

УДК 528.422

DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-18-27

## **КОНТРОЛЬ КООРДИНАТ И ВЫСОТ ПУНКТОВ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТОДОМ PPP**

### ***Станислав Олегович Шевчук***

Российский институт радионавигации и времени, 192012, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120ЕЦ, 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. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

### ***Юрий Михайлович Зюзин***

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, зав. лабораторией полевой геофизики, тел. (383)222-48-55, e-mail: zyuzin54@mail.ru

### ***Андрей Хельдурович Мелеск***

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 67, ведущий инженер, тел. (383)22-45-86, e-mail: melesk-a-x@rambler.ru

В статье рассмотрена методика контроля ГНСС-измерений, выполняемых при навигационно-геодезическом обеспечении наземных геофизических исследований. Предложенная методика предполагает использование метода Precise Point Positioning и свободного программного обеспечения.

**Ключевые слова:** геофизика, гравиразведка, геодезическое обеспечение, ГНСС, контроль, Precise Point Positioning, стой-иди.

## **GRAVIMETRIC SURVEY POINTS POSITIONING SUPERVISING USING PPP**

### ***Stanislav O. Shevchuk***

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120EC, Prospect Obukhovskoy Oborony St., 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 Space and Physical Geodesy, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

### ***Yuri M. Zyuzin***

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 67, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Head of Laboratory of Field Geophysics, phone: (383)222-48-55, e-mail: zyuzin54@mail.ru

**Andrey Kh. Melesk**

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 67, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Leading Engineer, phone: (383)222-45-86, e-mail: melesk-a-x@rambler.ru

In article the technique of supervising of GNSS-measurements for navigational and geodetic support of ground geophysical works is considered. The technique contains Precise Point Positioning GNSS post-processing with free software and online-services.

**Key words:** geophysics, gravimetric survey, geodetic support, GNSS, supervising, Precise Point Positioning, Stop-and-Go.

В настоящее время геодезическое обеспечение геофизических работ, в частности гравиметрических, выполняется с использованием ГНСС-технологий. При этом при применении ГНСС-технологий для геодезического обеспечения геофизических работ необходимо учитывать специфику их выполнения, а именно:

– для определения плановых координат геофизических пунктов наблюдений обычно применяются кодовые ГНСС-приемники, которые обеспечивают невысокую точность определения местоположения [1–4];

– измерения высот требует не только применения аппаратуры геодезического класса (фазовые ГНСС-приемники), но и методов, обеспечивающих высокоточное позиционирование (относительный и дифференциальный методы, метод Precise Point Positioning);

– уметь выполнять переход от измеряемых геодезических высот к ортометрическим или нормальным высотам. В табл. 1 приведены нормативные требования к точности определения координат и высот пунктов гравиметрических наблюдений.

*Таблица 1*

Требования к точности определения координат и высот пунктов гравиметрических наблюдений [1]

Масштаб съемки	СКП определения положения пунктов геолого-геофизических наблюдений	
	в плане, м	по высоте, м
1 : 500 000	120 (200)	3,0 (5,0)
1 : 200 000	100 (100)	2,5 (3,0)
1 : 100 000	80 (100)	1,2 (1,8)
1 : 50 000	40 (50)	0,35 (0,9)
1 : 25 000	20 (25)	0,25 (0,45)
1 : 10 000	4 (5)	0,1 (0,25)
1 5 000	2 (2)	0,05

*Примечание:* в скобках приведены требования для горных районов.

При выполнении геодезических измерений на пунктах геофизических наблюдений, в частности, гравиметрических, в соответствии с инструкцией по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ требует обязательного контроля выполненных измерений [1]. Как правило, такой контроль выполняется путем повторных измерений на тех же пунктах геофизических наблюдений, на которых были проведены измерения (не менее 3–5% от общего количества пунктов) [2]. Другим методом контроля является применение геодезической аппаратуры с точностными характеристиками, выше заявленных при данном виде работ, для выполнения повторных измерений. На основе повторных измерений рассчитывается средняя квадратическая погрешность (СКП) определения координат и высот пунктов геофизических наблюдений, которая затем сравнивается с нормативной. В случае если рассчитанная СКП меньше нормативной, то геодезических измерений на пунктах геофизических наблюдений выполнены качественно, в противном случае нет.

