

Обеспечение единого координатного пространства: привязка к государственной системе высот

DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.8

Гулин В.Н., директор по технологиям ООО «ИндорСофт» (г. Томск)
Миронов С.А., технический директор ООО «Индор-Центр» (г. Москва)

Предлагаются пути решения задачи достижения точности определения высотной компоненты пунктов ведомственной опорной геодезической сети (ВОГС) на уровне 10 мм в Балтийской системе высот 1977 года. Основное внимание уделено аспектам, связанным с привязкой пунктов ВОГС к Балтийской системе высот 1977 года с помощью измерений посредством глобальных навигационных спутниковых систем.

Данная публикация является продолжением темы формирования единого координатного пространства на объектах дорожной отрасли, затронутой в предыдущем номере журнала «САПР и ГИС автомобильных дорог» [1]. Поскольку авторами была анонсирована задача достижения точности определения высотной компоненты пунктов ведомственной опорной геодезической сети (ВОГС) на уровне 10 мм в Балтийской системе высот 1977 года, требуется дополнительное освещение предполагаемых путей решения этой задачи. Основное внимание ниже уделено аспектам, связанным с привязкой пунктов ВОГС к Балтийской системе высот 1977 года с помощью ГНСС-измерений.

Текущее состояние дел с государственной высотной основой РФ

Процесс создания государственной нивелирной сети Российской Федерации был начат более 140 лет назад, но наиболее активное развитие государственной высотной основы (ГВО) приходится на период существования СССР [2, 3]. В это время были утверждены нормативы требуемой плотности пунктов высотного обоснования, которая достигалась сочетанием нивелирных сетей различных классов. Линии нивелирования I и II классов располагались вдоль автомобильных и железных дорог по причинам более вероятной сохранности реперов в ведомственных

полосах отвода земель, а также технологического удобства прокладки высокоточных нивелирных ходов вдоль существующих или строящихся магистралей вместо неосвоенных территорий или сельхозугодий.

Размещение высотных реперов I и II классов вблизи автомобильных и железных дорог выполняло ещё и функцию удовлетворения спроса на эти данные при проектировании развития магистралей и их эксплуатации. Плотность обеспечения линейных объектов реперами нивелирования I и II классов составила в среднем не менее чем 1 репер на 5 км. Для объектов, размещаемых вне линий I и II классов и приуроченных к главным транспортным магистралям, использовались заполняющие построения сетей сгущения III и IV классов, приуроченных, как правило, к текущим потребностям развития территорий и не имевшим такой упорядоченности и регулярности, как пункты опорной сети I и II классов.

Следует также отметить ещё один примечательный факт отечественной системы развития отрасли геодезии и картографии. Задачи планового и высотного обеспечения решались различными подразделениями ГУГК, в результате чего мы теперь имеем государственную геодезическую сеть (ГГС) с точными плановыми координатами, но зачастую без высотных отметок, и отдельно нивелирную сеть с высотными реперами, не имеющими точных значений плановых координат.



Обеспечение текущей потребности экономики страны высотной основой в результате ограничилось ответственностью государства за ГВО в пределах работ по нивелированию I и II классов. Каталоги пунктов ГВО сегодня уже поступили на предприятия ОАО «Роскартография» в виде ГИС и СУБД. В современных каталогах ГВО каждому реперу нивелирных сетей присвоены абсолютные величины погрешностей определения высот, которые получены при уравнивании всей сети ГВО страны.

Во второй половине прошлого века для выполнения совместного уравнивания всех пунктов ГТС потребовалась привязка пунктов планового

Теперь рассмотрим более подробно процесс выбора класса пункта исходной основы и средств передачи высотной отметки. Поскольку передача отметки от исходного пункта к определяемым реперам сгущения классическим методом нивелирования зависит от длины хода, то достижение планируемой абсолютной точности в 1 см от реперов I и II классов ограничено предельной длиной хода. В соответствии с [4] имеются следующие требования к точности результатов нивелирования (таблица 1).

