

# ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 528:629.783

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-6-5-16

## МЕТОДЫ ДЛИННОБАЗИСНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ GNSS-ПРИВЯЗКИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ГСК-2011

*Николай Александрович Бовшин*

Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных, 125413, Россия, г. Москва, ул. Онежская, 26, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник управления геодезических исследований, e-mail: bovshin\_na@nsdi.rosreestr.ru

На основе GNSS-обработки реальных спутниковых измерений, выполненных на пунктах экспериментальной геодезической сети, в данной работе исследуются методы длиннобазисной геодезической привязки в системе координат ГСК-2011. С точки зрения проникновения систематических ошибок в конечные результаты – координаты пунктов привязки – изучению подвергаются как строгие, так и упрощенные методы геодезической привязки, представляющие несомненный практический интерес. Из сопоставления результатов длиннобазисной привязки, выполненных различными методами, оцениваются основные свойства систематических ошибок – их вероятный уровень в настоящее время, а также поведение в зависимости от используемых методов геодезической привязки. Даны рекомендации по использованию приближенных методов, как избежать значительных деформаций, обусловленных систематическими ошибками длиннобазисной геодезической привязки, в определяемых координатах как отдельных пунктов, так и локальных геодезических сетей.

**Ключевые слова:** ГСК-2011, длиннобазисная геодезическая привязка, редукция координат к эпохе, связь между ГСК-2011 и ITRF, референсная станция, ITRF2014, вспомогательная система ГСК-2011-ДВ, ФАГС

### *Введение*

Построение и уточнение фундаментальных сетей ФАГС и ВГС [1–4], реализующих систему координат ГСК-2011, подразумевает обработку базисов длиной в сотни и тысячи километров. Определение координат новых референционных станций и дифференциальных геодезических сетей [5, 6] в системе ГСК-2011 выполняется посредством привязки к пунктам сетей ФАГС и IGS, часто тоже удаленным на сотни и более километров. Работы выполняются в разные годы; за это время пункты, как опорные, так и определяемые, в силу геодинимических процессов меняют свои положения в референционных системах координат [1–3, 6], и эти изменения необходимо учиты-

вать при обработке GNSS-измерений на столь длинных базисах. Последовательность операций, позволяющая принимать во внимание эти эффекты и сохраняющая строгость геодезической привязки, конкретизирована в работе [7]. Однако необходимые для этого данные далеко не всегда легкодоступны, что понуждает обращаться к упрощенным методам геодезической привязки, ставя при этом под сомнение качество получаемых результатов – координат определяемых пунктов.

Цель данной работы – используя GNSS-обработку реальных измерений, количественно оценить качество строгих методов и степень искажений, возникающих в упрощенных методах длиннобазисной геодезической привязки. С этой целью была сформирована эксперимен-

тальная геодезическая сеть (представляющая собой фрагмент ФАГС и включающая четыре пункта – ARTU, NRIL, NVSK, NOYA), геометрические и географические свойства которой соответствовали поставленным задачам. Схема экспериментальной сети представлена на рис. 1. Базисы, окрашенные на схеме в черный цвет, использовались для проверки строгих методов, а базисы, окрашенные в синий цвет, – для проверки упрощенного метода.

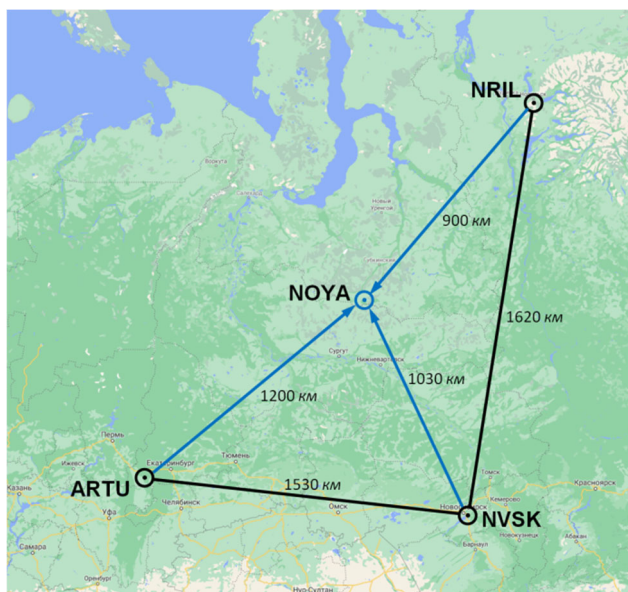


Рис. 1. Схема экспериментальной геодезической сети

К экспериментам были привлечены GPS-наблюдения на пунктах экспериментальной сети, выполненные в течение двух лет – 2018–2019 гг. Двухлетний период наблюдений был принят для того, чтобы обеспечить возможность визуально наблюдать тенденции в поведении пунктов (или отсутствие тенденций) без привлечения для этой цели аналитического аппарата. В работе использовался экспериментальный научный пакет программ GNSS-обработки и уравнивания векторных сетей, предоставляющие более гибкие возможности при решении нетиповых задач (например, когда потребовалось пересчитать точные спутниковые орбиты из систем координат ITRF в систему ГСК-2011, научный пакет программ был дополнен еще одной программой, выполняющей эту операцию и сохраняющей пересчитанные точные орбиты

в файлах стандартного формата). Однако для данных экспериментов подошел бы любой пакет программ, научный или коммерческий, позволяющий по типовым алгоритмам обрабатывать базисы длиной до полутора-двух тысяч километров.

