МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ И СТРУКТУРА БАЗЫ СКОРОСТЕЙ ГНСС-СТАНЦИЙ

Данные

Область, охваченная нашей базой данных (БДС), приблизительно ограничена рамками Восточно-Европейской платформы. Помимо ГНСС-станций международных служб IGS (http://www.igs.org/network) и EPN (http://epncb.oma.be/) в неё входят станции из национальных геодезических сетей

Эстонии (http://www.maaamet.ee/),

Латвии (http://latpos.lgia.gov.lv/),

Финляндии (http://euref-fin.fgi.fi/fgi/en/positioning-service/rinex-service).

В настоящее время все станции геодезической сети Финляндии выкладываются на сайте EPN. Данные латвийской геодезической службы стали недоступны с даты 2019(231), эстонской - с 2024(108).

Российские станции представлены базовыми станциями геодезических компаний

ПРИН (http://www.prin.ru/seti_referencnyh_stancij/),

HEXAGON (http://smartnet-ru.com/),

ГЕОСТРОЙИЗЫСКАНИЯ (http://topnet.gsi.ru),

Центр геодезии, картографии и ИПД (http://new.rgs-centre.ru/),

РКС (http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/sdkm/),

EFT (https://eft-cors.ru/).

Особо плотная сеть покрывает Санкт-Петербург и Ленинградскую область базовыми станциями (http://www.geospider.ru/) геодезического предприятия ГЕОМАТИК и соответствующего подразделения Комитета по градостроительству и архитектуре СПб (http://ref.kgainfo.spb.ru/). Помимо этого в сеть входят избранные станций ГНСС-сетей университетов КГУ и СПбГУ и ряда зарубежных институтов, а также станции других государственных организаций РФ.

Мы признательны коллегам всех перечисленных организаций за постоянно предоставляемый исходный материал наблюдений.

Обработка исходного материала

Исходные наблюдения со станций (суточные с интервалом в 30 секунд RINEX файлы) обрабатываются пакетом Gipsy 6.4 (JPL) с применением стратегии PPP (Precise Point Positioning). Положения отнесены к эллипсоиду GRS80 и переведены в систему IGS14. При этом учитываются:

- абсолютная калибровка антенн,
- точные орбитальные параметры, вычисленные относительно центра масс (total) Земли, и поправки часов, вычисленные в системе IGS14 с использованием стандартов IERS2010 ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL_GPS_Products/Final,
- параметры ориентации Земли из IERS решения CO4 (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.

Помимо этого, по данным IMSL (http://massloading.net/), учитываются нагрузочные факторы, а именно: нагрузки за вариации атмосферного давления по модели MERRA, выбранной нами как наилучшая модель [1 и неприливные океанические нагрузки по модели OMCT. Для удобства визуализации данных исключаются также составляющие скорости, возникающие вследствие вращения Евразийской плиты [3].

Обработка рядов положений

Фильтрация

При обработке рядов положений принята следующая регрессионная модель:

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

Здесь X_i – текущие значения любой составляющей положения станции (северная, восточная, вертикальная, в мм) на момент наблюдения t_i (в годах), X_0 – положение станции на первую дату наблюдения, $a_{1\text{-}4}$ – коэффициенты сезонных вариаций положений станции, 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, полученные с помощью программы TEQC (UNAVCO). Эмпирически подобран уровень неприемлемости наблюдения по продолжительности измерений (< 20% от суток) 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 (> 3σ), где вместо СКО относительно принятой регрессионной модели используется соответствующая оценка вариаций Аллана (ADEV), эффективная для статистических оценок рядов, имеющих существенную систематическую составляющую:

$$\sigma_A = \sqrt{\Sigma(x_i - x_{i+1})^2 / (2(N-1)} \qquad (2)$$

На следующем этапе по данным из LOG-файлов или информации из RINEX-файлов о смене на станции оборудования или его модернизации производится оценка возможного ступенчатого 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 [2] в этот момент может происходить не только сдвиг в одной из координат ряда. На некоторых станциях это сопровождалось изменением тренда, что обнаруживалось спустя год и более. Величина сдвига $\Delta = X_I - X_{II}$ в

нашем подходе определяется локально на интерфейсно задаваемом интервале (dt <20 суток) до и после момента предполагаемого сдвига в ряде положений. Для оценки значимости сдвига применяется критерий Фишера сравнения дисперсий, полученных по всему ряду, $F = \sigma^2 / \sigma_b^2$, здесь, индекс b относится к оценке с учётом сдвига, $\sigma^2 = \Sigma v_i v_i /(N - Nu)$, 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 Δ 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 Δ просматривается весь ряд положений от $t_i + dt$ до $t_i - dt$. Временна́я локализация поиска сдвига на наш взгляд существенна, так как не позволяет сгладить эффект от краткосрочных флуктуаций, часто присутствующих в рядах положений.