Следует отметить, что программа нивелирования I класса относится к прерогативе государственных основных работ и благодаря своей

Таблица 1. Требования к точности результатов нивелирования

Класс нивелирования	Средняя квадратическая ошибка		Допустимые невязки в полигонах и по линиям f , мм
	случайная η , мм/км	систематическая σ , мм/км	
I	0,8	0,08	3 мм \sqrt{L}^*
II	2,0	0,20	5 мм \sqrt{L}
III	5,0	-	10 мм \sqrt{L}
IV	10**	-	20 мм \sqrt{L}

обоснования также по высоте. В сетях низших классов и разрядной полигонометрии плановые и высотные определения обычно выполнялись совместно. Потому сеть муниципальных и ведомственных видов сгущения сегодня, как правило, имеет более высокие показатели абсолютной точности, чем классные пункты ГТС.

Высотные отметки ГТС не были её главным приоритетом, потому они определялись наиболее бюджетными методами. В основном это были нивелирные работы IV (реже III) класса, а порой применялся метод тригонометрического нивелирования, имеющий достаточно низкую точность. Однако полученные результаты позволяли редуцировать плоские прямоугольные координаты на референц-эллипсоид, в чём и состояла основная цель работ.

В каталогах СК и МСК разных эпох и редакций в фондах ещё можно встретить пометки о методах определения высот на пунктах ГТС. Их различают на полученные геометрическим нивелированием и иные. Потому можно сделать следующий вывод о достаточности существующей основы ГТС в качестве высотной основы будущего развития дорожной отрасли:

Пункты ГТС, имеющие отметки высот из геометрического нивелирования без указания их абсолютной точности как пунктов высотной основы, можно принимать в работу с доверительной оценкой их погрешности в 10–30 см. Для обеспечения точности высотного обоснования на уровне 1 см требуются исходные пункты нивелирной сети более высоких классов.

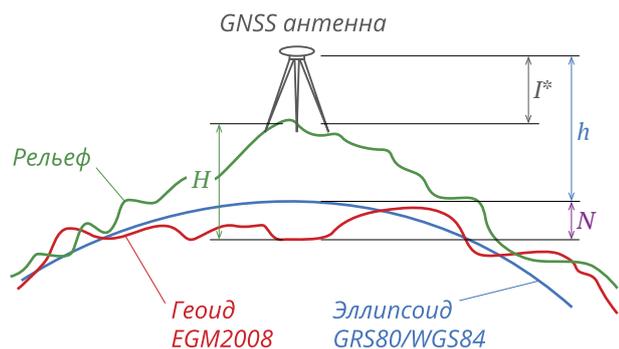
трудоемкости имеет производительность не более 5 км в неделю, поэтому мы не будем её рассматривать в данной работе. Программа наблюдений III класса даёт точность передачи отметки в 1 см уже через километр хода, в то время как программа II класса допускает длину хода до 4 км для той же точности, в связи с чем можно сделать следующий вывод:

Без создания дополнительных специальных построений нивелирной сети сгущения (полигонов) определения отметок реперов с абсолютной точностью не грубее 1 см можно достичь нивелированием по программе II класса при максимальном удалении определяемых реперов от исходных на расстояние не более 4 км.

Если использовать в качестве основного метода измерения высот метод геометрического нивелирования, нам потребуется достаточно высокая плотность пунктов ГВО. Дополнительно мы остановимся на этом вопросе в последующих разделах, а сейчас рассмотрим более подробно возможности спутниковых технологий в плане решения задачи высокоточной передачи высотных отметок.

