

УДК 528.31/.41:629.783(571.1)
DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-76-94

СРАВНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ПУНКТОВ СЕТИ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ОНЛАЙН-СЕРВИСОВ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Вячеслав Евгеньевич Терещенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант, тел. (953)766-70-14, e-mail: taboretzvigyn@mail.ru

Елена Константиновна Лагутина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: e.k.lagutina@snga.ru

В статье показаны возможности использования онлайн-сервисов при обработке измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС-измерений), описаны их достоинства и недостатки. Приведены результаты оценки точности высокоточного местоопределения пунктов сети ПДБС НСО различными онлайн-сервисами. Выполнено сравнение результатов обработки ГНСС-измерений онлайн-сервисами с методом классической обработки и методом отдельной обработки в программном обеспечении Trimble Business Centre v.4.0. Показано, что результаты четырех из шести сервисов согласуются с эталонными значениями координат на уровне, не превышающем 2,5 см, а также превосходят по точности результаты, полученные методом отдельной обработки ГНСС-измерений. Полученные в результате эксперимента скорости смещений пунктов сети ПДБС НСО сопоставлены с общемировыми моделями движения точек земной поверхности. Также онлайн-сервисы оценены по результатам ГНСС-измерений, выполненных в других частях земного шара.

Ключевые слова: ГНСС-измерения, онлайн-сервис, постобработка, Trimble Business Centre, метод PPP, высокоточное местоопределение.

Введение

Для определения местоположения пунктов в общеземной системе координат можно использовать следующие методы с применением технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС): абсолютный, относительный и дифференциальный [1]. С развитием ГНСС-технологий повышается уровень точности определения координат пункта, который зависит не только от методов определения местоположения, но и от режима обработки ГНСС-измерений [2]. Наиболее точным режимом измерений является постобработка, поскольку здесь может использоваться большое количество дополнительной информации (вычисленные точные эфемериды спутников, применение моделей тропосферной и ионосферной задержек, параметры вращения Земли и пр.) [1, 2].

Программное обеспечение (ПО) для обработки ГНСС-измерений может реализовывать различные методы обработки, среди них:

- вычисление базовых линий (относительный) [3];

– точное точечное местопределение (англ. – Precise Point Positioning, PPP) (дифференциальный) [4–6].

Существуют программы, реализующие тот или иной метод обработки с открытым кодом и лицензионное ПО коммерческих компаний со скрытым кодом. ПО с открытым кодом (как правило, разрабатывается научными организациями) предназначено для свободного использования, распространения и совершенствования алгоритмов, имеет широкий спектр возможностей настроек и сложный малоадаптированный для пользователя интерфейс. Коммерческое ПО имеет интуитивно понятный интерфейс, наглядный вывод отчетов об обработке, но алгоритмы вычислений скрыты от пользователя. Достоинства и недостатки их использования, сравнение точности результатов обработки описаны в ряде публикаций [7–11].

Результатом объединения возможностей научного ПО, с доступностью и простотой решений, характерными для коммерческого ПО, являются онлайн-сервисы обработки ГНСС-измерений. Такие сервисы полностью основаны на научном ПО, а алгоритмы обработки максимально оптимизированы для простоты использования. Онлайн-сервисы реализованы на удаленном сервере, доступ к которому посредством сети интернет существует у неограниченного круга пользователей.

В процессе вычислений онлайн-сервисы работают в режиме постобработки и используют для этого продукты сети Международной ГНСС-службы (МГС, англ. – International GNSS Service) [12]. Важнейшей частью каждого сервиса являются ГНСС-измерения на пунктах сетей постоянно действующих базовых станций, созданных в соответствующем регионе. Примерами таких сетей являются:

- CORS – сеть ПДБС США;
- EUREF – Европейская постоянно действующая сеть пунктов ГНСС;
- ARGN – Австралийская региональная сеть пунктов ГНСС;
- SPRGN – региональная сеть пунктов ГНСС в южной части Тихого океана и пр.

Региональные сети ПДБС позволяют решать задачи единого координатно-временного и навигационного обеспечения на территории и задачи региональной геодинамики посредством анализа поля смещений пунктов, вызванных естественными геофизическими процессами. С июня 2010 г. на территории Новосибирской области функционирует сеть ПДБС (ПДБС НСО) [13–15]. В научных целях доступ к измерениям сети может быть предоставлен зарегистрированным пользователям на ресурсе [16].

Для изучения возможностей и точностных характеристик различных методов обработки ГНСС-измерений выполнено сравнение результатов использования некоторых онлайн-сервисов и коммерческого программного обеспечения Trimble Business Centre v.4.0 (ПО ТВС) на примере сети ПДБС НСО. Сравнение результатов обработки, выполненной по разным методикам с помощью ПО ТВС, с результатами обработки различными онлайн-сервисами позволит оце-

нить влияние различия алгоритмов моделирования эффектов, воздействующих на спутниковые измерения, и оценить их значимость при определении местоположения.

Онлайн-сервисы обработки спутниковых измерений

Среди инструментов обработки ГНСС-измерений онлайн-сервисы можно вынести в отдельный сегмент, так как они имеют следующие преимущества перед классическими методами обработки:

- свободный доступ к алгоритмам передового профессионального научного ПО для высокоточного местопределения точки благодаря возможности учета множества факторов, влияющих на точность;
- не требуется установка специализированного программного обеспечения на рабочем компьютере;
- при работе с данными достаточно стандартного браузера;
- облегченный интерфейс и несложный, интуитивно понятный процесс работы;
- отсутствует проблема совместимости между той или иной программой и операционной системой на компьютере пользователя;
- отсутствует необходимость отслеживания обновления, онлайн-сервис всегда содержит самую актуальную версию программы;
- онлайн-сервис доступен всегда и везде, где есть доступ к интернету, и не привязан к конкретному компьютеру;
- большая часть услуг, предоставляемая онлайн-сервисами, оказывается бесплатно, но существуют и коммерческие разработки.

К недостаткам можно отнести тот факт, что серверы, на которые посылаются спутниковая навигационная информация, принимаемая приемниками на территории Российской Федерации, находятся за пределами страны. Это приведет к утечке информации, в том случае, если измерения производились на объектах с ограниченным доступом.

По методике определения координат пунктов онлайн-сервисы обработки спутниковых измерений делятся на два типа:

- основанные на методе PPP;
- основанные на относительном методе.

Принципиальное отличие двух методик заключается в том, что в первом методе высокоточное определение координат происходит за счет применения апостериорно уточненной эфемеридно-временной информации. Также методика PPP обеспечивает определение местоположения точки без непосредственной привязки к наземной координатной основе [17]. Методика, основанная на относительном методе, напротив, привязана к наземной координатной основе. В этом случае определение координат выполняется с вычислением вектора базовой линии, построенным от опорной точки с известными точными координатами до определяемой точки.

Для проведения исследования были выбраны следующие онлайн-сервисы, основанные на методе PPP:

– CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System, Precise Point Positioning Service). Сервис точного местоопределения, основанный на методе PPP Министерства природных ресурсов Канады [18];

– Magic GNSS. Сервис для обработки ГНСС-данных, поддерживаемый организацией Aerospace and Defense S.A.U. «GMV» в г. Мадриде [19];

– Trimble RTX (Trimble Center Point RTX™). Сервис глобального высокоточного местоопределения, разработанный и поддерживаемый компанией Trimble Navigation, США [20].

