



Рекомендации по методике обработки ГНСС-измерений на основе анализа точности Московской геодезической сети

Д.Н. Филонов¹✉

АФФИЛИАЦИИ

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево (Московская область), Россия
✉ filonov_dn@vniiftri.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Филонов Д.Н. Рекомендации по методике обработки ГНСС-измерений на основе анализа точности Московской геодезической сети // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16, №2. С. 76–97. DOI:10.30533/scidata-2025-16-07.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

обработка ГНСС-измерений, ГНСС-пункт, сеть, программное обеспечение, уравнивание, анализ, сценарий обработки, параметр обработки, точность, разность координат, нормальная высота

АННОТАЦИЯ

В настоящее время существует множество программных комплексов обработки ГНСС-измерений. Наиболее известны такие, как Justin, GIODIS, Trimble Business Center, специализированные программы для различных типов приемников, Vernese и т. д. Для обработки локальных (отчасти региональных) ГНСС-сетей подходит программное обеспечение Justin, сочетающее в себе необходимые инструменты для постобработки данных GPS и ГЛОНАСС, автоматически образующее связи между перекрывающимися по времени интервалами наблюдений и формирующее векторы, которые показываются в картографическом окне сразу после импорта файлов измерений. Однако в руководстве пользователя программного обеспечения не освещены конкретные моменты и особенности методики

обработки ГНСС-измерений, не всегда поясняются параметры, значения при выборе определенного сценария обработки ГНСС-измерений. В данной статье рассматриваются различные сценарии обработки ГНСС-измерений, заложенные в программное обеспечение, разбираются методики обработки с получением конкретных результатов и анализа точности вычисления при выполнении наблюдений в неблагоприятных условиях (экранирование, отражение сигнала от окружающих объектов, недостаточное количество спутников, плохая геометрия созвездия и т. п.). Приводятся рекомендации по различным этапам обработки ГНСС-измерений.

1 Введение

Целью исследования является разбор различных методик (сценариев) обработки ГНСС-измерений, определение особенностей математико-алгоритмического процесса на основе анализа точности полученных результатов. Выявляются также недостатки программного обеспечения на различных промежуточных этапах обработки ГНСС-данных.

Многие пользователи программных комплексов обработки ГНСС-измерений не до конца понимают математико-алгоритмические процессы, заложенные в эти программы, и не используют весь спектр их действий. В итоге результаты обработки и уравнивания ГНСС-сетей получаются разными. В связи с этим необходимо определить оптимальную технологию обработки и уравнивания ГНСС-измерений.

В процессе исследования было выявлено несовершенство процедур и установленных параметров обработки и уравнивания ГНСС-сетей, а также проведена оценка различных неблагоприятных факторов, влияющих на точность результатов (неточность эфемерид, геометрический фактор, влияние тропосферы и ионосферы).

На каждом этапе исследований осуществлялась метрологическая оценка полученных результатов.

2 Материалы и методы

ГНСС-наблюдения были проведены 23, 24 и 25 декабря 2022 года синхронно на ГНСС-пунктах Менделеево, Одинцово, Орехово-Зуево, Клин с частотой 1 с. на протяжении 24 часов непрерывно. В результате наблюдений получены навигационные и измерительные файлы длительностью 1 ч. по каждому пункту сети.

Для эксперимента были выбраны данные трех дней ГНСС-наблюдений с 23 по 25 декабря 2022 года, установлен временной интервал 13–14 часов и 1–2 часа по Всемирному координированному времени (UTC). Критерием выборки стало максимально возможное изменение геометрического фактора и группировки спутников с течением времени. В качестве исходных используются навигационные эфемериды (файлы *.g и *.n) и данные измерений (файл *.o).

Выбранные ГНСС-пункты уравниваются в режиме фиксированного решения. Последнее в дальнейшем потребуется для сравнения разностей координат, длин и среднеквадратического отклонения (СКО) с выбранным (экспериментально опробованным) способом обработки и уравнивания ГНСС-измерений.

Параметры обработки ГНСС-данных, установленные для предварительного анализа, приведены в **табл. 1**. Параметры тропосферы выбраны приближенно и максимально соответствуют климатическим условиям дат ГНСС-наблюдений: модель Justin, давление 990 гПа, температура –20 °С, влажность 70 %.

Таблица 1 Параметры обработки ГНСС-данных

Table 1 GNSS data processing parameters

Параметр обработки	Значение
Минимальный размер выборки, эпоха	1
Максимальный разрыв, эпоха	300
Критерий для статики (СКО), м	5,00; 2,5
Угол отсечки, °	15
Допуск для статики и O-файлов, м	5,00; 2,5
Автостарт	обработка / уравнивание
Пересчет времени приемника	–
Время	UTC
Координатная система	WGS-84

Рассмотрим некоторые критерии оценки результатов обработки и уравнивания ГНСС-измерений.