Применение ГНСС для высотных определений

Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) давно и успешно используются для выполнения высокоточных определений разностей высотных отметок (превышений) между пунктами, в том числе разнесёнными на большие расстояния. В качестве иллюстрации



$$H = h - N - I^*$$

H — Ортометрическая высота (MSL)

h — Геодезическая высота эллипсоидальная (WGS84)

N — Высота геоида относительно эллипсоида

I^* — Высота антенны ГНСС приёмника над точкой

* Высота антенны ГНСС (I) с вертикальным домером до фазового центра

Рис. 1. Получение ортометрических высот ГНСС-методом с использованием модели геоида EGM2008

этого тезиса можно обратиться к материалам, опубликованным на сайте университета г. Берна, Швейцария [5]. Там приведены результаты анализа многолетних ГНСС-наблюдений, выполненных на представительной выборке пунктов, расположенных на разных материках. Расстояние между пунктами наблюдений достигает нескольких тысяч километров. Приведённые в работе данные наглядно иллюстрируют тот факт, что абсолютные изменения высот пунктов на разных континентах не превосходят по амплитуде 10 мм за период с 2003 по 2007 годы. Это свидетельствует о том, что современные методы ГНСС-измерений способны обеспечить определение высотной компоненты на уровне первых миллиметров. Однако необходимо сделать одну очень существенную оговорку — речь здесь идёт об эллипсоидальных высотах. В этом заключена ключевая разница между результатами высотных определений, получаемыми из ГНСС-измерений и из геометрического нивелирования. Поясним подробнее, о чём идёт речь.

В результате выполнения геометрического нивелирования определяются высоты точек относительно геоида (ортометрические высоты) или квазигеоида (нормальные высоты). Понятие квазигеоида было предложено в 1950-х годах русским учёным М.С. Молоденским в качестве вспомогательной поверхности, строго определяемой по результатам измерений (астрономо-гравиметрическое нивелирование). Поверхность квазигеоида совпадает с поверхностью геоида на территории Мирового океана и несколько отличается от неё на территории суши. Балтийская система высот 1977 года представляет собой именно систему нормальных высот. В качестве общемировой системы отсчёта высот используется поверхность общемирового геоида (EGM2008), и здесь речь идёт об ортометрических высотах. На равнинных территориях суши (при высотах над уровнем моря до 1500 м) разница между ортометрическими и нормальными высотами выражается в миллиметрах, тогда как в горной местности она может достигать метров.

Далее при описании связи между ГНСС-измерениями и геометрическим нивелирова-

нием мы будем оперировать понятием ортометрических высот (высот над поверхностью общемирового геоида). Там, где пойдёт речь о привязке к Балтийской системе (нормальных) высот 1977 года, будут приведены соответствующие пояснения.

На рисунке 1 проиллюстрирована взаимосвязь между эллипсоидальными и ортометрическими высотами.

В результате ГНСС-измерений, в отличие от геометрического нивелирования, получают не отметки высот, а значения декартовых трёхмерных координат в геоцентрической системе XYZ. Приведение их к формату геодезических координат BLN (широта, долгота, эллипсоидальная высота) происходит с использованием стандартных формул, приведённых в [6].

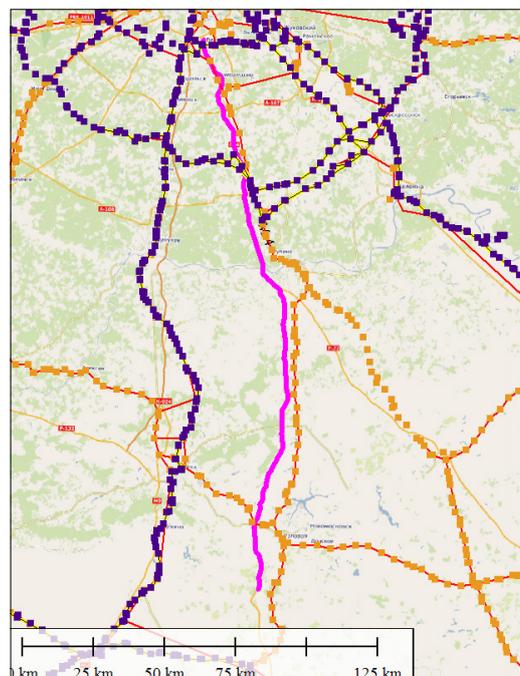


Рис. 2. Реперы ГВО I и II класса в районе работ (синим цветом показаны реперы I класса, оранжевым цветом — реперы II класса, пурпурным цветом выделен участок работ на трассе М-4)

