

УДК 556+629.783:528

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-78-95

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГНСС-АППАРАТУРЫ

Станислав Олегович Шевчук

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ, кандидат технических наук, руководитель проектного направления, тел. (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Николай Сергеевич Косарев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Вадим Николаевич Пономарев

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ, руководитель проектного направления, тел. (965)816-65-50, e-mail: v8166550@yandex.ru

Нелля Николаевна Бобровицкая

Государственный гидрологический институт, 199004, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, 23, доктор географических наук, заведующая отделом мониторинга и экспедиционных исследований, тел. (812)323-12-49, e-mail: bobrovi@ggi.nw.ru

Александр Арсеньевич Судаков

Государственный гидрологический институт, 199004, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, 23, зам. начальника экспедиционного отряда, тел. (905)213-42-10, e-mail: alexandr.sudakov07@gmail.com

Статья содержит описание и результаты совместных исследований, проводившихся сотрудниками АО «РИРВ» и ФГБУ «ГГИ», по определению высот гидрологических постов. Изложены проблемы геодезического обеспечения гидрологических постов, рассмотрены варианты их решения посредством ГНСС-аппаратуры отечественного производства, проведены полевые испытания в Новгородской области.

По результатам выполненных экспериментальных работ установлено, что использование аппаратуры ГНСС отечественного производства, а также моделей геоида сверхвысоких степеней (EGM2008, GECO, EIGEN-6C4) позволяет определить нормальные высоты с точностью нивелирования IV класса, необходимого для обеспечения гидрологических постов, при условии наличия надежных исходных данных. Измерения при этом должны выполняться относительным методом во избежание погрешностей систематического характера.

В качестве исходных данных, к точности которых предъявляются требования, следует понимать, в первую очередь, высотные отметки опорных реперов, их сохранность и статичность. При этом существующая высотная основа, представленная реперами с известными отметками в Балтийской системе высот 1977 года (БСВ-77), находится в неудовлетворительном состоянии – большое количество пунктов утеряно полностью, а часть деформирована. Высотная сеть Новгородской области и, очевидно, России в целом требует восстановления и мониторинга ее состояния.

Таким образом, результаты работ позволили вскрыть глубокие проблемы высотного обеспечения территории Российской Федерации и на данном этапе не позволяют дать одно-

значный ответ на вопрос о соответствии точности спутникового нивелирования требованиям гидрологии.

Ключевые слова: гидрология, ГНСС, геоид, ГАО2012, EGM2008, EIGEN-6C4, ортометрическая высота, аномалия высоты.

Введение

Изучение гидрологического режима водных объектов суши и государственный учет количества и качества вод для удовлетворения текущих и перспективных потребностей любой сферы деятельности являются актуальной задачей, требующей оперативного решения [1]. В настоящее время эта задача решается путем периодических наблюдений на стационарных гидрологических постах. По состоянию на 31.12.2016 на территории Российской Федерации действует 2 991 пост, из которых 2 655 ведут наблюдения на реках и 336 – на озерах и водохранилищах (рис. 1) [2].

Каждый гидрологический пост оборудован двумя видами реперов – основными и контрольными, которые в соответствии с Инструкцией [3] включаются в линии нивелирования I и II класса, и устройством для измерения уровня воды. Относительно этих реперов систематически контролируется высотное положение уровенных устройств (реек, свай и пр.) и закрепляется единый нуль гидрологического поста. Мониторинг высотного положения уровенных устройств осуществляется нивелированием IV класса и повторяется не реже двух раз в год [4].

Выполнение мониторинга высотного положения уровенных устройств геометрическим нивелированием сопряжено с большим объемом полевых работ и необходимостью обеспечения видимости между пунктами нивелирного хода. В последние годы все чаще появляются публикации, свидетельствующие о повышении точности и надежности высотных измерений спутниковыми методами на локальных площадях, а иногда и на территориях целых областей РФ и стран Европы [5–10]. Проведен ряд исследований по применению спутникового нивелирования для решения задач гидрологии [11–13].

В отличие от геометрического нивелирования, метод спутникового нивелирования позволяет значительно снизить объемы работ и не требует прямой видимости между пунктами измерений [14–16]. При всех достоинствах у спутникового нивелирования есть и недостатки. Основной недостаток заключается в том, что в ГНСС-технологиях определяются геодезические высоты (H^G), которые отсчитываются от поверхности общеземного эллипсоида, в то время как высотное положение гидрологических постов задается системой нормальных высот (H^N), связанной с поверхностью квазигеоида. Разница между геодезической и нормальной системами высот называется аномалией высоты (высотой квазигеоида)