Статистические критерии эффективны, когда ошибки измерений соответствуют гипотезе о модели распределения. Для более длинных линий (свыше 30 км) велико влияние систематических ошибок, которые усредняются только на периодах измерений свыше четырех часов [1].

Коэффициент критерия Фишера является главной характеристикой фиксированного решения (сценарий Auto). Он указывается в процентах и вычисляется на основании контраста решения и доверительного интервала, равного 95 %.

Коэффициент статистического критерия разрешения неоднозначности Фишера вычисляется на основании величины контраста и числа степеней свободы решения.

Контраст решения (коэффициент надежности решения) является отношением сумм квадратов невязок фазовых измерений двух наилучших, т. е. имеющих минимальные суммы квадратов невязок, наборов целочисленных решений неоднозначностей фазовых измерений. Контраст решения получается методом LAMBDA на основании преобразований ковариационной матрицы решения систем линейных уравнений по методу наименьших квадратов [2]. Однако высокий коэффициент контрастности не является надежной оценкой достоверности разрешения неоднозначности длинных линий на коротких периодах наблюдений. В таком случае для проверки решения целесообразно разделить сеанс наблюдений на две части, обработать их поочередно и сравнить результаты. В обработке следует добиваться получения коэффициента контрастности 95–100%. Для этого лучше всего использовать графики невязок решения, чтобы выявлять спутники с грубыми измерениями или же периоды, когда измерения имели аномальные отклонения.

Фиксированное решение с коэффициентом свыше 70% тоже может быть достоверным, если количество отбракованных измерений мало, а число спутников, использованных в обработке, более 7. Причина ошибок обработки заключается в трудности автоматической отбраковки грубых измерений, если их количество превышает треть всех данных, поэтому в ручном режиме практически всегда можно добиться уверенного фиксированного решения [1].

Остановимся на некоторых особенностях и сценариях обработки ГНСС-измерений, реализуемых в различных программных комплексах.

Используются следующие сценарии обработки ГНСС-данных: Auto, Code, L1&L2, Only L1, Only L2, Wide Lane, Narrow Lane. Охарактеризуем некоторые из них.

Как правило, совместное решение по сценариям Code и Auto (фиксированное решение) применяется в пакетной обработке ГНСС-сети после сценария «Предобработка». Сценарий Float (плавающее решение) используется выборочно для отдельных векторов сети после обработки Code.

Решение L1&L2 основано на одновременном вычислении неоднозначностей по первой и второй частотам и в отличие от решений, связанных с комбинациями данных, во-первых, позволяет использовать все имеющиеся данные, во-вторых, является наиболее эффективным при уточнении весов путем последовательных приближений [1]. Хорошей проверкой обоснованности применения режима L1 & L2 является отдельная обработка в режимах L1 и L2. Основное ограничение метода L1 & L2 на этапе определения неоднозначностей — неточность оценки поправки, определяемой с помощью навигационной информации по ионосферной модели. Окончательным этапом обработки в режиме L1 & L2 является решение, полученное на основе формирования свободной от ионосферы комбинации.

Линейная комбинация Wide Lane состоит из измерений на различных частотах, которые в общем случае имеют различную точность, следовательно,

преимущество более высокоточных данных теряется. Другая проблема решения Wide Lane заключается в том, что измерения по первой и второй частотам часто не совпадают между собой по времени, поэтому часть данных пропадает [1].

Перейдем к технологии экспериментальной обработки ГНСС-измерений. После обработки ГНСС-сети в целом (предобработка, обработка по кодовым измерениям, обработка по фиксированному решению) на первом этапе выбрана линия (вектор) Одинцово — Менделеево. **Для обработки используются следующие сценарии:**

- Float;
- L1 & L2;
- Code;
- отдельно L1 и L2;
- Narrow Lane;
- Wide Lane.

По результатам обработки ГНСС-измерений составляется таблица сравнения полученных результатов по сценариям и базовым линиям, где приводятся координаты, разности координат, нормальные высоты, СКО определения координат и длин.

На следующем этапе исследований выбираются два оптимальных по точности полученных результатов сценария, которые используются для обработки трех выбранных линий (векторов) ГНСС-сети. По полученным невязкам базовых линий исключаются грубые ошибки, и снова уравнивается сеть ГНСС-пунктов. Проводится сравнительный анализ полученных результатов и графиков геометрического фактора по всем выбранным векторам, датам и временным интервалам.

Результаты приводятся в таблице по сценариям обработки: Auto, выбранный сценарий и выбранный сценарий с исключением грубых измерений по полученным невязкам.

На завершающем этапе исследования ГНСС-данных проводится пространственно-временной анализ изменения высот выбранных пунктов сети после обработки фиксированным способом с ужесточением начальных параметров обработки (примерно в два раза — критерий для статики и O-файлов 2,5 м). При этом изначальные параметры (система координат, тропосферная модель с метеопараметрами, угол отсечки) не меняются. Используются ГНСС-измерения длительностью 1 ч. с дискретностью измерений 1 с. (3600 измерений за 1 ч.) и навигационные эфемериды. Анализируются полученные значения отклонений от суточной средней нормальной высоты выбранных ГНСС-пунктов на протяжении трех суток подряд.