### Строгий метод геодезической привязки

Геодезическая GNSS-привязка использует в качестве исходной информации координаты опорных пунктов в референционной системе координат на референционную эпоху, одновременные GNSS-измерения на опорных и определяемых пунктах, а также опорные эфемериды спутников на весь период наблюдений, необходимый для обработки этих измерений. Строгий метод привязки требует, чтобы при выполнении GNSS-обработки и координаты опорных пунктов, и эфемериды спутников были представлены в одной и той же системе координат (будем называть эту систему координат рабочей). В работе [7] рассмотрены два варианта строгого метода привязки – методы 1 и 2. Прежде чем обратиться к их свойствам, укажем необходимые этапы, сохраняющие строгость привязки пунктов к системе опорных координат с использованием GNSS-обработки. Табл. 1 перечисляет эти этапы с сохранением последовательности их исполнения.

Таблица 1

#### Этапы строгого метода длиннобазисной геодезической привязки

Этапы	Выполняемые операции
1	а) перевод опорных координат из референционной системы координат в рабочую; б) пересчет опорных координат с референционной эпохи на эпоху измерений (прямая редукция); в) перевод эфемерид в рабочую систему координат
2	Обработка GNSS-измерений и определение координат новых пунктов в рабочей системе координат на эпоху измерений
3	а) пересчет координат новых пунктов с эпохи измерений на референционную эпоху (обратная редукция); б) перевод координат новых пунктов из рабочей системы координат в референционную

Таблица 2

Необходимые операции при выборе рабочих систем ITRF или ГСК-2011

Операция	ITRF	ГСК-2011
1а	Да	–
1б	Да	Да
1в	–	Да
2	Да	Да
3а	Да	Да
3б	Да	–

Выполнять операции внутри каждого этапа можно в произвольном порядке.

Первый этап, предварительный, включает редукцию координат опорных пунктов на эпоху измерений (для краткости будем называть эту операцию прямой редукцией) и сведение исходных данных (координат опорных пунктов и опорных эфемерид спутников) в единую, рабочую систему координат. Прямая редукция выполняется по следующим простым формулам:

$$\begin{cases} X(t) = X(t_0) + V_X \cdot (t - t_0) \\ Y(t) = Y(t_0) + V_Y \cdot (t - t_0) \\ Z(t) = Z(t_0) + V_Z \cdot (t - t_0) \end{cases},$$

где  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  – пространственные прямоугольные координаты пункта в референцной системе координат в эпоху наблюдений  $t$ ;  $X(t_0)$ ,  $Y(t_0)$ ,  $Z(t_0)$  – координаты пункта в этой же референцной системе координат в референцную эпоху  $t_0$ ;  $V_X$ ,  $V_Y$ ,  $V_Z$  – компоненты скорости пункта в этой же референцной системе координат.

Второй этап, основной, – это собственно обработка спутниковых измерений и получение координат пунктов привязки в рабочей системе координат на эпоху измерений. Третий этап, окончательный, подразумевает пересчет координат определяемых пунктов в референцную систему координат и их редукцию на референцную эпоху (для краткости будем называть эту операцию обратной редукцией). Обратная редукция выполняется по аналогичным формулам:

$$\begin{cases} X(t_0) = X(t) - V_X \cdot (t - t_0) \\ Y(t_0) = Y(t) - V_Y \cdot (t - t_0) \\ Z(t_0) = Z(t) - V_Z \cdot (t - t_0) \end{cases}.$$

Обычно координаты опорных пунктов заданы в системе ГСК-2011, а точные орбиты GNSS-спутников – в системах ITRF. В такой ситуации представляется естественным использовать те варианты строгого метода, в которых в качестве рабочей системы координат назначается либо ITRF, либо ГСК-2011. При этом оказывается, что некоторые операции делать не надо (табл. 2).

### Свойства системы координат ГСК-2011

Для экспериментов будут использоваться следующие свойства системы координат ГСК-2011:

– в референцную эпоху 2011.0 система координат ГСК-2011 формально соотносится с системой ITRF2008 посредством координатного преобразования, утвержденного приказом Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестра) от 23.03.2016 № П/0134, и совокупности координат пунктов ФАГС, вошедших в первичное построение [8];

– система координат ГСК-2011 фиксирована относительно той части Евразийской плиты, которая попадает на территорию РФ (это свойство системы ГСК-2011 будем называть для краткости ее стационарностью).

Значения параметров координатного преобразования между ITRF2008 и ГСК-2011 в референцную эпоху 2011.0, утвержденные приказом Росреестра, можно рассматривать как оценку уровня систематических ошибок решения [8]. Как видно из текста приказа, значения всех параметров оказались существенно ниже их формальных ошибок. Тем самым, систематические ошибки можно считать незначительными и, следовательно, в референцную эпоху 2011.0 обе системы координат ITRF2008 и ГСК-2011 – практически эквивалентными. Этот факт будет принят во внимание при анализе результатов экспериментов.