$$\zeta = H^G - H^N . \quad (1)$$

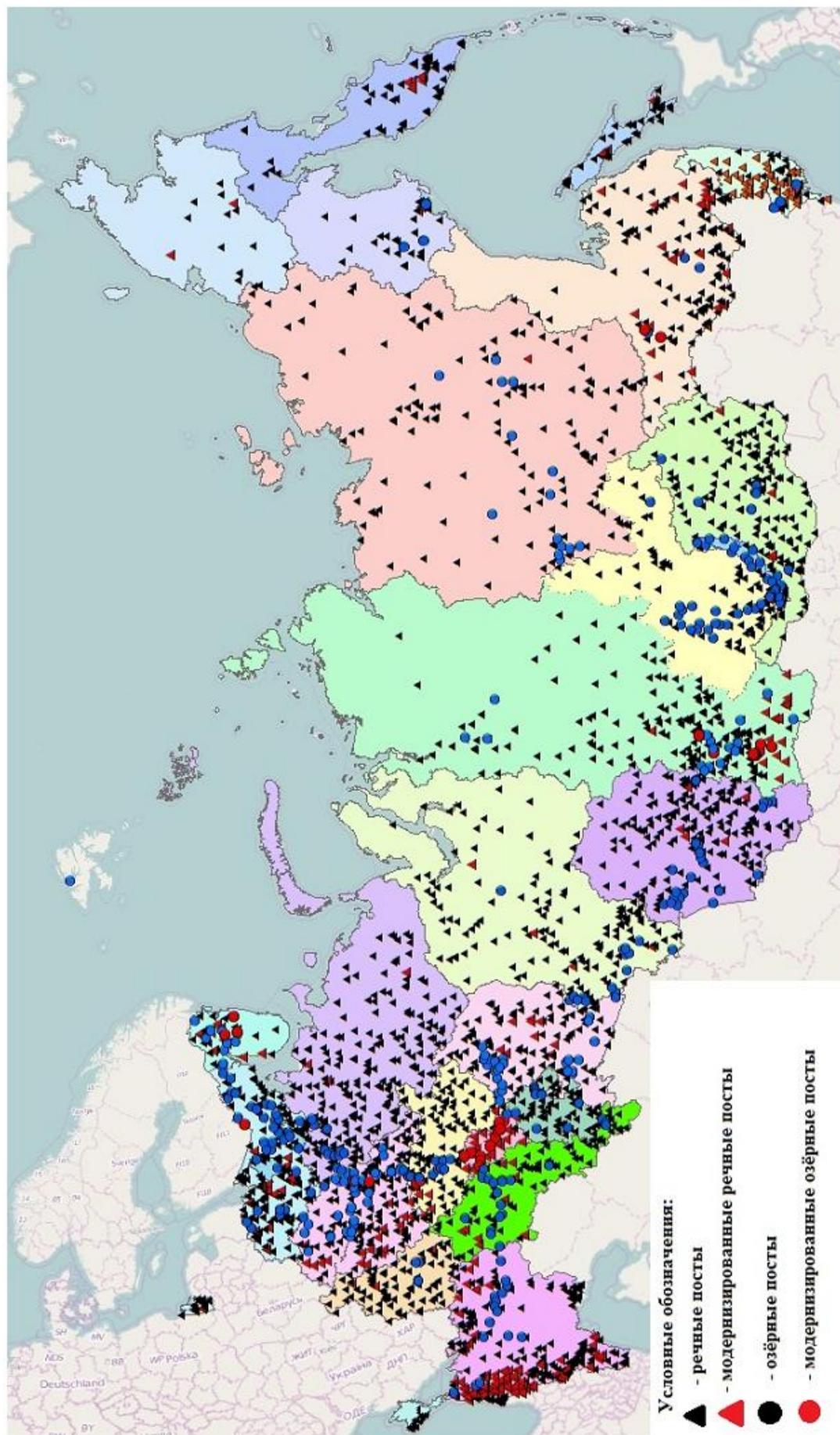


Рис. 1. Карта-схема размещения гидрологической сети Росгидромета [2]

Высота квазигеоида может быть получена по данным соответствующих гравиметрических моделей, но такая информация не всегда доступна рядовым пользователям коммерческого программного обеспечения, поэтому в современных программных продуктах обработки ГНСС-измерений предусмотрено подключение моделей глобального геоида, таких как EGM2008, GAO2012, GECO, EIGEN-6C4 и др. Как правило, точность глобальных моделей геоида находится на уровне 10–20 см [17–24].

Из-за того, что поверхность квазигеоида отличается от поверхности геоида от нескольких сантиметров на равнинной территории до нескольких метров в горной местности, при использовании глобальной модели геоида в уравнении (1) для вычисления нормальной высоты (H^{γ}) возникает сдвиг по высоте (Δ), который на локальных территориях может быть интерпретирован как систематический сдвиг

$$H^{\gamma} = H^{\Gamma} - \zeta_{\text{мод}} - \Delta, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{мод}}$ – аномалия высоты, рассчитанная по глобальной модели геоида.

При исключении систематического сдвига по высоте (например, при ГНСС-измерениях относительным методом) для локальной территории возможно получение аномалии высоты с ошибкой несколько сантиметров, что позволит вычислить нормальную высоту также с ошибкой в несколько сантиметров. При этом не стоит забывать, что точность самих ГНСС-измерений будет напрямую зависеть и от иных внешних факторов – условий приема спутниковых сигналов, многопутности, точности исходных данных и пр.

В публикациях [5–10] показано, что посредством ГНСС-аппаратуры с использованием моделей геоида возможно достижение точности определения высоты, соответствующее III–IV классу нивелирования.

Кроме того, в работах, которые посвящены применению ГНСС-технологий в гидрологии, использовалась только зарубежная аппаратура [11–13], при этом не проводилось планомерных исследований по применению отечественной ГНСС-аппаратуры для определения высот гидрологических постов.

Поэтому целью данной статьи является исследование возможности применения ГНСС-аппаратуры, в частности, отечественной, с различными моделями геоидов, для определения высот гидрологических постов.

Аппаратура и методика измерений

В рамках исследований использовалась спутниковая геодезическая аппаратура отечественного производства СБС-363 (базовая станция), «Изыскание» и программное обеспечение VL-Geo.

