



Влияние смены оборудования пулковской ГНСС-станции PULK на результаты наблюдений

З. М. Малкин*

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Поступила в редакцию 18 апреля 2024 / Принята к публикации 17 мая 2024

Аннотация

В Пулковской обсерватории с 2002 г. работает постоянная ГНСС-станция PULK. В работе представлены результаты предварительного анализа изменения со временем ошибок определения координат станции, в первую очередь при смене приемника или антенны. Изучались две оценки точности: формальная ошибка ежесуточных значений координат и шумовая составляющая ряда координат PULK. В первом случае использовалась медианная оценка, во втором дисперсия Аллана. В результате работы выяснилось, что две замены приемника в первые годы работы станции привели к заметному уменьшению формальной ошибки координат, тогда как последующие замены приемника, как и обе замены антенны не показали заметных изменений этой ошибки. Величина шумовой составляющей ряда координат мало менялась на всем периоде наблюдений.

Ключевые слова: ГНСС, PULK, ошибки координат

Введение

Сети постоянно действующих станции приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS (США), ГЛОНАСС (СССР/Россия), Galileo (Европейский союз) и BeiDou (Китай) позволяют решать с высокой точностью и оперативностью многие научные и прикладные задачи в области геодезии, геодинамики, навигации, синхронизации шкал времени, геофизики, связи и других. Поэтому они активно развиваются в большинстве стран мира, включая Россию.

Одна из таких станций расположена в Пулковской обсерватории (ГАО РАН). Она начала свою работу 22 апреля 2002 г. (Горшков, Воротков и др., 2002). Антенна ГНСС-приемника, к которой, собственно, и относятся определяемые из наблюдений координаты, установлена на Восточном корпусе обсерватории. Получаемые наблюдения используются в различных геодезических проектах, геодинамических исследованиях, а также в Центре обработки и анализа данных о параметрах вращения Земли Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты¹. Общее руководство работой станции PULK осуществляет В. Г. Горшков. Вычисления координат станции производятся в оперативном режиме Н. В. Щербаковой.

В мае 2008 г. станция PULK вошла в состав европейской сети EUREF Permanent GNSS Network² (EPN). Общая и текущая информация о станции доступна на сайте ГАО РАН³.

Наблюдения ведутся в непрерывном автоматическом режиме и обрабатываются методом Precise Point Positioning (PPP) с помощью программного пакета GIPSY-OASIS⁴, разработанным в Jet Propulsion Laboratory (JPL).

*e-mail:malkin@gaoran.ru

¹<https://pvz.vniiftri.ru/>

²https://www.epncb.oma.be/_networkdata/siteinfo4onestation.php?station=PULK00RUS

³<http://www.gao.spb.ru/english/as/persac/pulk.htm>

⁴<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>

Как правило, оборудование постоянных ГНСС-станций регулярно обновляется для улучшения полноты, точности и надежности наблюдательных данных. В первую очередь такие обновления включают в себя замену приемника и антенны. Не является исключением и станция PULK. За прошедшее с начала ее работы время приемник и антенна, установленные на станции, менялись несколько раз:

22.04.2002	Установлен приемник Trimble 4000SSE
22.06.2004	Установлена антенна TRM41249.00
31.08.2006	Установлен приемник Trimble 4000SSI
13.05.2014	Установлен приемник TPS NETG3
07.06.2017	Установлена антенна TRM57971.00
10.05.2018	Установлен приемник Leica GR10
05.03.2019	Установлен приемник Trimble NETR9
29.11.2022	Установлен приемник Trimble BD990

Таким образом всего было произведено пять замен приемника и две смены антенны. После каждой замены оборудования ожидается улучшение результатов, получаемых из наблюдений. Целью этой работы является предварительное исследование изменения точности определения координат станции PULK после обновлений оборудования.

1 Данные и результаты

Использованные данные представляют собой среднесуточные значения координат станции PULK, с 23 апреля 2002 г. по 4 мая 2024 г., всего 7804 определений (из 8041 возможных). Таким образом за 22 года работы было пропущено по разным причинам всего 37 дней.