В заключение приводятся оценка полученных результатов и рекомендации по обработке ГНСС-наблюдений.

3 Результаты

Продемонстрируем результаты расчета для одночасовых интервалов ГНСС-наблюдений. На основании полученных результатов для всех сценариев обработки на временном интервале 1 ч. выберем два более точных сценария.

Из полученных результатов обработки ГНСС-измерений (**табл. 2**) следует, что полученные коэффициенты контрастности (в процентах и в числовом виде) значительно изменяются в зависимости от сценария и времени обработки ГНСС-измерений. Это свидетельствует о существенном изменении коэффициента надежности полученного результата (от невысокой надежности и достоверности до высокой вероятности надежности результата).

Стабильно высокие показатели у сценария Auto. По сценариям L1 и L2 (отдельно), Wide Lane, Narrow Lane процент отбраковки данных меньше 5%. По сценариям Float и Code получился неопределенный результат (почти нулевой коэффициент) — решение нестабильное, ненадежное (использовать не рекомендуется). По сценарию L1&L2 сравнительно высокий коэффициент надежности, но в дневном интервале наблюдений (13–14 ч.) 24 декабря большой процент отбраковки измерений (около 20%).

Из анализа **табл. 2** и графиков оценки точности (**рис. 1**) следует, что наиболее приемлемыми по предварительной точности полученных результатов являются сценарии обработки L1 & L2 и Auto. Следовательно, используя эти сценарии обработки ГНСС-измерений, можно получить более точные координаты, высоты и расстояния по выбранным трем линиям ГНСС-измерений (Одинцово — Менделеево, Орехово-Зуево — Менделеево и Клин — Менделеево).

Согласно Государственной поверочной схеме для координатно-временных средств измерений¹ [3], для сети спутниковых и измерительных систем, непрерывно действующих в диапазоне длин от 1 до 200 км, предел допускаемой абсолютной погрешности приращения координат S_i составляет от 10 до 60 мм. Из **табл. 2** видно, что эта погрешность не превышает 60 мм для режима постобработки, за исключением сценария обработки ГНСС-измерений Code.

¹ Государственная поверочная схема для координатно-временных средств измерений: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 июня 2024 г. № 1374. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/565765> (дата обращения: 17.06.2025).