В данной публикации будет рассмотрена возможность контроля плановых координат и высот пунктов геофизических наблюдений (в частности, гравиметрических) с применением метода Precise Point Positioning (PPP). Для апробации предлагаемой методики контроля выступали ГНСС-измерения, выполненные сотрудниками АО «СНИИГиМС» во время проведения гравиметрических работ масштаба 1 : 200 000 на Ирменско-Кирзенской площади в 2014–2016 гг. В рамках указанных работ использовалась технология ГНСС-измерений, подразумевающей относительный метод позиционирования от пунктов сети постояннодействующих базовых станций Новосибирской области (ПДБС НСО) и собственной базовой станции, размещаемой не далее 50 км от пунктов измерений [5, 6]. При этом, в силу невысоких требований к определению планового положения пунктов наблюдений, приемник крепился на автомобиле, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Закрепление антенны ГНСС-приемника на автомобиле при проведении гравиметрической съемки

Измерения проводились методом Stop-and-Go приемниками Leica Viva GS-10 и Javad Triumph-1, высота антенны измерялась во время остановок. Время наблюдений на пунктах геофизических наблюдений не превышало 5–7 минут (что, кроме прочего, было обосновано режимом работы гравиметров). Обработка измерений выполнялась в коммерческом программном обеспечении (ПО) Magnet Office Tools. Учитывая чувствительность режима измерений к срывам фазовых наблюдений и сложные условия приема сигналов (как на самих пунктах, так и при перемещении между ними), при обработке было получено большое количество решений с плавающим разрешением многозначности.

Уже при проведении данных работ рассматривалась возможность применения метода Precise Point Positioning (PPP), позволяющего получать необходимые точности без привязки к ближайшим базовым станциям. Метод PPP подробно описан в работах [7–10].

Очевидно, применение PPP для выполнения геодезического обеспечения (как минимум, для контроля надежности позиционирования) вызывает интерес. Имеющиеся исследования точности метода PPP, приведенные в открытых источниках (например, в [8–12]) относятся к статическому и кинематическому режимам ГНСС-измерений, однако отсутствует какая-либо информация о точности данного метода в режиме Stop-And-Go. Одной из причин отсутствия информации является отсутствие поддержки данного режима в большинстве программ и Web-сервисов, поддерживающих постобработку методом PPP. Например, в ПО GrafNav получение координат точек «стопов» соответствует началу «события» остановки [13].

Несмотря на данный факт, еще при выполнении исследований [5], метод был применен для дополнительного контроля определения плановых координат и высот пунктов геофизических наблюдений. Обработка ГНСС-измерений методом PPP выполнялась в ПО NovAtel GrafNav с подключением модели геоида EGM-2008, что позволяло оценить надежность полученных решений (особенно, в случае плавающего разрешения многозначности относительным методом), и принять решение о необходимости повторных измерений и/или принятии полученного результата.

Разности между координатами и высотами, полученными разными относительным методом от ближайшей базовой станции (менее 20 км) и методом PPP приведены в табл. 2 и на рис. 2 [5]. В таблице приведены сводные данные с использованием более 200 пунктов.

Таблица 2

Значения разностей плановых координат и высот, полученных относительным методом и методом PPP [6]

Характеристика	Максимальное отклонение $ \Delta _{\max}$		Среднее отклонение $\Delta_{\text{cp}}$		СКП m	
	в плане	по высоте	в плане	по высоте	в плане	по высоте
Значение, м	1,09	1,40	0,31	–0,19	0,34	0,24

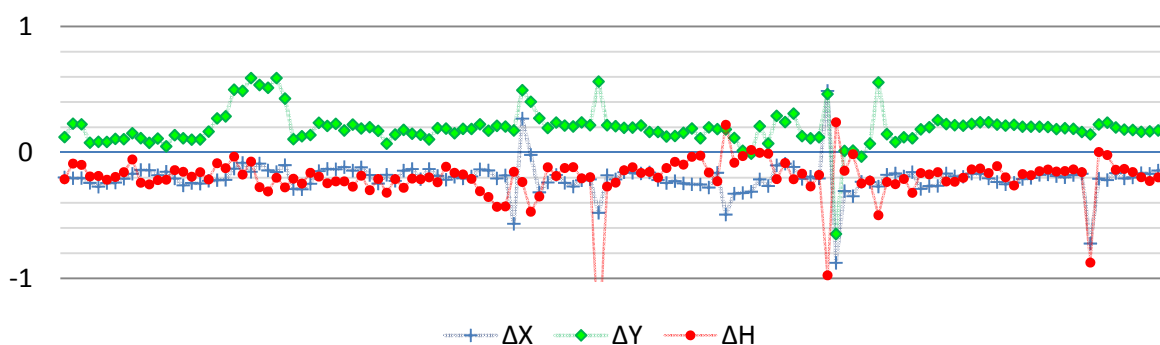


Рис. 2. Разности координат и высот, полученных относительным методом и методом PPP (GrafNav), в метрах [6]

