

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ УРОВЕННЫХ ПОСТОВ ПО ДАННЫМ ГНСС И МОДЕЛИ КВАЗИГЕОИДА В АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

Л.В. Остроумов (ГОИН)

В 2006 г. окончил факультет прикладной космонавтики МИИГАиК по специальности «информационные системы и технологии». После окончания университета учился в аспирантуре МИИГАиК. С 2009 г. работает в ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (ГОИН), в настоящее время — заведующий лабораторией геоинформационных исследований. Кандидат технических наук.

В.З. Остроумов (ГОИН)

В 1971 г. окончил факультет геодезии МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». Затем работал в Казахском АГП инженером, начальником Объединенной комплексной экспедиции, начальником планово-производственного отдела, главным инженером предприятия. С 1992 г. — начальник Главного управления геодезии и картографии при Кабинете Министров Республики Казахстан. С 2003 г. работает в ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (ГОИН), в настоящее время — старший научный сотрудник. Кандидат технических наук.

В числе приоритетных направлений научно-исследовательской деятельности в области гидрологии и океанологии, наряду с решением фундаментальных задач, находятся работы по мониторингу уровня водных объектов. Среди этих работ определение и мониторинг уровня морей занимает особое место и является важной государственной задачей при расчете водного баланса, осуществлении хозяйственной деятельности, а также прогнозировании чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Основой для определения уровня моря служат уровенные станции и посты Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Инфраструктура уровенных станций и постов состоит из водомерных устройств: свай, реек, мареографов и автоматизированных систем. Кроме них в инфраструктуру уровенных станций и постов

входят основные и рабочие реперы.

Для корректного расчета уровня морей возникает необходимость привязки реперов и уровенных устройств к системе нормальных высот, т. е. к Балтийской системе высот 1977 года, а также осуществление постоянного контроля их высотного положения. Очевидно, что решение этой задачи традиционными геодезическими методами, такими как геометрическое нивелирование, приводит к большому финансовому и трудовым затратам, а, учитывая значительную по площади и протяженности территорию России, данный процесс растягивается во времени на десятилетия. Более того, традиционные геодезические методы не позволяют в полной мере осуществлять геодезическое обеспечение уровенных станций и постов, расположенных на труднодоступных территориях и удаленных от материка островах.

Возможной альтернативой геометрическому нивелированию может быть спутниковый метод определения нормальных высот, основой которого является совместное использование данных, полученных с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и модели квазигеоида [1, 2]. При замене геометрического нивелирования спутниковым методом основная проблема заключается в переходе от системы геодезических высот к системе нормальных высот. Решению данной проблемы посвящены различные исследования, и ведется множество научных дискуссий. В данной статье представлен опыт ученых Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова (ГОИН) по определению нормальных высот реперов уровенных станций и постов в Азово-Черноморском регионе с использованием технологий ГНСС. Данные работы проводились в

рамках инициативного научно-исследовательского проекта РФФИ № 11-05-01070-а.

Исследования о возможности применения вместо геометрического нивелирования спутникового метода определения нормальных высот были начаты еще на Каспийском море [3]. Тогда усилиями специалистов ГОИН совместно со специалистами Астраханского АГП была создана спутниковая сеть реперов морских уровенных постов на Каспийском море. С использованием модели квазигеоида, построенной ЦНИИГАиК, были определены нормальные высоты. В то же время нормальные высоты этих реперов были получены из геометрического нивелирования III класса. Сравнение нормальных высот, определенных спутниковым методом, и нормальных высот, полученных из геометрического нивелирования, показало, что среднеквадратическая погрешность определения нормальных высот спутниковым методом составляет 10 см [4]. Такая погрешность складывается из погрешности определения геодезических высот спутниковыми приемниками ГНСС и погрешности вычисления аномалий высот по модели квазигеоида. Учитывая, что погрешность определения геодезических высот на порядок меньше, чем погрешность вычисления модельных значений аномалий высот, можно утверждать, что точность определения нормальных высот с использованием приемников ГНСС зависит от погрешности расчета аномалий высот по той или иной модели квазигеоида.

Подобные исследования были выполнены и на акватории Финского залива Балтийского моря [5]. При вычислении нормальных высот спутниковым методом была задействована региональная модель квазигеоида, созданная ЦНИИГАиК. Нормальные высоты были вычисле-

ны и с привлечением модели гравитационного поля Земли EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008). Среднеквадратическая погрешность определения нормальных высот составила 8 см и 9 см, соответственно. Таким образом, исследования показали, что совместное использование ГНСС и модели квазигеоида позволяет определять нормальные высоты с точностью в пределах дециметра.