Таблица 2 Ведомость результатов по линии Одинцово — Менделеево

Table 2 Statement of results for the line Odintsovo – Mendeleevo

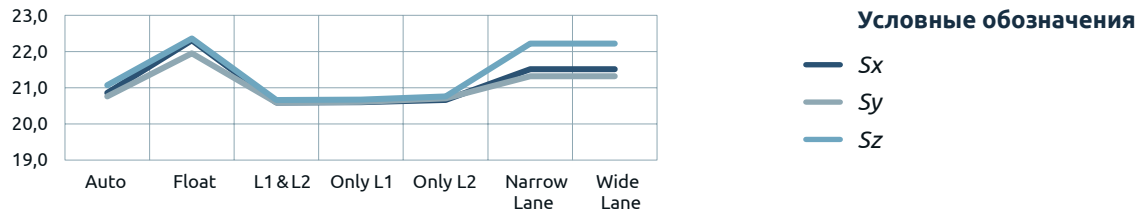
Дата и время	Параметр	Результаты вычислений							
		Auto	Float	L1&L2	Code	Only L1	Only L2	Narrow Lane (L1+L2)	Wide Lane
23.12.2022, 1–2 ч.	Разность координат dx, dy, dz , м	-35 918,5083 10 865,0090 14 818,0437	-35 918,4844 10 864,9906 14 818,0516	-35 918,5326 10 865,0275 14 818,0416	-35 918,5218 10 864,9828 14 817,9582	-35 918,5160 10 865,0285 14 818,0489	-35 918,5286 10 865,0422 14 818,0444	-35 918,5047 10 864,9545 14 818,0090	-35 918,5047 10 864,9545 14 818,0090
	Расстояние / S_i , м	40 345,5335 / 0,0362	40 345,5102 / 0,0384	40 345,5594 / 0,0357	40 345,5071 / 0,1131	40 345,5476 / 0,0357	40 345,5608 / 0,0358	40 345,5029 / 0,0375	40 345,5029 / 0,0375
	Нормальная высота, м	224,3417 183,0097	224,3417, 183,0206	224,3417, 183,0036	224,3417 182,9239	224,3417 183,0174	224,3417 183,0127	224,3417 182,9639	224,3417 182,9639
	S_x, S_y, S_z , м	2,086E-2 2,076E-2 2,107E-2	2,231E-2 2,195E-2 2,236E-2	2,059E-2 2,059E-2 2,066E-2	6,523E-2 5,070E-2 7,720E-2	2,060E-2 2,061E-2 2,067E-2	2,066E-2 2,071E-2 2,076E-2	2,151E-2 2,132E-2 2,222E-2	2,151E-2 2,132E-2 2,222E-2
	Результирующее СКО, м	0,0123	0,0121	0,0158	0,5205	0,0120	0,0187	0,0263	0,0263
	Коэффициент, %	99,98	0,00	96,75	0,00	100,00	99,92	99,99	99,99
	Контраст	1,506E+1	0,000E+0	3,736E+0	0,000E+0	2,722E+1	1,236E+1	1,537E+1	1,537E+1
24.12.2022, 13–14 ч.	Разность координат dx, dy, dz , м	-35 918,4628 10 865,0419 14 818,0610	-35 918,5199 10 864,9967 14 817,9312	-35 918,5754 10 865,0354 14 818,0580	-35 918,4971 10 864,9998 14 817,9013	-35 918,5512 10 865,0402 14 818,0622	-35 918,6026 10 865,0419 14 818,0793	-35 918,4049 10 865,0059 14 817,9652	-35 918,3790 10 865,0235 14 818,0078
	Расстояние / S_i , м	40 345,5082 / 3,819E-2	40 345,4993 / 4,030E-2	40 345,6057 / 3,604E-2	40 345,4688 / 1,160E-1	40 345,5870 / 3,600E-2	40 345,6394 / 3,614E-2	40 345,4119 / 4,074E-2	40 345,4092 4,071E-2
	Нормальная высота, м	222,5498 181,2662	222,5498 181,1180	222,5498 181,2116	222,5498 181,1044	222,5498 181,2275	222,5498 181,2195	222,5498 181,2002	222,5498 181,2530
	S_x, S_y, S_z , м	2,181E-2 2,148E-2 2,283E-2	2,342E-2 2,235E-2 2,399E-2	2,073E-2 2,072E-2 2,097E-2	6,322E-2 4,683E-2 8,019E-2	2,069E-2 2,072E-2 2,094E-2	2,074E-2 2,078E-2 2,106E-2	2,311E-2 2,242E-2 2,496E-2	2,309E-2 2,242E-2 2,493E-2
	Результирующее СКО, м	0,0161	0,0147	0,0194	0,8333	0,0161	0,0180	0,0323	0,0329
	Коэффициент, %	97,10	0,00	79,53	0,00	99,08	99,86	97,78	97,38
	Контраст	4,250E+0	0,000E+0	1,649E+0	0,000E+0	6,366E+0	1,138E+1	4,512E+0	4,228E+0

Дата и время	Параметр	Результаты вычислений							
		Auto	Float	L1&L2	Code	Only L1	Only L2	Narrow Lane (L1+L2)	Wide Lane
25.12.2022, 1-2 ч.	Разность координат dx, dy, dz , м	-35 918,5077 10 865,0074 14 818,0400	-35 918,5063 10 864,9992 14 818,0309	-35 918,5272 10 865,0291 14 818,0619	-35 918,6288 10 864,9265 14 817,8985	-35 918,5157 10 865,0267 14 818,0647	-35 918,5266 10 865,0369 14 818,0690	-35 918,4854 10 864,9839 14 818,0313	-35 918,4854 10 864,9839 14 818,0313
	Расстояние / S_b , м	40 345,5312 / 3,617E-2	40 345,5244 / 3,839E-2	40 345,5625 / 3,563E-2	40 345,5653 / 9,843E-2	40 345,5526 / 3,561E-2	40 345,5666 / 3,566E-2	40 345,5019 / 3,731E-2	40 345,5019 / 3,731E-2
	Нормальная высота, м	225,5902 184,2547	225,5902 184,2450	225,5902 184,2716	225,5902 184,0561	225,5902 184,2783	225,5902 184,2805	225,5902 184,2493	225,5902 184,2493
	S_x, S_y, S_z , м	2,084E-2 2,074E-2 2,106E-2	2,191E-2 2,172E-2 2,284E-2	2,057E-2 2,054E-2 2,060E-2	5,905E-2 4,612E-2 6,383E-2	2,056E-2 2,053E-2 2,059E-2	2,058E-2 2,056E-2 2,063E-2	2,139E-2 2,118E-2 2,205E-2	2,139E-2 2,118E-2 2,205E-2
	Результирующее СКО, м	0,0108	0,0099	0,0128	0,5290	0,0089	0,0134	0,0221	0,0221
	Коэффициент, %	99,95	0,00	99,84	0,00	99,97	99,88	100,00	100,00
	Контраст	1,254E+1	0,000E+0	8,212E+0	0,000E+0	1,468E+1	1,134E+1	3,132E+1	3,132E+1

