

Уточнение скоростей движения пунктов ФАГС по данным ГНСС-измерений

*Е. Г. Гиенко¹**

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
*e-mail: elenagienko@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена методика определения (или уточнения) скоростей пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) по временным рядам координат, полученным из обработки ГНСС-измерений. Представлены критерии оценки качества решения задачи, отражены вопросы адекватной оценки точности и контроля данных. Внесены предложения по составлению априорной весовой матрицы измерений и скоростей. Обращено внимание на важность предварительного обнаружения и исключения грубых измерений. Приведены результаты определения скорости пункта ФАГС ОХТК, продемонстрирован анализ результатов по рассмотренной методике. Предлагается использовать рассмотренные в статье инструменты анализа решения при автоматизации процесса определения скоростей пунктов ФАГС, а перечисленные критерии оценки результатов выводить в отчетах по вычислениям. Рекомендуется на сайте RGS-center публиковать не только координаты и скорости пунктов ФАГС, но также их средние квадратические погрешности.

Ключевые слова: Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть, скорости движения геодезических пунктов, ГНСС-измерения, весовая матрица

Correction of FAGN points velocities by results of GNSS measurements

E. G. Gienko

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation,
* e-mail: elenagienko@yandex.ru

Abstract. The method of determining the velocities of the Fundamental Astronomical and Geodetic Network (FAGN) points from the coordinates time series obtained from processing GNSS measurements is considered. The criteria for estimation the quality of the solution, the issues of adequate estimation of accuracy and data control are presented. Proposals for the compilation of a priori weight matrix of measurements and velocities are considered. The importance of preliminary detection and exclusion of rough measurements is noted. The results of determining the OХТК point velocities are presented, the analysis of the results is demonstrated. It is proposed to use the decision analysis tools discussed in the article when automating the process of determining the FAGS points velocities, and the listed criteria for evaluating the results should be displayed in reports. It is recommended to publish on the RGS-center website not only the coordinates and velocities of the FAGS points, but also their average square errors.

Keywords: Fundamental Astronomical and Geodetic Network, velocities of the geodetic points, GNSS measurements, weight matrix

Введение

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть предназначена, во-первых, для реализации государственной системы координат ГСК-2011 и, во-вторых, для построения высокоточной модели квазигеоида [1, 2]. Координаты пунктов ФАГС определяются в геоцентрической системе с наивысшей точностью. Из-за глобального движения литосферных плит координаты непрерывно изменяются, поэтому современные каталоги высокоточных геоцентрических координат относятся к определенной опорной эпохе и содержат не только координаты, но и скорости пунктов (например, международная земная координатная основа ITRF2014, [3]).

В настоящее время (на 18.05.22) ФАГС содержит 54 постоянно действующих пунктов, причем для 25 из них скорости не опубликованы вследствие короткого промежутка времени ГНСС-измерений [4]. Поэтому актуальна задача определения и уточнения скоростей движения пунктов ФАГС.

Кроме того, актуальным является уточнение моделей литосферных плит и моделей вертикальных смещений по скоростям смещений геодезических пунктов на территории России. В современных глобальных моделях движения литосферных плит (NUVEL-1A [5], ITRF2014 [6]) значительная часть России относится к Евразийской плите, требует уточнения граница Североамериканской плиты, проходящая по территории Чукотки.

Скорости пунктов необходимо знать для связи текущих координатных определений с государственным каталогом ГСК-2011 [4], а также кинематической системы отсчета ГСК-2011 со статическими системами (например, СК-95, МСК). Кроме того, по уточненным скоростям пунктов ФАГС можно пересчитать их текущие координаты в ГСК-2011, чтобы сравнить с каталожными значениями.

Вопросы проверки и уточнения скоростей пунктов ФАГС рассматривались в статье [7], в [8 – 11] приводятся результаты определения смещений геодезических пунктов и их скоростей по данным ГНСС-измерений. При этом актуальной задачей остается разработка критериев для анализа результатов определения скоростей, для того чтобы в будущем автоматизировать процесс вычисления, контроля и отчетности.