Онлайн-сервисы, основанные на относительном методе определения координат:

– AUSPOS (Geoscience Australia Online GPS Processing Service). Онлайн-сервис обработки GPS-данных, Австралия [21];

– OPUS (Online Positioning User Service). Онлайн-сервис высокоточного местоопределения, подконтрольный Национальной геодезической службе США [22];

– SOPAC SCOUT (Scripps Coordinate Update Tool of Scripps Orbit and Permanent Array Center). Сервис вычисления точных координат станции на местности, разработанный и поддерживаемый институтом океанографии им. Скриппса в Калифорнии [23].

Все сервисы работают только с двухчастотными данными приемников для сведения неопределенности местоопределения к минимуму (за исключением CSRS-PPP, где есть возможность обработки одночастотных измерений). Они бесплатны, просты в использовании, обрабатывают измерения, выполненные в любой точке земного шара, и формируют результаты с равнозначным уровнем точности. Поскольку каждый из приведенных сервисов использует уникальный базовый инструмент и стратегию обработки, сервисы образуют отличную проверку надежности алгоритмов друг друга [24]. В табл. 1 приведены некоторые параметры и особенности онлайн-сервисов и ПО ТВС, при которых выполняется обработка ГНСС-измерений.

Помимо вышеперечисленных онлайн-сервисов, существуют другие аналогичные службы определения координат, в том числе работающие в пределах зоны действия национальных спутниковых геодезических сетей, например: SAPOS – немецкая служба постобработки ГНСС-измерений; Position NZ-PP – служба постобработки данных ГНСС Новой Зеландии и пр.

В Российской Федерации предпринимаются шаги для создания собственного национального сервиса для постобработки данных спутниковых измерений. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО), г. Королев, запустил сервис уточнения координат, работающий на основе относительного метода, используя алгоритмы обработки сверхдлинных базовых линий [25]. ОАО «Российские коммерческие системы» разработало систему высокоточного местоопределения [26] для определения координат пункта относительным методом, используя систему ГЛОНАСС.

Параметры онлайн-сервисов и ПО ТВС для обработки ГНСС-измерений

Наименование параметров	Метод PPP			Относительный метод			ПО
	CSRS-PPP	Magic GNSS	Trimble RTX	AUSPOS	OPUS	SOPAC	ТВС
Поддерживающая организация. Страна	Министерство природных ресурсов Канады	Оборонная и аэрокосмическая компания (GMV). Испания	Компания Trimble Navigation Ltd. США	Австралийское научное сообщество изучения Земли	Национальная геодезическая служба США (NGS)	Институт океанографии им. Скриппса. США	Компания Trimble Navigation Ltd.
Наименование используемого ПО	SPARK	Собственные программные коды	Собственные программные коды	Bernese	PAGES	GAMIT	ТВС v. 4.0
GPS	с 2009	с 01.01.2009	с 14.05.2011	с 01.01.1996	с 01.01.2010	да	да
ГЛОНАСС	с 2011	с 01.01.2014	с 14.05.2011	нет	нет	нет	да
Beidou	нет	нет	с 04.06.2014	нет	нет	нет	да
Galileo	нет	с 01.01.2014	с 01.01.2017	нет	нет	нет	да
SBAS	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
QZSS	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
Кинематический режим	да	да	нет	нет	нет	нет	да
Выбор ГНСС при обработке	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
Поддержка RINEX 2.11 и сжатые форматы*	да	да	да	да	да	да	да
Поддержка RINEX 3.0	да	да	да	нет	нет	нет	да
Продолжительность сеанса	до 24 часов	до 24 часов	от 10 мин до 24 часов	от 1 часа до 7 суток	от 2 до 48 часов	от 1 до 24 часов	нет
Дискретность измерений	интерполяция, если чаще 1 Гц	1, 2, 5, 10, 15, 30, 60 и 300 с	10, 15, 30, 60 с	1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 300 с	автопрореживание до 30 с	автопрореживание до 30 с	нет
Ограничение размера	нет	нет	нет	нет	нет	10 Мб	нет
Регистрация	да	нет	да	нет	нет	нет	лицензия

*Сжатые YYo.gz, YYd.gz, YYo.Z, YYd.Z, YYo.zip, YYo.pkzip, YYo.bz, YYo.bz2, UNIX, или Hatanaka форматы.

К сожалению, для проведения исследования и сравнения с другими онлайн-сервисами оказалось невозможно применить российские сервисы. При подаче запроса на обработку суточного сеанса одного пункта среднее время выполнения обработки составило более трех суток, а итоговый результат определения координат отличался от результатов сервисов, выбранных для исследования, более чем на 50 м в системе координат ITRF. Другой российский сервис высокоточного местоопределения также не удалось применить по причине сбоя в программе клиента для подачи файла измерений на сервер. В литературе [27] приводится ряд причин, по которым создание отечественных сервисов для обработки ГНСС-измерений на сегодняшний день представляется затруднительной задачей.

Сравнение с классическим методом определения координат

Суть исследования заключалась в определении относительных смещений и скоростей смещений пунктов сети ПДБС НСО доступными онлайн-сервисами обработки ГНСС-измерений. Сравнение полученных результатов между собой, а также с результатами, полученными классическим методом обработки в ПО ТВС, позволит сделать выводы о надежности применения данных онлайн-сервисов в качестве инструмента для высокоточного местоопределения точки.

Под термином «классическая методика» понимается общепринятая методика определения координат пунктов [13, 28, 29], реализованная в виде обработки векторов базовых линий в ПО ТВС, построенных от исходного пункта до определяемого, с последующим выполнением уравнивания всего геодезического построения.

Применяя данную методику, на эпоху 2013.01.02 были обработаны четырехсуточные ГНСС-измерения 18 пунктов сети ПДБС НСО (совокупность этих пунктов являлась первой очередью построения сети ПДБС НСО). На первом этапе были рассчитаны координаты пункта NSKW путем вычисления векторов базовых линий от опорных пунктов МГС, находящихся на расстоянии свыше 1 500 км (ARTU, BADG, NRIL, POL2, URUM). При обработке использовались данные точных эфемерид. На втором этапе опорным пунктом являлся пункт NSKW, от которого сетевым методом были распространены базовые линии на остальные пункты ПДБС НСО. На третьем этапе производилось минимально ограниченное уравнивание сети с фиксацией в качестве опорного пункта NSKW. В данной работе значения, рассчитанные таким образом, приняты за эталонные, так как имеют наименьшую среднеквадратическую ошибку (СКО), не превышающую 0,007 м для каждой станции. На рис. 1 приведена общая схема сети для выполнения расчетов.

При обработке онлайн-сервисами общее уравнивание всей сети не производится, так как одновременно в обработке используются измерения только одной определяемой станции, в отличие от классической обработки с уравни-

ванием сети. Вследствие этого факта, сравнение с результатами, полученными онлайн-сервисами, будет не объективно. Для более объективного сравнения результатов, 24-часовые ГНСС-измерения дополнительно были обработаны методом отдельной обработки в ПО ТВС, который заключался в оценке измерений каждого пункта сети ПДБС НСО отдельно, то есть самостоятельно относительно пунктов МГС, вне связи с другими пунктами сети ПДБС НСО. Уравнивание производилось только относительно опорных пунктов МГС. На рис. 2 приведена схема отдельной обработки каждого пункта сети.