Паспортные точностные и технические характеристики ГНСС-аппаратуры «Изыскание» и СБС-363 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики используемой ГНСС-аппаратуры

Наименования характеристик		«Изыскание»	СБС-363-02
Назначение		ровер	базовая станция
Количество каналов приема		36 каналов GPS L1, L2 ГЛОНАСС L1,L2	
Тип исполнения		Составной (приемник + антенна)	
Точность (СКП) определения координат и высот, мм	RTK	в плане: $10 + 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot D$ по высоте: $20 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D$	
	Статика и быстрая статика с постобработкой	в плане: $10 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D$ по высоте: $10 + 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot D$	
	Кинематика с постобработкой	$20 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D$	
	Stop-And-Go	$20 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D$	
Интерфейсы		RS-232C, USB, Bluetooth, PPS	RS-232, USB, Ethernet, RS-422
Встроенная память		112 Мб	Нет (используется память внешнего ПК)
Рабочая температура, °С		-30...+50	СБС-363: -25...+55 Антенна: -40...+55
Масса		«Изыскание»: 1,6 кг Антенна: 1 кг	СБС-363: 1 кг Антенна: 1 кг
Размеры, мм		«Изыскание»: 208,5×187,5×40,0 Антенна: 186,0×186,0×91,5	СБС-363: 186,0×186,0×38,0 Антенна: 186,0×186,0×91,5

Работы выполнялись на территории Новгородской области (Валдайский и Демянский районы). Пункты измерений – реперы с известными отметками (пункты государственной геодезической сети (ГГС) II-III класса нивелирования) – располагались на максимальном удалении 70 км. В связи с этим было выполнено две расстановки базовых станций для обеспечения базовых линий в пределах 20–25 км.

Для некоторых реперов не имелось предварительной информации ни об их сохранности, ни об условиях их расположения, поэтому выполнение работ совмещалось с рекогносцировкой пунктов.

Базовые станции были развернуты на гидрологических постах, где им обеспечивалось постоянное питание (переменный ток, 220 В, 50 Гц) и фиксированное стационарное расположение. На рис. 2 приведены фотографии установки и настройки базовой станции.

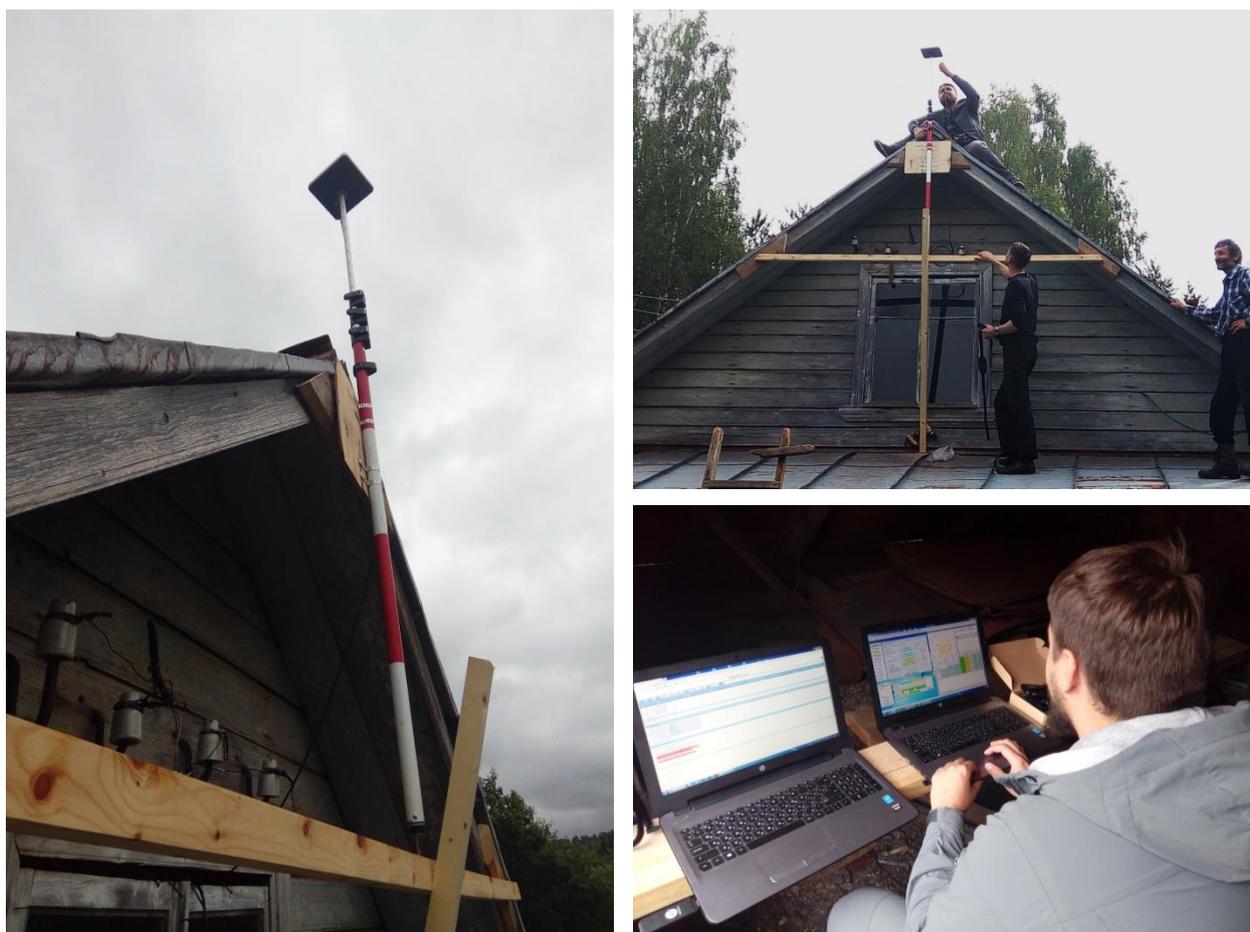


Рис. 2. Установка базовой станции на территории гидрологического поста

Привязка базовых станций выполнялась от пунктов IGS [25] в окрестностях городов: Санкт-Петербург (SVTL), Рига (RIGA), Екатеринбург (ARTU) и Москва (MDVO).