Методика уточнения скоростей пунктов

Скорости пунктов ФАГС определяются на основании рядов прямоугольных пространственных геоцентрических координат, полученных на разные эпохи наблюдений из обработки ГНСС-измерений. Вычисление координат может выполняться как методом точного точечного позиционирования (PPP), так и относительным методом от пунктов IGS, положения которых даны на эпоху наблюдения.

В относительном методе ГНСС исключаются ошибки часов и эфемерид спутников, и другие систематические погрешности, что является несомненным достоинством метода. Однако здесь необходимо знать точные положения исходных пунктов на эпоху наблюдения. И если исходные пункты расположены на разных литосферных плитах, то возможные ошибки в скорости этих пунктов не компенсируются полностью.

Результаты определения координат методом PPP не зависят от положений наземных пунктов, но здесь не компенсируются возможные ошибки используемой эфемеридно-временной информации. Кроме того, в силу особенности метода PPP, оценка точности вычисленных координат, как правило, завышена.

Минимальная продолжительность интервала времени для надежной оценки скоростей пунктов Δt_{\min} определяется исходя из погрешностей координат m_r и априорного значения скорости V_{apr} , которое можно узнать по данным глобальных моделей движения литосферных плит:

$$\Delta t_{\min} = 2m_r / V_{apr}.$$

После получения временных рядов координат необходимо проверить наличие грубых измерений (отскоков), а также по возможности выяснить их причины. Это в первую очередь определяется визуально на диаграммах, где грубые измерения (отскоки) видны вне основной линии тренда. Кроме того, на графиках можно отобразить уравнение линейного тренда, где скорость есть коэффициент наклона прямой, а также вывести показатель достоверности аппроксимации R^2 , близость которого к единице говорит о надежном определении скорости графическим методом.

Дополнительное отображение на графиках координат пунктов ФАГС в ГСК-2011, опубликованных на сайте rgs-centre.ru [4], позволяет выявить возможные ошибки исходных данных (в каталоге или измерениях), особенно для тех случаев, когда пункты ФАГС закладывались позже 2011 года.

При определении скоростей аналитическим методом выполняется взвешенное решение, оценка точности, определяется значимость параметров, выявляются грубые измерения. Исходными данными здесь являются полученные из обработки ГНСС-измерений временные ряды геоцентрических экваториальных координат пунктов $(X_i, Y_i, Z_i)_{ti}$ и соответствующих полных ковариационных матриц координат \mathbf{K}_{XYZi} . Вместо полных ковариационных матриц могут использоваться диагональные матрицы с квадратами средних квадратических погрешностей (СКП) координат на диагонали. Весовая матрица \mathbf{P} вычисляется как

$$\mathbf{P} = \sigma_{apriori}^2 \mathbf{K}_{XYZ}^{-1},$$

где полная ковариационная матрица \mathbf{K}_{XYZ} – блочная матрица, составленная из отдельных ковариационных матриц на разные эпохи \mathbf{K}_{XYZi} , $\sigma_{apriori}^2$ – априорная дисперсия единицы веса.

Скорости пунктов V_x , V_y , V_z оцениваются из решения системы линейных уравнений, составленных из i систем уравнений вида:

$$\begin{bmatrix} (t_i - t_0) & 0 & 0 \\ 0 & (t_i - t_0) & 0 \\ 0 & 0 & (t_i - t_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}$$

где X_0, Y_0, Z_0 – начальные координаты в начальный момент времени t_0 ,
 X_i, Y_i, Z_i – координаты в момент времени t_i ,
 $i = 1..n$, n – число эпох измерений.