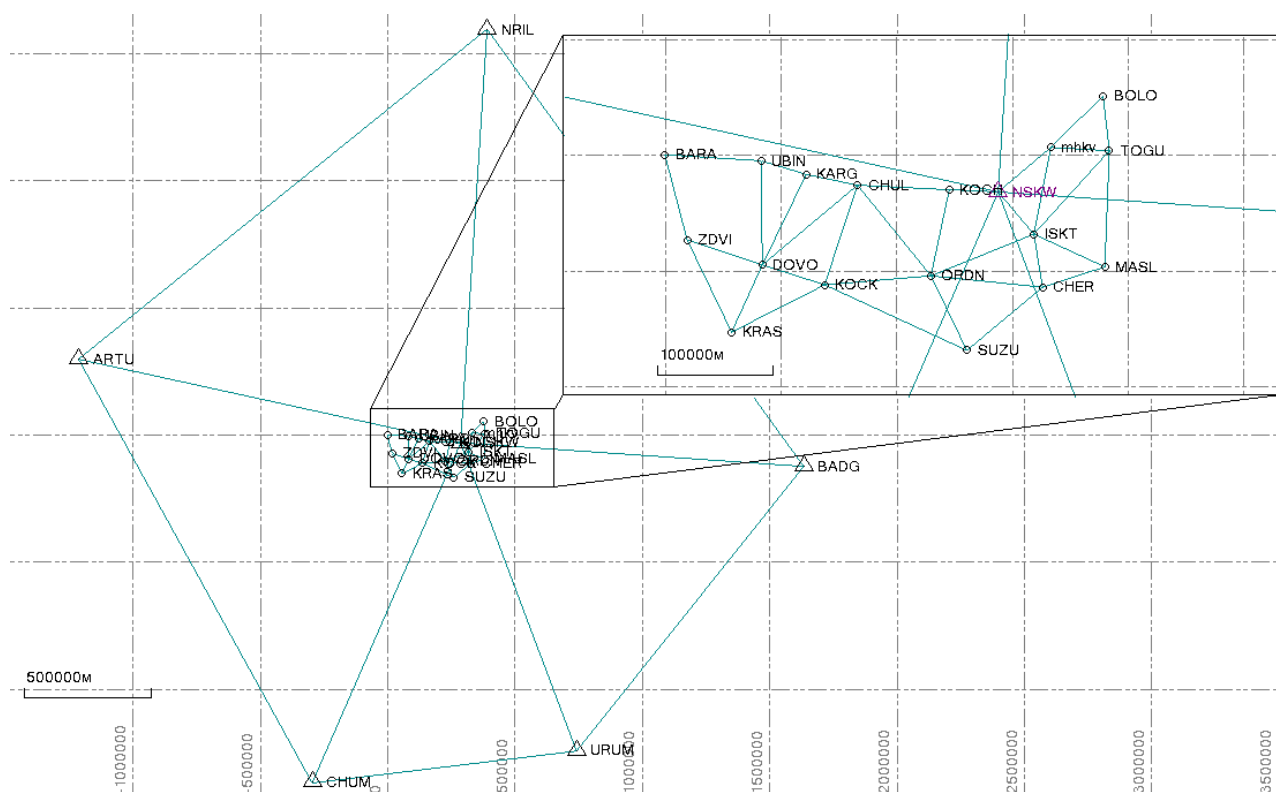


Рис. 1. Схема сети ПДБС НСО при классическом методе обработки ГНСС-измерений в ПО ТВС

Для обработки онлайн-сервисами, ГНСС-измерения пунктов сети ПДБС НСО продолжительностью 24 часа были загружены на соответствующий удаленный сервер после процедуры регистрации (если требовалось). Вычисленные результаты отправлялись автоматически на указанный адрес электронной почты в файле отчета об обработке не позднее 15 минут после подачи запроса.

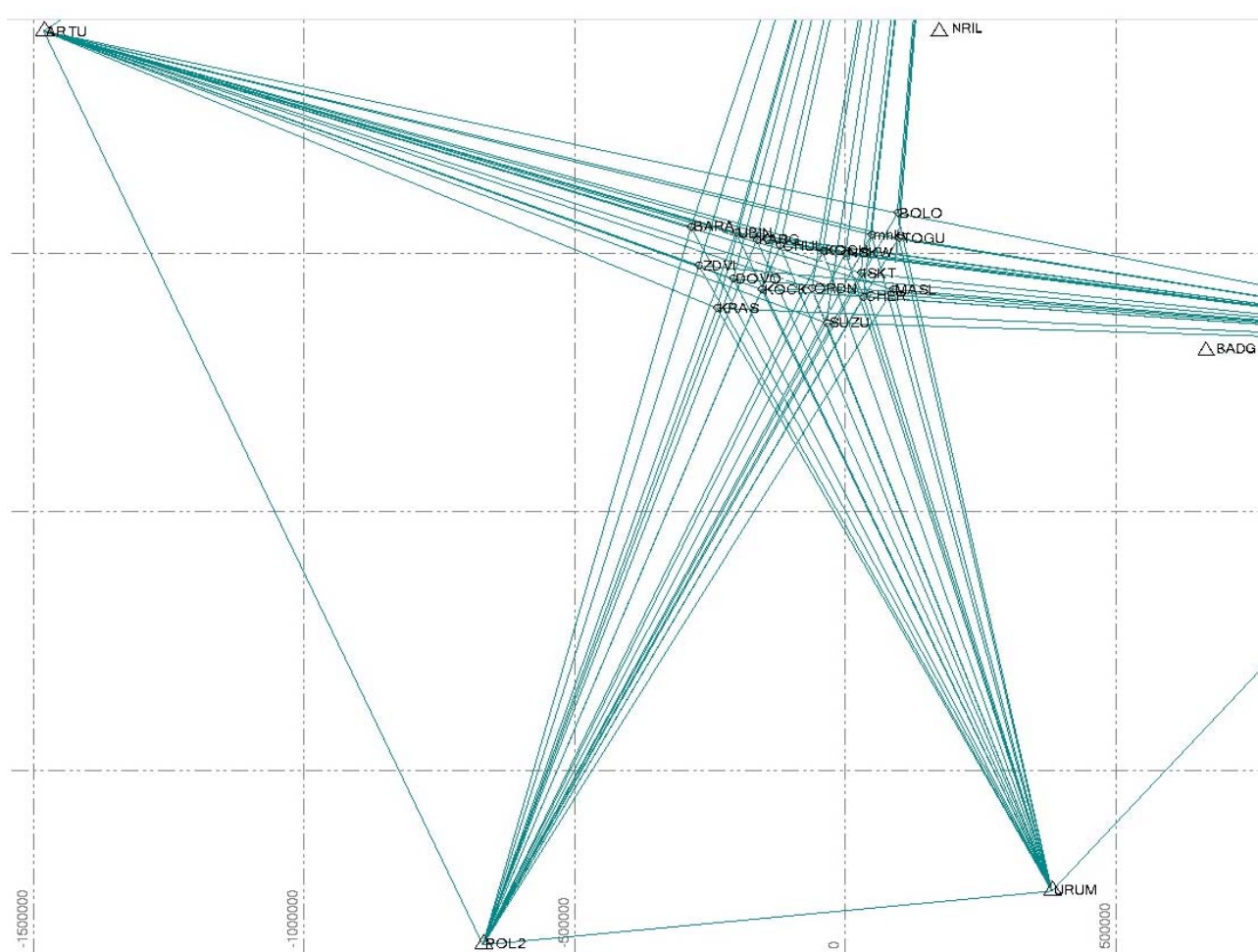
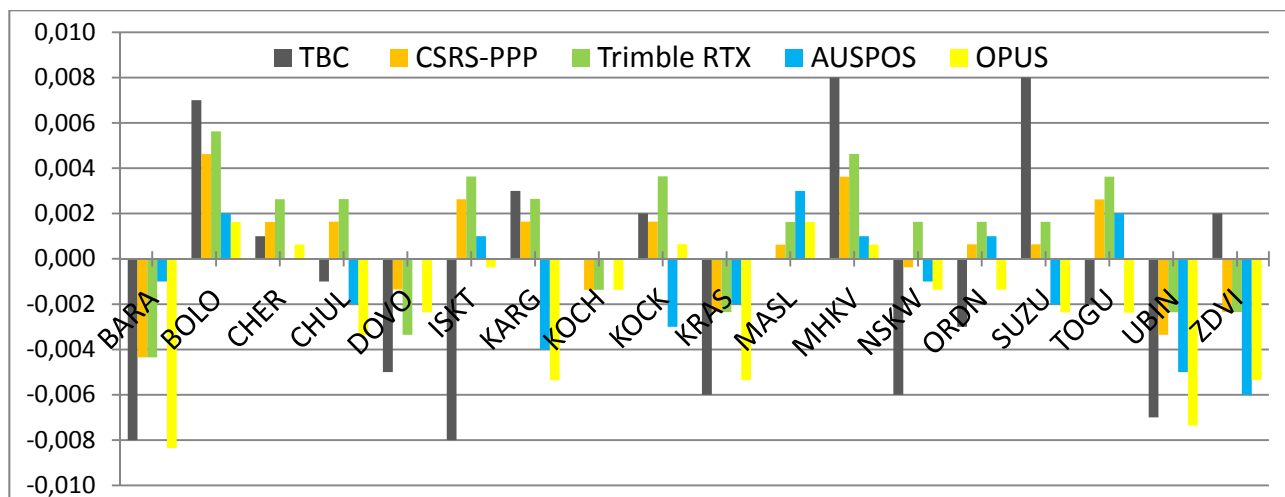


