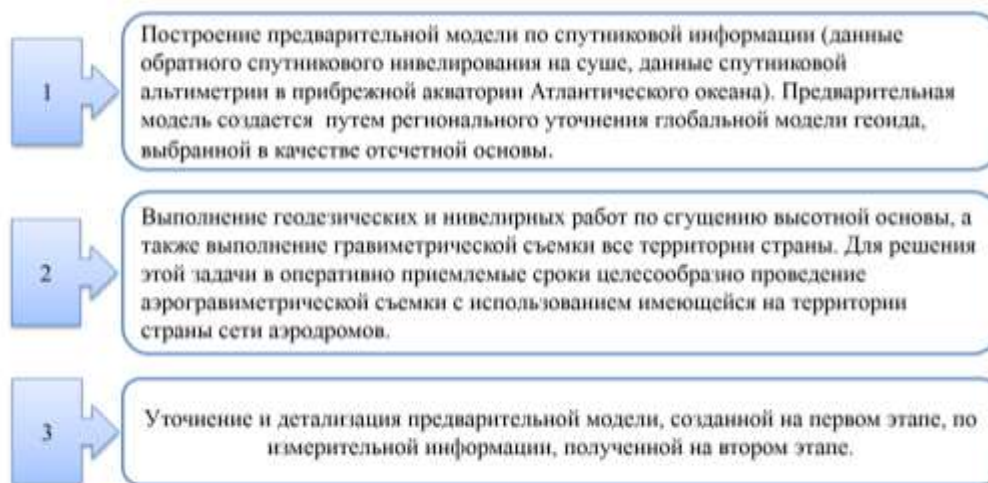


Рисунок 6 – Основные этапы создания региональной модели геоида

Четвертый раздел «Разработка предложений по уточнению предварительной модели геоида на территории Республики Кот д’Ивуар» посвящен развитию предложений по площадной гравиметрической съемке. В его основу заложено использование аэрогравиметрического метода. Исходные положения базируются на российском опыте и доводятся до конкретных технико-экономических оценок и методических рекомендаций по получению и обработке аэрогравиметрической информации. Сформулированы предложения по техническому облику комплекса средств аэрогравиметрической съемки. В соответствии с методикой ИФЗ РАН разработана схема расположения съемочных маршрутов (рис. 7).

Съемка должна выполняться с использованием самолета АН-26 БРЛ (или аналогичного). Расстояние между маршрутами принимается равным: для рядовых маршрутов – 2 км; для опорных маршрутов – 10 км. Оценки объема работ приведены в табл. 3. Общие затраты летного времени можно оценить в объеме 22 летных дней для опорных маршрутов и 78 летных дней для рядовых маршрутов, в летных часах - около 750. Исходя из стоимости одного летного часа в размере 6000 долл. США, итоговая стоимость работ по проведению аэрогравиметрической съемки ориентировочно составит 4,5 млн. долл. США. Одним бортом при месячной норме для в среднем 100 часов, эти работы могут быть выполнены примерно за 8 месяцев.



а



б

Рисунок 7 – Схема маршрутов аэрогравиметрической съемки территории Республики Кот д’Ивуар (а – опорные маршруты; б – рядовые маршруты)

Таблица 3 – Оценка объема аэрогравиметрических работ

Виды работ	Кол-во маршрутов	Протяженность маршрутов, км	
		Общая	Средняя
Рядовые маршруты	312	135000	432,7
Опорные маршруты	64	27500	430,0
Итого	376	162500	432,2

К этому следует добавить затраты сил и средств на развертывание и обеспечение функционирования наземных базовых станций дифференциальной навигации съемочного самолета, координатно-временную привязку и обработку измерительной информации. По ориентировочным оценкам, для покрытия территории Республики Кот д’Ивуар сетью базовых станций с требуемой плотностью в среднем 1 станция на 75 тыс. км² потребуется от 4 до 5 базовых станций, оснащенных двухчастотной спутниковой геодезической аппаратурой GPS/ГЛОНАСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом работы является то, что в ней решены следующие научно-практические задачи:

1) системно определены общие требования к национальным моделям геоида, оценены основные факторы, оказывающие влияние на состав, объем,

трудоемкость и возможность выполнения геодезических работ по созданию таких моделей в специфических условиях Республики Кот д'Ивуар;

2) проведен анализ научно-технического задела по моделям геоида в континентальных районах, в том числе на территории стран Африки, и разработаны предложения по его использованию применительно к определению ВГ на территории Кот д'Ивуара;

3) разработаны оценки современного состояния и перспектив улучшения обеспеченности Республики Кот д'Ивуар в геодезическом отношении в аспекте создания национальной модели геоида, исследованы точностные характеристики глобальных моделей ГПЗ на территории страны, проведен анализ современного состояния изученности африканского геоида;

4) разработана комплексная методика повышения точности региональной модели геоида, предусматривающая получение предварительного решения путем детализации глобальной модели ГПЗ по спутниковым данным и его уточнение по данным площадных гравиметрических съемок, которые могут быть получены в оперативном режиме на базе технологий аэрогравиметрии;

5) создан комплекс вычислительных программ, реализующий разработанную методику в части интерполяционного подхода, с помощью которого по реальной измерительной информации получены экспериментальные данные, которые не только подтверждают эффективность указанной методики, но и могут служить предварительным вариантом региональной модели геоида для Республики Кот д'Ивуар с улучшенными по отношению к глобальной модели ГПЗ точностными характеристиками;

6) разработаны предложения по проведению на территории Республики Кот д'Ивуар геодезических работ в интересах уточнения национальной модели геоида, включая проведение площадной аэрогравиметрической съемки, с оценками объема, трудоемкости, стоимости и сроков выполнения работ.

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

1) национальная модель геоида должна вписываться в существующую систему геодезического обеспечения государства, принятые нормы и правила

выполнения геодезических работ, оптимальным образом реализуя потенциал всей доступной исходной информации;

2) при создании национальной модели геоида необходим комплексный учет таких факторов как геодезическая изученность (обеспеченность) территории, ее физико-географические, природно-климатические, геофизические и геоморфологические характеристики, а также характеристики транспортной инфраструктуры, населенных пунктов, экономической и демографической обстановки, а также опыт создания национальных моделей геоида на территории стран африканского континента;

3) недостатками существующей национальной системы геодезического обеспечения, включающей в себя государственную систему геодезических координат, астрономо-геодезические пункты, государственные и специальные геодезические сети, а также две постоянно действующие базовые станции, являются недостаточная точность, полнота и подробность исходных гравиметрических данных и относительно малое, в масштабах страны, количество геодезических пунктов с известными высотами геоида;

4) источником первичной информации о высотах геоида могут служить глобальные модели ГПЗ в виде сферических гармоник геопотенциала. При выборе опорной модели для описания тренда целесообразно учитывать полученные в работе точностные характеристики глобальных моделей ГПЗ на территории Кот д'Ивуара. Наибольшей стабильностью оценок (в пределах 1 см) отличаются модели сверхвысокого разрешения. На предварительной стадии в качестве референцной модели может использоваться модель EGM-2008;

5) предварительная региональная модель геоида на территорию страны в виде сеточной (цифровой) модели ВГ может быть создана по разработанной комплексной методике, объединяющей два подхода к вычислению ВГ – интегральный и аппроксимационный. Интегральный подход потенциально обеспечивает наиболее высокую точность, однако для этого нужна детальная площадная гравиметрическая информации, подготовка которой сопряжена с большой трудоемкостью. Аппроксимационный подход позволяет в

определенной мере обойти это ограничение, как путем вычисления ВГ по АСТ с использованием метода точечных масс и/или метода статистической коллокации, так и путем пересчета ВГ из пунктов ОСН в узлы регулярной сетки с использованием различных методов интерполяции;