Решение системы уравнений $\mathbf{Ax} = \mathbf{f} + \mathbf{v}$ выполняется по методу наименьших квадратов с составлением системы нормальных уравнений, по формулам:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}, \mathbf{g} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{f}, \mathbf{Q} = \mathbf{N}^{-1}, \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{Q} \mathbf{g}.$$

Вычисляется вектор оценок невязок $\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{f}$ и средняя квадратическая погрешность (СКП) единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}}}{n - k}},$$

ковариационная матрица параметров

$$\mathbf{K}_{V_{xyz}} = \mu^2 \mathbf{Q},$$

а также ковариационная матрица остаточных невязок

$$\mathbf{K}_v = \mathbf{K}_{xyz} - \mathbf{A} \mathbf{K}_{V_{xyz}} \mathbf{A}^T,$$

где \mathbf{A} – матрица коэффициентов; \mathbf{x} – вектор неизвестных (скорости пунктов); \mathbf{f} – вектор свободных членов (измерений); \mathbf{N} – матрица коэффициентов нормальных уравнений; \mathbf{v} – вектор остаточных невязок.

Скорости изменения координат в топоцентрической горизонтальной системе V_E, V_N, V_U , и соответствующая ковариационная матрица вычисляются по формулам

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{ENU} = \mathbf{R} \mathbf{K}_{V_{xyz}} \mathbf{R}^T$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix},$$

где B, L – геодезические широта и долгота пункта.

Предлагаются следующие основные критерии для анализа результатов.
 Внутренний контроль:

1) Средняя квадратическая погрешность единицы веса должна соответствовать точности исходной измерительной информации – то есть СКП геоцентрических координат;

2) Проверка наличия грубых измерений: сравнение оценок остаточных невязок и их СКП. Если невязка превышает допустимое значение, то измерение грубое или оценка точности не адекватна (завышена). Грубые измерения визуально видны на диаграммах временных рядов координат, кроме того можно вывести на график линейный тренд и величину достоверности аппроксимации. Перед тем, как исключить грубые измерения, желательно выяснить причину отскоков: ошибки ГНСС-измерений, вызванные разными причинами, или это ошибки в метаданных (часто – в высоте антенны), или это физическое смещение пункта вследствие геодинамических явлений, или это перенос пункта, или изменение оборудования на пункте и др.;

3) Проверка значимости параметров: отношение значения оцениваемого параметра к его СКП должно быть больше единицы. Однако этот критерий не работает при значениях скоростей, близких к нулю. В этом случае предлагается сравнивать оценку скорости с ее априорным значением, ранее определенным по ГНСС-измерениям или вычисленным по модели движения литосферных плит.

Внешний контроль:

1) Сравнение вычисленных скоростей со значениями, приведенными на сайте rgs-centre.ru (при наличии);

2) С полученными скоростями пересчет координат с эпохи наблюдения на эпоху 2011.0, сравнение координат с опубликованными значениями в ГСК-2011, проверка корректности данных на сайте;

3) Сравнение полученных скоростей V_x , V_y , V_z и V_E , V_N , V_U со значениями, вычисленными по глобальной модели движения литосферных плит. Следует обратить внимание на вертикальные смещения, которые отсутствуют в глобальной геодинамической модели, и по возможности, выяснить причины их появления.

В завершение предложений по анализу результатов – примечание по оценке точности вычисления скорости. Формально погрешность скорости, определенной геометрическим методом, есть погрешность координат, разделенная на интервал времени. При таком подходе на больших интервалах времени оценка погрешности скорости будет стремиться к нулю, хотя это не так. Предлагается при вычислениях задавать не только априорную погрешность исходных координат, но и априорную погрешность скорости, на уровне погрешностей скоростей пунктов IGS в системе ITRF, а именно 0,1–1 мм/год [3]. В случае определения координат относительным методом от пунктов IGS можно задавать априорную погрешность на основании опубликованных погрешностей скоростей этих пунктов в каталоге на сайте ITRF.

В описанной методике оценки скоростей движения пунктов, основанной на геометрическом методе, подразумевается малое линейное изменение координат за относительно небольшой промежуток времени. На длительных интервалах времени, разумеется, следует учитывать кривизну глобального движения, связанного с разворотом литосферных плит [12].

Полученные результаты и их анализ

Экспериментальное подтверждение методики оценивания скорости было выполнено для пункта ФАГС ОХТК (Охотск). Установка пункта была выполнена относительно недавно – 18 октября 2018 года, и на сайте RGS-Center в карточке пункта сведения о его скорости пока отсутствуют.