В качестве условия, обеспечивающего стационарность системы координат ГСК-2011 на указанной территории, принималось равенство нулю средней скорости пунктов ФАГС,

расположенных на этой территории. Вследствие этого системы ITRF и ГСК-2011, практически совпадающие в референдную эпоху 2011.0, начинают расходиться по мере удаления от этой эпохи. Расхождение имеет характер вращения, параметры этого вращения оценивались в работе [7] и представлены

в табл. 3. Для Дальневосточного региона, расположенного большей частью на Североамериканской плите, следует применять, когда это необходимо, вспомогательную систему ГСК-2011-ДВ, значения параметров для которой оценивались в работе [9] и тоже представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры взаимного вращения систем ITRF2014, ГСК-2011, ГСК-2011-ДВ

№ п/п	Параметры вращения, " / год	$\dot{\omega}_X$	$\dot{\omega}_Y$	$\dot{\omega}_Z$
1	ITRF2014 относительно ГСК-2011	-0,000093	-0,000528	0,000725
2	ITRF2014 относительно ГСК-2011-ДВ	0,000066	-0,000694	-0,000017
3	ГСК-2011-ДВ относительно ГСК-2011	0,000159	-0,000166	-0,000742

### Проверка строгих методов геодезической привязки

В данном разделе представлены результаты проверки двух строгих методов. В методе 1 как в качестве рабочей, так и в качестве референчной используется система координат ITRF2014, в методе 2 – система координат ГСК-2011. Проверка заключалась в GNSS-обработке контрольных базисных линий и со-

поставлении полученных координат определяемого пункта NVSK.

Для выполнения привязки были использованы базисы ARTU-NVSK и NRIL-NVSK. Все три пункта входят и в сеть IGS, и в сеть ФАГС, поэтому для них доступна вся информация (скорости движения в системах ITRF2014 и ГСК-2011, табл. 4), необходимая для выполнения соответствующих редуциций координат.

Таблица 4

Скорости пунктов в системах ITRF2014, ГСК-2011

Система координат	ITRF2014			ГСК-2011		
	$V(x)$	$V(y)$	$V(z)$	$v(x)$	$v(y)$	$v(z)$
ARTU	-24,14	8,96	3,73	0,00	0,09	0,37
NRIL	-22,19	3,12	0,77	0,94	0,21	1,62
NVSK	-26,40	4,32	-0,18	-0,27	0,45	0,36

При обработке методом 1 опорным пунктам ARTU, NRIL были назначены координаты и скорости в системе координат ITRF2014 [10]. В качестве опорных эфемерид использовались окончательные (final) точные орбиты IGS, заданные в системе координат ITRF2014 и распространяемые с сайтов IGS (например, [11, 12]) в файлах формата SP3 [13] (названия файлов используют следующий шаблон: igs?????.sp3). Обработка спутниковых измерений выполнялась сеансами суточной продолжительности, так что в результате

было получено более семисот независимых решений. В процессе обработки спутниковых измерений программа, используя значения скоростей пунктов в системе ITRF2014 (см. табл. 4), автоматически редуцировала координаты опорных пунктов на среднюю эпоху обрабатываемого сеанса, так что все требования предварительного этапа строго выполнялись. Полученные из обработки всех сеансов координаты определяемого пункта соответствовали системе ITRF2014 и средней эпохе сеанса обработки. Поскольку определяемый пункт

NVSK входит в сеть IGS, для него в решении [10] тоже доступны скорости в системе ITRF2014 (см. табл. 4). Используя эти скорости, а также средние эпохи сеансов, все полученные координаты пункта были редуцированы на эпоху 2011.0 – референционную эпоху системы ГСК-2011, с целью дальнейшего сравнения с результатами метода 2.

При обработке методом 2 опорным пунктам ARTU, NRIL были назначены координаты в системе координат ГСК-2011 [14, 8]. Скорости в системе ГСК-2011 (см. табл. 4) для этих пунктов были взяты из [7], табл. 5 (они получены из скоростей в системе ITRF2014 посредством исключения взаимного вращения систем ITRF2014 и ГСК-2011). В качестве опорных эфемерид использовались те же самые окончательные (final) точные орбиты IGS, заданные в системе координат ITRF2014, но пересчитанные (с помощью координатного преобразования связи между системами ITRF2014 и ГСК-2011, см. [7], табл. 6) в систему ГСК-2011 и вновь сохраненные в файлах формата SP3 [13]. Обработка спутниковых измерений выполнялась сеансами суточной продолжительности, так что в результате было получено более семисот независимых решений. В процессе обработки спутниковых измерений программа, используя значения скоростей пунктов в системе ГСК-2011 (см. табл. 4), автоматически редуцировала координаты опорных пунктов на среднюю эпоху обрабатываемого сеанса, так что все требования предварительного этапа строго выполнялись. Полученные из обработки всех сеансов координаты определяемого пункта соответствовали системе ГСК-2011 и средней эпохе сеанса обработки. Поскольку определяемый пункт NVSK входит в сеть IGS, для него тоже доступны скорости в системе ГСК-2011 (см. табл. 4). Используя эти скорости, а также средние эпохи сеансов, все полученные координаты пункта были редуцированы на эпоху 2011.0 – референционную эпоху системы ГСК-2011, с целью дальнейшего сравнения с результатами метода 1.

Дальнейшее сближение результатов, полученных методами 1 и 2 (преобразование результатов обоих методов в общую систему

координат с использованием параметров связи между системами ITRF2014 и ГСК-2011 в эпоху 2011.0), не представлялось необходимым, поскольку эти параметры имеют миллиметровый уровень и были фактически результатами оценки величин систематических ошибок при первичном построении системы ГСК-2011. Тем не менее, было принято во внимание, что означенное координатное преобразование будет вносить свой вклад в различия между результатами методов 1 и 2. Помимо этого, свой вклад могут добавить фактические ошибки координат опорных пунктов в референционных системах координат ITRF2014 и ГСК-2011. Величины этих ошибок тоже оцениваются ориентировочно на миллиметровом уровне. С учетом всего сказанного, можно ожидать, что различия между результатами методов 1 и 2 будут иметь следующие два важных свойства. Во-первых, различия во всех координатах должны быть миллиметрового уровня. Во-вторых, они должны быть постоянны во времени, независимы от эпохи наблюдений, потому что все составляющие эти различия источники вносят вклад, независимый от времени.