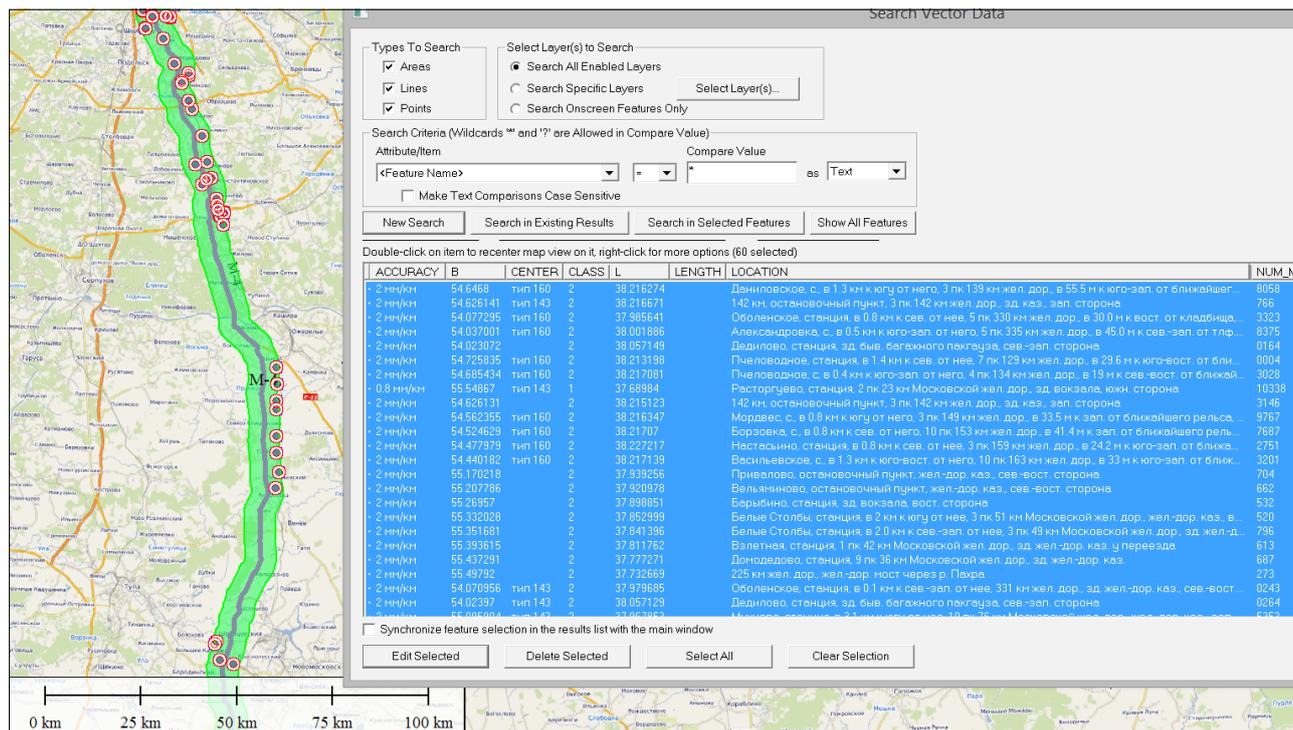


Рис. 3. Реперы ГВО в 4-километровой зоне по обе стороны от участка работ

Дальнейший переход от эллипсоидальных к ортометрическим высотам осуществляется в модуле уравнивания программного обеспечения постобработки ГНСС-измерений. Имеется два варианта решения этой задачи:

1. При отсутствии (или неиспользовании) модели геоида (квазигеоида) с известными параметрами производят ГНСС-измерения не менее чем на пяти точках с известными отметками в требуемой системе высот. Три точки необходимы для создания условной плоскости (для определения поверхности относимости), ещё две являются минимальным набором для контроля и выбора трёх точек с лучшим решением. На данную плоскость, как на локализованный геоид (квазигеоид), будут редуцироваться все определяемые точки.