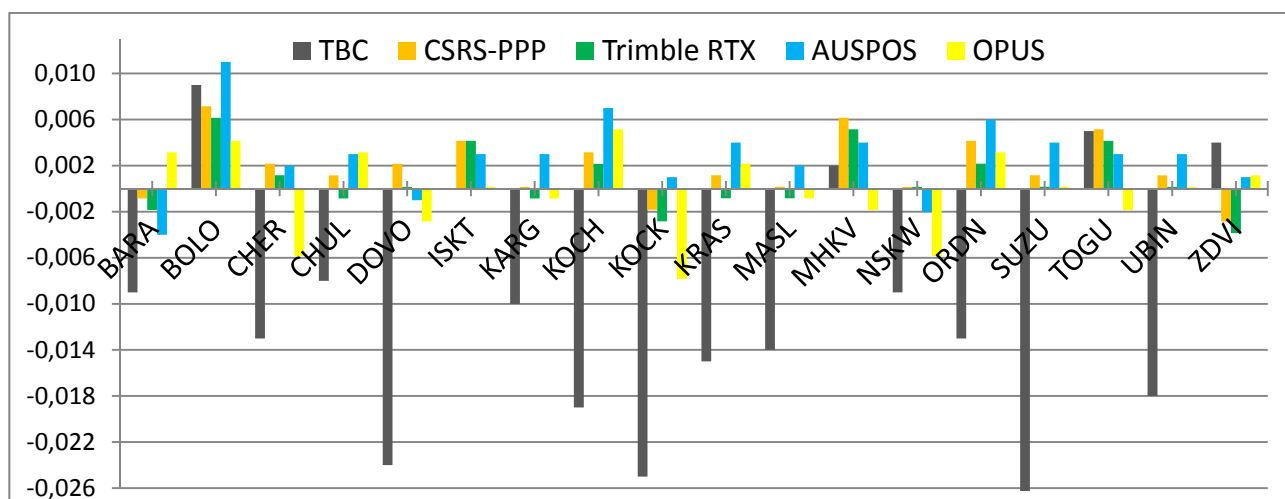
Рис. 2. Схема сети ПДБС НСО при методе отдельной обработки ГНСС-измерений каждого пункта в ПО ТВС

Сравнение результатов обработки ГНСС-измерений представлено на рис. 3 в виде разности координат, полученных при классической обработке с минимально-ограниченным уравниванием всей сети в ПО ТВС и обработке измерений каждого пункта с помощью онлайн-сервисов (цветные линии), а также по методике отдельной обработки измерений каждого пункта сети ПДБС НСО в ТВС (серые линии). Разницы результатов классической обработки и отдельной обработки на графиках условно обозначены «ТВС».

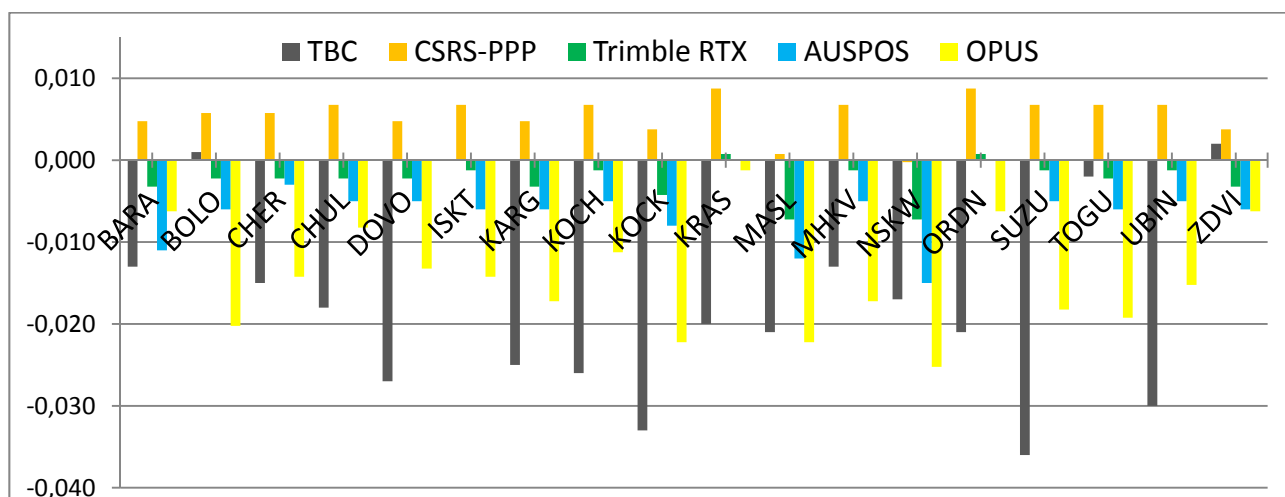
Обработка измерений проводилась на эпоху 2013.01.02. Значения разностей координат представлены по вертикальной шкале в метрах. Все результаты, полученные не в ITRF2014, были преобразованы в ITRF2014 на соответствующую эпоху с помощью параметров трансформации, доступных на сайте ITRF [30].