Диаграммы расхождений в геоцентрических пространственных координатах  $X$ - $Y$ - $Z$  определяемого пункта NVSK, полученные из обработки базисов ARTU-NVSK и NRIL-NVSK, представлены на рис. 2. Диаграммы очень убедительно подтверждают наши ожидания – систематические расхождения составили лишь 1 мм и менее. Кроме того, различия постоянны на протяжении всего двухлетнего периода наблюдений, и это тоже является подтверждением правильности использованной технологии обработки. Наконец, можно заметить, что географические различия базисов (базис ARTU-NVSK ориентирован преимущественно по долготе, а базис NRIL-NVSK – преимущественно по широте, см. рис. 1) никак не отразились на сходимости решений. Тем самым можно утверждать, что использование строгих методов при выполнении длиннобазисной геодезической привязки гарантирует от проникновения в результаты систематических ошибок, обусловленных редуцированными факторами, уровня большего, чем единицы миллиметров.

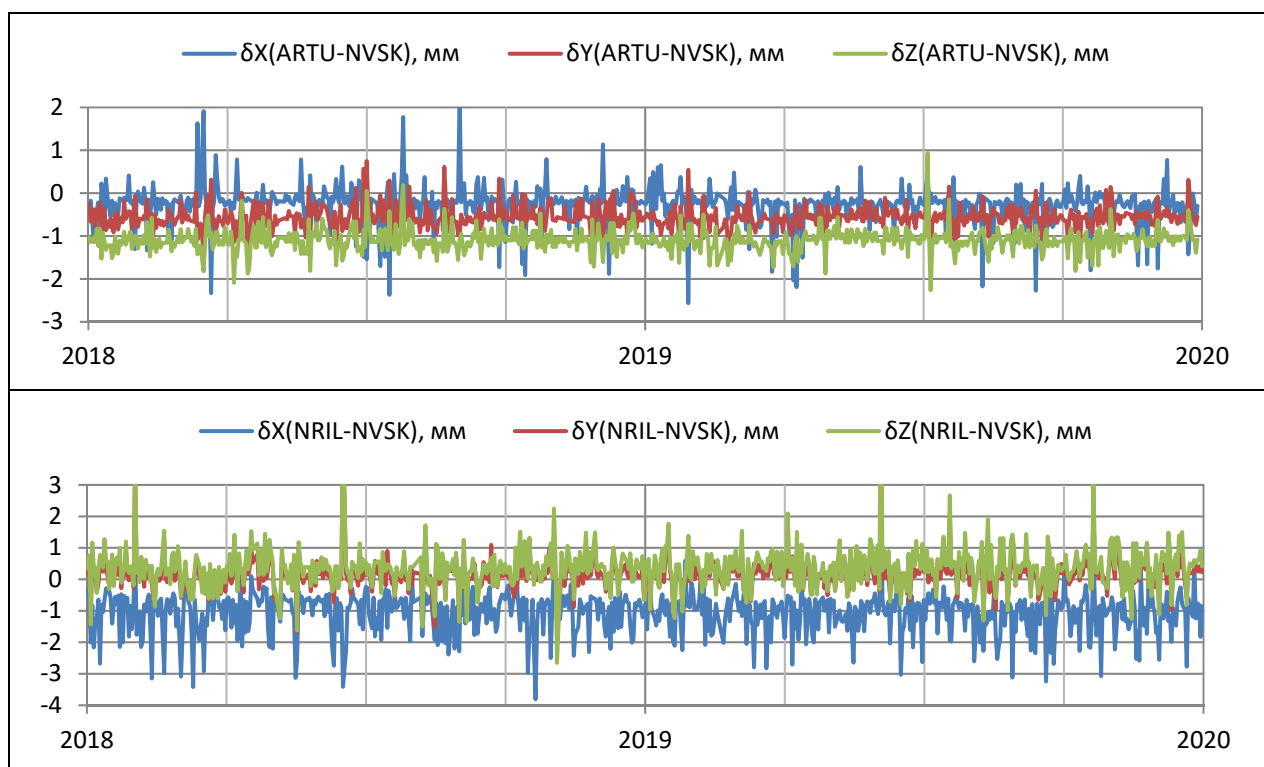


Рис. 2. Расходимость методов 1 и 2 для базисов ARTU-NVSK и NRIL-NVSK

Использование строгого метода имеет очевидную сложность: для вновь определяемых пунктов могут оказаться неизвестными составляющие скорости движения в референционной системе координат, что не позволит выполнить обратную редукцию координат пунктов. Для оценки влияния этого фактора в рассмотренных примерах была отменена обратная редукция координат в методе 2, т. е. в референционной системе ГСК-2011. В результате различия между методами 1 и 2 выросли до 3–5 мм. Это величина смещения, которое получил определяемый пункт NVSK в системе ГСК-2011 за время, прошедшее с референционной эпохи до эпох измерений (7–9 лет). Поскольку в системе ГСК-2011 устранено общее движение пунктов на территории РФ, остаточные скорости невелики и полученными смещениями во многих случаях можно пренебрегать. Если пренебречь обратной редукцией в референционной системе координат ITRF2014, то расхождения составили бы величину в два-три дециметра. Систематические ошибки такой величины совершенно недопустимы во многих геодезических приложениях. Поэтому, работая в системе ITRF2014,

нельзя пренебрегать редукциями координат между эпохами измерений и референционной эпохой. Если скорости неизвестны, можно использовать модельные значения, полученные по параметрам взаимного вращения систем ITRF2014 и ГСК-2011 (см. [7], табл. 5, либо [9], табл. 2).

