

## О создании базы данных скоростей ГНСС-станций

© В. Л. Горшков<sup>1</sup>, А. В. Мохнаткин<sup>1,2</sup>, Н. В. Щербакова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Определение поля скоростей станций по ГНСС-наблюдениям является основой геодинамических исследований как в глобальном, так и региональном масштабе. В поддерживаемых общедоступных глобальных базах данных скоростей станций территория РФ представлена только десятком станций, входящих в состав международных сетей IGS и EPN, в то время как только на европейской части РФ функционирует несколько сотен перманентных станций. В работе представлен опыт формирования базы скоростей ГНСС-станций для Восточно-Европейской платформы (ВЕП), в настоящее время содержащей около 200 станций, из них более сотни российской принадлежности.

При постобработке исходных данных с помощью пакета GIPSY использованы параметры современных моделей, а в ряды положений включены все нагрузочные коррекции.

Описан метод формирования скоростей станций, включающий фильтрацию выбросов и сезонности, а также учёт в рядах положений сдвигов разной природы, наиболее существенно влияющих на оценку скоростей и являющийся поэтому самым проблемным этапом при автоматизации обработки потока исходных данных. Полученное поле скоростей станций использовано для оценки геодинамического взаимодействия двух крупных блоков ВЕП — Балтийского щита и Русской плиты.

**Ключевые слова:** скорости ГНСС-станций, геодинамика Восточно-Европейской платформы, Балтийский щит, пакет GIPSY-OASIS.

### Введение

Для формирования поля скоростей сети ГНСС-станций, являющегося основой для геодинамических исследований, необходим учёт многих модельных параметров при обработке исходных данных и по-

следующих модельных коррекций в ряды наблюдений. Выбор наилучших моделей при этом остаётся субъективным фактором, хотя современные модели, как правило, хорошо сходятся между собой и разброс между ними не вносит значимых изменений в скорости станций.

Однако последующий анализ присутствующих ГНСС-наблюдениям ошибок и их фильтрация представляют более серьёзную проблему при постоянно растущем количестве станций, зачастую не обеспеченных сопутствующей информацией (log-файлы). Наличие некомпенсированной нагрузочными коррекциями квазисезонности в рядах положений, разрывы их непрерывности (сдвиги) разной, чаще неизвестной природы, а также выбросы в компонентах положений становятся большим препятствием при автоматизации процесса получения скоростей станций. Многие из перечисленного не может быть элементарно оценено или учтено ввиду присутствия в рядах систематических проявлений других, не моделируемых пока процессов.

Нам известны две поддерживаемые общедоступные глобальные базы данных скоростей станций. Одна из них в Лаборатории реактивного движения (НАСА) содержит данные более 2500 станций. Другая, как часть проекта по глобальному картированию поля напряжений, в Геодезической Лаборатории Невады содержит около 15000 ГНСС-станций. Для решения вышеупомянутых проблем при формировании скоростей станций в этих проектах применяются разные методы, описанные соответственно в [1,2]. В обоих подходах основной проблемой является обнаружение и учёт скачков в рядах положений, поскольку именно этот фактор оказывает наибольшее влияние на оценки скоростей станций при некорректном его учёте, особенно для непродолжительных рядов.

В данной работе представлена оригинальная методика формирования поля скоростей ГНСС-станций и исследованы некоторые геодинамические характеристики Восточно-Европейской платформы (ВЕП).

### **Обработка исходных данных**

Область, охваченная нашей базой данных, ограничена приблизительно границами Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Помимо ГНСС-станций международных служб IGS и EPN, на ней располагается ряд станций из национальных геодезических сетей Финляндии, Эстонии, Латвии. Из российских станций представлены некоторые базовые станции геодезических компаний «НАВГЕОКОМ» и «ПРИН». Особо

плотная сеть покрывает Санкт-Петербург и Ленинградскую область базовыми станциями геодезического предприятия «ГЕОМАТИК» и соответствующего подразделения Комитета по градостроительству и архитектуре Санкт-Петербурга. Мы признательны коллегам всех перечисленных организаций за постоянно предоставляемый исходный материал наблюдений. Распределение станций, входящих в базу скоростей, представлено на рис. 1.