Этот метод хорошо работает на сравнительно небольших участках местности диаметром (протяжённостью) не более 20 км при незначительных перепадах высот. В гористой местности этот метод работать не будет. Условная плоскость вполне заменяет геоид (квазигеоид) и может быть принята в качестве его замещения до тех пор, пока кривизна Земли на участке работ не станет оказывать сильное влияние на точность плоских координат.

2. Другим вариантом решения является использование модели мирового геоида в качестве матрицы высот, на которой производится интерполяция значений высот геоида над эллипсоидом (N) для широты и долготы точки измерений, с дальнейшим вычислением ортометрической высоты (H) вместо эллипсоидальной (h), — см. обозначения на рисунке 1.

Если использовать одну и ту же редакцию модели геоида для всех случаев ГНСС-определений высот на объекте работ, то неоднородности и ошибки самой модели геоида будут всегда участвовать во всех измерениях одинаково. Другими словами, результаты вычислений будут иметь систематическую погрешность, которую можно вычислить и компенсировать. В ходе постобработки ГНСС-измерений компенсация неоднородностей модели геоида происходит в момент фиксирования заведомо известного значения высоты хотя бы одной точки проекта в сеансе уравнивания всех векторов. Практика показывает, что в равнинной местности с перепадами высот не более 200 метров этот метод вполне оправдан для передачи отметок высокой точности, близкой к миллиметру.

Именно данный метод передачи высот предлагается использовать в качестве основного при развитии пунктов

плано-высотного обоснования — ведомственной опорной геодезической сети (ВОГС) Государственной компании «Автодор». Продолжительные (не менее 6 часов) ГНСС-измерения на пунктах каркаса ВОГС синхронно с реперами ГВО позволят с высокой точностью передать на пункты каркаса, а затем и на рабочие реперы (пары реперов) ВОГС отметки в Балтийской системе высот 1977 года. Для контроля полученных в результате ГНСС-измерений высотных отметок будут проложены ходы геометрического нивелирования II класса от высотных реперов ГВО до пунктов ВОГС. Для обеспечения уровня точности высотной привязки не грубее 1 см длина ходов геометрического нивелирования II класса не будет превышать 4 км.

Практика показывает, что использование ГНСС-технологий для передачи высотных отметок позволяет повысить производительность работ в десятки и даже сотни раз по сравнению с методом геометрического нивелирования. Более того, на выполнение работ спутниковыми методами не действуют жёсткие ограничения по длине нивелирного хода. Как уже было отмечено ранее, точность в 1 см при передаче высот ГНСС-методами может быть достигнута на очень больших расстояниях между пунктами



Рис. 4. Здание ж/д вокзала г. Венёв (Тульская область) после реконструкции

измерений. Однако помимо резкого выигрыша в производительности выполнения работ имеются и другие причины необходимости перехода на более современные технологии развития высотного обоснования. Речь о них пойдёт в следующем разделе.

Апробация предлагаемой методики создания ВОГС

В настоящее время по контракту с Государственной компанией «Автодор» на участке автодороги М-4 «Дон» протяжённостью порядка 200 км реализуется проект по развитию плано-высотного обоснования в соответствии с методикой, предложенной авторами в [1]. Ниже мы остановимся лишь на той части работ, которая связана с созданием высотного обоснования.