Используя эти параметры (№ 1 или № 2 в табл. 3 в зависимости от географического расположения редуцируемого пункта), можно вычислить приближенные значения скоростей пункта  $V_X$ ,  $V_Y$ ,  $V_Z$  в системе ITRF2014 по следующим формулам:

$$\begin{cases} V_X = (\dot{\omega}_Y Z - \dot{\omega}_Z Y) / \rho'' \\ V_Y = (\dot{\omega}_Z X - \dot{\omega}_X Z) / \rho'' \\ V_Z = (\dot{\omega}_X Y - \dot{\omega}_Y X) / \rho'' \end{cases}$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – прямоугольные геоцентрические координаты пункта,  $\rho'' = 206\,265''$ . Точность вычисления по этим формулам скорости пункта в каждой координате для большей части территории РФ оценивается величиной 0,7 мм/год, а для Дальневосточного региона – величиной 3 мм/год, кроме района Камчатки и прилегающих островов (Командоры, Ку-

рилы), где приведенные в табл. 3 значения неэффективны.

### **Упрощенный метод геодезической привязки**

На практике часто встречаются ситуации, когда скорости собственных движений неизвестны ни для определяемых, ни даже для опорных пунктов. Это могут быть пункты сети ВГС или пункты, недавно включенные в сеть ФАГС. Пример другого рода: скорости пунктов ФАГС, приведенные в решении [8], имеют большие ошибки и их использование для выполнения редуциций может дать еще худшие результаты, поскольку в свете таких больших ошибок значения скоростей не соответствуют с необходимой точностью ни системе ITRF, ни системе ГСК-2011. Тем самым, необходимость в прямой и особенно обратной редуцициях вызывает в настоящее время наибольшие проблемы. В этих условиях находят применение упрощенные методы привязки, в той или иной степени обходящие этапы редуциции.

Как показано в [7], несмотря на совершенно очевидные нарушения строгости в операции геодезической привязки, упрощенные методы вполне способны обеспечить надлежащее качество геодезической привязки на относительно небольших расстояниях, не превышающих несколько десятков километров, что охватывает довольно широкий круг геодезических задач. Однако с увеличением дальности привязки и с удалением эпохи привязки от референцной эпохи качество привязки упрощенными методами неуклонно падает и начиная с нескольких сотен километров может стать совершенно неудовлетворительным.

Наиболее очевидным обычно представляется метод (обозначим его как метод 3), при котором в качестве опорных координат используются координаты пунктов ФАГС [8] в системе ГСК-2011, приведенные к референцной эпохе 2011.0, а в качестве опорных эфемерид спутников используются окончательные (final) точные орбиты IGS [11, 12]. Привлекательность этого метода обусловлена высокой доступностью опорных данных – и те,

и другие данные находятся в свободном доступе в сети Интернет. При этом по умолчанию полагается, что координаты определяемых пунктов будут получаться тоже в системе ГСК-2011, сразу редуцированные на референцную эпоху 2011.0.

В рамках данного исследования были проведены эксперименты с целью проверки, насколько эти нарушения сказываются на результатах привязки. Проверка заключалась в обработке контрольных базисных линий методами 2 и 3 и сопоставлении полученных этими методами координат определяемого пункта. В качестве контрольных были использованы базисы ARTU-NOYA, NVSK-NOYA и NRIL-NOYA (см. рис. 1). Пункт NOYA не входит в сеть IGS, поэтому для него недоступна информация, необходимая для выполнения обратной редуциции координат. Тем самым, в методах 2 и 3 обратная редуциция не выполнялась. Это хоть и нарушало строгость обоих методов, но в совершенно одинаковой мере, поэтому не должно было повлиять на результаты сравнения. Расхождения в топоцентрических координатах  $E-N-U$  (восток-север-зенит) представлены на следующих диаграммах (рис. 3).

Что касается количественных оценок, то все три базиса демонстрируют сантиметровой и даже субдециметровый уровень расхождений. Расхождения такого уровня не могут быть объяснены неучетом обратной редуциции (которая могла внести вклад величиной в несколько миллиметров, как было показано выше). Следовательно, причиной таких расхождений может быть только рассогласование между опорными данными – тот факт, что координаты опорных пунктов и точные орбиты наблюдаемых спутников заданы в разных системах координат.

Диаграммы демонстрируют безусловный линейный рост расхождений по мере удаления эпохи наблюдений от референцной эпохи. Это подтверждает сделанный ранее вывод, что со временем ошибки упрощенных методов будут расти и тем самым будут становиться критичными на все менее длинных базисах геодезических привязок.

Векторы привязки, направленные к определяемому пункту с разных сторон, вносят

в положение пункта различные (и по величине, и по знаку) систематические искажения. Тем самым, совместное действие на координаты определяемого пункта систематических ошибок, передаваемых от различных

опорных пунктов, не может быть предсказуемым. Другими словами, привязка к другим опорным пунктам может внести другие систематические ошибки и по знаку, и по величине.