а)



б)



в)

Рис. 3. Разности координат, полученных с применением онлайн-сервисов и по методике отдельной обработки в ПО ТВС с координатами, полученными классическим методом обработки
 а) по координате X; б) по координате Y; в) по координате Z

Показанные на графиках разности рассчитанных координат пунктов ПДБС НСО онлайн-сервисами и уравненных координат показывают, что результаты таких сервисов, как CSRS-PPP, Trimble RTX, AUSPOS, OPUS, находятся в пределах: по координате $X \pm 0,8$ см, по координате $Y \pm 1,1$ см и по координате $Z \pm 2,5$ см – от эталонных значений координат. СКО вычисленных координат этими сервисами не превышают 1,8 см по каждой из координат X , Y , Z (по данным из отчетов об обработке измерений, высланных сервисами).

Результаты, полученные такими сервисами, как Magic GNSS и SOPAC SCOUT, не включены в графики, так как имеют систематическую ошибку в вычислениях, достигающую 15,4 см, а в отдельных случаях – десятков сантиметров, например, на пункте TOGU (Тогучин). СКО вычисленных координат сервисом SOPAC SCOUT не превышает 5,1 см по каждой из координат. Сервис Magic GNSS в отчете не предоставляет информацию о СКО вычисленных координат пункта.

СКО решений, полученных методом отдельной обработки каждого пункта ПДБС НСО относительным методом от станций МГС в ПО ТВС по каждой координате, не превышает 3,4 см.

СКО уравненных координат пунктов сети с фиксацией в качестве опорного пункта NSKW (эталонные координаты) не превышают 0,7 см.

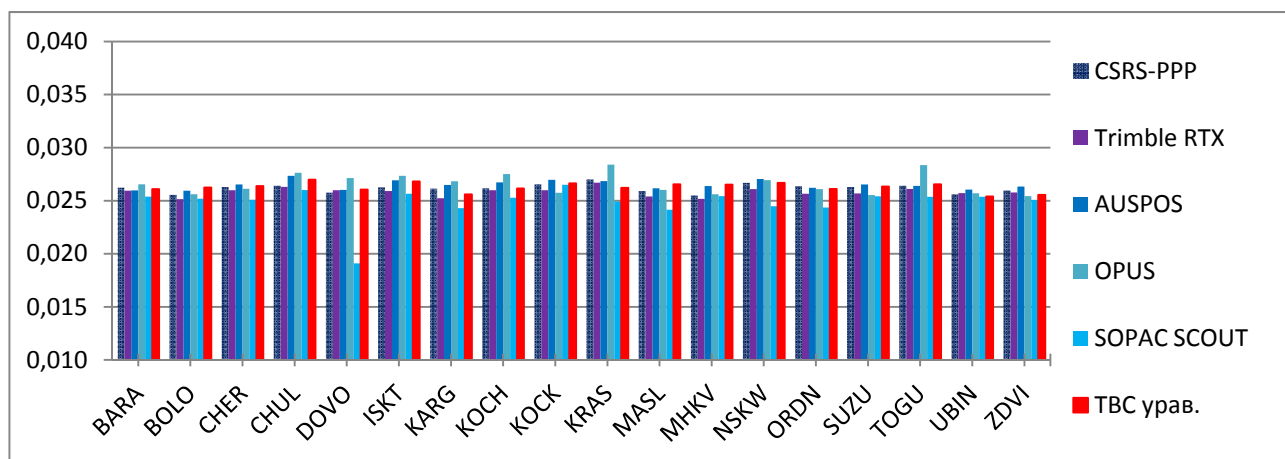
Полученные результаты позволяют констатировать, что точность определения координат онлайн-сервисами для суточных сеансов ГНСС-измерений сопоставима с точностью, достигаемой классическим методом определения координат и превосходит по точности метод отдельной обработки каждого пункта сети, несмотря на то, что онлайн-сервисы реализуют аналогичный метод отдельной обработки каждого пункта. Это говорит о том, что в алгоритмах онлайн-сервисов применяются более адекватные модели прогнозирования различной уточняющей информации, а также используется большее количество прочих моделей, недоступных в коммерческом ПО (лунно-солнечные приливы, неравномерность оси вращения Земли, приливы в твердом теле Земли, океаническая нагрузка и др.).

Точность местоопределения не зависит от метода определения координат. Сервисы, использующие метод PPP, и сервисы, работающие по методике относительного позиционирования, при обработке суточных измерений, выполненных на территории Новосибирской области, в точности определения координат пунктов преимуществ друг перед другом не имеют, несмотря на совершенно разный подход в обработке.

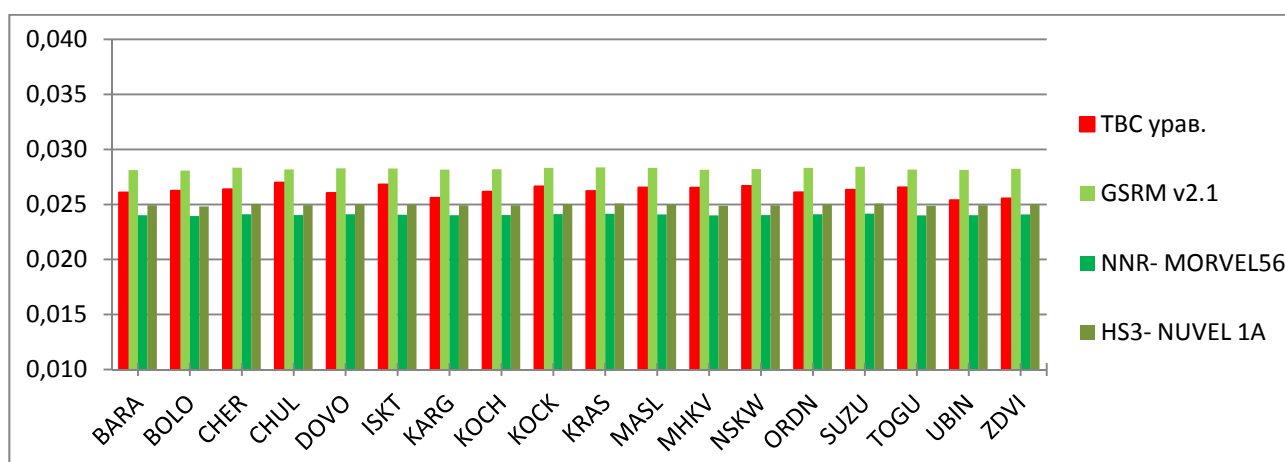
Определение скоростей смещения пунктов сети ПДБС НСО с применением онлайн-сервисов. Сравнение с моделями движения

Для определения смещений и скоростей смещений были выбраны две эпохи определения координат пунктов сети ПДБС НСО, на которые были доступны данные ГНСС-измерений, это 2013.01.02 и 2017.03.01. Обработка проводи-

лась с помощью вышеприведенных онлайн-сервисов и с помощью ПО ТВС с последующим уравниванием геодезического построения. Разность между полученными значениями является смещением пункта за период. Полученные значения были пересчитаны с учетом прошедшего времени и представлены на рис. 4 в виде скоростей смещений пунктов ПДБС НСО, выраженных в мм/год (вертикальная шкала). Синими цветами показаны скорости, полученные онлайн-сервисами обработки данных ГНСС-измерений; красным цветом – скорости, полученные в ходе обработки в ПО ТВС с последующим уравниванием всей сети (ТВС урав.); зелеными цветами – скорости, полученные в результате моделирования с помощью калькулятора скоростей движения тектонических плит [31]. На данном ресурсе сосредоточены наиболее известные общемировые модели движения тектонических плит, основанные на высокоточных данных многолетних наблюдений опорных станций. Все результаты обработки измерений получены в пространственных прямоугольных координатах в системе координат ITRF2014 на соответствующую эпоху.



