

Результаты последнего уравнивания фундаментальной астрономо-геодезической сети в системе ITRF

© Н. А. Бовшин¹, А. Ю. Лапшин¹, Г. Э. Мельник^{1,2}, В. В. Попадьев¹

¹Роскадастр, г. Москва, Россия

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Реферат

Реализации земных систем координат в XX веке прошли путь от каталогов разрозненных астрономо-геодезических сетей до постоянно действующих станций, обработанных с опорой на глобально распределённые пункты международной службы вращения Земли. Соответственно этому менялись и принципы описания их взаимного положения с помощью координат. Действующая сейчас система координат 2011 г. введена как статическая с расчётом на небольшой эффект от медленно накапливающихся деформаций каркаса пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). Дальнейшая практика использования ГСК-2011 выявила территории с существенными смещениями земной коры, где общее изменение координат в международной системе имеет другое направление и скорость. Также неудобно, что при приведении на стандартную эпоху 2011,0 долгопериодические изменения взаимного положения пунктов учитываются неявно с помощью инструментов ITRF.

Последнее уравнивание ФАГС в системе ITRF2014 и ITRF2020 с опорой на международные пункты IGS за длительный период позволило аппроксимировать изменения координат п. ФАГС линейными функциями и периодическими гармониками, что позволяет экстраполировать координаты п. ФАГС как в будущее, так и в прошлое (более уверенно). Уверенно выделены периоды с амплитудой до 1 см, что позволит создать систему координат, обеспечивающую запас точности для подавляющего большинства геодезических приложений.

Ключевые слова: международная система координат, ITRF, государственная система координат, фундаментальная астрономо-геодезическая сеть, ГНСС.

Контакты для связи: Попадьев Виктор Валерьевич (azyas@mail.ru).

Для цитирования: Бовшин Н. А., Лапшин А. Ю., Мельник Г. Э., Попадьев В. В. Результаты последнего уравнивания фундаментальной астрономо-геодезической сети в системе ITRF // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 72. С. 3–9.
<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.72.3-9>

Results of the Recent Adjustment of the Fundamental Astronomical and Geodetic Network Using ITRF

N. A. Bovshin¹, A. Yu. Lapshin¹, G. E. Melnik^{1,2}, V. V. Popadyev¹

¹Roskadastr, Moscow, Russia

²IPE RAS, Moscow, Russia

Abstract

Implementations of terrestrial coordinate systems in the 20th century have gone from the catalogs of isolated astrogeodetic networks to continuously operating geodetic points processed based on globally distributed points of the International Earth Rotation Service. Accordingly, the principles of describing their mutual position using coordinates have also changed. The current coordinate reference system of 2011 was introduced as a static one with the expectation of a small effect from slowly accumulating deformations of the frame of the FAGS framework. Further practice of using CRS of 2011 revealed areas with significant displacements of the earth's crust, where the general change in the coordinates of the international system has a different direction and speed. It is also inconvenient that long-term changes in the mutual position of points are taken into account implicitly using the ITRF tools when reducing to the standard epoch 2011.0.

The last adjustment of the FAGS in the ITRF2014 and ITRF2020 system based on international IGS points over a long period made it possible to approximate changes in the coordinates of the FAGS point by linear functions and periodic harmonics, which makes it possible to extrapolate the coordinates of the FAGS point both into the future and into the past (more precisely). Periods with an amplitude of up to 1 cm are confidently identified, which may allow creating a coordinate system that provides a margin of accuracy for the vast majority of geodetic applications.

Keywords: international CRS, ITRF, state CRF, fundamental astrogeodetic network, GNSS.

Contacts: Viktor V. Popadyev (azyas@mail.ru).

For citation: Bovshin N. A., Lapshin A. Yu., Melnik G. E., Popadyev V. V. Results of the recent adjustment of the fundamental astronomical and geodetic network using ITRF // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 72. P. 3–9.
<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.72.3-9>

Введение

В 2022–2024 гг. в рамках п. 5.2. НИР «ГЕОКАРТА-2030» завершена экспериментальная обработка измерений с пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) в системах ITRF2014 и ITRF2020. Основным материалом для получения рядов координат пунктов ФАГС стали результаты обработки и уравнивания измерений с п. ФАГС за 2015–2022 гг., позже добавлены результаты за 2023–2024 гг. За исходные взяты пункты из ядра IGS, обеспечивающие глобальное встраивание ФАГС в каркас IGS.