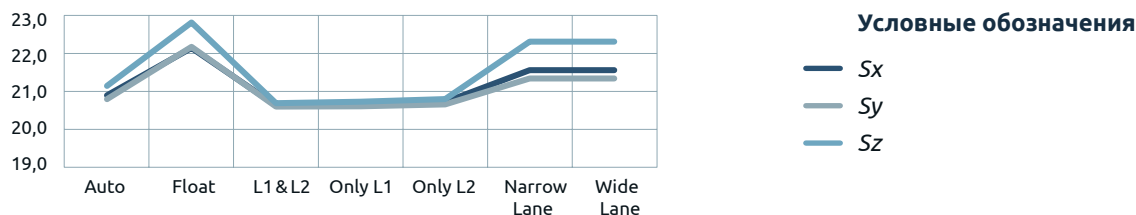
Рис. 1 Графики оценки точности линии Одинцово — Менделеево

Fig. 1 Graphs of the accuracy assessment of the Odintsovo – Mendeleevo line

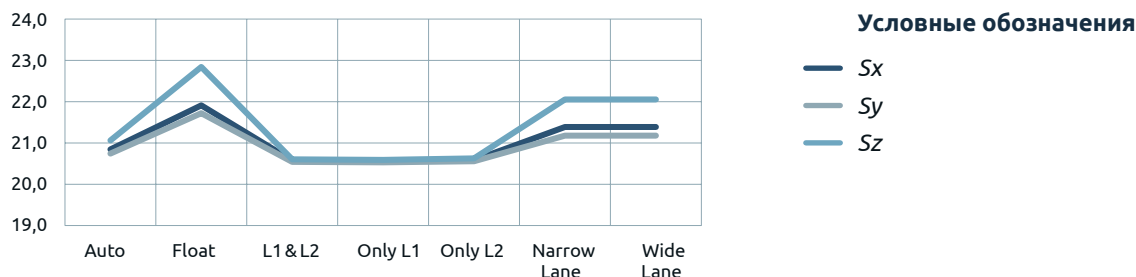
Точность определения вектора (S_x, S_y, S_z) на 23.12.2022, мм



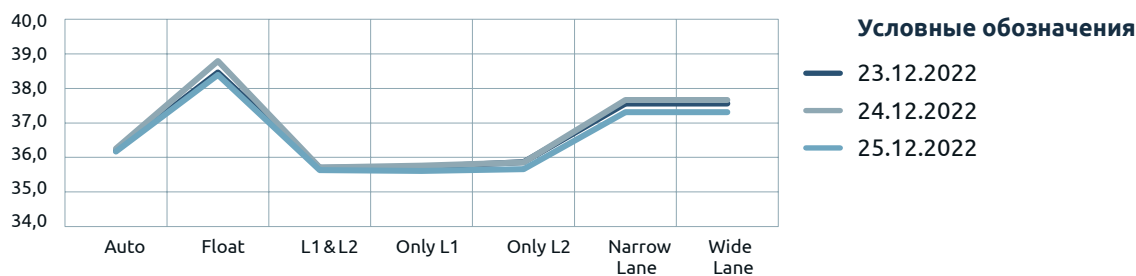
Точность определения вектора (S_x, S_y, S_z) на 24.12.2022, мм



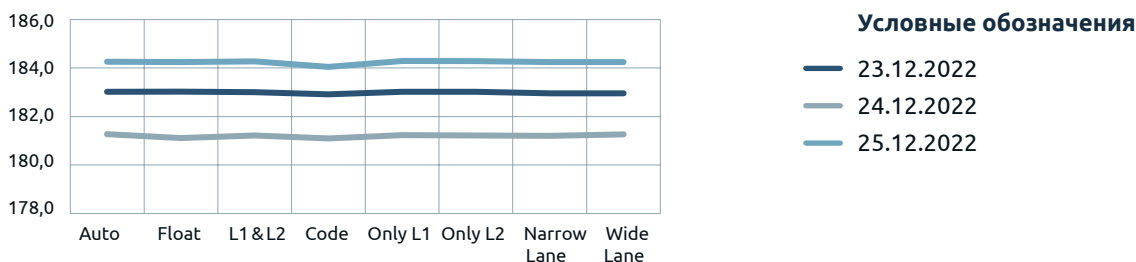
Точность определения вектора (S_x, S_y, S_z) на 25.12.2022, мм



Точность определения расстояния (S_r) на 23.12.2022, 24.12.2022 и 25.12.2022, мм



Изменение нормальной высоты пункта Менделеево на 23.12.2022, 24.12.2022 и 25.12.2022, м



Разность высот пункта Менделеево (24.12.2022–23.12.2022, 25.12.2022–24.12.2022, 25.12.2022–23.12.2022), м



Условные обозначения

- 24.12.2022–23.12.2022
- 25.12.2022–24.12.2022
- 25.12.2022–23.12.2022

4 Обсуждение

В результате анализа данных (табл. 2, рис. 1) выбраны два оптимальных сценария обработки ГНСС-измерений — Auto и L1 & L2, — которые будут использоваться при обработке трех линий на одночасовом и шестичасовом интервалах. В исходных параметрах «Свойства проекта» точность определения изменена для статики на 2,5 м, для O-файлов — на 2,5 м.