Изменения геоцентрических декартовых координат XYZ станции PULK в системе IGS14 показаны на Рис. 1 в виде приращений к значениям координат на первую эпоху данных 2002.3. Точки графиков соответствуют ежесуточным определениям координат, а голубые вертикальные линии – ошибкам координат (1σ). На основании этих рядов вычислены параметры линейной модели движения станции на центральную эпоху ряда координат 2013.315:

$$\begin{array}{lll} X_0=2778606.647 \text{ м} & V_X=-19.38 \text{ мм/год} & V_N=12.26 \text{ мм/год} \\ Y_0=1625494.781 \text{ м} & V_Y=13.30 \text{ мм/год} & V_E=21.27 \text{ мм/год} \\ Z_0=5487811.035 \text{ м} & V_Z=7.18 \text{ мм/год} & V_U=1.17 \text{ мм/год} \end{array}$$

В последней колонке приведены скорости станции в местной горизонтальной системе координат в северном (N), восточном (E) и зенитном (U) направлениях.

Ежесуточные значения координат PULK в местной горизонтальной системе координат после вычитания приведенной выше линейной модели показаны на Рис. 2. Зеленые вертикальные линии на рисунке показывают даты смены приемника, а красные линии – даты смены антенны. Эти данные наглядно показывают, что на фоне основного линейного смещения станции, обусловленного главным образом движением Евразийской тектонической плиты, наблюдаются также сезонные вариации координат, вызванные, в основном, геофизическими факторами. Такие вариации исследовались в Горшков, Смирнов и Щербакова (2012) и Горшков и Щербакова (2012), они находятся вне интересов настоящей работы.

Ошибки ежесуточных значений координат показаны на Рис. 3.

Два анализа изменений ошибок определения координат станции PULK со временем были вычислены две оценки для каждого из восьми интервалов времени, разделенных датами смены оборудования на станции для каждой из трех координатных составляющих. В качестве первой оценки была вычислена медианная ошибка координат для каждого интервала. Эта величина отражает эволюцию формальной точности определения координат со временем. В качестве оценки уровня шума в ряде самих координат станции использована вариация Аллана. Преимущество