Обработка и уравнивание выполнены в различных пакетах программ: GAMIT (суточные и трёхсуточные решения), ГЕОМАСТЕР (суточные решения), BERNESE (суточные решения только за 2020 год).

Экспериментальный научный пакет программ ГЕОМАСТЕР использует при обработке ГНСС-измерений метод двойных разностей и модифицированный фильтр Калмана (некоторые дополнительные детали приводятся в статье (Бовшин, 2021)). Для уравнивания временных рядов ФАГС используется стандартная процедура метода наименьших квадратов и модель поведения, включающая постоянные параметры (координаты пунктов в референционную эпоху), их ступенчатые изменения (по причине сейсмической активности, смены аппаратуры на пункте, и т. п.), линейный ход (отражающий геодинамические и техногенные процессы), а также сезонные вариации.

При обработке ГНСС-наблюдений с пунктов ФАГС в системе ITRF2020 использованы:

- координаты и скорости смещения пунктов IGS с ftp-сервера Астрономического института Бернского университета из раздела для пользователей Bernese 5.2:

<http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/STA/>;

- окончательные (final) точные эфемериды навигационных ИСЗ в формате SP3:

<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products>

https://igs.org/products/#orbits_clocks;

- точные поправки часов спутников GPS и ГЛОНАСС на даты наблюдений в формате RINEX Clock;

- карты ионосферных параметров TEC на регулярной сетке в формате IONEX:

<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>

<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/ionosphere/>

<ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/ionosphere/>

<ftp://nfs.kasi.re.kr/gps/products/ionex/>

<ftp://gssc.esa.int/gnss/products/ionex/>;

- дифференциальные кодовые задержки DCB:

<ftp://igs.bkg.bund.de/IGS/products/dcb/>

<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/bias/>;

- модели учета влияния океанических приливов для станций IGS для учета смещения пунк-

тов из-за океанической нагрузки (приливов) на основе моделей астрономической обсерватории Onsala Space Observatory по запросу с приближенными координатами станций:

<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>;

- модели тропосферной рефракции вычислительного центра VMF Data Server (Vienna, Austria) в виде тропосферных отображающих функций VMF1:

<https://vmf.geo.tuwien.ac.at/>;

- стандартные параметры антенн в формате ANTEX:

<https://igs.org/wg/antenna/#files>;

- параметры антенн, указанные в log-файлах пунктов ФАГС. На рис. 1 показаны основные типы спутниковых антенн пунктов ФАГС.

Для выполнения исследований, результаты которых представлены в данной работе, использовались суточные решения GAMIT и ГЕОМАСТЕР.

Результаты BERNESE за 2020 год и трёхсуточные результаты GAMIT использованы для контроля.

На рис. 2 приведен пример обработки измерений с пункта LOVJ с 2015 по 2024 гг. Для удобства разделения на плановую и высотную часть геоцентрические координаты преобразованы в топоцентрические с началом в точке, соответствующей эпохе 2015.0. Для оценки масштаба нарисована окружность, радиус которой в реальности соответствует 10 см.

Также точками, соответствующими 2011–2025 гг., нанесены прогнозные координаты пункта по результатам обработки двухлетних измерений 2010–2011 гг. при установлении ГСК-2011 с помощью ПО BERNESE (Горобец, Кауфман, 2012), которая получена из обработки п. ФАГС с опорой на пункты IGS в системе ITRF2008, координаты опорных пунктов приведены на эпоху измерений со стандартной эпохи 2005,0 (Altamimi et al., 2011). Полученное отступление прогнозной кривой от результатов реальной обработки показывает локальную деградацию координат пункта в системе каталога ГСК-2011 (Попадьев и др., 2018), полученного по результатам обработки лишь двухлетних наблюдений.

Мы предполагаем, что реальные временные ряды, составленные из суточных решений, не отражают реальное расположение центра пункта в конкретный день, главным образом по причине неучтенного влияния атмосферы. Для вычисления более надежных координат пункта полученные временные ряды удобно аппроксимировать в общем случае нелинейной функцией, для изменения координат геодезических пунктов удобно использовать линейную функцию и с малыми нелинейными отклонениями.