Измерения на реперах велось в режиме RTK. Передача измерений базовой станции в формате RTCM 2.3 на мобильную станцию велась посредством GSM-канала.

В процессе исследований из 14 намеченных пунктов удалось выполнить измерения на семи. Шесть пунктов оказались утрачены физически, один не удалось найти из-за растительности и отсутствия опознавательных знаков (сторожков, окопки, пирамиды). Из найденных пунктов не менее трех вызывали сомнения в их пригодности для измерений.

Например, поверх пункта Крестовая была построена охотничья вышка (рис. 3).

Такое состояние пункта вызывает сомнения в актуальности его отметки. Кроме того, в силу непосредственной близости препятствия в виде указанного сооружения, измерения производились на расстоянии от пункта непосредственно с дальнейшим переносом отметки посредством нивелира.



Рис. 3. Измерения на пункте Крестовая

Утраченные пункты, как правило, идентифицировались по следам окопки или остаткам тригопунктов (рис. 4).



Рис. 4. Утраченный репер на пункте Сопки

Наибольшее сомнение в актуальности отметок и их надежности (несмотря на номинальную сохранность) вызывали реперы, расположенные на вертикальных трубах, сторожках и рельсах, так как некоторые из них имели заметный крен (рис. 5). Некоторые пункты оказывались под слоем грунта и требовали раскопок (рис. 6).



Рис. 5. Пункты, расположенные на вертикальных сторожках, трубах и рельсах



Рис. 6. Раскопанный репер на пункте Паршино

Важно также отметить, что большая часть отметок, выданная Росреестром, была датирована 1970-ми гг. и, очевидно, могла устареть.

Наилучшая сохранность была у пунктов на территории г. Валдай и в пос. Дворец (рис. 7). В табл. 2 приведены данные сохранности и надежности исследуемых реперов.



Рис. 7. Пункты 4075 и 4405, располагавшиеся на территории г. Валдай (сверху) и стенной репер в пос. Дворец (снизу)

Таблица 2

Сохранность и надежность исследуемых реперов

Состояние	Пункты (реперы)	Примечания
Надежные	4405	Находился под люком (см. рис. 7)
	4750	Находился под люком (см. рис. 7)
	Водонапорная Башня	Сохранился на сооружении (см. рис. 7)
	Паршино	Пункт находился под слоем грунта (см. рис. 6)
Ненадежные	Крестовая	Поверх была сооружена охотничья вышка (см. рис. 3)
	Стекляницы	Пункт не соответствовал указанному в каталоге типу (имелся пилон с принудительным центрированием, однако по описаниям пункт был сигнального типа с пирамидой)
	Белый Бор	Ветхое состояние пункта
Непригодные для измерений	Лычково	Пункт находился глубоко в лесу, представлял собой сваю в виде рельсы
Утраченные	Сопки	Окопка сохранилась, но сам пункт был разрушен (см. рис. 4)
	Дворец-1	Уничтожен при застройке
Не найдены	Лонна	Пункт находился на территории кладбища, возможно, был утрачен при его расширении
	Лужно	Возможно, находился под слоем грунта

Пункты, на которых были выполнены измерения, образовали сеть (примерно 70×30 км), показанную на рис. 8.