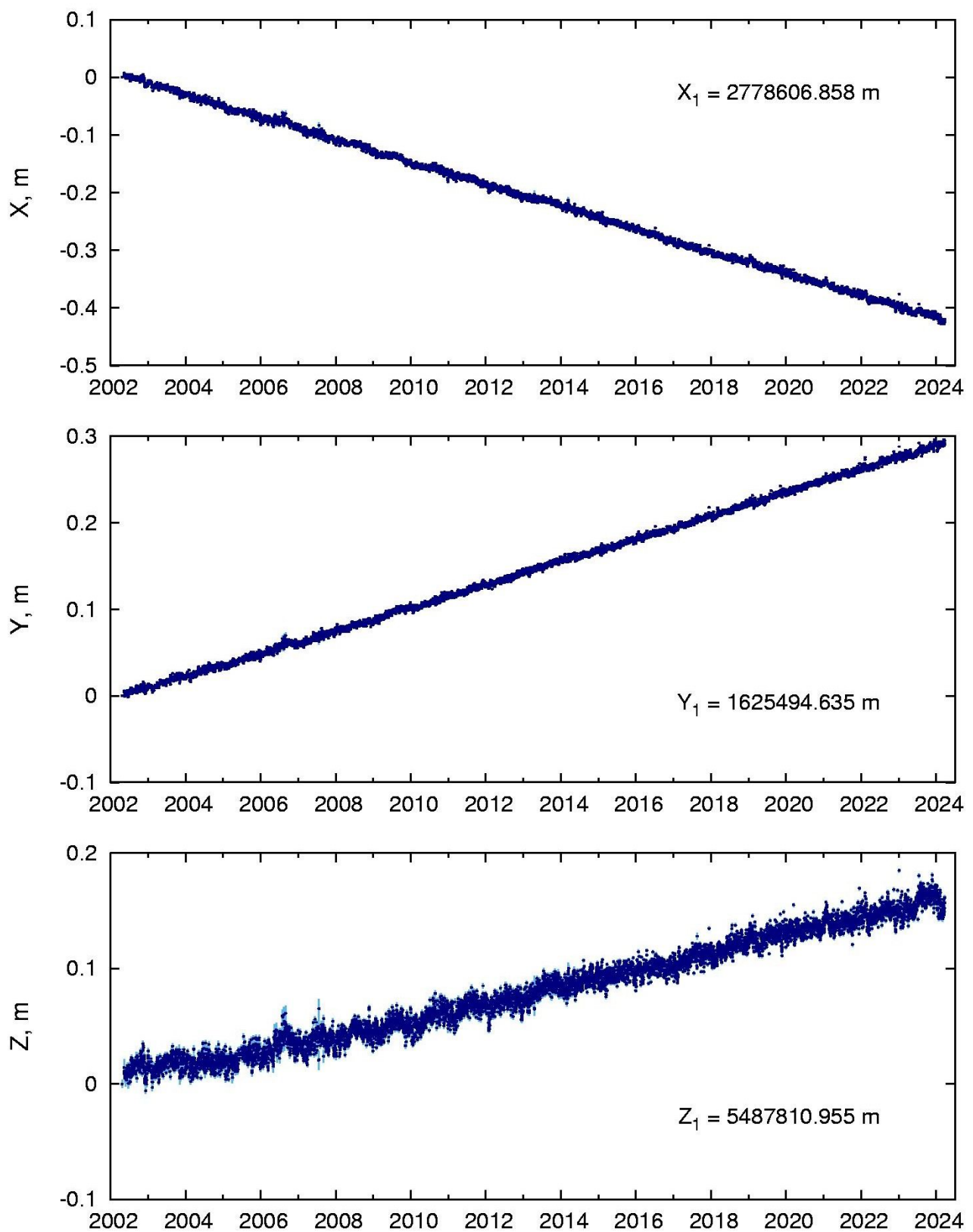


Рис. 1: Ряд координат станции PULK в геоцентрической декартовой системе координат (приращения координат по отношению к координатам на первую эпоху 2002.3086). Вертикальные голубые линии показывают ошибки координат (1σ).