а)



б)

Рис. 4. Скорости смещения пунктов сети ПДБС НСО:

а) вычисленные с применением онлайн-сервисов; б) вычисленные на основе моделей движения тектонических плит

Максимальная СКО вычисленных координат на каждую эпоху для сервисов CSRS-PPP, Trimble RTX, AUSPOS, OPUS не превышает 2,5 см по каждой координате, для сервиса SOPAC SCOUT – 5,3 см. Результаты, полученные с применением сервиса Magic GNSS, на графиках не приведены, так как присутствует систематическое отклонение от результатов прочих сервисов и результатов моделирования более чем на 3-4 см/год.

Из приведенных графиков следует, что, вычисленные скорости движения пунктов сети ПДБС НСО онлайн-сервисами согласуются с результатами моделирования движений тектонических плит примерно на уровне расхождений между значениями скоростей, полученными с помощью различных моделей.

Результаты скоростей, полученных из обработки ГНСС-измерений классическим методом с последующим уравниванием всей сети (ТВС урав.), соответствуют результатам моделирования, при СКО определения каждого пункта сети ПДБС НСО на каждую эпоху измерений, не превышающей 0,7 см. Ошибка моделирования скоростей движения пунктов на ресурсе не приводится.

Оценка онлайн-сервисов по ГНСС-измерениям, выполненным в других частях земного шара

За последние несколько лет сравнение результатов оценки точности различных онлайн-сервисов между собой, а также результатов оценки точности в зависимости от продолжительности измерений на станции выполнялось многими авторами в разных частях земного шара.

В частности, авторами [24, 32] были проведены исследования онлайн-сервисов на территории США в штате Юта и на западе Орегона соответственно. Авторами [33, 34] проводились исследования в Турции в провинции Чорум (север Турции) и в г. Стамбуле. Авторы исследования [35] проводили испытания онлайн-сервисов на основе ГНСС-измерений станций МГС, расположенных на территории Европы. В статье [36] авторы тестировали онлайн-сервисы на примере ГНСС-измерений сети ПДБС Нигерии.

В каждой публикации авторы исследований использовали разные параметры обработки данных для оценки онлайн-сервисов: разная продолжительность измерений, разная эпоха измерений, разная дискретность измерений, использование спутников разных навигационных систем, разные приемники и антенны.

В табл. 2 кратко приведена оценка испытуемых в данной работе онлайн-сервисов по измерениям, проведенным в разных частях земного шара. В учет приняты результаты обработки ГНСС-измерений продолжительностью не менее 12 часов, выполненных не позднее 31 декабря 2011 г., с дискретностью измерений 30 секунд и использованием систем GPS или GPS + ГЛОНАСС. Сервисы проранжированы по точности результатов обработки ГНСС-измерений от 1 до 6 для каждой территории, на которой проводились измерения. В столбце 1 приводится онлайн-сервис, с помощью которого достигнута максимальная точность, в столбце 6 – минимальная. Красным цветом выделены онлайн-сервисы,

с помощью которых получена наихудшая точность вычислений, и которые не рекомендуются (по результатам соответствующих исследований) для обработки ГНСС-измерений, выполненных в данном регионе. Точность характеризуется: для измерений Новосибирской области, штата Юта, провинции Чорум, г. Стамбула и станций в Европе – отклонением от эталонных значений координат; для штата Орегон и Нигерии – среднеквадратическим отклонением (RMS).

Таблица 2

Оценка онлайн-сервисов по результатам обработки ГНСС-измерений, выполненных в Новосибирской области и других частях земного шара

Регион ГНСС-измерений	1	2	3	4	5	6
РФ, НСО	Trimble RTX	CSRS-PPP	AUSPOS	OPUS	SOPAC SCOUT	Magic GNSS
Юта, США	AUSPOS	Trimble RTX	OPUS	CSRS-PPP	Magic GNSS	SOPAC SCOUT
Орегон, США	Trimble RTX	CSRS-PPP	OPUS	AUSPOS	-	-
Турция, Чорум	AUSPOS	CSRS-PPP	Trimble RTX	OPUS	Magic GNSS	-
Турция, Стамбул	AUSPOS	OPUS	SOPAC SCOUT	CSRS-PPP	Magic GNSS	-
Европа	OPUS	AUSPOS	CSRS-PPP	Trimble RTX	-	-
Нигерия	Magic GNSS	AUSPOS	-	-	-	-

Сервисы SOPAC SCOUT и Magic GNSS показали неприемлемую точность результатов координатных определений не только на территории Новосибирской области, но и на территории штата Юта, США. В остальных исследованиях сервис SOPAC SCOUT не был представлен. Однако сервис Magic GNSS дал результат, сопоставимый с другими сервисами на территории Турции, а на территории Нигерии оказался точнее, чем AUSPOS. Причина, по которой AUSPOS не сработал так же, как в других регионах, связана с эффектом решения очень длинных базовых линий при обработке, так как в данном регионе сеть МГС недостаточна развита.

На территории Российской Федерации сеть МГС также не является достаточно плотной, поэтому факт того, что сервисы, основанные на методике PPP, дали немногим более точные результаты координатных определений на территории Новосибирской области, является закономерным.

Онлайн-сервисы Trimble RTX, AUSPOS, CSRS-PPP, OPUS показали схожие и точные результаты относительно друг друга на территории каждого региона, подтвердив надежность и точность алгоритмов в глобальном масштабе.

В литературе [24, 32, 36] также приводятся результаты обработки ГНСС-измерений в зависимости от длительности измерений на станции. Так, в исследованиях показано, что измерений продолжительностью от 2 до 6 часов достаточно для достижения дециметровой точности определения координат, от 6 до 12 часов – для сантиметровой точности, а суточных измерений – для достижения субсантиметровой точности. Следует отметить, что онлайн-сервисы, использующие метод относительного позиционирования, имеют преимущество в точности перед сервисами, использующими метод PPP, при продолжительности измерений до 6 часов, при условии достаточной плотности пунктов международной ГНСС-службы.

Заключение

В исследовании проведены оценка местоопределения точек земной поверхности онлайн-сервисами обработки ГНСС-измерений на примере сети ПДБС НСО и сравнение полученных результатов с результатами обработки классическим методом в ПО ТВС, а также с результатами, полученными по методу отдельной обработки каждого пункта. Обработка ГНСС-измерений на разные эпохи с интервалом времени более 4 лет позволила оценить скорости смещения пунктов в общеземной системе координат и сравнить их с результатами скоростей, полученными с помощью различных общемировых моделей движения тектонических плит для территории Новосибирской области.