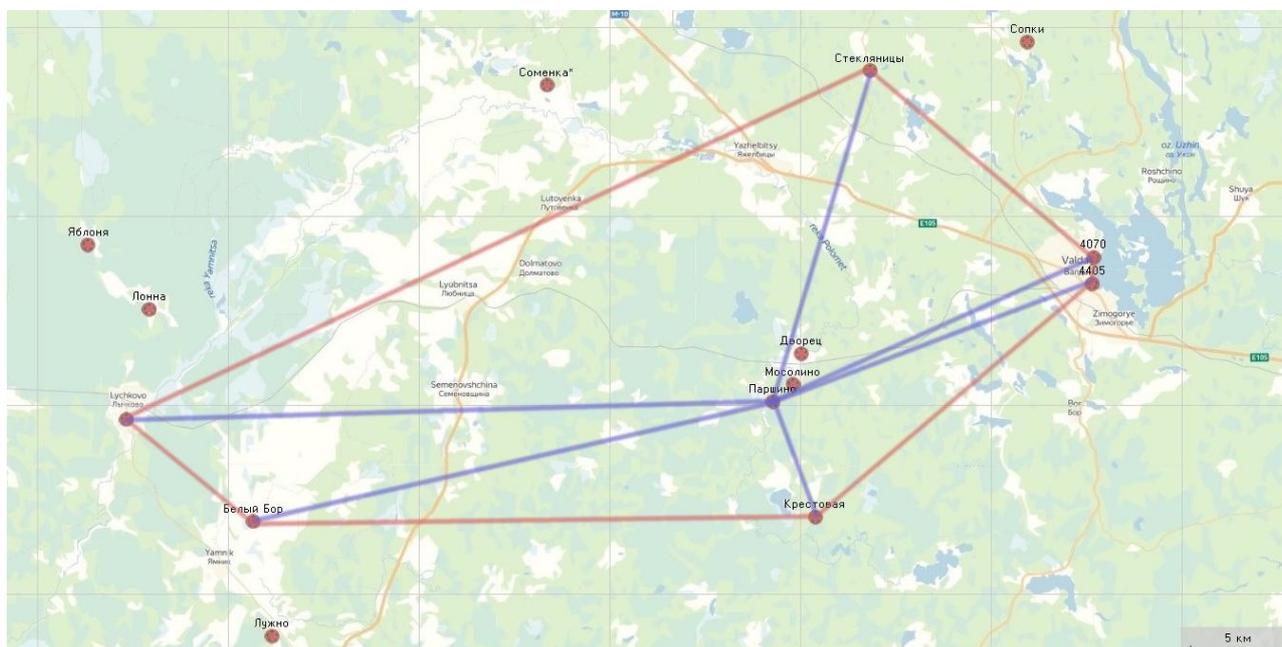


Рис. 8. Сеть найденных реперов, на которых выполнялись измерения

Результаты экспериментальных работ

Полученные результаты в виде серий измерений были усреднены по сеансам и сравнены с известными высотами пунктов ГГС. Результаты сравнений приведены в табл. 3. Пункт 4070 был взят за нуль для относительных сравнений как наиболее сохранный.

Таблица 3

Высоты, измеренные аппаратурой «Изыскание»,
и аномалии высот, полученные по ним

Пункт	H (эллипсоид WGS-84)	H (БСВ-77)	Аномалия квазигеоида	
			абсолютные	отн. п. 4070
4405	208,338	193,335	-15,003	0,061
4070	208,796	193,731	-15,065	0,000
Стекляницы	211,948	198,053	-13,895	1,169
Крестовая	222,334	207,366	-14,968	0,097
Паршино	187,543	172,473	-15,070	-0,005
Белый Бор	84,155	69,052	-15,103	-0,047
Водонапорная Башня	180,519	165,554	-14,965	0,073

Пункт Стегляницы, очевидно, был неверно идентифицирован при рекогносцировке или имел неверную высоту и в дальнейшем был исключен.

Далее полученные аномалии (разности геодезических и нормальных высот, известных из каталогов Росреестра) сравнивались с аномалиями высот, вычисленными по глобальным моделям геоидов, имеющихся в открытом доступе – EGM2008, GECO, EIGEN-64C и ГАО2012. Характеристики глобальных моделей геоидов, используемые авторами для эксперимента, приведены в табл. 4 [26].

Таблица 4

Характеристики глобальных моделей геоидов

Характеристика	EGM2008	EIGEN-6C4	GECO	ГАО2012
Разработчик	NGA (США)	GFZ и GRGS (Германия и Франция)	DICA (Италия)	ЦНИИГАиК (Россия)
Источники данных	- гравиметрия, - астрономия, - спутник GRACE	- гравиметрия, - астрономия, - спутники: GRACE, GOCE, LAGOS	- гравиметрия, - астрономия, - спутник GOCE	- гравиметрия, - астрономия, - спутники: GRACE, GOCE
Год	2008	2014	2015	2012
Тип геоида	Свободный от приливов	Свободный от приливов	Свободный от приливов	Свободный от приливов
Степень	2190	2190	2190	360

Данные модели были загружены с сервиса [26] для локальных участков (Новгородская область). Узлы регулярных сеток были интерполированы до 1'. Для получения аномалий геоида в точках нахождения реперов использовалась программа собственной разработки GeoCalc. Интерполяция между узлами сеток 1' × 1' выполнялась линейно. В табл. 5 приведены результаты вычислений аномалий высот, полученные по глобальным моделям геоида.

Таблица 5

Аномалии высот, полученные по глобальным моделям геоида

Пункт	Аномалий высот в пункте измерений, м							
	ГАО2012		EGM2008		GECO		EIGEN-6C4	
	ζ	$\zeta_{отн}$	ζ	$\zeta_{отн}$	ζ	$\zeta_{отн}$	ζ	$\zeta_{отн}$
4405	-15,607	-0,002	-15,808	0,015	-15,840	0,014	-15,786	0,014
4070	-15,605	0,000	-15,823	0,000	-15,854	0,000	-15,800	0,000
Стегляницы	-15,605	0,000	-15,993	-0,170	-16,015	-0,161	-15,963	-0,163
Крестовая	-15,622	-0,017	-15,762	0,061	-15,800	0,054	-15,748	0,052
Паршино	-15,562	0,043	-15,812	0,011	-15,844	0,010	-15,792	0,008
Белый бор	-15,707	-0,102	-15,885	-0,062	-15,888	-0,034	-15,867	-0,067
Водонапорная Башня	-15,557	0,048	-15,815	0,008	-15,847	0,007	-15,795	0,005

Из табл. 5 можно сделать следующие выводы. Аномалии высот, рассчитанные по глобальным моделям геоида EGM2008, GECO, EIGEN-6C4, отличаются друг от друга не более чем на 1 см. При использовании модели ГАО2012 для вычисления аномалий высот были выявлены отличия, которые на некоторых пунктах достигали 6–8 см, что может быть объяснено тем, что модель ГАО2012 имеет низкую разрешающую способность.