В табл. 2 приведены разности планового положения в двух вариантах, так как используемые параметры пересчета к МСК-54/СК-95 (в которой были даны координаты пунктов ПДБС НСО) из ГОСТ [14] приводили к появлению систематической погрешности пересчета в плановых координатах. Использование локальных параметров пересчета практически полностью устраняют данную систематическую составляющую погрешности на ограниченной площади измерений.

Методика, описанная выше, сопряжена с использованием дорогостоящего ПО GrafNav, что в контексте ее использования для контроля измерений может быть неэффективно. Кроме того, использовавшаяся версия 8.2 на данный момент не поддерживает обновленные форматы поправок (апостериорных орбит и часов спутников), используемых для реализации метода после июня 2017 г.

Так как метод положительно зарекомендовал себя и, очевидно, имеет перспективы развития, для его реализации потребовалось найти альтернативный путь.

В качестве решения может быть предложено применение технологической цепочки на основе использования свободного ПО, поддерживающего обработку методом PPP. Данная методика предложена в рамках данной публикации.

В силу поддержки в открытом ПО RTKLib [15] модели геоида EGM2008, а также с учетом сравнительных исследований, приведенных в [11, 12] было решено использовать данное программное обеспечение вместо GrafNav.

Интерфейс RTKLib, включая карту-схему обработки одного дня измерений показан на рис. 3.

Серьезным ограничением свободного ПО и Web-сервисов постобработки ГНСС-измерений методом PPP является отсутствие режима измерений Stop-And-Go в подавляющем большинстве случаев, в том числе, и в RTKLib [15, 16].

Данная проблема может быть решена осреднением и фильтрацией кинематической траектории. Для выделения остановок из обработанной кинематической траектории может использоваться бесплатная утилита RouteEditor (рис. 4).