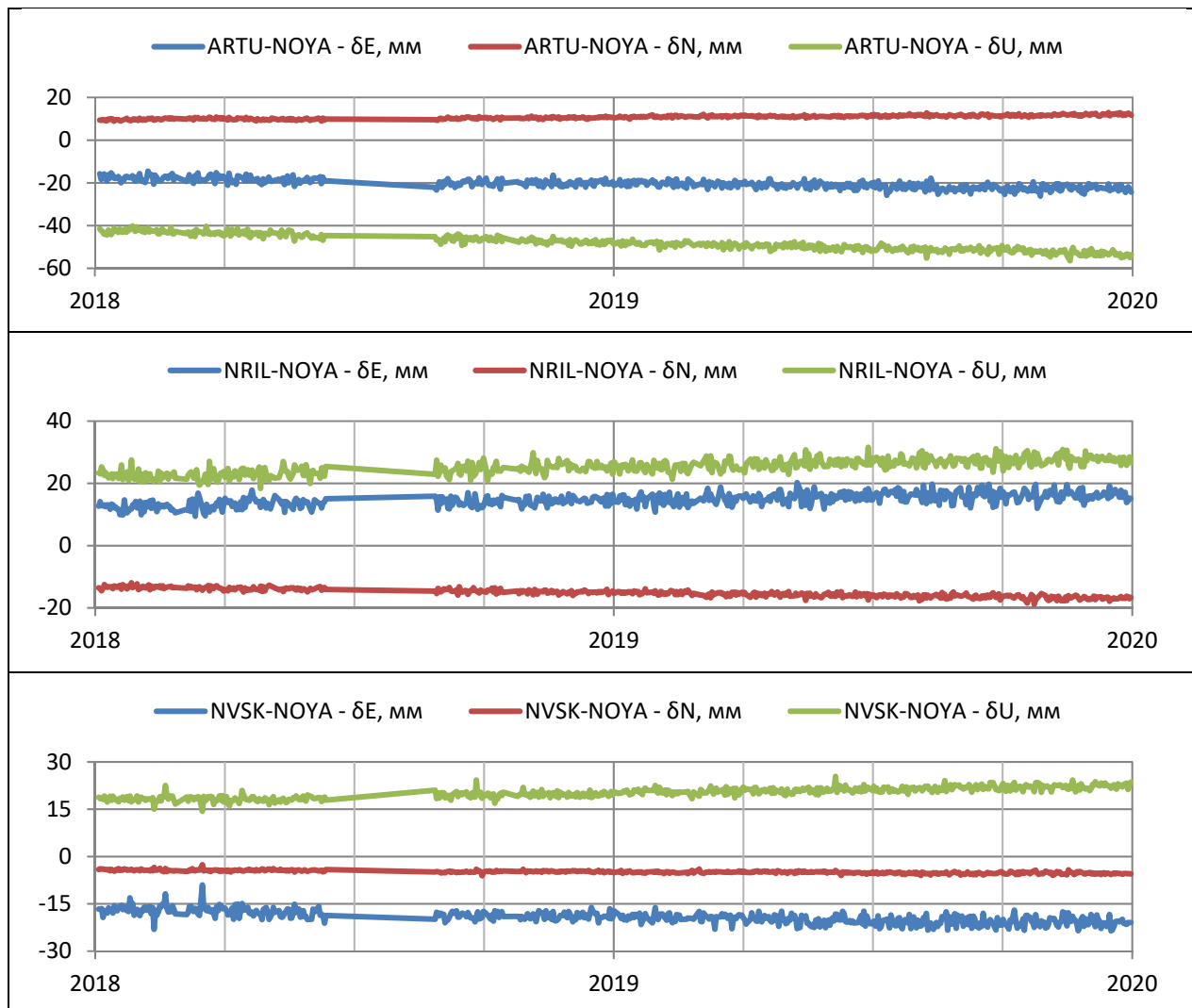


Рис. 3. Расходимость методов 2 и 3 для базисов ARTU-NOYA, NRIL-NOYA и NVSK-NOYA

Итак, выполненные эксперименты показали, что наиболее употребительный упрощенный метод не свободен от систематических ошибок в результатах длиннобазисной привязки, а также приблизительно оценили возможные значения систематических ошибок на настоящее время. Значения оказались непренебрежимыми для тех приложений, для которых выполняется длиннобазисная привязка. Основной причиной таких высоких искажений является рассогласованность между системой коор-

динат опорных пунктов и системой координат опорных орбит. Если в качестве рабочей системы координат принята ГСК-2011, а точные орбиты заданы в системе ITRF2014 на эпоху наблюдений (2018–2019 гг.), то фактически это означает, что в системе ГСК-2011 орбиты развернуты от истинного положения на величину разворота между системами ITRF2014 и ГСК-2011. При обработке GNSS-измерений в системе ГСК-2011 эти развороты будут восприниматься просто как систематические



ошибки орбит. Выполним оценку величины этих систематических ошибок. Модуль скорости относительного вращения систем ITRF2014 и ГСК-2011 составляет 0,0009 "/год. Радиусы орбит спутников GPS имеют величины около 25 000 км. За 8 лет, прошедших от референцной эпохи (2011.0) до середины периода наблюдений (2019.0) разворот опорных орбит спутников в линейной мере составил

$$25\,000\,000\text{ м} \cdot 0,0009\text{ "/год} \cdot 8\text{ лет} / 206\,265'' = 0,9\text{ м.}$$

Это означает, что GNSS-обработка выполняется с опорными орбитами, систематические ошибки которых почти достигают одного метра. Понятно, что такая ситуация в геодезической привязке не может не приводить к ошибкам в координатах определяемых пунктов, что и подтверждают диаграммы на рис. 3. Подробно с механизмом этого влияния можно ознакомиться, например, в [15], разд. 5.3.5, либо в [16], разд. 9.6.1. При использовании различных программ GNSS-обработки (использующих различные алгоритмы обработки GNSS-измерений) фактические систематические ошибки привязки упрощенным методом могут получаться различными по значениям и знакам, но общий уровень их величин и рост по мере удаления от референцной эпохи будет сохраняться.