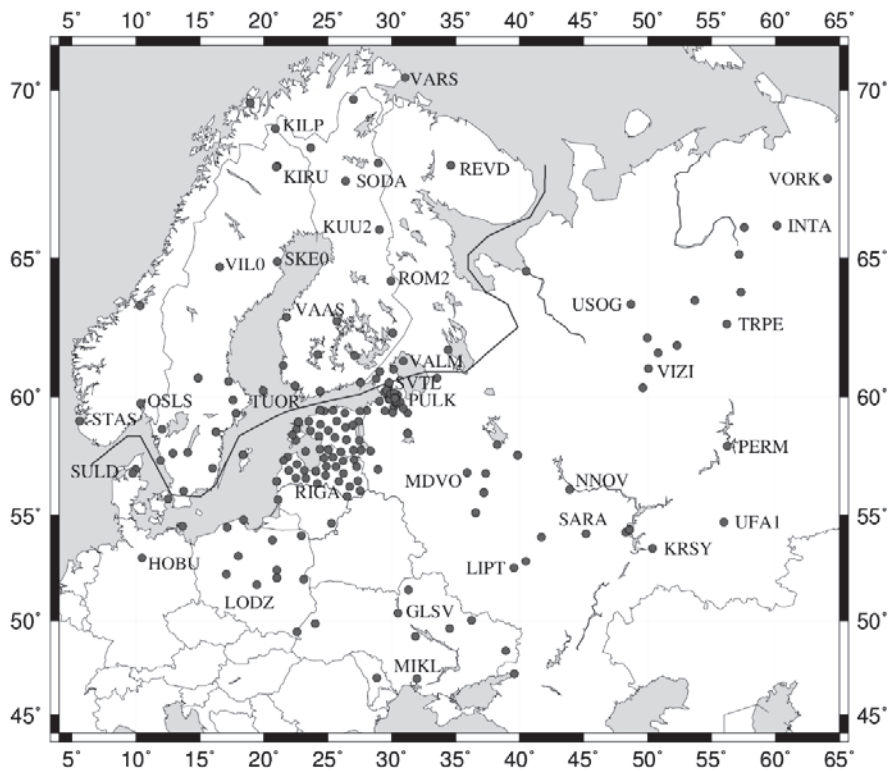


Рис. 1. Распределение ГНСС-станций.  
Линией отмечена зона сопряжения БШ и РП

Многие станции вышеупомянутых компаний появились сравнительно недавно, поэтому база данных очень неоднородна по продолжительности. Станции с продолжительностью функционирования менее двух лет не рассматривались в геодинимических аспектах данной работы. К сожалению, исходный материал сохраняется в ряде геодезических компаний не более нескольких последних месяцев, что приводит к невозможной утрате данных из научного оборота и является неоправданной расточительностью. Следует отметить также, что принад-

лежность российских станций разным государственным и коммерческим структурам сильно затрудняет эффективность их научного использования.

Результаты наблюдений обрабатываются пакетом Gipsy 6.3 (JPL NASA) с применением стратегии PPP (Precise Point Positioning). При этом учитываются:

- абсолютная калибровка антенн;
- точные орбитальные параметры, вычисленные относительно центра масс (total) Земли, и поправки часов, вычисленные в системе IGS08 с использованием стандартов IERS2010 ([ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL\\_GPS\\_Products/Final](ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL_GPS_Products/Final));
- параметры ориентации Земли из IERS решения C04 (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>);
- тропосферная модель VMF1/ECMWF (<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/STD/>);
- все твердотельные приливы, включая соответствующие полюсные приливы;
- океанические приливные нагрузки по модели GOT4.8 (<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>), исправленные за движение центра масс Земли, обусловленное океаническими приливами;
- влияние ионосферы второго порядка по модели IONEX (<http://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>).

Помимо этого, по данным IMSL [3], учитываются нагрузочные факторы, а именно: нагрузки за вариации атмосферного давления и грунтовых вод по модели MERRA, выбранной нами как наилучшей [4], а также неприливные океанические нагрузки по модели OMST. При этом атмосферные нагрузки имеют в основном синоптические временные вариации и, частично, сезонные, а нагрузки от грунтовых вод — исключительно сезонные. Однако сезонные вариации в рядах положений при этом не исчезают. Поэтому при оценке скорости остаточные низкочастотные вариации положений аппроксимируются годичной и полугодичной гармониками и затем исключаются. Для операционного удобства исключаются также составляющие скорости, возникающие вследствие вращения Евразийской плиты по модели ITRF2008-PMM [5].