Временные ряды координат для этого пункта вычислялись в СК ITRF на среднюю эпоху ГНСС-измерений методом PPP с помощью онлайн-сервиса постобработки ГНСС-измерений CSRS-PPP (программное обеспечение, разработанное в Канадской службе природных ресурсов, [13], [14]).

Кроме того, координаты пункта ОХТК определялись относительным методом ГНСС с помощью онлайн-сервиса постобработки ГНСС-измерений AUSPOS [15]. Здесь геоцентрические координаты определяются в СК ITRF на среднюю эпоху ГНСС-измерений относительно ближайших станций IGS, с использованием программного обеспечения – Bernese5.2.

Для сравнения результатов использовались скорости, вычисленные по модели движения литосферных плит ITRF2014 [6] с помощью онлайн-калькулятора UNAVCO [16].

Определение скоростей выполнялось графическим и аналитическим методом. Исходные данные – временные ряды пространственных прямоугольных координат (X, Y, Z), а также их СКП. К сожалению, указанные онлайн-сервисы не предоставляют полные ковариационные матрицы вычисленных координат. Однако можно заметить некоторую разницу в оценке точности координат при использовании разных методов постобработки ГНСС-измерений. Например, для пункта ОХТК диапазон СКП координат, полученных относительным методом (AUSPOS), от 4 до 12 мм, а методом PPP (CSRS-PPP) – от 4 до 8 мм.

Подробные результаты определения скорости движения пункта по временным рядам координат, полученных двумя методами с помощью онлайн-сервисов CSRS-PPP и AUSPOS, приведены в таблице.

По данным, приведенным в таблице, можно сделать следующие выводы:

- наиболее достоверно получены скорости по координате X с СКП от 1,0 до 1,3 мм/год и с коэффициентом достоверности аппроксимации (в графическом методе) 0,9126. Скорость V_x является здесь значимым параметром;
- разность оценок V_x в 2,9 мм, полученных аналитически по данным AUSPOS и CSRS-PPP, превышает СКП из обработки. Данное расхождение отражает действительную точность получения скоростей пунктов. С другой стороны, среднее значение скорости V_x , -21,2 мм/год всего на 0,2 мм/год отличается от значения по модели ITRF2014;
- наибольшую погрешность имеет скорость V_z , что соответствует максимальной погрешности исходных координат Z в результате обработки ГНСС-измерений;
- диапазон СКП невязок соответствует СКП единицы веса;
- при определении V_y процент невязок, превышающих их СКП, составляет 45%, что говорит или о наличии грубых измерений, или о незначимом па-

раметре на заданном временном интервале, или о завышенной оценке точности измерений (СКП невязок);

– разброс вертикальных смещений пункта, определенных разными методами, графически и аналитически, свидетельствует о недостоверном определении этой величины, или о недостаточном интервале ГНСС-измерений для надежной оценки;

– сравнение полученных скоростей с данными, вычисленными по модели литосферных плит ITRF2014, показало, что наибольшие расхождения здесь – по скорости V_y (до 3,9 мм/год). Разности по V_x и V_y практически попадают в доверительный интервал, задаваемый удвоенной СКП для вероятности 95%.

В итоге, на примере оценки скоростей пункта ОХТК, продемонстрирован анализ результатов по критериям, описанным в методике.