После исключения грубых ошибок измерений по вычисленным невязкам и расширения выборки ГНСС-данных до 6 ч. в ходе вычисления получены результаты, представленные в табл. 3–5. Графики изменения геометрического фактора представлены на рис. 2–4. Характеристика PDOP (англ. Position Dilution of Precision) вычисляется из квадратного корня суммы квадратов характеристик VDOP (англ. Vertical Dilution of Precision) и HDOP (англ. Horizontal Dilution of Precision) [2]. Для того чтобы не перегружать графики геометрического фактора (рис. 2–4), решено было не приводить характеристики GDOP (англ. Geometric Dilution of Precision) и TDOP (англ. Time Dilution of Precision).

Из анализа табл. 3–5 следует, что погрешность изменения длины (приращения координат — S_i) для линий свыше 40 км возрастает и превышает предельную² [3]. На расстояниях 75–78 км (Орехово-Зуево — Менделеево и Клин — Менделеево) погрешность приращения координат (S_i) оказалась свыше 60 мм (от 67 до 70 мм).

Полученные коэффициенты контрастности высокие (табл. 3–5), что говорит о высокой надежности полученного результата.

² Государственная поверочная схема для координатно-временных средств измерений: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 июня 2024 г. № 1374. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/565765> (дата обращения: 17.06.2025).

Значения геометрического фактора невысоки (от 1,4 до 1,9), но нестабильны во времени. Это проявляется «срывами» и «взлетами» от полуночных до полуденных временных интервалов.

Существенные изменения высот происходят на интервале 12–18 ч. (дневное время), что, возможно, свидетельствует о влиянии ионосферного фактора на прохождение ГНСС-сигнала и неточности эфемерид искусственного спутника Земли (в меньшей степени). Увеличение выборки ГНСС-измерений не оказывает значительного влияния на изменение высоты пункта.

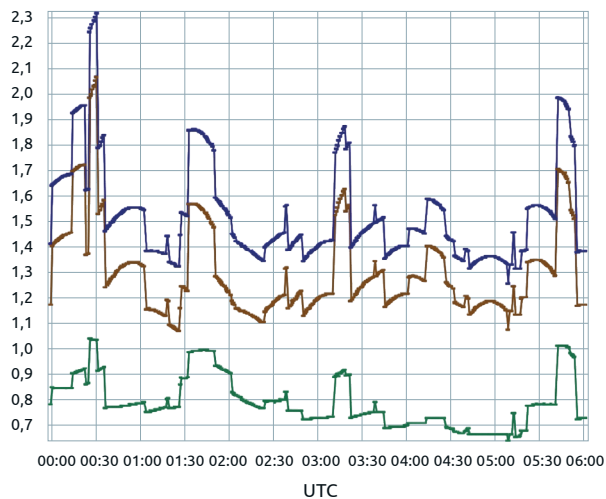
В итоге явно прослеживается тенденция к увеличению погрешности приращения координат с увеличением расстояния (свыше 40 км) и значительному изменению получаемых нормальных высот в дневные сеансы ГНСС-измерений. Следовательно, необходимо подробнее рассмотреть влияние ионосферы на точность высотного положения ГНСС-пунктов. При этом обработку ГНСС-измерений требуется проводить с применением точных эфемерид.

Таблица 3 Ведомость результатов по линии Одинцово — Менделеево

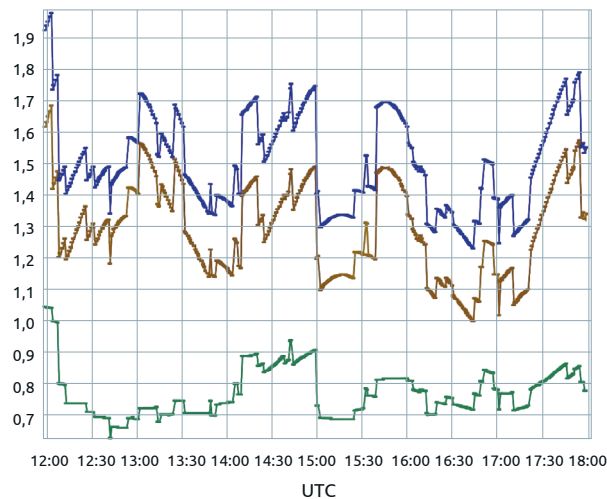
Table 3 Statement of results on the line Odintsovo – Mendeleevo