Результаты местоопределения пунктов сети ПДБС НСО онлайн-сервисами обработки ГНСС-измерений показали, что сервисы, основанные на методе PPP (CSRS-PPP и Trimble RTX), и сервисы, основанные на относительном методе определения координат (AUSPOS и OPUS), дали схожие результаты. В сравнении с классическим методом обработки в ПО ТВС, использующим алгоритмы вычисления сверхдлинных базовых линий, эти сервисы показали различия, не превышающие: по координате X – 0,8 см, по координате Y – 1,1 см, по координате Z – 2,5 см, при СКО, не превышающей 1,8 см.

В сравнении с методом отдельной обработки каждого пункта результаты исследования показали, что при обработке суточных сеансов ГНСС-измерений онлайн-сервисы могут обеспечить более высокую точность местоопределения. Это проявилось как в сравнении результатов с классическим методом местоопределения, так и по результатам оценки точности, в качестве критерия при этом принимались оценки СКО вычислений.

Сервисы Magic GNSS и SOPAC SCOUT показали менее точные результаты. Расхождения полученных координат в сравнении с прочими сервисами превышают 15,4 см, а в отдельных случаях достигают десятков сантиметров, при СКО не более 5,1 см. Это связано с неадекватностью моделей некоторых моделируемых эффектов (атмосферные задержки, гравитационная аномалия, приливные нагрузки и др.), имеющих отличительные особенности, связанные с географической удаленностью Новосибирской области от мест широкого при-

менения этих сервисов. Поэтому сервисы Magic GNSS и SOPAC SCOUT не могут быть рекомендованы для использования на территории Новосибирской области, в то время как остальные являются надежным инструментом обработки ГНСС-измерений и могут применяться в геодезической практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. В 2 т. Т. 2. – М. : Картгеоцентр, 2006. – 360 с. : ил.
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more. – Wien, New-York : Springer, 2008. — 516 с.
3. Струков А. А. Анализ точности определения векторов сверхдлинных базовых линий по результатам GPS-измерений // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 2 (15). – С. 30–38.
4. Kouba J., Héroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products // GPS Solut. – 2001. – Vol. 5, I. 2. – P. 12–28. doi: 10.1007/PL00012883.
5. Виноградов А. В., Войтенко А. В., Жигулин А. Ю. Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах // Геопрофи. – 2010. – № 2. – С. 27–30.
6. Липатников Л. А. Применение методики точного абсолютного позиционирования для высокоточного определения положения геодезических пунктов в общеземной системе координат // Геодезия и картография. – 2012. – № 7. – С. 13–16.
7. Малютина К. И., Шевчук С. О. Сравнение бесплатной программы RTKLib с коммерческим программным обеспечением для постобработки ГНСС-измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 113–125.
8. Шевчук С. О., Малютина К. И., Липатников Л. А. Перспективы использования свободного программного обеспечения для постобработки ГНСС-измерений // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 65–84.
9. Mustafa Tariq, Abduhaq Hadi, & Husham Hafedh. Accuracy Assessment of Different GNSS Processing Software // Imperial Journal of Interdisciplinary Research. – 2017. – Vol. 3, I. 10. P. 469–478.
10. Morteza Hamidi, Peyman Javadi. The Analysis of Scientific and Commercial Softwares Accuracy in GPS Observation Processing // Open Journal of Geology. – Vol. 7, I. 3. – P. 267–278. doi: 10.4236/ojg.2017.73019.
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. International GNSS Service (IGS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://igs.org/>.
13. Определение координат пунктов сети базовых станций Новосибирской области в общеземной системе координат / А. П. Карпик, А. П. Решетов, А. А. Струков, К. А. Карпик // 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. 3–8.
14. Лагутина Е. К. Апробация методики включения сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области в государственную геодезическую сеть // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 35–40.
15. Терещенко В. Е. Определение актуальных координат сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области на эпоху 2017.01. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картогра-

фия, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 125–129.

16. Государственное бюджетное учреждение «Центр навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rtk.nso.ru/>.

17. Липатников Л. А. О методике точного дифференциального позиционирования (Precise Point Positioning) и перспективах ее совершенствования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : сб. молодых ученых СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 48–53.

18. CSRS-PPP Precise Point Positioning / National Resources Canada – Earth Sciences. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.

19. Magic GNSS – GNSS online service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://magicgnss.gmv.com/ppp>.

20. Trimble RTX – Trimble center point RTX post-processing service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trimblertx.com/Home.aspx>.

21. AUSPOS – Online GPS Processing Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>.

22. OPUS: the Online Positioning User Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>.

23. SOPAC SCOUT – Scripps Coordinate Update Tool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sopac-csrs.ucsd.edu/>.

24. Eric Gakstatter. A Comparison of Free GPS Online Post-Processing Services // GPS World. – 2013. – Vol. 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gpsworld.com/a-comparison-of-free-gps-online-post-processing-services/>.

25. ИАЦ – информационно-аналитический центр. КВНО ФГУП ЦНИИМАШ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/specifyRINEX.php>.

26. Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sdcм.ru>.

27. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF / В. С. Вдовин, В. В. Дворкин, А. П. Карпик, Л. А. Липатников, С. Д. Сорокин, Г. М. Стеблов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23. № 1. – С. 6–27.

28. Шендрик Н. К. Исследование точности геодезической сети активных базовых станций Новосибирской области в государственной системе координат и высот // Геодезия и картография. – 2014. – № 1. – С. 2–7.

29. Обиденко В. И., Оприцова 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.

30. ITRF transformation parameters [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php.

31. UNAVCO Plate Motion Calculator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>.

32. Marian Jamieson, Daniel T. Gillins. Comparative Analysis of Online Static GNSS Postprocessing Services // Journal of Surveying Engineering. – 2018. – Vol. 144 (4).

33. Reha Metin Alkan, Veli Ilci and I. Murat Ozulu. Web-based GNSS Data Processing Services as an Alternative to Conventional Processing Technique // FIG Working Week 2016. – Christchurch, New Zealand, 2016.

34. Taylan Ocalan, Bahattin Erdogan, Nursu Tunalioglu. Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques // Boletim de Ciências Geodésicas – 2013. – Vol. 19 (2). – С. 191–207.

35. Islam A. Kandil, Mahmoud El-Mewafi and Ahmed Awaad. Analysis of GNSS Accuracy of Relative Positioning and Precise Positioning Based on Online Service. // International Journal of Scientific Engineering and Research. – 2017. – Vol. 5 (12). – С. 94–103.

36. Olalekan Adekunle Isioye, Mefe Moses, Lukman Abdulmumin. Comparative Study of Some Online GNSS Post-Processing Services at Selected Permanent GNSS Sites in Nigeria. – 2019 [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <https://www.intechopen.com/books/accuracy-of-gnss-methods/comparative-study-of-some-online-gnss-post-processing-services-at-selected-permanent-gnss-sites-in-n>.