### **Обработка рядов положений**

При обработке рядов положений принята следующая модель:

$$X_i = X_0 + Vt_i + a_1 \sin(2\pi t_i) + a_2 \cos(2\pi t_i) + a_3 \sin(4\pi t_i) + a_4 \cos(4\pi t_i) + v_i. \quad (1)$$

Здесь  $X_i$  — текущие значения любой составляющей положения станции (северная, восточная и вертикальная, в мм) на момент наблюдения  $t_i$  (в годах),  $v_i$  — шумовая составляющая. В данной модели параметр  $V$  — искомая скорость станции по соответствующей координате (в мм/год). Помимо взвешенной МНК оценки скорости по модели (1) (веса определялись по дисперсиям суточных положений из решения Gipsy), также вычисляется её робастная оценка медианным методом  $\min\{\sum|X_i - (X_0 + Vt_i)|\}$  по усечённой модели без учёта сезонности.

На первом этапе происходит фильтрация грубых и ошибочных наблюдений. Для этого используется, во-первых, информация о качестве наблюдений, полученная с помощью программы TEQC (UNAVCO). Эмпирически подобран уровень неприемлемости наблюдения по продолжительности измерений (< 4 часов) и недостаточном в процентном отношении количестве подходящих узкополосных измерений (narrow lanes < 25 %) для надежного решения фазовых неоднозначностей. Неприемлемыми также признаются измерения, для которых вовсе не удаётся определить фазовые неоднозначности. Затем итеративно применяется стандартная статистика выбросов ( $> 3\sigma$ ), где вместо дисперсии относительно принятой регрессионной модели используется дисперсия Аллана:

$$\sigma_A = \{\sum(X_i - X_{i+1})^2 / (2(N - 1))\}^{1/2} \quad (2)$$

На следующем этапе по данным из Log-файлов или информации из RINEX-файлов о смене на станции оборудования или его модернизации производится оценка возможного сдвига (скачка) в каждой из составляющих ряда положений в этот момент. Это наиболее критичный для оценки скоростей станций элемент алгоритма, как правило требующий несколько итераций. По нашим исследованиям [5] в этот момент может происходить не только сдвиг в одной из координат ряда. На двух станциях это сопровождалось изменением тренда, что обнаруживалось спустя год. Величина сдвига ( $\Delta = X_I - X_{II}$ ) в нашем подходе определяется локально на интерфейсно задаваемом интервале ( $dt < 30$  сут) до и после момента предполагаемого сдвига в ряде положений. Для оценки значимости сдвига применяется критерий Фишера  $F = \sigma^2 / \sigma_b^2$ , здесь  $\sigma^2 = \sum v_i v_i / (N - N_u)$ , индекс  $b$  относится к оценке с учётом сдвига,  $N_u$  — количество оцениваемых параметров (в нашем случае  $N_u = 6$ ). При  $F > 1.2$  для наблюдений более трёх лет ( $N > 1000$ ) различие дисперсий значимо на уровне  $p = 0.999$ ; в этом случае вводится соответствующее смещение  $\Delta$  в рассматриваемую координату станции.

Затем по такому же алгоритму производится поиск скачков, не связанных со сменой или модернизацией оборудования, вызванных неизвестными факторами (стохастические смещения). В этом случае используется тот же временной интервал  $dt$ , а величина искомого сдвига определяется выражением  $\Delta = k\sigma_A$  с интерфейсно задаваемым  $k$ . С этим значением  $\Delta$  просматривается весь ряд положений от  $t_i + dt$  до  $t_i - dt$ . Временная локализация поиска сдвига на наш взгляд существенна, так как позволяет устранить эффект от краткосрочных флуктуаций, часто присутствующих в рядах положений.

При параметрах  $k = 2 \div 4$  и  $dt = 10 \div 20$  количество стохастически значимых (на уровне 99 %) сдвигов во всех рядах положений составляет около 20 %, почти половина из которых приходится на вертикальную составляющую. Количество значимых сдвигов, связанных со сменой оборудования намного меньше. Из всего этого количества при детальном скрин-анализе, что пока позволяет небольшой объём базы, можно исключить более половины. Сдвиги, признанные значимыми, вводятся в базу и в дальнейшем не рассматриваются. В вышеупомянутых глобальных базах [1, 2] процесс их формирования и еженедельного обновления полностью автоматизирован, и поэтому в данных скоростей присутствуют досадные ошибки, что было обнаружено нами [6] при сравнении скоростей для станций, общих с нашей базой. Кроме того, в базе [1] присутствует большое количество заведомо незначимых сдвигов, в лучшем случае завышающих точность принятых скоростей.