С одной стороны, возможность получать нормальные высоты с точностью в 10 см с помощью спутникового метода является большим успехом в геодезической практике. С другой — такая погрешность не удовлетворяет по точности требованиям, предъявляемым к гидрологическим исследованиям и другим видам инженерных работ. Поэтому при определении нормальных высот спутниковым методом возникает необходимость уточнять модель квазигеоида для конкретной территории.

Была разработана методика, позволяющая для локального участка акватории или территории суши совершенствовать модели квазигеоида, при этом уменьшение ошибки определения модельных значений аномалий достигается за счет введения в эти значения определенной поправки [6]. В качестве такой поправки предложено использовать аппроксимированные значения разностей аномалий высот, полученных на совокупности реперов в исследуемом районе, для которых выполнен комплекс геодезических измерений. Разностью аномалий высот будет являться разность двух значений аномалий высоты одной и той же точки. Причем, одно значение аномалий высоты получено с использованием высокоточных методов геодезии, таких как геометрическое нивелирование и спутниковые измерения, а второе — вычислено по модели

квазигеоида. Решение задачи по уточнению модели квазигеоида сводится к аппроксимации разностей аномалий высот с нерегулярной сеткой (образованной сетью существующих реперов морских уровенных постов, расположенных на побережье) на точки с известными координатами (реперы, расположенные на труднодоступных территориях и удаленных от материка островах или точки регулярной сетки модели квазигеоида).

Целесообразность аппроксимации именно разностей аномалий высот заключается в том, что функция разностей аномалий высот точек в зависимости от их координат меняется не так быстро, как просто функция аномалий высот. В то же время, функция разности аномалий высот изменяется плавно, поскольку она уточняет функцию модельных значений аномалий высот, т. е. саму модель, а модель, как известно, является гладкой и соответственно плавной поверхностью. В качестве функции аппроксимации был принят ряд Тейлора. Предложено, используя параметрический способ метода наименьших квадратов, исследовать влияние каждого члена ряда на качество получаемых при аппроксимации результатов, и таким образом выполнять оптимизацию ряда Тейлора для локального участка, конкретной модели квазигеоида и конфигурации сети исходных пунктов.

Данная методика была успешно апробирована на акватории Финского залива Балтийского моря [7]. Тогда была реализована разработанная методика и построена уточненная модель квазигеоида. Выполнено сравнение результатов, полученных аппроксимацией рядами Тейлора и дифференциальными сплан-функциями второго порядка, в соответствии с работой [8]. Численный эксперимент для данной конфигурации

сети исходных пунктов и района работ — акватории Финского залива, показал преимущество аппроксимирующей функции в виде рядов Тейлора. Точность определения нормальных высот спутниковым методом увеличилась в два раза. В результате чего была повышена точность определения нормальных высот на удаленных от материка островах Гогланд, Мощный и Толбухин.

Дальнейшие исследования были продолжены в Азово-Черноморском регионе. В 2012 г., в ходе экспедиции, была создана спутниковая сеть, включающая реперы морских уровенных постов (рис. 1).

Также методом геометрического нивелирования III класса были определены нормальные высоты реперов, на которых выполнялись наблюдения с помощью приемников ГНСС. Из результатов совместной обработки значений геодезических высот (Н), полученных с помощью приемников ГНСС, и нормальных высот (Н') — из геометрического нивелирования, для реперов морских уровенных постов вычислены априорные значения высот квазигеоида ($\xi_{\text{нив}}$). Для этих же реперов по модели EGM2008 получены модельные значения высот квазигеоида (ξ_{egm08}). Затем были вычислены разности между этими значениями ($\Delta\xi_{\text{нив-egm}}$). Сравне-

ние априорных и модельных значений высот квазигеоида показало, что точность модели EGM2008 для Азово-Черноморского региона составляет 10 см, что не превышает точности в 11 см, заявленной разработчиками этой модели (см. таблицу).

Используя данные, полученные в результате измерений на реперах морских уровенных постов, и методику, разработанную авторами, проводилось уточнение модели локального квазигеоида. В ходе исследований был доработан математический аппарат метода аппроксимации рядами Тейлора. Исходное значение разности аномалий высот в ряду Тейлора пе-

реведено в разряд неизвестных (определяемых коэффициентов), что позволило сделать результаты аппроксимации разностей аномалий высот независимыми от выбора начального репера. В результате построена уточненная региональная модель квазигеоида на Азово-Черноморский регион. На рис. 2 модель представлена в виде изоаномал высот квазигеоида.