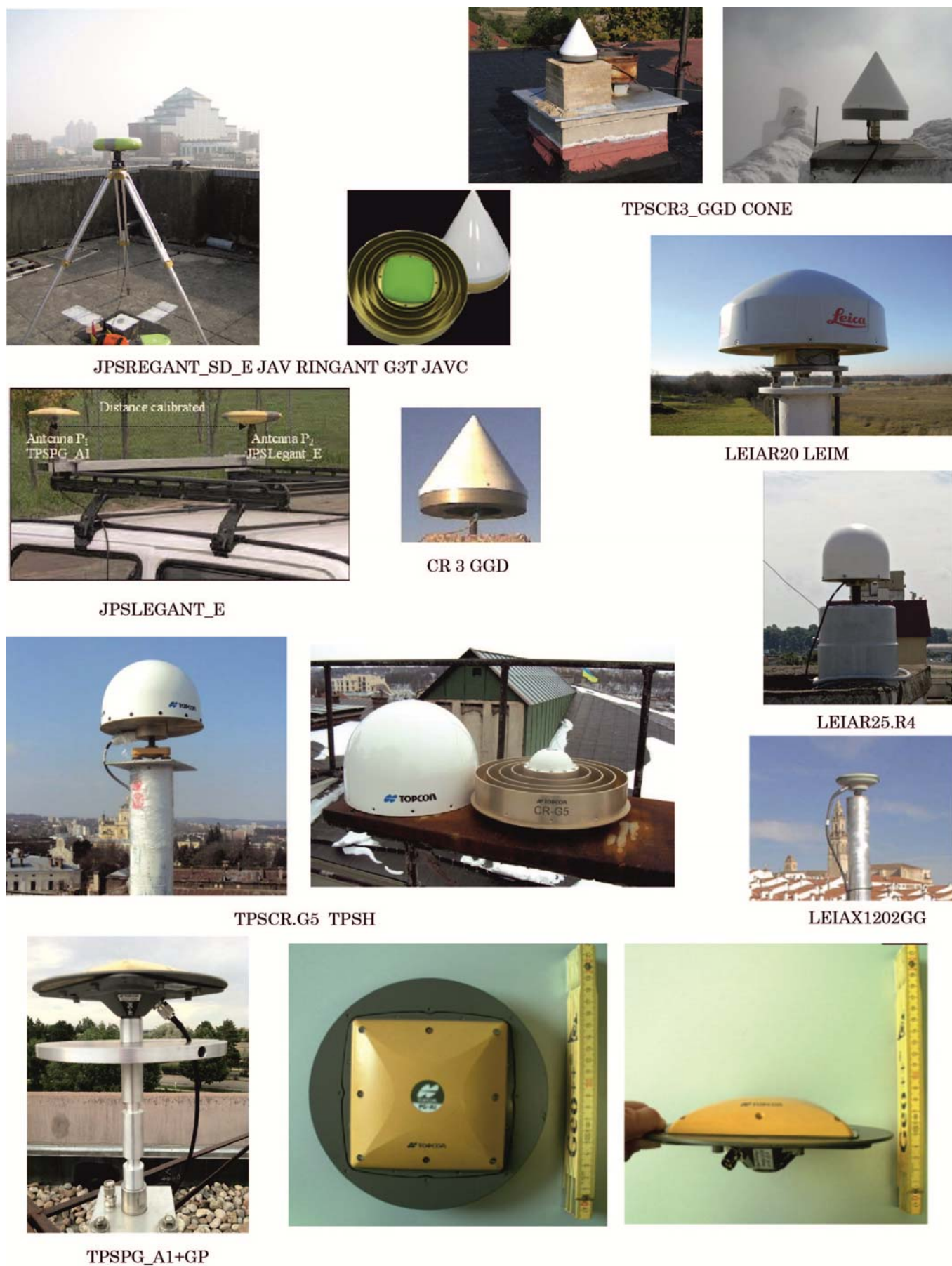


Рис. 1. Основные используемые типы антенн на пунктах ФАГС

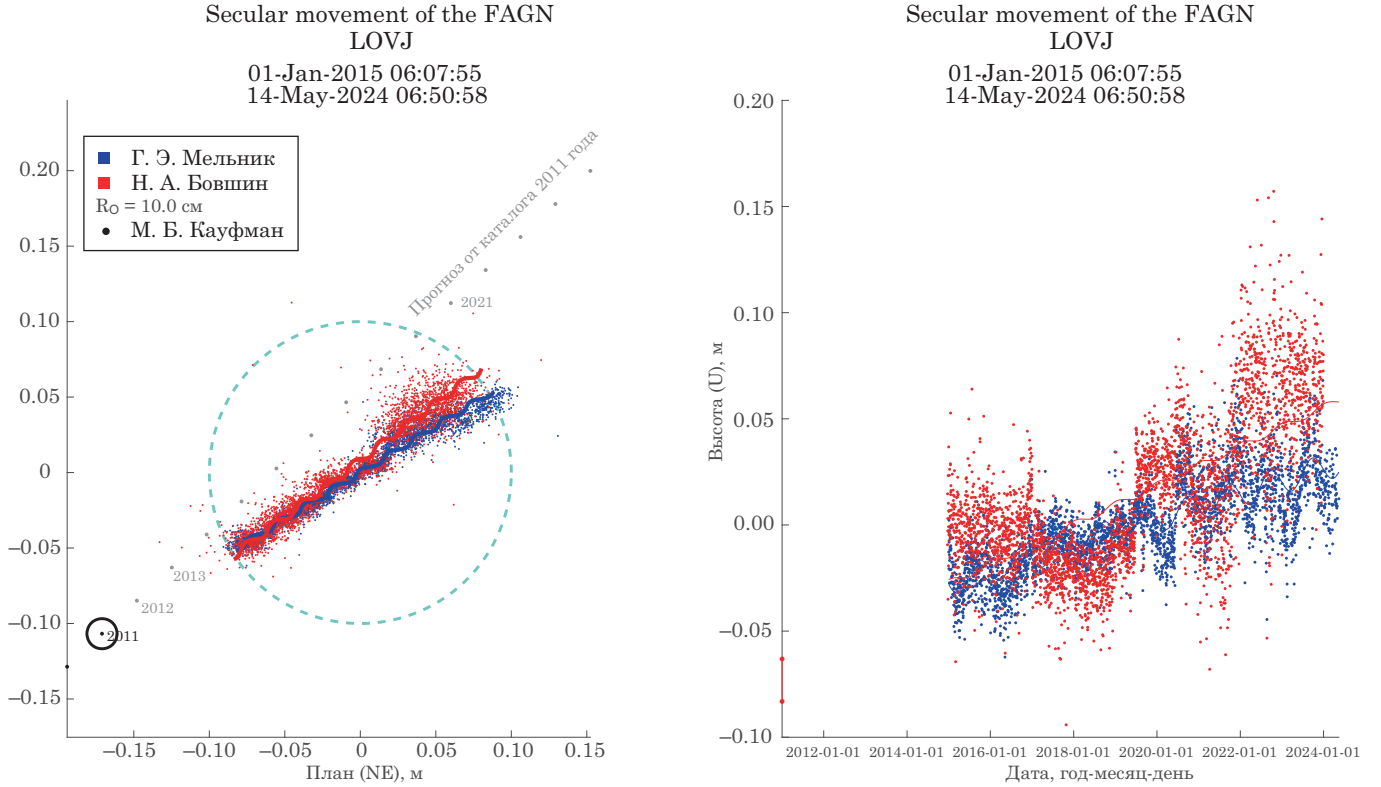


Рис. 2. Плановые и высотные изменения координат пункта LOVJ в системе ITRF2020, вычисленные в ПО GAMIT, ГЕОМАСТЕР, в ПО BERNESЕ дан прогноз по результатам обработки измерения за 2010–2011 гг. Соответствующие синяя и красная линии построены по коэффициентам для пункта LOVJ из табл. 1–2.

Одним из новшеств ITRF2020 (Altamimi et al., 2023) по сравнению с ITRF2014 (Altamimi et al., 2016) стала возможность учёта периодических изменений координат опорных пунктов (с периодами менее 1 года). Ранее периодические изменения координат проявлялись при обработке многолетних измерений, но не учитывались, поскольку они описывают колебания на уровне 1–5 см, что сопоставимо с точностью суточной обработки.