Вблизи интересующего нас участка трассы М-4 согласно схеме расположения реперов ГВО (рис. 2) имеется достаточно пунктов I и II классов, от которых в пределах 4 км нивелирного хода можно передать отметку на определяемые реперы сгущения.

Собственно процесс реализации координатного обеспечения в высотной основе можно представить следующими шагами:

1. Получение сведений о местоположении опорных пунктов ГВО в виде ГИС-слоя, который



Рис. 5. Уничтоженный стенной репер 1 класса на станции Расторгуево

можно использовать в качестве основы поисково-рекогносцировочных работ.

2. Определение буферных зон от ближайших реперов ГВО до объекта работ, в пределах которых нивелирование 2 класса даст требуемую точность обоснования.

3. Рекогносцировка с отысканием сохранившихся пунктов ГВО и определением пригодности их для спутниковых наблюдений.

Для определения подходящих для работы пунктов ГВО (с точки зрения обеспечения заданной точности измерений) была построена буферная зона шириной по 4 км в обе стороны от оси трассы М-4. На рисунке 3 представлены результаты выборки.

Всего в данную выборку попало 60 реперов ГВО, что заведомо больше необходимого для работы количества. Оставалось только выбрать наиболее удобные реперы с точки зрения логистики выполнения работ. Однако всё оказалось не так просто...

Вначале при анализе описаний объектов заложения выяснилось, что большинство пунктов являются стенными реперами с закладкой в стены (фундаменты) железнодорожных строений. Так, согласно выписке на станции Венёв (Тульская область) в 1979 году в фасаде здания вокзала была заложена пара реперов II класса. Однако здание было не так давно отреставрировано, и в результате перелицовки и отделки фасадов здания стенные марки бесследно исчезли (рис. 4).

На станции Дедилово (Тульская область) стенные марки были размещены в здании бывшего пакгауза. Он сгорел, после чего остатки фундамента были полностью разобраны. На мосту через р. Пахру (Московская область) в одной из опор ж/д моста числится в каталогах репер I класса. Опоры регулярно красят и латают цементом. Следов репера обнаружить не удалось. На ж/д станции Расторгуево (Московская область) высокоточный высотный репер был выломан асфальтовым катком практически в момент обследования (рис. 5). К сожалению, этот печальный список может быть продолжен.

Отыскание грунтовых реперов даже такого основательного метода заложения, как тип 160, по существующим описаниям также крайне затруднительно.

Вот пример классического описания нивелирного пункта первого класса:

*Вельяминово, с., сев. окраина его,
68 км шоссе Москва — Воронеж,
на перекрёстке дорог, в 42.2 м к сев.-зап.
от км. стб. 68/1016
в 26.8 м к юго-зап. от шоссе
Вельяминово — Михнево,
в 19.3 м к вост. от шоссе
в 19.0 м к югу от поворотного стб.
б/№ ЛЭП*



Рис. 6. Определение местоположения репера ГВО на местности

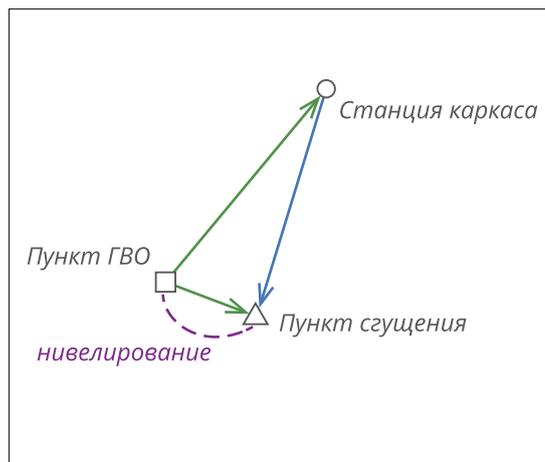


Рис. 7. Методы контроля полученных результатов

Попробуем восстановить эти размеры на местности.