Созданная таким образом модель квазигеоида была также протестирована по результатам натурных измерений, полученных в ходе экспедиции на Азово-Черноморское побережье. Результаты тестирования показали, что среднеквадратическая

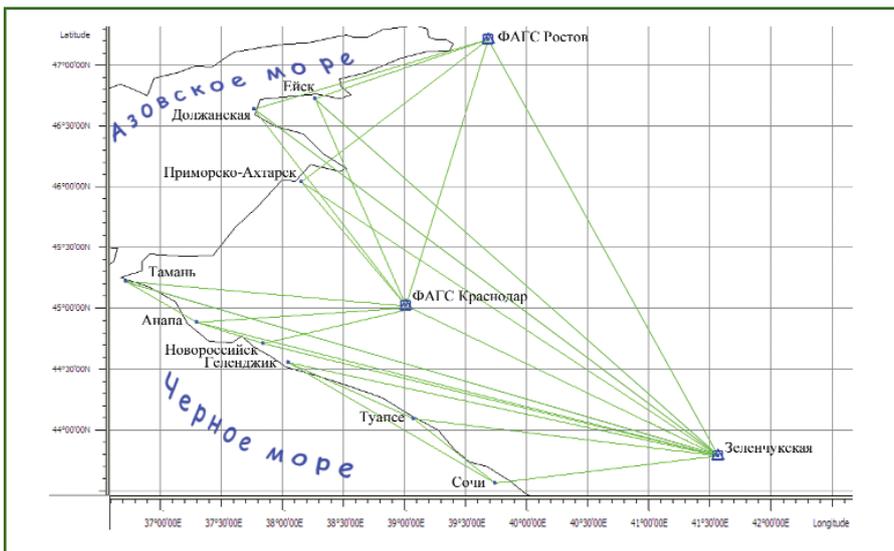


Рис. 1
Схема спутниковой сети Азово-Черноморского побережья

Сравнение априорных и модельных значений аномалий высот реперов морских уровенных постов

Название пункта	B	L	H	H'	$\xi_{\text{нив}}$	ξ_{egm08}	$\Delta\xi_{\text{нив-egm}}$
Сочи	43°33'53,7"N	39°44'31,5"E	20,256	1,745	18,511	18,424	0,087
Туапсе	44°05'28,5"N	39°04'37,6"E	18,923	2,841	16,082	16,008	0,074
Геленджик	44°33'04,4"N	38°02'59,6"E	30,363	15,042	15,321	15,202	0,119
Новороссийск	44°42'28,2"N	37°50'41,7"E	17,715	1,651	16,064	15,952	0,112
Тамань	45°13'08,2"N	36°43'23,9"E	15,318	1,139	14,179	14,036	0,143
Анапа	44°52'59,5"N	37°18'19,5"E	46,204	29,614	16,590	16,430	0,160
Приморско-Ахтарск	46°02'12,3"N	38°09'19,8"E	15,276	2,255	13,021	12,961	0,060
Ейск	46°43'31,5"N	38°16'23,3"E	15,647	1,985	13,662	13,573	0,089
Должанская	46°38'26,1"N	37°46'07,9"E	16,358	2,158	14,200	14,127	0,073
ФАГС Краснодар	45°01'10,6"N	39°00'46,6"E	51,390	39,247	12,143	12,154	0,039