б) выбор интерполяционной схемы обусловлен простотой и возможностью варьирования характеристик интерполяторов. Предложенный алгоритм интерполяции базируется на унифицированной форме представления интерполятора в виде суммы полиномиального тренда и случайной составляющей с подходящей автоковариационной функцией (АКФ) или вариограммы по методу оптимального линейного прогноза из решения соответствующим образом составленной системы линейных алгебраических уравнений. К методам, использующим АКФ (методы С-класса) относятся метод обратных расстояний, метод потенциальных функций, метод статистического прогноза, а к методам, использующим вариограмму (методы V-класса) относятся методы сплайн-интерполяции, метод мультиквадриков, метод кригинга. Выбор метода интерполяции целесообразно делать с учетом сравнительного анализа результатов верификации различных интерполяторов по способу перекрестной проверки;

7) проведенный комплекс экспериментальных исследований с использованием реальных данных позволил обосновать пути практического применения разработанной методики и получить для сравнения ряд вариантов предварительной модели для территории Кот д'Ивуара. Наилучшие результаты по точностным характеристикам получены при использовании методов С-класса. Точность созданной предварительной модели на регулярной сетке меридианов и параллелей с шагом 5' характеризуется среднеквадратической погрешностью (в целом по региону) около 0,12 м, что примерно на 15% превышает точность глобальной модели геопотенциала;

8) уточнение предварительной модели регионального геоида, созданной по спутниковым данным, может быть реализовано с использованием данных детальной аэрогравиметрической съемки, выполненной по рядовым и опорным

маршрутам с расстоянием между ними, соответственно, 2 км и 10 км. Для выполнения съемки может потребоваться летное время в объеме до 750 часов. Общая стоимость работ по проведению аэрогравиметрической съемки составит 4,5 млн. долл. США. При использовании одного борта эти работы могут быть выполнены за 8 месяцев.

Рекомендации:

создание региональной модели геоида в условиях Кот д'Ивуара осуществлять поэтапно, начиная с предварительной модели, базирующейся на данных ОСН, с последующим уточнением по данным гравиметрической (аэрогравиметрической) съемки;

предварительную модель геоида получать с использованием косвенной интерполяции ВГ с опорой на современную глобальную модель ГПЗ в виде сферических гармоник геопотенциала (подходящий вариант – EGM-2008 до 2190-й степени), предусматривая дополнение исходных данных на суше альтиметрическими ВГ в прибрежной части акватории океана;

при проведении аэрогравиметрической съемки использовать опыт, научно-технический и технологический потенциал России в области аэрогравиметрических работ.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

детализация разработанной методики поэтапного повышения точности модели геоида в части уточнения предварительной модели по гравиметрической информации;

оптимизация выбора глобальной модели ГПЗ для учета влияния дальнейшей зоны и использования данных спутниковой альтиметрии при вычислении ВГ по АСТ на основе интегрального подхода;

разработка методических указаний по проведению аэрогравиметрической съемки территории Республики Кот д'Ивуар и обработке полученных данных;

исследование возможности восстановления АСТ на сопредельных территориях по гипсометрической информации для использования в качестве исходной информации при вычислении ВГ по интегральным формулам.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Ака Б.У., Непоклонов В.Б. Оценка возможности использования геодезической сети для создания региональной модели геоида на территории Республики Кот д'Ивуар // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. - №3. С. 68-73.
2. Ака Б.У. О создании предварительной модели геоида на территорию Республики Кот д'Ивуар // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – №2.
3. Ака Б.У., Непоклонов В.Б. Метаданные и форматы моделей геоида // Славянский форум. – 2017. – №4(18). – С. 209-214.
4. Ака Б.У. Предварительная модель геоида на территорию Республики Кот д'Ивуар и возможные пути ее совершенствования // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Выпуск 9, МИИГАиК - Москва, 2018.