В табл. 6 приведены результаты сравнений аномалий высот, рассчитанных по глобальным моделям геоида EGM2008, GECO, EIGEN-6C4, ГАО2012, и аномалий высот, полученных как разность геодезических и нормальных высот, известных из каталогов Росреестра.

Таблица 6

Разности аномалий высот (в метрах)

Пункт	ГАО2012	EGM2008	GECO	EIGEN-6C4
4405	-0,604	-0,805	-0,837	-0,783
4070	-0,540	-0,758	-0,789	-0,735
Крестовая	-0,654	-0,794	-0,832	-0,780
Паршино	-0,492	-0,742	-0,774	-0,722
Белый Бор	-0,596	-0,774	-0,777	-0,756
Водонапорная Башня	-0,566	-0,824	-0,856	-0,804

Из табл. 6 можно сделать следующие выводы. Разности аномалий высот, рассчитанных по глобальным моделям геоида EGM2008, GECO, EIGEN-6C4, ГАО2012, и аномалий высот, полученных как разность геодезических и нормальных высот, известных из каталогов Росреестра, имеют одинаковый по абсолютной величине систематический сдвиг. Для моделей геоида EGM2008, GECO, EIGEN-6C4 он составляет приблизительно 0,8 м, для модели ГАО2012 – 0,6 м.

Для устранения систематического сдвига было выполнено сравнение относительных аномалий (нулевым пунктом взят п. 4070). В табл. 7 приведены результаты сравнений.

Таблица 7

Разности аномалий высот после устранения систематического сдвига (в метрах)

Пункт	ГАО2012	EGM2008	GECO	EIGEN-6C4
4405	-0,063	-0,046	-0,047	-0,047
4070	0,000	0,000	0,000	0,000
Крестовая	-0,114	-0,036	-0,043	-0,045
Паршино	0,048	0,016	0,015	0,013
Белый Бор	-0,055	-0,015	0,013	-0,020
Водонапорная Башня	-0,025	-0,065	-0,066	-0,068

Из табл. 7 можно сделать следующие выводы. Разности аномалий высот, выраженные относительно одного из пунктов измерений для ГНСС-аппаратуры «Изыскание», находились в среднем на уровне нескольких сантиметров (4–6 см для EGM2008, GECO и EIGEN-6C4 и 11 см для ГАО2012). Указанные результаты косвенно подтверждают возможность использования ГНСС-аппаратуры для выполнения нивелирования относительным методом спутникового позиционирования.

Для получения качественных исходных материалов, очевидно, должна быть выполнена частичная или полная реконструкция государственной высотной сети, по крайней мере, для исследуемой территории.

Заключение

По экспериментальным работам могут быть сделаны следующие итоговые выводы.

1. Существующая высотная основа, представленная реперами с известными отметками в Балтийской системе высот 1977 года (БСВ-77), находится в неудовлетворительном состоянии. Часть пунктов утрачена физически, часть требует ремонта (удаление грунта, обновление окопки, повторное заложение центров) или полного обновления. Сохранившиеся пункты требуют повторного определения отметок на них.

2. Условия, в которых размещаются реперы, зачастую являются мало пригодными для спутниковых измерений в силу присутствия объектов (деревьев, сооружений), препятствующих приему спутниковых сигналов и являющихся источником их переотражения (многопутности).

3. Аномалии высот, рассчитанные по глобальным моделям геоида EGM2008, GECO, EIGEN-6C4, отличаются друг от друга не более чем на 1 см. При использовании модели ГАО2012 для вычисления аномалий высот были выявлены отличия, которые на некоторых пунктах достигали 6–8 см, что может быть объяснено тем, что модель ГАО2012 имеет низкую разрешающую способность.

4. Абсолютные величины аномалий квазигеоида, полученные по измерениям, имели значительные систематические различия относительно исследуемых моделей геоида (на уровне 0,8 м).

5. Разности аномалий, выраженные относительно одного из пунктов измерений для ГНСС-аппаратуры «Изыскание», находились в среднем на уровне нескольких сантиметров (4–6 см для EGM2008, GECO и EIGEN-6C4 и 11 см для ГАО2012). Указанные результаты косвенно подтверждают возможность использования ГНСС-аппаратуры для выполнения нивелирования относительным методом спутникового позиционирования.

6. Существующая ситуация свидетельствует о том, что ГНСС-аппаратура (в частности отечественного производства) и методы измерений с использованием моделей геоидов высокого порядка позволяют определять высоты не ни-