Некоторые ряды положений станций, последовательно сменявшие друг друга (в смысле оборудования) на одном и том же месте (иногда со смещением до нескольких метров), были объединены. Соответствующие сдвиги положений оценивались и вводились в виде коррекций.

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.

Вычисление ошибок

ГНСС-наблюдения, после удаления трендов и квазипериодических компонент, являются стохастическим шумом со спектральной плотностью мощности хорошо аппроксимируемой степенной зависимостью от частоты f:

$$P(f) \propto f^{-\beta}.$$

Для стохастических сигналов с таким спектром мощности для целочисленных значений β в работе [4] приведены следующие простые для вычислений ошибки скоростей станций:

Для нормально распределенных шумов ($\beta = 0$) ошибки скоростей станций

$$\sigma_n \cong \frac{a}{T}\sqrt{12/n}, \qquad (3)$$

практически совпадают с формальными МНК ошибками. Здесь a – средняя величина амплитуды шума, в качестве которой нами использована оценка σ_A из (2), $T = \Delta T(n - 1)$ – продолжительность ряда наблюдений с постоянным приращением ΔT (обычно в годах).

Для распределения типа фликер-шум ($\beta = 1$)

$$\sigma_b \cong 0.75\frac{a}{T}. \qquad (4)$$

Для оценки величины β нами реализованы два метода. Наиболее простой способ [5] основан на определении коэффициента μ наклона *log-log* зависимости вариации Аллана от продолжительности выборки τ ($\tau < T/2$). При этом $\beta = \mu + 1$ и, следовательно, $\mu \approx 0$ характеризует распределение типа фликкер-шум, $\mu < 0$ соответствует нормальному распределению.

Другой способ основан на вычисление β по соотношению $\beta = 1 - 2H$ [6] для приращений обобщённых броуновских движений, где H есть параметр Хёрста ($0 < H < 1$), определяемый по приращению исследуемой реализации сигнала методом нормированного размаха *R/S* [7]. Заметим, что вариации Аллана ($x_i - x_{i+1}$) характеризуют именно приращения процесса. Параметр H также определяется по коэффициенту наклона *log-log* зависимости вариаций *R/S* от продолжительности выборки τ.

В зависимости от средневзвешенного значения обеих оценок β вычислялась соответствующая ошибка скорости станций по формулам (3) или (4).

В случае медианной оценки скорости вместо σ_A в (3,4) использовано среднее абсолютное уклонение $\sigma_P = \Sigma |v_i| / N$.

Форматы файлов БДС

Каждый вариант вычисления скоростей станций (МНК и медианный метод) представлен файлами: ***LISTA, LIStat*** с соответствующими метками LSS и MED. В файлах LISTA содержится основная информация базы. Файлы LIStat содержит статистическую информацию о рядах и об ошибках и частично пересекается с данными файлов LISTA. Файлы ***LISTseason*** и ***LISTjump*** содержат информацию об учтённых сезонных поправках и сдвигах (скачках) в рядах положений, а также полную информацию о структуре самих этих файлов. Файл ***equipment*** (gao_with_former.snx**)** аналогичен подобному файлу IGS (igs_with_former.snx) и содержит данные о станции и смене оборудования на ней (приёмник и антенна). Файл ***LISTclosed*** содержит список станций либо закончивших наблюдения, либо более не поддерживаемых нами в обработке.

В базе представлены данные станций, имеющих продолжительность наблюдений более двух лет.

Структура файлов LISTA:

1. Name & Co - аббревиатура ГНСС-станции и страна расположения.
2. Lat – приближённая широта станции в градусах.
3. Long – приближённая долгота станции в градусах.
4. Up(m) – высота станции в метрах.
5. VnPM – северная скорость станции в системе ITRF2014 (мм/год), положительная в направлении на север.
6. VePM – восточная скорость станции в системе ITRF2014 (мм/год), положительная в направлении на восток.
7. Vh – вертикальная составляющая скорости станции в мм/год, положительная вверх.
8. Vn – аналогично 5 после учёта вращения Евразийской плиты.
9. Ve – аналогично 6 после учёта вращения Евразийской плиты.

10– 12. sVn, sVe, sVu – соответствующие ошибки положений, вычисленные по МНК, одинаковы в файлах LSS и MED.
13 – 15. sVnf, sVef, sVuf – соответствующие ошибки положений, вычисленные в предположении фликкер-шума по ф-ле (4), разные в файлах LSS и MED.
16. dT(y) – продолжительность наблюдений в годах.
17. Yfin – последняя эпоха ряда наблюдений.
18. N – количество дней наблюдения.
19. Jumps – наличие сдвигов в положениях (при смене оборудования и стохастические).