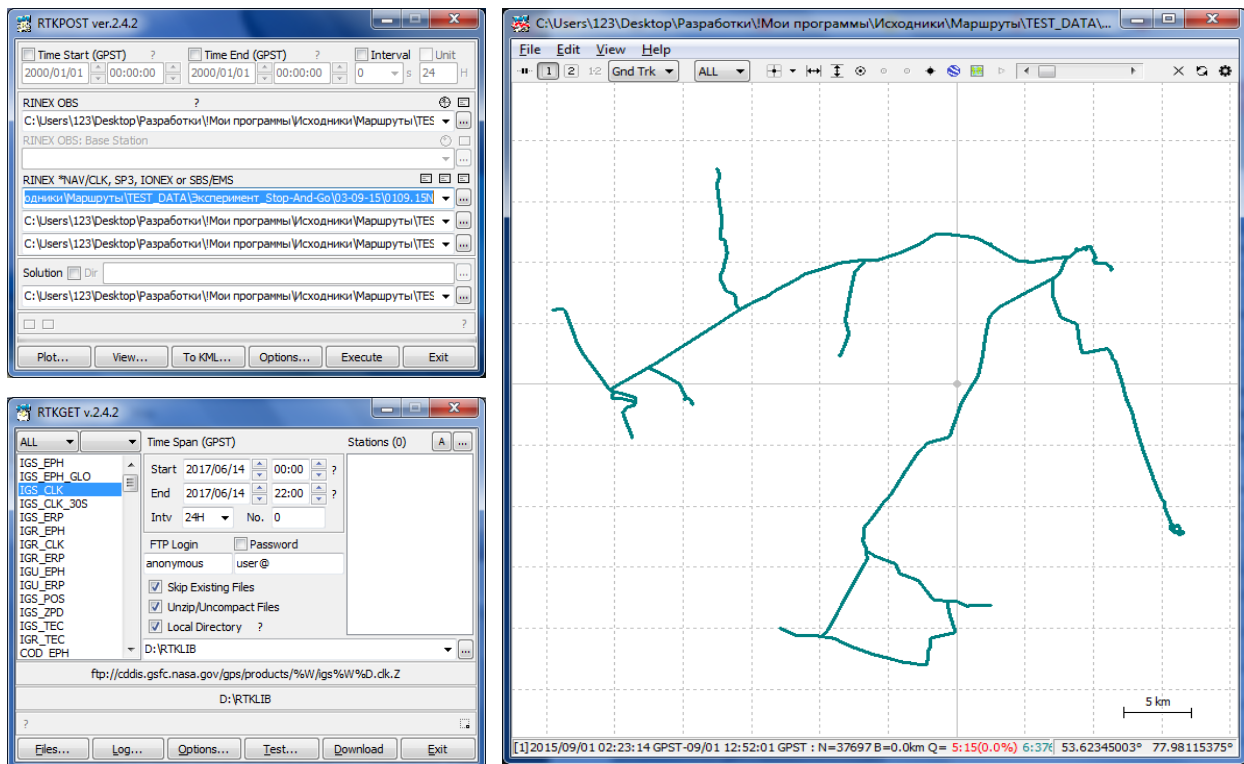


Рис. 3. Интерфейс RTKLib (модули RTKPOST, RTKGET и RTKPLLOT)