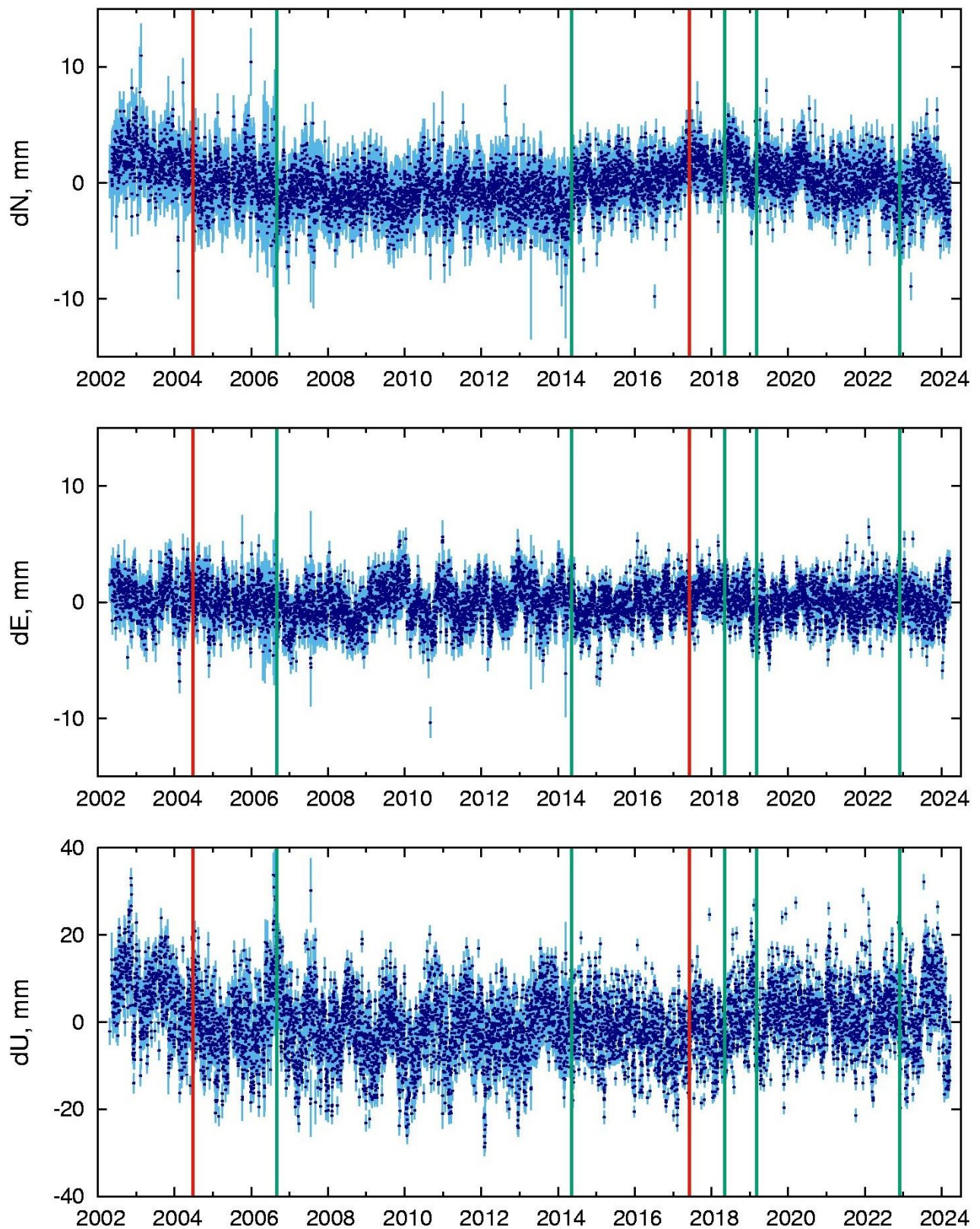


Рис. 2: Ряд координат станции PULK в местной горизонтальной системе координат в северном, восточном и зенитном направлениях после исключения линейного тренда. Вертикальные голубые линии показывают ошибки координат (1σ).