В свете проведенных экспериментов представляется, что в тех случаях длиннобазисной геодезической привязки, когда точные значения скоростей пунктов неизвестны, вместо упрощенных методов следует использовать приближенные модификации строгих методов 1 или 2, в которых для редукиций используются вычисляемые по моделям приближенные значения скоростей. При использовании приближенной модификации метода 1 пунктам, участвующим в длиннобазисной привязке (опорному, определяемому или обоим), которые расположены на Евразийской плите (не только российские, но и европейские пункты, если в них возникнет необходимость), скорости вычисляются по приведенным в статье формулам с использованием параметров взаимного вращения систем ITRF2014 и ГСК-2011 (см. табл. 3, строка № 1),

а пунктам, расположенным на Североамериканской плите (в Дальневосточном регионе, на Аляске и даже на западе Канады) – с использованием параметров взаимного вращения систем ITRF2014 и ГСК-2011-ДВ (см. табл. 3, строка № 2). При использовании приближенной модификации метода 2 пунктам, расположенным на Евразийской плите, назначаются нулевые значения скоростей (т. е. для них редукиций проводить не надо), а пунктам, расположенным на Североамериканской плите – с использованием параметров взаимного вращения ГСК-2011-ДВ и ГСК-2011 (см. табл. 3, строка № 3). Правда, для использования этого метода требуется перед выполнением обработки GNSS-измерений точные орбиты спутников пересчитывать в систему ГСК-2011.

В случаях, когда выполняется длиннобазисная геодезическая привязка сразу нескольких пунктов, например, местной сети референцных станций, следует все пункты этой сети привязывать к одним и тем же опорным пунктам и в одно и то же время. Это следует делать для того, чтобы избежать возникновения в сети внутренних деформаций, которые могут возникнуть, если различные пункты сети получили различные систематические ошибки длиннобазисной геодезической привязки. Если по прошествии значительного времени к локальной сети добавляются новые пункты, то во избежание возникновения в сети внутренних деформаций новые пункты следует привязывать к уже имеющимся, а не использовать длиннобазисную геодезическую привязку, либо использовать ее для всей обновленной сети заново.

### *Заключение*

В настоящее время строгие методы необходимо применять при обработке сетей ФАГС и ВГС, а также при привязке к ГСК-2011 референцных станций или сетей ДГС, удаленных от опорных пунктов на сотни километров и более. На не столь длинных расстояниях допустимо применение упрощенных методов привязки, хотя по мере удаления эпохи привязки от референцной эпохи 2011.0 допустимое удаление от опорных пунктов будет пропорционально снижаться.

В данной работе выполнена проверка строгих методов длиннобазисной привязки и показан низкий уровень систематических ошибок, допускаемых этими методами в части учета влияния редуцированных факторов. Показано также, что наиболее привлекательный упрощенный метод длиннобазисной привязки по причине недостаточного учета редуцированных факторов привносит в настоящее время в определяемые координаты систематические ошибки в субдециметровом диапазоне, и с удалением от референционной эпохи величины искажений достигнут в скором времени дециметрового уровня.

На основе полученных результатов рекомендовано вместо упрощенных методов длиннобазисной геодезической привязки использовать приближенные модификации двух строгих методов. Приближенный метод 1 для вы-

полнения редукиций координат пунктов между референционной эпохой и эпохами наблюдений использует приближенные значения скоростей пунктов, вычисляемые по моделям взаимного вращения систем ITRF2014 и ГСК-2011. Приближенный метод 2 для пунктов, расположенных на Евразийской плите, вообще не требует выполнения редукиций координат пунктов, однако использует точные орбиты, пересчитанные в систему ГСК-2011. При соблюдении этих условий обе модификации дают практически эквивалентные результаты.

Для случая, когда упрощенным методом выполняется длиннобазисная привязка локальной сети геодезических пунктов, даны рекомендации, предотвращающие возникновение внутренних деформаций локальной сети из-за воздействия систематических ошибок длиннобазисной привязки этим методом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горобец В. П., Кауфман М. Б. Астрономо-геодезическая сеть России и эффективность использования ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. – 2012. – № 2 (6). – С. 48–52.
2. Горобец В. П., Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Результаты построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» // Геодезия и картография. – 2012. – № 2. – С. 53–57.
3. Горобец В. П., Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат // Геопрофи. – 2013. – № 6. – С. 4–9.
4. Горобец В. П., Ефимов Г. Н., Столяров И. А. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 24–37.
5. Вдовин В. С., Дворкин В. В., Карпик А. П., Липатников Л. А., Сорокин С. Д., Стеблов Г. М. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграция в ITRF // Вестник СГУГиТ. – 2018. – № 23 (1). – С. 6–27.
6. Кутушев Ш. Б. Создание карты горизонтальных деформаций земной коры Республики Башкортостан по результатам обработки спутниковых измерений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 6. – С. 24–26.
7. Бовшин Н. А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011 // Геодезия и картография. – 2019. – № 2. – С. 2–14.
8. Список координат и скоростей пунктов, участвовавших в первичном построении системы координат ГСК-2011 на эпоху 1 января 2011 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://cgkipd.ru/opendata/fags/list.php?clear\\_cache=Y](https://cgkipd.ru/opendata/fags/list.php?clear_cache=Y).
9. Бовшин Н. А. Оптимизация условий применения системы ГСК-2011 в Дальневосточном регионе // Геодезия и картография. – 2019. – № 9. – С. 2–9.
10. ITRF2014 station positions at epoch 2010.0 and velocities [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/doc/ITRF2014\\_GNSS.SSC.txt](https://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/doc/ITRF2014_GNSS.SSC.txt).
11. The BKG GNSS Data Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <ftp://igs.bkg.bund.de/IGS/products/orbits/>.
12. The National Institute of Geographic and Forest Information (IGN) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/>.
13. Hilla Steve. The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.igs.org/pub/data/format/sp3c.txt>.