Полученные временные ряды геоцентрических координат п. ФАГС и их изменения в топоцентрической системе сглажены с помощью линейно-гармонической аппроксимации, где положение пункта на любой момент времени представлено следующим образом:

$$X(MJD) = X_0 + v_X \cdot (MJD - MJD_0) + C_1 \cos \omega MJD + S_1 \sin \omega MJD + C_2 \cos 2\omega MJD + S_2 \sin 2\omega MJD + \dots, \quad (1)$$

где циклическая частота $\omega = 2\pi/365.25$, гармонические коэффициенты C_n, S_n учитывают внутригодовые вариации координат пункта, аналогично для остальных координат. Ранее такая модель применена для анализа вариаций гравитационного поля Земли (Спесивцев, 2016). Для удобства связи с астрономическими эпохами в качестве ар-

гумента используется модифицированная юлианская дата MJD .

Подход (1) существенно отличается от обычного приёма, где выделяется только линейный (многолетний) тренд в изменении координат (к примеру, X) в виде

$$X(MJD) = a \cdot MJD + b,$$

что эквивалентно принятой в практике модели

$$X(MJD) = X_0 + v_X \cdot (MJD - MJD_0),$$

где X_0 — положение пункта на стандартную эпоху, при этом

$$a = v_X, \quad b = -v_X \cdot MJD_0,$$

многолетняя скорость изменения v_X выражена в м/сут.

Поскольку линейные и тригонометрические функции в общем случае неортогональны, то некорректно сначала выделять и удалять линейный тренд, а затем выполнять разложение в ряд Фурье. Легко видеть, что при попытке выделить линейный тренд у простейшей периодической функции $f(x) = \sin x$ на одном или двух периодах результирующая прямая будет иметь наклон при любом разбиении, при том что векового возрастания функция не имеет.

Таблица 1

Коэффициенты разложения координат пунктов в ITRF2020, полученных Г. Э. Мельником в ПО GAMIT

LOVJ	X	Y	Z	N	E	U
b	1981442.5506	1367711.4735	5886954.9561	-1.7978	-2.9287	-0.9654
c_1	0.0012514	0.0003974	0.0035312	0.00016575	-0.00038382	0.0037441
s_1	-0.0016068	0.00091168	-0.00513	-0.0011855	0.0016631	-0.0050556
c_2	0.0004538	0.00057105	-0.00029924	-0.00075918	0.00021217	-1.4581e-05
s_2	-0.00010228	0.00048915	0.0024607	0.00074666	0.00046066	0.0023526
a	-4.6608e-05	2.8463e-05	2.6772e-05	3.0634e-05	4.9901e-05	1.6452e-05

Таблица 2

Коэффициенты разложения координат пунктов в ITRF2020, полученных Н. А. Бовшиным в ПО Геомастер

LOVJ	X	Y	Z	N	E	U
b	1981442.6103	1367711.6152	5886954.3644	-2.1406	-2.8459	-1.4647
c_1	-2.2343e-05	0.00068943	0.00096997	1.9254e-05	0.00058008	0.0010391
s_1	0.0011706	0.0023312	0.0004509	-0.0019497	0.0012535	0.0012788
c_2	0.0016961	0.0019721	0.0019036	-0.0016147	0.00065948	0.0027107
s_2	-0.00099888	0.0013536	0.0037439	0.0014583	0.0016814	0.0034487
a	-4.7573e-05	2.5996e-05	3.7113e-05	3.6559e-05	4.8419e-05	2.5206e-05

Полученные по модели (1) коэффициенты разложения геоцентрических координат X , Y , Z пунктов представлены в табл. 1–2 (коэффициенты в м, кроме a , где размерность м/сут на примере пункта LOVJ). Коэффициенты разложения для топоцентрических координат N , E , U служат для иллюстрации.

Сопоставление исходных временных рядов координат и результатов аппроксимации позволяют выделить наиболее уверенно прогнозируемые пункты, образующие основу всей сети: AMDR, ANDR, ARKH, AST3, BARE, BELG, BORO, CHIT, CHRD, CNG1, DKSJ, EKTG, EKTR, FSVO, IRKO, IRKU, KAGP, KHAB, KHAZ, KIZ1, KLN1, KLPS, KOTL, LOVJ, MAG1, MAGJ, MAMA, MURM, MOBJ, MURM, NARY, NERY, NIRO, NNOV, NOVG, NOYA, NSK1, OHA1, OMSR, OREN, OXTK, PEVK, PTGK, PULJ, RBCS, ROST, RSTD, RSTS, SAMR, SEMH, SEV1, SLH1, SPB2, TILK, TURA, UNGN, URAL, USNR, VLDV, VNOV, ZHEL.