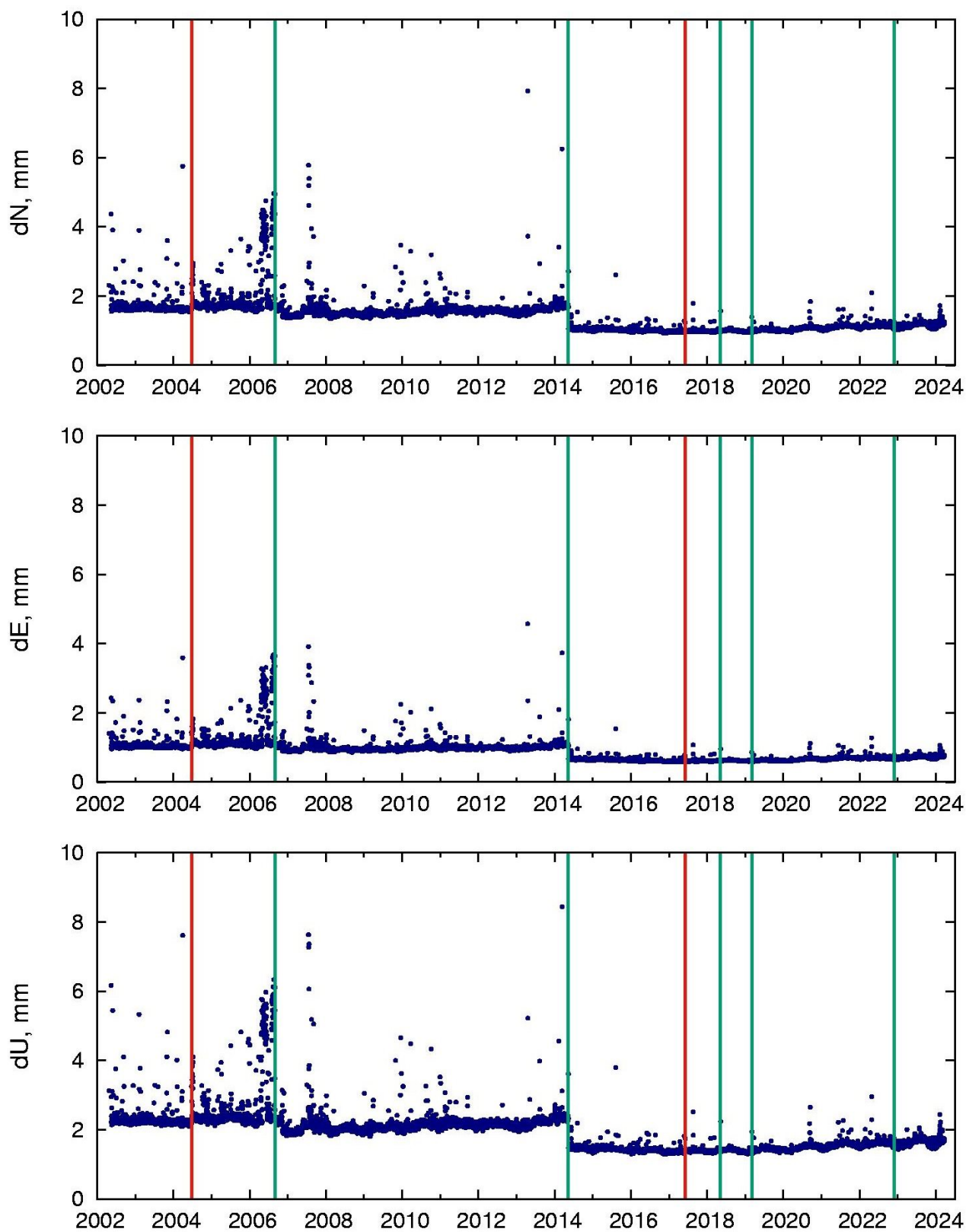


Рис. 3: Ошибки координат станции PULK в местной горизонтальной системе координат в северном, восточном и зенитном направлениях.

Таблица 1: Медианная ошибка (MED) и взвешенная дисперсия Аллана ($WADEV$) для горизонтальных координат станции PULK по интервалам между датами смены оборудования.

Интервал данных	Число данных	MED , мм			$WADEV$, мм		
		N	E	U	N	E	U
23.04.2002 – 21.06.2004	659	1.64	1.02	2.24	1.24	1.05	3.87
23.06.2004 – 30.08.2006	759	1.72	1.09	2.34	1.39	1.02	4.42
01.09.2006 – 12.05.2014	2768	1.55	0.98	2.12	1.25	1.00	4.25
14.05.2014 – 06.06.2017	1119	1.01	0.63	1.42	1.26	0.98	3.94
08.06.2017 – 09.05.2018	334	0.98	0.61	1.39	1.03	0.91	3.81
11.05.2018 – 04.03.2019	295	1.00	0.62	1.40	1.18	0.89	4.34
06.03.2019 – 28.11.2022	1342	1.07	0.67	1.51	1.23	1.01	4.07
30.11.2022 – 04.05.2024	515	1.15	0.71	1.62	1.47	1.05	4.89

такой оценки состоит в ее малой зависимости от трендовых, долгопериодических и сезонных вариаций координат.

Классическая вариация Аллана $AVAR$ в применении к серии измерений $y_i, i = 1, \dots, n$ определяется как (Allan, 1966)

$$AVAR = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - y_{i+1})^2. \quad (1)$$

Поскольку ряд координат PULK не является равнооточным, для его анализа целесообразно использовать модификацию классической оценки вариации Аллана для неравнооточных данных $WAVAR$, предложенную в Z. Malkin (2008) и Z. M. Malkin (2011). Для ряда измерений $y_i, i = 1, \dots, n$ с ошибками $s_i, i = 1, \dots, n$ имеем

$$WAVAR = \frac{1}{2p} \sum_{i=1}^{n-1} p_i (y_i - y_{i+1})^2, \quad (2)$$

$$p = \sum_{i=1}^{n-1} p_i, \quad p_i = (s_i^2 + s_{i+1}^2)^{-1}.$$

Практически, в качестве результата вычислений ниже приводится взвешенная дисперсия Аллана $WADEV = \sqrt{WAVAR}$.