Результаты определения скорости движения пункта ФАГС ОХТК

Пункт Охотск		V_x , мм/г	V_y , мм/г	V_z , мм/г	V_E , мм/г	V_N , мм/г	V_U , мм/г
UNAVCO	Модель ITRF2014	-21,4	-7,5	-7,5	-14,7	18,8	-
По данным CSRS-PPP	СКП исходных координат, в среднем, мм	4,0	3,0	7,0	3,9	6,2	4,5
	Графически	-19,3	-4,1	-9,1	-13,1	17,1	-2,8
	Аналитически	-22,6	-3,6	-5,85	-13,6	19,2	1,3
	СКП скорости, мм/год	1,0	1,0	2,0	1,4	0,9	1,8
По данным AUSPOS	СКП исходных координат, в среднем, мм	5,5	2,5	11,5	5,5	4,5	10,5
	Графически	-21,2	-4,7	-7,9	-13,2	18,9	-1,4
	Коэффициент достоверности аппроксимации R^2	0,9126	-0,017	-0,007	-	-	-
	Аналитически	-19,7	-4,0	-10,7	-13,9	17,8	-4,3
	СКП скорости, мм/год	1,3	0,6	2,8	2,8	1,4	2,2
	Диапазон СКП невязок, мм	5-6	2-3	10-12	-	-	-
	Процент невязок, превышающих СКП	3%	45%	0%	-	-	-
	СКП единицы веса, мм	16,1					

Заключение

Рассмотренная методика определения скоростей пунктов основывается на простом алгоритме, предполагающем линейные изменения координат на отно-

нительно небольшом интервале времени. Основное внимание уделено анализу результатов, начиная от проверки грубых измерений (координат) на входе и заканчивая оценкой точности с внутренним и внешним контролем полученных скоростей.

Предлагается использовать инструменты анализа решения при автоматизации процесса определения скоростей пунктов ФАГС, и предлагаемые критерии оценки результатов выводить в отчетах по вычислениям.

Рекомендуется на сайте RGS-center публиковать не только координаты и скорости пунктов ФАГС, но также их средние квадратические погрешности.

Исследование выполнено в рамках выполнения работ по СЧ НИР «ГЕОТЕХ-Квант».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 24.11.2016 № 1240. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. 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.
3. ITRF2014 - URL: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2014> (дата обращения: 18.05.22)
4. Координаты пунктов ФАГС – URL: <https://rgs-centre.ru/fags-coords> (дата обращения 18.05.22)
5. IERS Technical Note 21. IERS Conventions (1996)/ D.D. McCarthy (ed) – Paris: Central Bureau of IERS. – Observatoire de Paris, July 1996. – 95 p.
6. ITRF2014 plate motion model/Z. Altamimi, L. Métivier, P. Rebischung [и др.] // Geophysical Journal International. – 2017. – Т. 209. – № 3. – С. 1906–1912. – DOI: 10.1093/gji/ggx136.
7. Липатников Л. А. Проверка опубликованных значений скоростей пунктов ФАГС в новой государственной системе координат ГСК-2011 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2016. – Т. 1. – № 2. – С. 86–91.
8. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., и др. О сравнении результатов определения координат и скоростей смещения пунктов с помощью двухчастотных приемников космической геодезии //Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т.25, №2. – С. 63-77.
9. Терещенко В.Е., Лагутина Е.К. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений// Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С.76-94.
10. Терещенко В.Е., Радченко А.В., Мелкий В.А. Глобальная система отсчета и ее локальная реализация – государственная система координат 2011 года //Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т.25, №3. – С.89-106
11. Рахимбердиева М.Н., Фазилова Д.Ш. Исследование координат и скоростей станций сети REGINA // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2021. 6(87). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11849>
12. Argus D. F. The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy / D. F. Argus, R. G. Gordon, M. B. Hefflin, C. Ma, R. J. Eanes, P. Willis, W. R. Peltier, S. E. Owen // Geophys. J. Int. - 2010. - Т. 180. - № 3. - С. 913-960.
13. Natural Resources Canada. Precise Point Positioning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.

14. CSRS-PPP Version 3: Tutorial. – URL: https://webapp.csrscs.nrcan-nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/sample_doc_filesV3/NRCan%20CSRS-PPP-v3_Tutorial%20EN.pdf (дата обращения 18.05.22)

15. AUSPOS - Online GPS Processing Service / Geoscience Australia – URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos> (дата обращения: 27.04.2022)

16. UNAVCO Plate Motion Calculator [Электронный ресурс] / – Электрон. дан., 2022. – URL: <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>.

© *Е. Г. Гиенко, 2022*