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
Auto	Разность координат dx, dy, dz , м	–35 918,5083 10 865,0090 14 818,0437	35 918,5002 –10 865,0072 –14 818,0541	–35 918,4911 10 865,0177 14 818,0226	35 918,4872 –10 865,0293 –14 818,0734	–35 918,5077 10 865,0074 14 818,0400	35 918,4930 –10 865,0160 –14 818,0705
	Расстояние / S_i , м	40 345,5335 / 3,620E–2	40 345,5297 / 3,586E–2	40 345,5128 / 3,788E–2	40 345,5312 / 3,606E–2	40 345,5312 / 3,617E–2	40 345,5317 / 3,581E–2
	Нормальная высота, м	224,3417 183,0097	225,6759 184,3563	222,5498 181,2136	223,2167 181,9250	225,5902 184,2547	226,1176 184,8166
	S_x , S_y , S_z , м	2,086E–2 2,076E–2 2,107E–2	2,067E–2 2,062E–2 2,082E–2	2,171E–2 2,137E–2 2,252E–2	2,076E–2 2,070E–2 2,100E–2	2,084E–2 2,074E–2 2,106E–2	2,064E–2 2,060E–2 2,077E–2
	Результ. СКО, м	0,0123	0,0114	0,0185	0,0171	0,0108	0,0101
	Коэффициент, %	99,98	99,83	95,08	99,99	99,95	99,63
	Контраст	1,506E+1	7,598E+0	3,423E+0	2,863E+1	1,254E+1	6,123E+0
L1 & L2	Разность координат dx, dy, dz , м	–35 918,5326 10 865,0275 14 818,0416	35 918,5270 –10 865,0268 –14 818,0569	–35 918,5754 10 865,0354 14 818,0580	35 918,5424 –10 865,0368 –14 818,0655	–35 918,5063 10 864,9992 14 818,0309	35 918,5202 –10 865,0296 –14 818,0664
	Расстояние / S_i , м	40 345,5594 / 3,570E–2	40 345,5599 / 3,561E–2	40 345,6057 / 3,604E–2	40 345,5794 / 3,567E–2	40 345,5244 / 3,839E–2	40 345,5580 / 3,556E–2
	Нормальная высота, м	224,3417 183,0036	225,6788 184,3563	222,5498 181,2116	223,2455 181,9250	225,5902 184,2450	226,1286 184,8166
	S_x , S_y , S_z , м	2,231E–2 2,195E–2 2,236E–2	2,054E–2 2,055E–2 2,058E–2	2,073E–2 2,072E–2 2,097E–2	2,058E–2 2,056E–2 2,065E–2	2,191E–2 2,172E–2 2,284E–2	2,052E–2 2,051E–2 2,056E–2
	Результ. СКО, м	0,0158	0,0189	0,0194	0,0211	0,0128	0,0155
	Коэффициент, %	96,75	99,44	79,53	99,93	99,84	92,85
	Контраст	3,736E+0	5,449E+0	1,649E+0	7,717E+0	8,212E+0	2,686E+0

23.12.2022



24.12.2022



25.12.2022

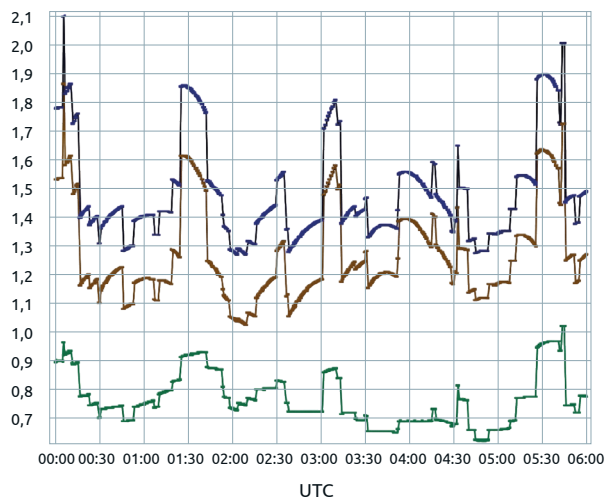


Рис. 2 Графики геометрического фактора линии Одинцово — Менделеево (23, 24 и 25 декабря 2022 г.)

Fig. 2 Geometric factor graphs of the Odintsovo – Mendeleevo line (December 23, 24 and 25, 2022)