Результаты вычислений приведены в Табл. 1. Приведенные в ней медианные ошибки отражают данные на Рис. 3. Шумовая составляющая координат станций существенно меньше меняется от интервала к интервалу, только северная компонента (N) показывает некоторую общую тенденцию, близкую к изменению $WADEV$ со временем. Все статистические оценки в Табл. 1 показывают ухудшение в конце ряда.

2 Заключение

В работе приведены предварительные результаты анализа изменения ошибок определения координат станции PULK со временем в течение 22 лет работы станции с апреля 2002 г. по май 2024 г. Главный интерес представляли изменения ошибок координат после замены приемника или антенны.

Для анализа формальных ошибок ежесуточных значений координат использовалась медианная оценка, а для анализа шумовой составляющей в ряд координат PULK использовалась взвешенная дисперсия Аллана (модификация классической дисперсии Аллана для неравнооточных данных).

В результате работы выяснилось, что две замены приемника в первые годы работы станции привели к заметному уменьшению формальной ошибки координат, тогда как три последующие

замены приемника не показали заметных изменений этой ошибки. Также не замечено значительных изменений ошибок координат после замен антенны. Что касается шумовой составляющей ряда координат PULK, она мало менялась в течение всего периода наблюдений без заметного влияния смены оборудования на станции.

Можно заметить небольшое ухудшение точности определения координат станции, как в отношении ошибки координат, так и в отношении шумовой составляющей ряда координат, в конце периода наблюдений. Выяснение причин такого изменения качества данных, наверное, требует дальнейшего накопления наблюдений и последующего более детального исследования.

Благодарности

Автор благодарен В. Л. Горшкову и Н. В. Щербаковой за предоставленный ряд координат станции PULK и дополнительную информацию, использованные в настоящей работе.

Список литературы

- Горшков, В. Л., М. В. Воротков, В. А. Вытнов и М. Б. Кауфман (2002). [О создании нового GPS пункта в Пулковской обсерватории](#). *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове* 216.216, с. 426—429.
- Горшков, В. Л., С. С. Смирнов и Н. В. Щербакова (2012). [Нагрузочные эффекты в ГНСС-наблюдениях при исследовании региональной геодинамики](#). *Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2.2*, с. 148—156.
- Горшков, В. Л. и Н. В. Щербакова (2012). [Исследование случайных и систематических ошибок GPS-наблюдений на территории Пулковской обсерватории](#). *Науки о Земле* 4.4, с. 12—22.
- Allan, D. W. (1966). [Statistics of atomic frequency standards](#). *IEEE Proceedings* 54, с. 221—230.
- Malkin, Z. (2008). [On the accuracy assessment of celestial reference frame realizations](#). *Journal of Geodesy* 82.6, с. 325—329.
- Malkin, Z. M. (2011). [Study of astronomical and geodetic series using the Allan variance](#). *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* 27.1, с. 42—49.

Impact of the equipment change at the Pulkovo GNSS station PULK on results of observations

Z.M. Malkin

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS

Received 18 April 2024 / Accepted 17 May 2024

Abstract

Pulkovo Observatory has been operating a permanent GNSS station PULK since 2002. This paper presents the results of preliminary analysis of the changes in the errors in the coordinates of the station over time, primarily after replacement of the receiver or antenna. Two accuracy estimates were applied: the formal error of the daily coordinate estimates and the noise component of the PULK coordinate series. In the first case, the median estimate was used, in the second, the Allan variance. As a result, it turned out that two receiver replacements in the first years of operation led to a noticeable decrease in the formal coordinate error, whereas subsequent receiver replacements, as well as both antenna replacements, showed no noticeable changes in this error. The magnitude of the noise component of the coordinate series did not change much during the entire observation period.

Key words: GNSS, PULK, position errors