Определение места расположения репера ГВО относительно ориентиров, указанных в описании, невозможно, поскольку столбы ЛЭП являются движимым имуществом. Изображенный на снимке (рис. 6) угловой столб ЛЭП перемещён в новое место. Промеры от километрового столба и дорог до предполагаемого репера указывают на густую лесополосу, которая, возможно, выросла с момента заложения репера в 1972 году. Наружный знак (охранный столб) утрачен, и, судя по развороченному грунту, произошло это во время монтажных работ по перемещению поворотной опоры ЛЭП. Пункт утерян.

В итоге из 20 обследованных реперов был найден только один, и то благодаря сохранившемуся в полосе отвода железной дороги опознавательному охранному столбику. Время, затраченное на обследование реперов высотной основы вдоль 200 километровой участка трассы М-4, составило три полных световых дня. Если сопоставить непроизводительные затраты на поиск реперов высотной основы со временем спутниковых наблюдений для передачи отметок на это расстояние, мы получим потерянное время, за которое можно было бы определить все пункты сгущения на данном участке ГНСС-методом.

Для контроля точности определения высотных отметок ГНСС-методом планируется использовать два метода:

- геометрическое нивелирование от реперов ГВО до реперов сети сгущения по программе наблюдений II класса;

- вычисление отметок реперов сети сгущения от отметок каркасных станций в отдельном решении ГНСС-определений.

На рисунке 7 зелёными стрелками изображены результаты вычисления программным обеспечением постобработки ГНСС-измерений высотных отметок пунктов каркаса и сгущения ВОГС относительно высотного репера ГВО. Синей стрелкой показано контрольное превышение (отметка) пункта сгущения, полученная относительно отметки пункта каркаса из ГНСС-метода. Пунктиром показана линия контрольного хода геометрического нивелирования.

Представленный на рисунке сегмент изображает независимое определение и контроль одного пункта сгущения из пары. Конструктивно предусмотрена компоновка пунктов сгущения ВОГС парами с обеспечением взаимной видимости между пунктами в паре. При этом в паре пунктов сгущения возникает ещё одно условие контроля по разности превышений, полученных геометрическим нивелированием пары.

Заключение

Мировой опыт применения ГНСС-технологий демонстрирует возможность передачи высотных отметок пунктов на большие расстояния с высокой точностью. Технология ГНСС-измерений способна кардинально повысить производительность выполнения нивелирных работ по сравнению с методом геометрического нивелирования без потери точности передачи высотных отметок.

В ходе реализации проекта на 200-километровом участке трассы М-4 «Дон» планируется продемонстрировать возможности высотных определений с помощью ГНСС-технологий для их последующего применения в дорожной отрасли. Результаты выполненных работ будут опубликованы в следующем выпуске журнала «САПР и ГИС автомобильных дорог».

Литература:

1. Гулин В.Н., Миронов С.А., Неретин А.А. Проблема обеспечения единого координатного пространства для объектов дорожной отрасли // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 1(4). С. 75–82. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.10.
2. Горобец В.П., Демьянов Г.В., Майоров А.Н., Побединский Г.Г. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Высотное и гравиметрическое обеспечение // Геопрофи. 2014. № 1. С. 5–11.
3. Хинкис Г.Л., Зайченко В.Л. К 140-летию государственной нивелирной сети России // Геопрофи. 2013. № 3. С. 60–65.
4. ГКИНП (ГНТА)–03–010–03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. Утверждена приказом Роскартографии 25.12.2003 г. № 181-пр.
5. Near-Seasonal Periods in GNSS Station Coordinate Time Series. L. Ostini et al. EGU2007A-06586, EGU General Assembly, Vienna, April 16–20, 2007. URL: http://www.bernese.unibe.ch/publist/2007/post/lo_egu_06_04.pdf (дата обращения: 28.09.2015).
6. ГОСТ 32453–2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. М.: Стандартинформ, 2014.