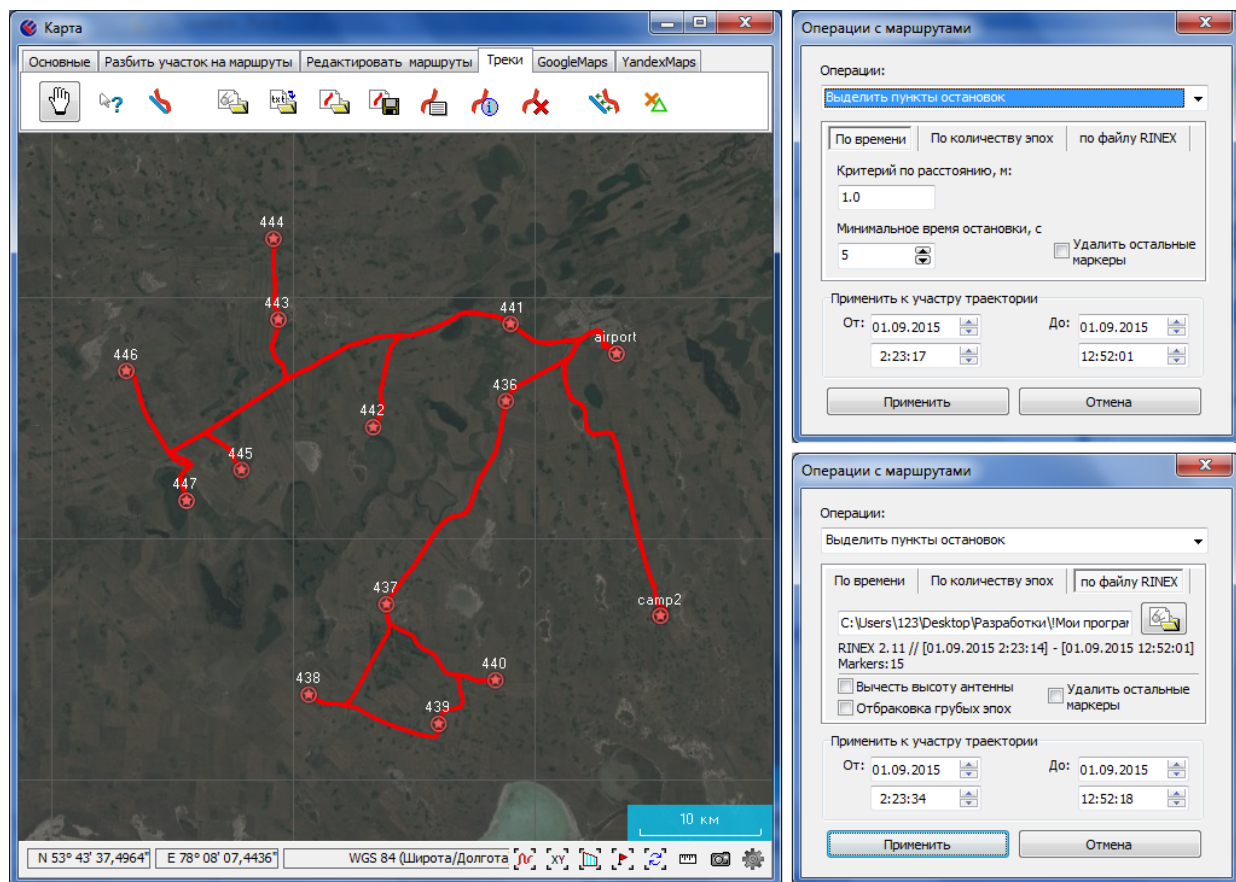


Рис. 4. Утилита RouteEditor с функцией выделения пунктов остановок

Остановки («стопы») могут определяться как по критериям времени и разброса координат, так и считываться из файла RINEX. Данный режим можно назвать «псевдо-Stop-and-Go».

При осреднении может использоваться фильтрация методом  $3\sigma$  в одну или несколько итераций (рис. 5).

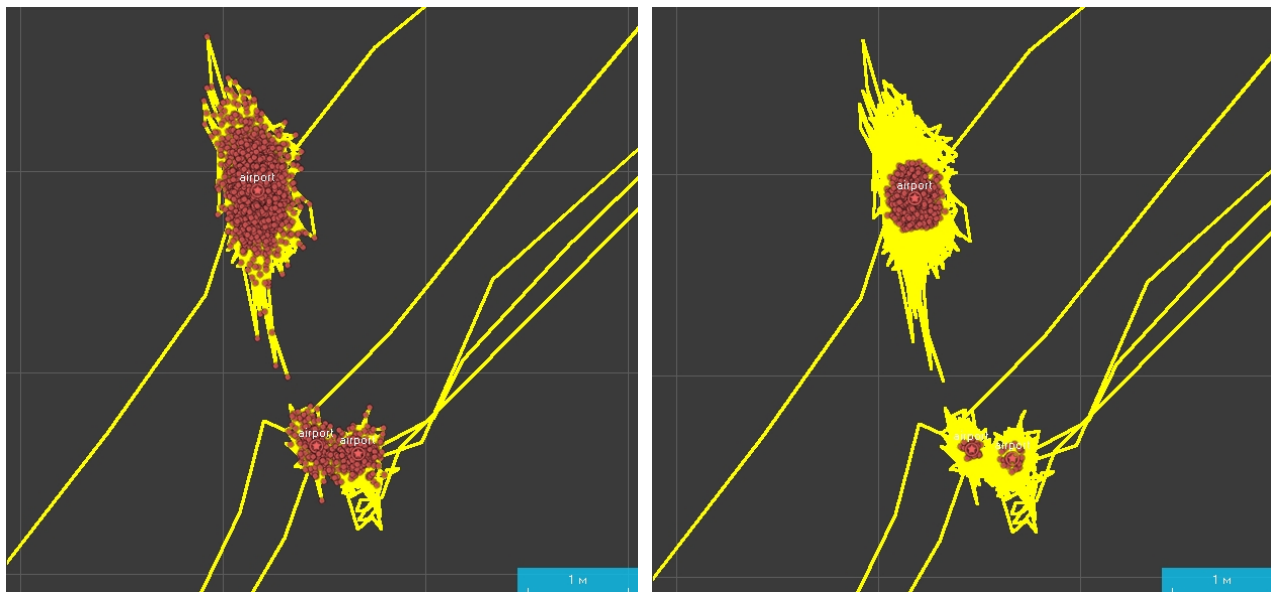


Рис. 5. Эпохи, участвующие в осреднении без фильтрации и с применением фильтра  $3\sigma$  в 3 итерации

В дальнейшем полученные координаты пунктов могут быть переведены в произвольную СК в любом бесплатном геокалькуляторе, например, в GeoCalc. На момент публикации данная утилита поддерживала пересчет из WGS-84 в СК-42, СК-95, ПЗ-90, проекции Гаусса-Крюгера и поперечная Меркатора, местные системы координат субъектов РФ и возможность добавления пользовательских СК.

Утилиты RouteEditor и GeoCalc входят в пакет программ RouteNav [17–19], полная версия которого является коммерческой и распространяется разработчиком ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» [19]. Отдельно от основной программы, RouteEditor и GeoCalc распространяются бесплатно.