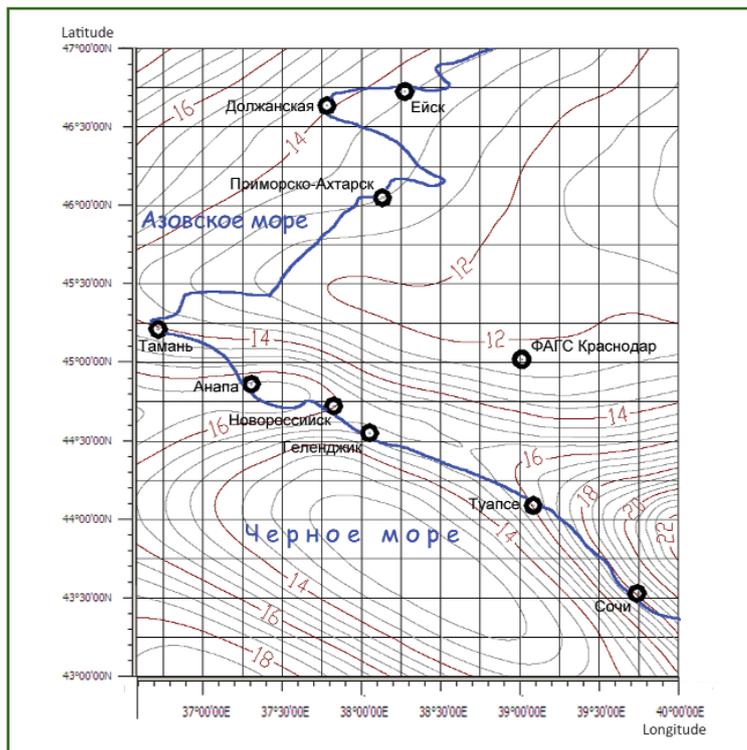


Рис. 2
Региональная модель квазигеоида на Азово-Черноморский регион

погрешность определения аномалий высот по уточненной модели составила 6,5 см. Практическим результатом реализации предложенного метода и выполненных научных исследований стала уточненная нормальная высота репера морского уровня поста «Должанская» на Азовском море. На данном репере были выполнены наблюдения только приемниками ГНСС. Из полученной уточненной модели квазигеоида определена аномалия высоты. После чего вычислена нормальная высота репера и изменена привodka футштока. Это позволило скорректировать уровень моря, представляемый данной станцией. Поправка составила 24 см. Предположительно, разница в высотах образовалась из-за проседания грунтов. Доказательством достоверности полученных на станции «Должанская» результатов является тот факт, что уровень моря по данной станции стал согласовываться с ходом уровня моря на

соседних станциях: «Ейск» и «Приморско-Ахтарск».

Проведенные научные и практические исследования показывают, что точность модели квазигеоида, полученная по EGM2008, по крайней мере, на район центральной России, находится на уровне 10 см. При использовании предложенной методики точность вычисления модельных значений аномалий высот удастся повысить в 1,5–2 раза.

▼ Список литературы

1. Калабай К.Б., Остроумов В.З., Шануров Г.А. Применение спутниковых технологий для совершенствования высотной основы уровней постов Казахстана и России // Геодезия. Картография. Геоинформационные системы. Научное приложение к журналу «Высшая школа Казахстана». — 2003. — № 3. — С. 35–47.
2. Шануров Г.А., Остроумов Л.В., Соколов В.А. Современные спутниковые системы GPS/ГЛОНАСС и их применение в организациях Росгидромета при производстве гидрологических изысканий: существующая практика и пути внедрения

// Тр. ГОИН. Исследования океанов и морей. — 2008. — Вып. № 211. — С. 408–417.

3. Шануров Г.А., Епишин В.И., Остроумов В.З. Определение высот уровневных постов спутниковым методом // Геопрофи. — 2004. — № 4. — С. 11–17.

4. Остроумов Л.В. Сравнение результатов определения высот пунктов геодезической сети на северо-западном побережье Каспийского моря из геометрического и спутникового нивелирования // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2007. — № 6. — С. 36–43.

5. Остроумов Л.В., Шануров Г.А. Результаты спутниковых наблюдений на реперах морских уровневных постов, расположенных вблизи экватории Финского залива // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения». — 2008. — С. 23–25.

6. Шануров Г.А., Остроумов Л.В., Розанова А.А. Повышение точности определения нормальных высот, полученных на основе использования глобальных навигационных спутниковых систем // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2009. — № 4. — С. 30–36.

7. Остроумов Л.В., Остроумов В.З., Шануров Г.А. Региональная модель квазигеоида, предназначенная для перехода к Балтийской системе высот при спутниковой привязке уровневной сети Росгидромета, расположенной на экватории Финского залива // Тр. ГОИН. Исследования океанов и морей. — 2011. — Вып. 213. — С. 193–204.

8. Карпушин Ю.Г., Лисеев И.А., Лисеев С.И. Совместное определение нормальных высот и высот квазигеоида пунктов геодезической сети по спутниковым измерениям // Тр. юбилейной конференции 220 лет МИИГАиК. — 1999. — С. 173–181.

RESUME

There are given the results of comparison for the values of the normal heights of the tide gauge stations derived from the geometrical leveling and identified with the use of the both GNSS data and quasigeoid models. Studies on improving the quasigeoid model in the Azov-Black Sea region are described.