Коэффициенты наиболее стабильных пунктов позволяют иметь доступ к ITRF2020 по измерениям только с ФАГС.

Топоцентрические изменения координат намного лучше проявляют хорошо выраженные периодические изменения как в плане (рис. 3), так и по высоте (рис. 4). На рис. 4 наложены гармоника

от всех пунктов ФАГС, схожее поведение прослеживается в высотной составляющей.

Следует отметить, что такие периодические изменения координат пунктов обусловлены не только и не столько *смещениями* конкретного геодезического пункта. Поскольку при обработке пространственной векторной сети общий «каркас» из исходных (IGS) и определяемых (ФАГС) пунктов наилучшим образом приближается к исходным пунктам («мягкая вставка»), то периодические изменения координат, проявляющиеся в результатах обработки, выражают суммарный эффект от смещений всего множества опорных и определяемых пунктов. Уверенно выявить этот эффект может только долгая многовариантная обработка сети с опорой на различные наборы исходных пунктов IGS, как глобально распределённые, так и сгруппированные в локальные кластеры. К сожалению, такое многовариантное уравнивание по разным причинам не выполнено.

К несущественным недостаткам обработки можно отнести и то, что результаты представлены в гипотетически вычисляемой системе, свободной от постоянной приливной деформации в твёрдой Земле (tide-free), тогда как на реальной Земле максимальная точность наблюдаемых результатов достигается в системе нулевого прилива (zero-tide) ([Luzum, Petit, 2012](#)).