Получено 30.03.2019

© В. Е. Терещенко, Е. К. Лагутина, 2019

DETERMINING OF NOVOSIBIRSK REGION REFERENCE STATIONS OFFSETS BY COMPARISON METHOD OF FREE ONLINE GNSS POST-PROCESSING SERVICES

Vyacheslav E. Tereshchenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, phone: (953)766-70-14, e-mail: taboretzvigyn@mail.ru

Elena K. Lagutina

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: (383)343-29-55, e-mail: e.k.lagutina@ssga.ru

The advantages of usage of free online GNSS post-processing services are shown. Advantages and disadvantages are described. The results of assessing the accuracy of high-precision positioning by free online services are given on the example of observations of Novosibirsk region reference stations network. The results obtained with using free online post-processing services were compared with the results obtained with using conventional and other positioning methods processed with TBC v.4.0 software. It is shown that the results of 4 out of 6 services are consistent with the reference values of the coordinates at the 2.5 centimeters level and have advantages over the method of separate measurement processing. As a result of the experiment the reference stations network velocities of Novosibirsk region, that after were compared with the results of global models of the earth's surface movement are revealed. These online services are estimated by the results of GNSS measurements performed in other parts of the globe.

Key words: GNSS measurements, free online post-processing services, Post-Processing, Trimble Business Centre, PPP technique, high-precision positioning.

REFERENCES

1. 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., 360 p. [in Russian]

2. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more*. Wien, New York: Springer. – 516 p.

3. Strukov, A. A. (2011). Accuracy analysis of vector super long baselines by the results of GPS-measurements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(15), 30–38 [in Russian].
4. Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 5(2), 12–28. doi: 10.1007/PL00012883.
5. Vinogradov, A. V., Voyetenkov, A. V., & Jigylin, A. Y. (2010). Estimated of accuracy Precise Point Positioning technique and possibility of usage for cadastral works. *Geoprofi [Geoprofi]*, 2, 27–30 [in Russian].
6. Lipatnikov, L. A. (2012). Application of precise absolute positioning method for precise positioning of geodetic points in common terrestrial coordinate system. *Geodezija I kartografija [Geodesy and Cartography]*, 7, 13–16 [in Russian].
7. Malutina, K. I., & Shevchuk, S. O. (2017). Comparing commercial GNSS post-processing software with RTKLIB. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformation, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 113–125). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
8. Shevchuk, S. O., Malyutina, K. I., & Lipatnikov, L. A. (2018). Prospects of using free software for GNSS measurements post-processing. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 65–84 [in Russian].
9. Mustafa Tariq, Abduhaq Hadi, & Husham Hafedh. (2017). Accuracy Assessment of Different GNSS Processing Software. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3(10), 469–478.
10. Morteza Hamidi, & Peyman Javadi. (2017). The Analysis of Scientific and Commercial Softwares Accuracy in GPS Observation Processing. *Open Journal of Geology*, 7(3), 267–278. doi: 10.4236/ojg.2017.73019.
11. Shevchuk, S. O., Kosarev, N. S., & Antonovich, K. M. (2016). Comparison of the Commercial Software Performance of GNSS Kinematic Measurement Postprocessing for Aerial Geophysics Geodetic Support. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 79–10 [in Russian].
12. International GNSS Service (IGS). (n. d.). Retrieved from <http://igs.org/>.
13. Karpik, A. P., Reshetov, A. P., Strukov, A. A., & Karpik, K. A. (2011). Determination of coordinates the continuous operating reference stations points of the Novosibirsk region in the common terrestrial system of coordinates. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 1, Part 1]* (pp. 3–8). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
14. Lagutina, E. K. (2016). Testing methods of integration regional CORS network and the Russian state geodetic network. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 35–40 [in Russian].
15. Tereshchenko, V. E. (2017). Determination of current coordinates of reference stations network on the territory of the Novosibirsk region for the epoch 2017.01. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 1, Part 2. Geodesy, Geoinformation, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 125–129). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
16. State budget establishment Center of Navigation and Geo-information Technologies of the Novosibirsk Region. (n. d.). Retrieved from <http://rtk.nso.ru/> [in Russian].
17. Lipatnikov, L. A. (2012). On precise point positioning and its future development. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: sbornik molodyh uchenyh SSGA [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Collection of Young Scientists SSGA]* (pp. 48–53). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
18. CSRS-PPP – Precise Point Positioning / National Resources Canada. (n. d.). Retrieved from <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.
19. Magic GNSS – GNSS online service. (n. d.). Retrieved from <https://magicgnss.gmv.com/ppp>.

20. Trimble RTX – Trimble centerpoint RTX post-processing service. (n. d.). Retrieved from <https://trimblertx.com/Home.aspx>.
21. AUSPOS – Online GPS Processing Service. (n. d.). Retrieved from <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>.
22. OPUS: the Online Positioning User Service. (n. d.). Retrieved from <https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>.
23. SOPAC SCOUT – Scripps Coordinate Update Tool. (n. d.). Retrieved from <http://sopac-old.ucsd.edu/scout.shtml>.
24. Eric Gakstatter. (2013). A Comparison of Free GPS Online Post-Processing Services. *GPS World*, 10. (n. d.). Retrieved from <https://www.gpsworld.com/a-comparison-of-free-gps-online-post-processing-services/>.
25. Information and analytical center. KVNO FSUE TSNIIMash. (n. d.). Retrieved from <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/specifyRINEX.php>.
26. Russian system of differential correction and monitoring. (n. d.). Retrieved from <http://www.sdcм.ru>.
27. Vdovin, V. S., Dvorkin, V. V., Karpik, A. P., Lipatnikov, L. A., Sorokin, S. D., & Steblov, G. M. (2018). Current state and future development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into ITRF. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 6–27 [in Russian].
28. Shendrik, N. K. (2014). The investigation of precision geodetic network of active base stations Novosibirsk region in the state system of coordinates and altitudes. *Geodeziya i Kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 2–7 [in Russian].
29. Obidenko, V. I., Opritova, O. A., & Reshetov, A. P. (2016). Working out 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].
30. ITRF transformation parameters. (n. d.). Retrieved from http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php.
31. UNAVCO Plate Motion Calculator. (n. d.). Retrieved from <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/platemotion-calculator.html>.
32. Marian Jamieson & Daniel T. Gillins. (2018). Comparative Analysis of Online Static GNSS Postprocessing Services. *Journal of Surveying Engineering*, 144(4).
33. Reha Metin Alkan, Veli Ilci & I. Murat Ozulu. (2016). Web-based GNSS Data Processing Services as an Alternative to Conventional Processing Technique. *In FIG Working Week 2016 Proceedings*. New Zealand: Christchurch.
34. Taylan Ocalan, Bahattin Erdogan & Nursu Tunalioglu. (2013). Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 19(2), 191–207.
35. Islam A. Kandil & Mahmoud El-Mewafiand Ahmed Awaad. (2017). Analysis of GNSS Accuracy of Relative Positioning and Precise Positioning Based on Online Service. *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 5(12), 94–103.
36. Olalekan Adekunle Isioye, Mefe Moses & Lukman Abdulmumin. (2019). Comparative Study of Some Online GNSS Post-Processing Services at Selected Permanent GNSS Sites in Nigeria. (n. d.). Retrieved from <https://www.intechopen.com/books/accuracy-of-gnss-methods/comparative-study-of-some-online-gnss-post-processing-services-at-selected-permanent-gnss-sites-in-n>. doi: 10.5772/intechopen.79924.

Received 30.03.2019

© V. E. Tereshchenko, E. K. Lagutina, 2019