же III-IV класса, необходимого для обеспечения гидрологических постов, однако при наличии надежных исходных данных. Для получения качественных исходных материалов очевидно должна быть выполнена частичная или полная реконструкция государственной высотной сети, по крайней мере, для исследуемой территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наставление гидрологическим станциям и постам. Вып. 9, ч. 1. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – 424 с.
2. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2016 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/obzor_seti_2016_v_pecchat.pdf.
3. ГКИНП (ГНТА)-03-010-03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М. : Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 135 с.
4. Руководящий технический материал. Высотная привязка уровенных постов (ГКИНП-03-15-88). – М. : ЦНИИГАиК, 1988. – 41 с.
5. Гиенко Е. Г., Струков А. А., Решетов А. П. Исследование точности получения нормальных высот и уклонов отвесной линии на территории Новосибирской области с помощью глобальной модели геоида EGM2008 // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 2. – С. 181–186.
6. Конешов В. Н., Непоклонов В. Б., Августов Л. И. Оценка навигационной информативности аномального гравитационного поля Земли // Гироскопия и навигация. – 2016. – № 2 (93). – С. 95–106.
7. Обиденко В. И., Опритова О. А., Решетов А. П. Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 14–25.
8. Шендрик Н. К. Формирование локальной цифровой модели высот геоида на территорию Новосибирской области // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 4 (36). – С. 66–72.
9. Hirt C. Assessment of EGM2008 over Germany using accurate quasigeoid heights from vertical deflections, GCG05 and GPS/leveling // Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv). – 2011. – Vol. 136 (3). – P. 138–149.
10. Łyszkowicz A. Assessment of accuracy of EGM08 model over the area of Poland // Techn. Sc. – 2009. – No 12. – P. 118–134.
11. Шануров Г. А., Остроумов В. З., Епишин В. И. Определение высот уровенных постов спутниковым методом // Геопрофи. – 2004. – № 4. – С. 11–17.
12. Шануров Г. А., Остроумов В. З., Остроумов Л. В. О влиянии геометрии спутниковых наблюдений на погрешности определения координат пунктов опорной геодезической сети // Геопрофи. – 2008. – № 2. – С. 57–60.
13. Остроумов Л. В., Остроумов В. З. Определение высот уровенных постов по данным ГНСС и модели квазигеоида в Азово-Черноморском регионе // Геопрофи. – 2013. – № 3. – С. 20–23.
14. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. – М. : Картгеоцентр, 2005. – 334 с.
15. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more. – Wien, New-York : Springer, 2008. – 516 p.
16. Leick A. GPS Satellite Surveying. – New York : A Willey-Interscience Publication, 1995. – 560 p.

17. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли: монография / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, А. М. Косарева, Н. С. Косарев. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с.
18. Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data / A. P. Karpik, V. F. Kanushin, I. G. Ganagina et al. // Contributions to Geophysics and Geodesy. – 2016. – Vol. 46, No. 1. – P. 1–11.
19. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова, А. М. Косарева, Н. С. Косарев // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 21–35.
20. Определение разности потенциалов силы тяжести и высот в геодезии посредством гравиметрических и спутниковых измерений / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, Д. Н. Голдобин, И. Г. Ганагина, Е. Г. Гиенко, Н. С. Косарев // Вестник СГУГиТ – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 45–52.
21. Chronometric measurement of orthometric height differences by means of atomic clocks / S. M. Kopeikin, V. F. Kanushin, A. P. Karpik et al. // Gravitation and Cosmology. – 2016. – Vol. 22, No. 3. – P. 234–244.
22. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) / N. K. Pavlis, S. A. Holmes, S. C. Kenyon et al. // Journal of geophysical research, Solid Earth. – 2012. – Vol. 117, Issue B4. – P. 1–38.
23. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 30–49.
24. Modern global Earth's gravity field models and their errors / V. N. Koneshov, V. B. Nepoklonov, R. A. Sermyagin et al. // Gyroscopy and Navigation. – 2013. – Vol. 4, No. 3. – P. 147–155.
25. IGS Network / International GNSS Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.igs.org/network>.
26. ICGEM International Center for Global Earth Models [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://icgem.gfz-potsdam.de>.

Получено 09.09.2019

© С. О. Шевчук, Н. С. Косарев, В. Н. Пономарев,
Н. Н. Бобровицкая, А. А. Судаков, 2020

HYDROLOGICAL SITE HEIGHTS MEASUREMENT WITH THE DOMESTIC GNSS RECEIVERS

Stanislav O. Shevchuk

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, Prospect Obukhovskoy Oborony, Saint Petersburg, 192012, Russia, Ph. D., Project Manager, phone: (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Nikolay S. Kosarev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Vadim N. Ponomarev

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, Prospect Obukhovskoy Oborony, Saint Petersburg, 192012, Russia, Project Manager, phone: (965)816-65-50, e-mail: v8166550@yandex.ru

Nellya N. Bobrovitskaya

State Institute of Hydrology, 23, 2nd line of Vasilievsky Ostrova, Saint Petersburg, 192012, Russia, D. Sc., Head of the Department of Monitoring and Expedition Researches, phone: (812)323-12-49, e-mail: bobrovi@ggi.nw.ru

Alexander A. Sudakov

State Institute of Hydrology, 23, 2nd line of Vasilievsky Ostrova, Saint Petersburg, 192012, Russia, Deputy Chief of the Expeditionary Team, phone: (905)213-42-10, e-mail: alexandr.sudakov07@gmail.com

The main topic of the article is the overview and results analysis of the research devoted to hydrological posts height leveling issues. The research was carried out by the Russian Institute of Radionavigation and Time and the State Institute of Hydrography. The problem of geodetic maintenance of hydrological post is overviewed, the technique of the problem solution with the domestic GNSS-receivers is proposed. The experimental measurements were made in Novgorod region.

The results of the experiments are analyzed. The main conclusion is that the domestic GNSS-receivers with a high-degree geoid model (ex. EGM2008, GECO, EIGEN-6C4) can provide the leveling precision equivalent to III-IV classes of leveling with classical geodesy methods, that's necessary for geodetic maintenance of hydrological posts. The accuracy level can be reached only in case of precise and accurate initial data. The measurements need to be made with the relative GNSS positioning methods to avoid the systematical errors.

The initial data in the context of these works are heights of control/basic points. The points should be static and safe for the heights were true and reliable. The main problem is the unsatisfactory condition of the State height system that includes the leveling points and their normal heights in Baltic system 1977. Most of the points are destroyed or shifted. The leveling net of Novgorod region (as the whole Russian Federation height points system) needs to be restored and being monitored further.