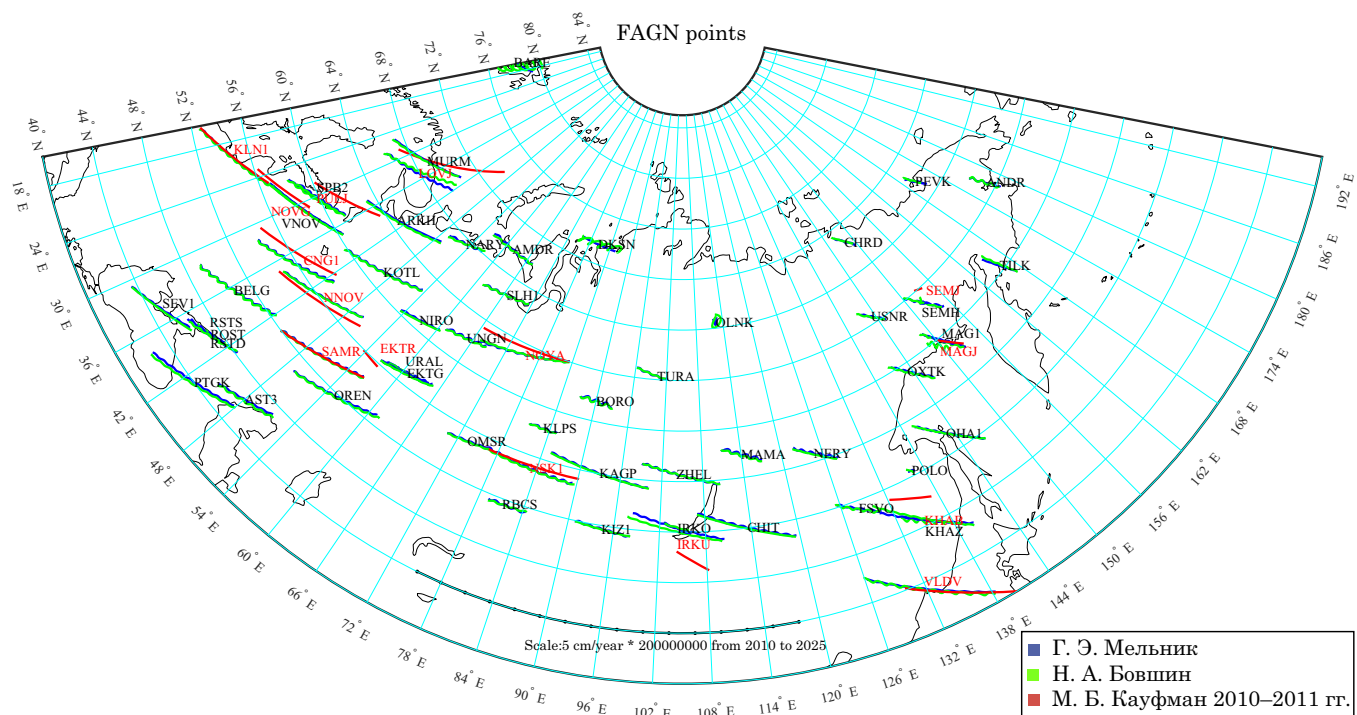


Рис. 3. Плановые изменения координат п. ФАГС в системе ITRF2020, вычисленные по коэффициентам линейно-гармонической аппроксимации по различным временным рядам. Реальные изменения координат (в метрах) увеличены в $0.2 \cdot 10^9$ раз

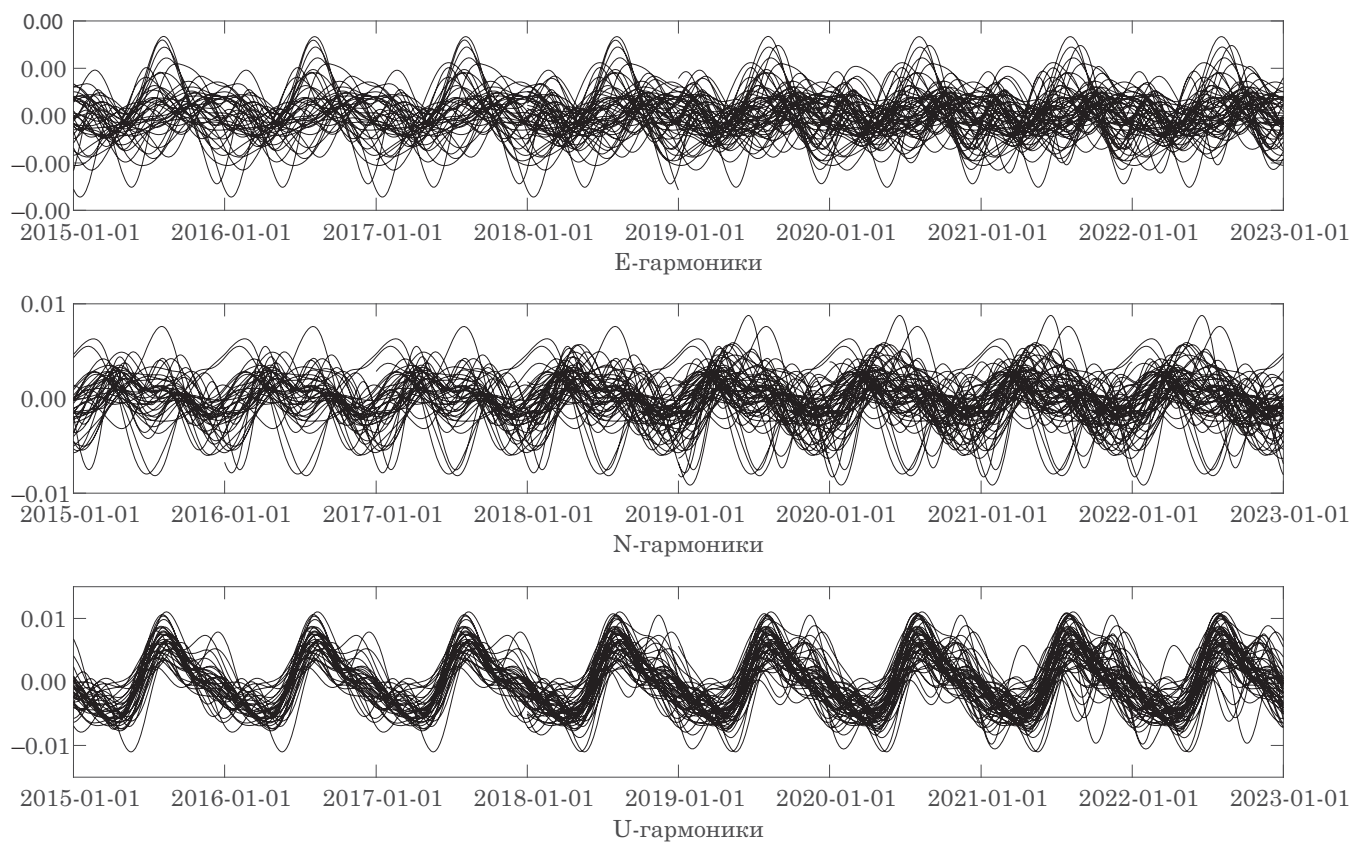


Рис. 4. Сравнение плановых и высотных изменений координат п. ФАГС. Наложены только гармонические (без линейных) изменения координат всех пунктов ФАГС