14. Попадъев В. В., Ефимов Г. Н., Зубинский В. И. Геодезическая система координат 2011 года // *Астрономия, геодезия и геофизика : науч.-техн. сб.* – М. : Изд-во ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2018. – С. 139–228.
15. Leick A. *GPS Satellite Surveying*. – 3rd Edition. – John Wiley and Sons, Inc. 2004.
16. Антонович К. М. *Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография в 2 т. Т. 2.* – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.

Получено 01.07.2021

© Н. А. Бовшин, 2021

## METHODS OF LONG BASELINE GNSS-BASED GEODETIC TIE IN THE GSK-2011 REFERENCE FRAME

*Nikolai A. Bovshin*

Federal Scientific and Technical Center of Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure, 26, Onezhskaya St., Moscow, 125413, Russia, Leading Scientist, e-mail: [bovshin\\_na@nsdi.rosreestr.ru](mailto:bovshin_na@nsdi.rosreestr.ru)

On a base of GNSS processing of two-year observations on experimental geodetic network the methods of long baseline geodetic tie in the GSK-2011 reference frame were investigated. From the point of view of systematic errors affecting final results – estimation of station coordinates – were studied both rigorous and simplified methods of geodetic tie, those of practical demand. From different long baseline geodetic tie methods' results comparison systematic errors' main properties were estimated, both their possible level in the present and their behavior in dependence of using geodetic tie method. The article gives the recommendations for the use of approximate geodetic tie methods how to avoid significant coordinate deformations, caused by systematic errors of long baseline geodetic tie, in the coordinates of both standalone station and local geodetic network.

**Keywords:** GSK-2011 reference frame, long baseline geodetic tie, coordinate reduction to the epoch, transformations between GSK-2011 and ITRF reference frames, reference station, ITRF2014, auxiliary frame GSK-2011-FE, FAGN

## REFERENCES

1. Gorobec, V. P., & Kaufman, M. B. (2012). Astronomo-geodetic network of Russia and effectiveness of GLONASS using. *Vestnik GLONASS*, 2(6), 48–52 [in Russian].
2. Gorobec, V. P., Dem'yanov, G. V., Majorov, A. N., & Pobedinskij, G. G. (2012). The results of the construction of the state geocentric coordinate system of the Russian Federation in the framework of the GLONASS Federal Target Program. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 2, 53–57 [in Russian].
3. Gorobec, V. P., Dem'yanov, G. V., Majorov, A. N., & Pobedinskij, G. G. (2013). The current state and directions of development of geodetic support in the Russian Federation. *Coordinate systems. Geoprofi*, 6, 4–9 [in Russian].
4. Gorobets, V. P., Yefimov, G. N., & Stolyarov, I. A. (2015). Experience of Russian Federation in establishment of National Coordinate System 2011. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(30), 24–37 [in Russian].
5. 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].
6. Kutushev, Sh. B. (2016). Creation of a map of horizontal deformations of the earth's crust in the Republic of Bashkortostan based on the results of processing satellite measurements. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 6, 24–26 [in Russian].
7. Bovshin, N. A. (2019). High-precision GNSS-positioning in GSK-2011 reference frame. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 80(2), 2–14. doi: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14 [in Russian].

8. List of station positions at reference epoch 2011.0 and velocities in GSK-2011 reference frame. (n. d.). Retrieved from [https://cgkipd.ru/opendata/fags/list.php?clear\\_cache=Y](https://cgkipd.ru/opendata/fags/list.php?clear_cache=Y).
9. Bovshin, N. A. (2019). On perfecting the employment of GSK-2011 reference frame in the Far East territory. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 80(9), 2–9. doi: 10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9 [in Russian].
10. ITRF2014 station positions at epoch 2010.0 and velocities. (n. d.). Retrieved from [https://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/doc/ITRF2014\\_GNSS.SSC.txt](https://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/doc/ITRF2014_GNSS.SSC.txt).
11. The BKG GNSS Data Center. (n. d.). Retrieved from <ftp://igs.bkg.bund.de/IGS/products/orbits/>.
12. The National Institute of Geographic and Forest Information (IGN). (n. d.). Retrieved from <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/>.
13. Hilla Steve. (n. d.). The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c). Retrieved from <https://files.igs.org/pub/data/format/sp3c.txt>.
14. Popad'yov, V. V., Efimov, G. N., & Zubinskij, V. I. (2018). Geodezicheskaya sistema koordinat 2011 goda. In *Nauchno-tekhnicheskij sbornik: Astronomiya, geodeziya i geofizika [Scientific and Technical Collection: Astronomy, Geodesy and Geophysics]* (pp. 139–228). Moscow: Federal State Budgetary Institution "Center for Geodesy, Cartography and SDI" Publ. [in Russian].
15. Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying* (3rd ed.). John Wiley and Sons, Inc.
16. Antonovich, K. M. (2006). *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii: T. 2 [The use of satellite radio navigation systems in geodesy: Vol. 2]*. Moscow: FGUP Cartgeocentr, 360 p. [in Russian].

Received 01.07.2021

© N. A. Bovshin, 2021