Currently it is impossible to make conclusions on the possibility of hydrological posts leveling with GNSS-methods taking in account the conditioning of the leveling net over the territory.

Key words: hydrology, GNSS, geoid, GAO2012, EGM2008, EIGEN-6C, orthometric height, height anomaly.

REFERENCES

1. Instructions on hydrologic stations and posts: No. 9, Part 1. (1968). Leningrad: Gidrometizdat Publ., 424 p. [in Russian].
2. Hydrological system of observations, data processing and informational products preparing overview on 2016. (n. d.). Retrieved from http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/obzor_seti_2016_v_pechat.pdf [in Russian].
3. Geodesic, cartographic instructions, standards and rules. (2004). GKNP (GNTA)-03-010-03. Manual leveling I, II, III and IV classes. Moscow: CNIIGAIK Publ., 135 p. [in Russian].
4. Geodesic, cartographic instructions, standards and rules. (2003). GKNP-03-15-88. Leading technical material. Leveling posts heights determination. Moscow: CNIIGAIK Publ., 41 p. [in Russian].
5. Gienko, E. G., Strukov, A. A., & Reshetov, A. P. (2011). Studying the accuracy of normal heights and vertical deviations on the territory of the Novosibirsk region using the global geoid model EGM2008. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of GEO-Siberia-2011: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformation, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 186–191). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

6. Koneshov, V. N., Nepoklonov, V. B., & Avgustov, L. I. (2016) Estimating the navigation informativity of the Earth's anomalous gravity field. *Gyroscopy and Navigation*, 7(3), 277–284.
7. Obidenko, V. I., Opritova, O. A., & Reshetov, A. P. (2016). Working out of a technique of reception of normal heights in territory of the Novosibirsk region with use of earth gravitational model EGM2008. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 14–25 [in Russian].
8. Shendrik, N. K. (2016). Creation of the local digital geoid heights model on Novosibirskaya oblast' territory. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 66–72 [in Russian].
9. Hirt, C. (2011) Assessment of EGM2008 over Germany using accurate quasigeoid heights from vertical deflections, GCG05 and GPS/leveling. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, 136(3), 138–149.
10. Łyszkowicz, A. (2009). Assessment of accuracy of EGM08 model over the area of Poland. *Techn. Sc.*, 12, 118–134.
11. Shanurov, G. A., Ostroumov, V. Z., & Yepishin, V. I. (2004) Determination of the Water Level Stations' Heights Using Satellite Techniques. *Geoprofi [Geoprofi]*, 4, 11–17 [in Russian].
12. Shanurov, G. A., Ostroumov, V. Z., & Ostroumov, L. V. (2008). On the Influence of the Satellite Observation Geometry On the Errors In Determining Coordinates of the Geodetic Control Network Stations. *Geoprofi [Geoprofi]*, 2, 57–60 [in Russian].
13. Ostroumov, L. V., & Ostroumov, V. Z. (2013). Determination of Normal Heights of the Tide Gauge Stations' Benchmarks by the GNSS Data and the Quasigeoid Model in the Azov and Black Sea Region. *Geoprofi [Geoprofi]*, 3, 20–23 [in Russian].
14. Antonovich, K. M. (2006). *Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii: T. 2 [Using satellite radio-navigation satellite systems in geodesy: Vol. 2]*. Moscow: Cartgeocentr Publ., 334 p. [in Russian].
15. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more*. Wien, New-York: Springer, 516 p.
16. Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. New York: A Willey-Interscience Publication, 464 p.
17. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosareva, A. M., & Kosarev, N. S. (2015). *Issledovanie sovremennyh global'nyh modelej gravitacionnogo polya Zemli [The study of modern global models of the gravitational field of the Earth]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 270 p. [in Russian].
18. Karpik, A. P., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2016). Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 46(1), 1–11.
19. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosareva, A. M., & Kosarev, N. S. (2014). Comparison of the GOCE project satellite models with different sets of independent terrestrial gravimetry data. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 3(27), 21–34 [in Russian].
20. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Goldobin, D. N., Ganagina, I. G., Gienko, E. G., & Kosarev, N. S. (2015). The definition of gravity potential and heights differences in geodesy by gravimetric and satellite measurements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 53–69 [in Russian].
21. Kopeikin, S. M., Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Tolstikov, A. S., Gienko, E. G., Goldobin, D. N., Kosarev, N. S., Ganagina, I. G., Mazurova, E. M., Karaush, A. A., & Hanikova, E. A. (2016). Chronometric measurement of orthometric height differences by means of atomic clocks. *Gravitation and Cosmology*, 22(3), 234–244.
22. Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor J. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of geophysical research, Solid Earth*, 117(B4), 1–38.

23. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Vazurova E. M., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2017). Quasigeoid modern global models: accuracy characteristics and resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 30–49 [in Russian].

24. Koneshov, V. N., Nepoklonov, V. B., Sermyagin, R. A., & Lidovskaya, E. A. (2013). Modern global Earth's gravity field models and their errors. *Gyroscopy and Navigation*, 4(3), 147–155.

25. International GNSS Service (IGS). (n. d.). Retrieved from <http://igs.org/>.

26. ICGEM – International Center for Global Gravity Field Models. (n. d.). Retrieved from <http://icgem.gfzpotdam.de/ICGEM/ICGEM.html>.

Received 09.09.2019

© S. O. Shevchuk, N. S. Kosarev, V. N. Ponomarev,
N. N. Bobrovitskaya, A. A. Sudakov, 2020