Таким образом, обработка выполнялась в три этапа:

1) постобработка ГНСС-измерений в RTKLib:

- конвертация измерений в RINEX 2.x;
- загрузка с помощью модуля RTKGET файлов орбит и поправок к спутниковым часам с серверов международной ГНСС-службы (IGS);
- в случае отсутствия – загрузка модели геоида EGM08 с сайта национального геодезического агентства США (NGA) и базы данных калибровки ГНСС-антенн с сайта национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA);

- настройка RTKLib и запуск обработки;
- 2) осреднение «стопов» в RouteEditor:
  - импорт результатов обработки (файл \*.pos);
  - выделение «стопов» по меткам событий из измерений в формате RINEX;

3) пересчет координат в заданную СК с помощью геокалькулятора (при необходимости, с предварительной локализацией).

Полный цикл обработки одного дня измерений не превышает 25 минут, что примерно соответствует продолжительности обработки одного дня измерений относительным методом (около 20 минут).

В табл. 3 приведено сравнение координат и высот, полученных GrafNav и посредством связи RTKLib + RouteEditor. Сравнение выполнено для 50 пунктов, измеренных за 3 дня наблюдений. В эксперименте использовалась версия RTKLib 2.4.2.

*Таблица 3*

Сравнение координат и высот, полученных относительным методом и PPP в ПО GrafNav и по предложенной методике

Характеристика	Максимальное отклонение $ \Delta _{\max}$ , м		Среднее отклонение, $\Delta_{\text{ср}}$ м		СКП $m$ , м	
	в плане	по высоте	в плане	по высоте	в плане	по высоте
Сравнение с относительным методом	1,50	2,57	0,04	0,18	0,50	1,05
Сравнение с PPP (GrafNav)	1,23	1,60	0,09	-0,13	0,66	0,81

На рис. 6 показаны отклонения координат и высот пунктов геофизических измерений, полученных предложенным методом в сравнении с относительным методом и PPP GrafNav.

Исходя из полученных результатов, предложенный метод в настоящее время может использоваться для дополнительного контроля определения местоположения пунктов гравиметрических исследований для масштабов съемки не крупнее 1 : 200 000. Для более крупных масштабов требуется доработка метода и выполнение дополнительных исследований.

Учитывая большую адаптацию GrafNav к обработке кинематических измерений, данный результат связан, по большей части, с RTKLib. Кроме того, метод псевдо-Stop-and-Go также требует отдельных исследований.

Важно отметить, что самостоятельное применение указанной технологии затруднено отсутствием сертификатов СИ у свободного ПО.