Заключение

Обработка ФАГС в системе ITRF2020 с опорой на пункты IGS за длительный период позволила выявить годичные и сезонные изменения координат п. ФАГС, затем аппроксимировать линейными функциями и периодическими гармониками, что позволяет экстраполировать координаты п. ФАГС как в будущее, так и в прошлое (более уверенно). Выделены ярко выраженные периоды с амплитудой до 1 см, учёт этих изменений позволяет обеспечить доступ к ITRF с помощью пунктов ФАГС.

Выделение линейных коэффициентов векового изменения координат п. ФАГС и гармонических вариаций — один из путей создания системы координат, привязанной к территории России, обеспечивающую запас точности для подавляющего большинства практических геодезических приложений. Такой подход принят в международной практике и соответствует международным рекомендациям ([ISO 19111:2018](#); [ISO/CD 19161-1](#)). Пункты ФАГС в России редко подвержены скачкообразным изменениям (в каталог координат можно не включать разрывные члены). К редким исключениям можно отнести пункт РЕТТ.

Коэффициенты уравнений (1) в виде тех, что приведены в табл. 1–2, могут быть использованы при обработке измерений в ITRF2020 на основе п. ФАГС и приведении между эпохами, в частности на эпоху 2011 года.

Представленные результаты могут быть ценны как для уточнения моделей геодинамических явлений на территории России, так и при выводе земной системы координат с учётом векторов скоростей на территории России.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках раздела 5.2. НИР «Геокарта-2030» Федерального проекта «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» Государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» на 2021–2030 гг. № 1210806000081-5 (номер ЕГИСУ).

Литература

- Бовшин Н. А. Методы длиннобазисной геодезической GNSS-привязки в системе координат ГСК-2011 // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 6. С. 5–16. doi: 10.33764/24111759-2021-26-6-5-16.
- Горобец В. П., Кауфман М. Б. Астрономо-геодезическая сеть России и эффективность использования ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 2 (6). С. 48–52.
- Попадьёв В. В., Ефимов Г. Н., Зубинский В. И. Геодезическая система координат 2011 года. С. 139–228 в сб.: Астрономия, геодезия и геофизика. М.: Изд-во ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2018. 236 с.
- Снесивцев А. А. Исследование вариаций гравитационного поля Земли по данным космической геодезии // Геодезия и картография. 2016. № 9. С. 5–9. doi: 10.22389/0016-7126-2016-915-9-5-9.
- Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame // Journal of Geodesy. 2011. Vol. 85. P. 457–473.
- Altamimi Z., Rebischung P., Metivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. Vol. 121, Iss. 8. doi: 10.1002/2016JB013098.
- Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // Journal of Geodesy. 2023. Vol. 97. Article number 47. doi: 10.1007/s00190-023-01738-w.
- Earthdata Login [Электронный ресурс]. URL: <https://cdsis.nasa.gov/archive/gnss/products> (дата обращения: 01.09.2024).
- IGS. Antenna files [Электронный ресурс] <https://igs.org/wg/antenna/#files> (дата обращения: 01.09.2024).
- IGS. Precise Orbit and Clock Products [Электронный ресурс] https://igs.org/products/#orbits_clocks (дата обращения: 01.09.2024).
- ISO 19111:2019, Geographic information – Referencing by coordinates. 2019.
- ISO/CD 19161-1, Geographic information – Geodetic references – Part 1: The international terrestrial reference system (ITRS). 2020.
- Luzum B., Petit G. The IERS Conventions (2010): reference systems and new models. Proceedings of the International Astronomical Union. 2012;10(H16):227-228. doi:10.1017/S1743921314005535
- Ocean Tide Loading [Электронный ресурс] <http://holt.oso.chalmers.se/loading/> (дата обращения: 01.09.2024).
- VMF Data Server [Электронный ресурс] <https://vmf.geo.tuwien.ac.at/> (дата обращения: 01.09.2024).