После проведённой фильтрации рядов положений независимо по каждой координате заново оцениваются соответствующие скорости как по модели (1), так и с использованием робастной оценки по усечённой модели. Ввиду, как правило, негауссового распределения ошибок в рядах положений ГНСС-станций, что проверено нами на части материала в работе [7], помимо формальных МНК ошибок вычисляются также ошибки скоростей для распределения типа фликкер-шум. При этом в отличие от ошибок, вычисленных в предположении нормального их распределения, ошибки скорости при их фликкер-шумовом распределении  $\sigma_f$  не зависят от количества наблюдений, но только от их продолжительности  $T$  (в годах) и средней величины амплитуды шума [8], в качестве которой естественно принять дисперсию Аллана  $\sigma_A$  по (2):

$$\sigma_f \approx 0.75 \sigma_A / T. \quad (3)$$

В случае медианной оценки скорости вместо  $\bar{b}_A$  используется  $\bar{b}_P = \sum |v_i|/N$ .

Полученная таким образом база скоростей станций доступна на сайте ГАО РАН (<http://www.gao.spb.ru/russian/database/>).

### Геодинамика региона

Восточно-Европейская платформа (ВЕП) разбита на многочисленные геологические структуры, неоднородные по вещественному составу и имеющие разную тектоническую историю. Наиболее значимые из них это кристаллический Балтийский щит (БЩ) и осадочная Русская платформа (РП). Граница этих образований (рис. 1) проходит через Балтийское море, Финский залив, Ладожское и Онежские озёра и Белое море. Она отмечена Балтийским уступом, протянувшимся от берегов Дании через Балтийское море до южных границ Ладожского озера. Кроме того, на юге в ВЕП вклинивается Украинский щит, а на северо-востоке ВЕП сопрягается с Печорской платформой.

Для исследования взаимной динамики этих давно консолидированных на уровне фундамента структур требуется большое количество хорошо распределённых и продолжительных рядов ГНСС-наблюдений. Из перечисленных блоков только БЩ и РП удовлетворяют этим условиям по данным нашей базы скоростей. Поскольку район северо-запада Европы отягощён динамикой послеледникового поднятия, систематически искажающего поле скоростей расположенных здесь станций, скорости этих станций были освобождены от влияния послеледникового поднятия по модели ICE-5G [9].

Таблица

Оценка угловых скоростей ( $\Omega$ ) по данным базы скоростей ГНСС-станций и сравнение с соответствующими данными для Евразийской плиты (ЕА) [5]

Метод	N станций	$\Omega_x$ (" / год)	$\Omega_y$ (" / год)	$\Omega_z$ (" / год)
МНК (ВЕП) Медианный	159	$-0.082 \pm .007$	$-0.490 \pm .005$	$0.765 \pm .013$
		$-0.080 \pm .007$	$-0.489 \pm .004$	$0.749 \pm .014$
МНК (РП) Медианный	106	$-0.071 \pm .009$	$-0.490 \pm .006$	$0.768 \pm .017$
		$-0.072 \pm .008$	$-0.491 \pm .006$	$0.767 \pm .015$
МНК (БЩ) Медианный	53	$-0.065 \pm .012$	$-0.476 \pm .006$	$0.837 \pm .026$
		$-0.067 \pm .011$	$-0.478 \pm .006$	$0.833 \pm .025$
ITRF2008 (ЕА) ITRF2000	69	$-0.083 \pm .008$	$-0.534 \pm .007$	$0.750 \pm .008$
	41	$-0.081 \pm .021$	$-0.489 \pm .008$	$0.792 \pm .026$

Предполагая твердость блоков земной коры и применимость к ним теоремы Эйлера, движение каждого такого блока можно представить вращением вокруг некоторой оси, ближайшую точку пересечения которой с поверхностью Земли принято называть полюсом Эйлера. Соответственно совместное движение набора из  $n$  ГНСС-станций, относящихся к одному геотектоническому блоку, можно представить в виде  $v = \Omega \times r$ , где  $v$  — матрица скоростей станций размера  $3 \times n$  для каждой из трех координат скоростей,  $\Omega$  — квадратная матрица размерности 3 с искомыми компонентами угловых скоростей на диагоналях,  $r$  — матрица координат станций размера  $3 \times n$ . Для оценки угловой скорости блока используется МНК с диагональной матрицей весов, обратных дисперсиям соответствующих скоростей.