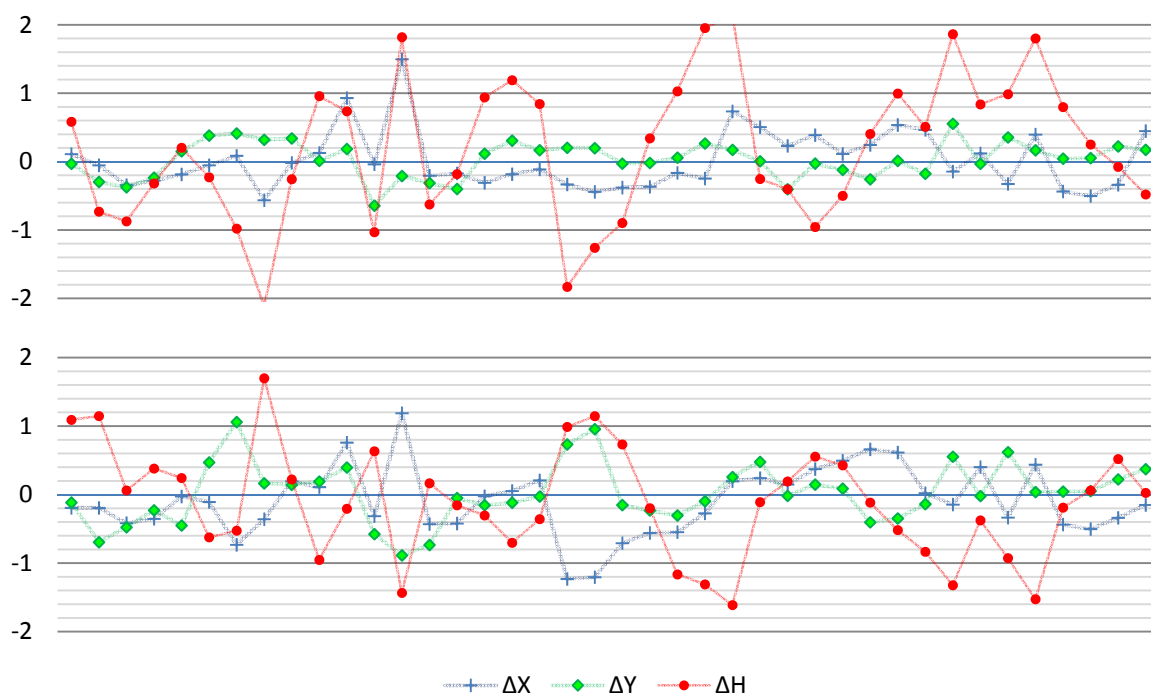


Рис. 6. Сравнение координат и высот точек, полученных предложенной методикой с результатами обработки относительным методом (вверху) и методом PPP в GrafNav (внизу)

Применение указанной методики контроля не ограничивается гравиметрией и может применяться, например, для контроля пунктов сейсморазведочных профилей. Контроль геодезического обеспечения геолого-геофизических работ позволяет повышать надежность измерений и избегать непредвиденных затрат, связанных с повторными измерениями, при несвоевременном обнаружении «проблемных» пунктов.

Использование свободного ПО делает предложенный метод экономически эффективным. Дальнейшие доработки и исследования предложенного метода позволяют повысить его точность, и, как следствие, расширить границы применения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 1997. – 106 с.
2. GPS-технология геодезического обеспечения геологоразведочных работ : метод. рекомендации / А. Г. Прихода, А. П. Лапко, Г. И. Мальцев, И. А. Бунцев. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 2008. – 274 с.
3. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. В 2 т. Т. 1. – М. : Картгеоцентр, 2005. – 334 с.
4. Hofmann-Wellenhof, B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle – Wien, New-York : Springer. – 2008. – 516 p. – Англ.

5. Шевчук С. О., Зюзин Ю. М. Применение измерений геодезической сети АБС НСО и метода PPP при геодезическом обеспечении геолого-геофизических работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 85–92.
6. Карпик А. П., Решетов А. П., Струков А. А. Определение координат пунктов сети базовой станций Новосибирской области // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 9–15.
7. Bisnath, S. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future / S. Bisnath, Y. Gao – Англ. – GPS World. – 2009. – No. 4. – P. 43–50. – Англ.
8. Антонович К. М., Липатников Л. А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (PPP) // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 44–47.
9. Chesagne, O. One centimeter accuracy with PPP // Inside GNSS. – 2012. – No 2. – P. 49–54.
10. Yu, X. Kinematic Precise Point Positioning Using Multi-Constellation Global Navigation Satellite System (GNSS) Observations / X. Yu, J. Gao // ISPRS Int. J. Geo-Inf. – 2017. – № 6, 6.
11. Шевчук С. О., Косарев Н. С., Антонович К. М. Сравнение коммерческих программ постобработки измерений ГНСС в режиме кинематики для геодезического обеспечения аэрогеофизических работ // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 79–102.
12. Шевчук С. О., Малютина К. И., Липатников Л. А. Перспективы использования свободного ПО для постобработки ГНСС-измерений // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 65–82.
13. GrafNav/GrafNet User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.novatel.com/assets/Document/Downloads/NavNet780\\_Manual.pdf](http://www.novatel.com/assets/Document/Downloads/NavNet780_Manual.pdf).
14. ГОСТ 32453–2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М. : Стандартинформ, 2013. – 19 с.
15. RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rtklib.com/>.
16. Ocalan T., Erdogan B., Tunalioglu N. Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques // Boletim de ciencias geodesicas. – 2013. – 19 (2). – P. 191–207.
17. Шевчук С. О., Барсуков С. В. Навигационное сопровождение аэрогеофизических исследований с использованием программы RouteNav // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 130–137.
18. Шевчук С. О., Никитин В. Н., Барсуков С. В. Выполнение навигационного обеспечения наземных и аэрогеофизических работ с использованием современного программно-аппаратного обеспечения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 266–275.
19. Шевчук С. О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614500 / Российская Федерация / Программа для навигационного обеспечения аэрогеофизических работ RouteNav / С. О. Шевчук, С. В. Барсуков; заявитель и правообладатель Закрытое акционерное общество «Аэрогеофизическая разведка» (RU); дата поступления 09 янв. 2017 г.; дата регистрации 18 апр. 2017 г.