Структура файлтов LIStat

1. Name – аббревиатура ГНСС-станции.
2. YearS – начальная эпоха ряда наблюдений.
3. YearF – конечная эпоха ряда наблюдений.
4. %use = N/(YearF –YearS)/365.25 – эффективность наблюдений в %.
5. N>30 – количество пропусков наблюдений в ряде более чем 30 дней.
6. Ncr – количество выброшенных дат по ограничениям TEQC.
7. Nsi – количество выброшенных дат по величине ошибок координат в дате.
8. Nout – количество выброшенных дат по статистике (выбросы).
9. N – количество дат наблюдений.
10. ADEV – вариации Аллана, вычисленные по формуле (2).
11. Sig1 – ошибки единицы веса для МНК решения или среднее абсолютное уклонение для медианного решения.

12 – 13. sV,sVf – ошибки скоростей по ф-лам (3) и (4).
14 – 15. оценка величины β по двум вышеприведённым методам (μ и H).
11. NEU – указатель координаты.

Интерактивная карта ГНСС-станций

Карта ГНСС-станций базы данных содержит два типа графиков для каждой станции, открывающиеся при нажатии на значок станции. Первый из них (*Station-EA Plate motion (ITRF14) - shifts*) содержит ряды положений (dN, dE, dUp, в мм) после учёта вращения Евразийской плиты [3] и смещений, если они были в данном ряде. Там же приведены скорости станций в системе ITRF14, вариации Аллана (2) для каждой компоненты и количество суток наблюдений. На втором графике приведены остаточные ряды положений после учёта сезонных компонент (1) (зелёная кривая) и фильтрации ошибочных наблюдений. Приведены также остаточные скорости, их ошибки для обоих типов распределения шумовой компоненты и количество суток наблюдений после всех фильтраций исходных данных.

На карте помимо обычных значков для обозначения станций присутствует каплевидный значок в том случае, когда в том же месте присутствует очень близко расположенная станция или последовательно сменившая её станция. В последнем случае иногда было возможно объединить ряды в один ряд, что отражено в файле LISTjump. Значок с литерой «P» обозначает станцию, прекратившую наблюдения или более нами не поддерживаемой.

На карте представлены все станции, в том числе с наблюдениями менее двух лет.

На сайте https://vesta.pu.ru/vdb содержится новая версия карты с расширенными возможностями, в частности, с предоставлением числовых данных о вариациях положений станций.

При использовании данных просьба ссылаться на статью:

Горшков В.Л., Мохнаткин А.В., Щербакова Н.В.,

База скоростей станций ГНСС Восточно-Европейской платформы для решения научных и прикладных задач // Геодезия и картография. – 2021. – № 1. – С. 34-44. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-34-44

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Горшков В.Л., Н.В. Щербакова* (2015). Сравнение нагрузочных моделей и ГНСС-систем ГЛОНАСС и GPS в рядах положений станций // Тр. ИПА РАН, вып.32. С.
2. *Горшков В.Л., Н.В. Щербакова* (2015). 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/)
3. *Altamimi, Z., L. Metivier, X. Collilieux*. ITRF2014 plate motion model // Geophys. J. Int. (2017) 209, 1906–1912 doi: 10.1093/gji/ggx136
4. *Williams S.D.P.* (2003) The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series // J. Geodesy (2003) 76, 483-494.
5. *Allan, D.W. and J. A. Barnes* (1981). A Modified “Allan Variance” with Increased Oscillator Characterization Ability, Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium, P. 470–475.
6. *Flandrin P,* (1989). On the spectrum of Fractional Brownian motion, IEEE trans. on inform. theory, Vol. 35, No. 1, 197-199.
7. *Hurst H.E.*, 1957. A suggestial statistical model of some time series, which occur in Nature, Nature, v.180, № 4584, pp.494-495.

Сравнение скоростей БДС с данными глобальной базой NGL

Проведённое нами исследование согласованности скоростей ГНСС-станций из нашей БДС и базы данных геодезической лаборатории университета Невады (NGL, http://*geodesy.unr.edu*) по территории пересечения БД, показало замечательное согласие данных, приведённое ниже в таблице.

Сравнение скоростей (БДС – NGL) по 171 общим ГНСС-станциям

DB	ΔVe(mm/y)	ΔVn(mm/y)	ΔVu(mm/y)	sVe	sVn	sVu	% use
VDB	-0.02 ± .24	0.03 ± .23	0.04 ± .65	0.13	0.12	0.31	90.46
NGL				0.18	0.17	0.73	91.73

Близость оценок скоростей станций, а также однородность применяемых методов обработки данных в обеих базах (GIPSY), позволяет включить обшир-

ный материал базы NGL на западной территории ВЕП в совместный геодинамический анализ. Всего на этой территории имеется около тысячи станций из базы NGL, включая 171 общих из БДС. Также из таблицы видно, что средняя величина ошибки вертикальных скоростей базы NGL (sVu) значительно хуже ошибки БДС. Это, вероятно, вызвано недостатками применяемого в NGL метода фильтрации скачков (MIDAS), сильнее проявляющегося именно на вертикальной компоненте особенно при смене оборудования на станциях.

Несколько меньший уровень ошибок в БДС горизонтальных компонент скорости может быть обусловлен учётом в БДС нагрузочных поправок (атмосферных и неприливных).