Как видно из таблицы, сходимость МНК и робастных оценок угловых скоростей почти полная. Это говорит о достаточном уровне учёта систематических ошибок в рядах положений. Также хорошо совпадают наши оценки угловой скорости ВЕП с решением из [5] для всей Евразийской плиты, за исключением  $Y$ -компоненты, что можно объяснить отсутствием азиатских станций в нашей БД. И, наконец, заметна разница угловых скоростей между РП и БЩ. Для оценки значимости полученных расхождений во вращении соответствующих структур результат лучше представить в виде координат полюса Эйлера и угловой скорости вращения вокруг оси (в градусах за миллион лет):

Блок	Широта	Долгота	$\Omega$ (°/Ma)
БЩ	$60.2 \pm 0.4$	$-97.8 \pm 3.0$	$0.268 \pm .006$
РП	$57.2 \pm 0.3$	$-98.2 \pm 2.1$	$0.254 \pm .004$

Видно, что разница угловых скоростей РП и БЩ  $\Delta\Omega = 0.014 \pm .007$ , что при имеющейся ошибке точно соответствует 95 % уровню значимости, т. е. достоверность различия в скоростях вращения этих блоков достаточно высокая.

### **Выводы**

— Для эффективных геодинамических исследований на территории России необходима сводная база данных скоростей ГНСС-станций государственных и коммерческих организаций.

— Создана и поддерживается однородная по методу обработки и учёту коррекций база данных скоростей для территории Восточно-Европейской платформы.



— По наиболее надёжным станциям созданной базы данных определена угловая скорость вращения ВЕП, хорошо совпадающая с вращением всей Евразийской плиты по модели ITRF2008-РММ [5].

— Для основных структурных образований ВЕП — Балтийского щита и Русской плиты оценены их собственные угловые скорости вращения, достоверность различия которых находится на уровне 95 %.

## Литература

1. Электронный ресурс: (<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>).
2. *Blewitt, G., Kreemer C., Hammond W. C., Gazeaux J.* MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2015JB012552. (<http://geodesy.unr.edu/gsrn.php>). — 2016.
3. *Petrov L., Boy J.-P.* Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations. // *J. Geophys. Res.*, 2004, 10.1029/2003JB002500. — Vol. 109, No. B03405. (<http://massloading.net/>). — 2004.
4. *Горшков В. Л., Щербакова Н. В.* Сравнение нагрузочных моделей и ГНСС-систем ГЛОНАСС и GPS в рядах положений станций // *Труды ИПА РАН*. — 2016. — Вып. 37. — С. 68–71.
5. *Altamimi Z., Metivier L., Collilieux X.* ITRF2008 plate motion model // *J. Geophys. Res.*, 117, B07402, doi:10.1029/2011JB008930. — 2011.
6. *Горшков В. Л., Щербакова Н. В.* О согласованности скоростей станций с несколькими ГНСС-приемниками // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»*. — № 3. — 2015 — С. 95–103. (<http://geo-science.ru/>).
7. *Горшков В. Л., Щербакова Н. В.* Исследование случайных и систематических ошибок GPS-наблюдений на территории Пулковской обсерватории // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»*. — № 4. — 2012. — С. 12–22. (<http://geo-science.ru/>).
8. *Williams S. D. P.* The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series // *J. Geodesy*. — 2003. — 76. — P. 483–494.
9. *Peltier W. R.* Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2004. — 32. — P. 11–149.

## Creation of a GNSS Station Velocity Database

**V. L. Gorshkov, A. V. Mokhnatkin, N. V. Scherbakova**

A GNSS-derived velocity field forms a basis for the global and regional geodynamic research. Unfortunately, only four stations in the European part of Russia are available in the global GNSS network, while hundreds of

permanent GNSS stations operate currently in this area. The experience of velocity database creation for the East European Craton (EEC) area is presented. Our database maintains uniformly processed velocities of more than 200 GNSS stations, half of which is in Russia. The post-processing of initial GNSS data has been made using GIPSY software toolkit according to the PPP strategy. All modern models were taken into account for the reduction as well as all loading corrections.

The calculation technique, which includes step discontinuity resolving and outlier and seasonality filtering, is described in the paper. Step discontinuities are the most significant problem under automatic estimation of velocities from GNSS coordinate time series, as their influence on the velocity is considerable. Moreover, this problem is more complicated as the algorithm can have many uncertainties for different GNSS coordinate time series. The velocities of the most reliable GNSS stations are used for estimation of geodynamic interaction of the large blocks of the EEC—the Baltic Shield and the Russian Plate. These blocks have different angular velocities with the 95 % confidence level which can be found from the velocity field of our database.

**Keywords:** velocities of GNSS stations, the East European Craton geodynamics, Baltic Shield, GIPSY-OASIS software.