Условные обозначения

- PDOP
- HDOP
- VDOP

Таблица 4 Ведомость результатов по линии Орехово-Зуево — Менделеево

Table 4 Statement of results on the line Orekhovo-Zuyevo – Mendeleevo

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
Auto	Разность координат dx , dy , dz , м	38 789,7383 -65 633,8849 7047,1319	38 789,7282 -65 633,8848 7047,1307	38 789,7185 -65 633,9073 7047,0935	-38 789,7221 65 633,8950 -7047,1144	38 789,7259 -65 633,8916 7047,1246	-38 789,7276 65 633,8805 -7047,1302
	Расстояние / S_i , м	76 564,4351 / 6,741E-2	76 564,4297 / 6,718E-2	76 564,4406 / 6,799E-2	76 564,4339 / 6,727E-2	76 564,4339 / 6,739E-2	76 564,4257 / 6,716E-2
	Нормальная высота, м	141,2504 183,0231	142,5925 184,3631	139,5038 181,2325	140,1727 181,9250	142,5085 184,2689	143,0446 184,8166
	S_x , S_y , S_z , м	3,889E-2 3,881E-2 3,906E-2	3,875E-2 3,872E-2 3,889E-2	3,919E-2 3,904E-2 3,952E-2	3,879E-2 3,876E-2 3,896E-2	3,887E-2 3,881E-2 3,905E-2	3,874E-2 3,871E-2 3,887E-2
	Результ. СКО, м	0,0098	0,0103	0,0134	0,0111	0,0098	0,0092
	Коэффициент, %	100,00	98,30	99,54	100,00	100,00	98,05
	Контраст	3,873E+1	4,436E+0	7,357E+0	2,304E+1	2,068E+1	4,204E+0

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
L1 & L2	Разность координат dx, dy, dz , м	38 789,7616 –65 633,9214 7047,1145	38 789,7498 –65 633,9341 7047,1148	38 789,3726 –65 633,9805 7047,1049	–38 789,7644 65 633,9543 –7047,1011	38 789,7538 –65 633,9269 7047,1039	–38 789,7530 65 633,9267 –7047,1162
	Расстояние / S_b , м	76 564,4765/ 6,710E–2	76 564,4814/ 6,699E–2	76 564,3292/ 6,764E–2	76 564,5049/ 6,716E–2	76 564,4763/ 6,708E–2	76 564,4769/ 6,696E–2
	Нормальная высота, м	141,2504 183,0066	142,5925 184,3427	139,5038 181,0636	140,1862 181,9250	142,5085 184,2521	143,0615 184,8166
	S_x , S_y , S_z , м	3,874E–2 3,869E–2 3,879E–2	3,866E–2 3,864E–2 3,872E–2	3,894E–2 3,890E–2 3,931E–2	3,874E–2 3,873E–2 3,885E–2	3,874E–2 3,867E–2 3,877E–2	3,865E–2 3,863E–2 3,869E–2
	Результ. СКО, м	0,0156	0,0230	0,0372	0,0328	0,0138	0,0186
	Коэффициент, %	90,59	97,79	99,49	100,00	95,86	98,29
	Контраст	2,567E+0	3,953E+0	6,700E+0	2,237E+1	3,593E+0	4,269E+0

23.12.2022

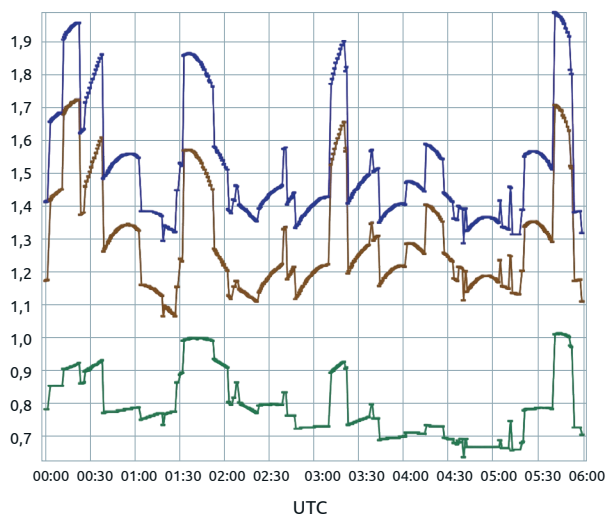


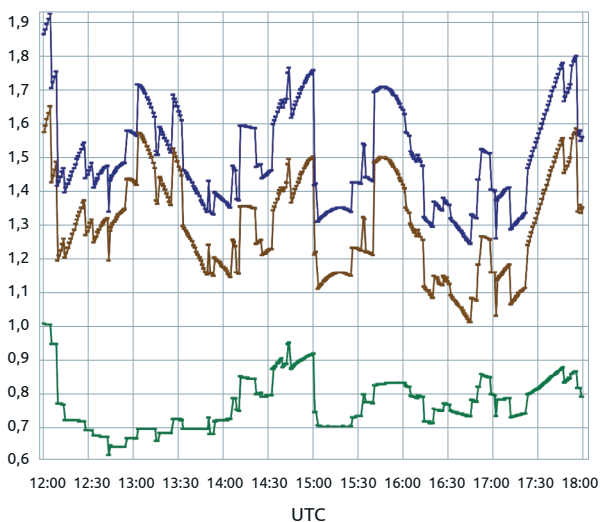
Рис. 3 Графики геометрического фактора линии Орехово-Зуево — Менделеево (23, 24 и 25 декабря 2022 г.)

Fig. 3 Geometric factor graphs of the Orekhovo-Zuyevo – Mendeleevo line (December 23, 24 and 25, 2022)

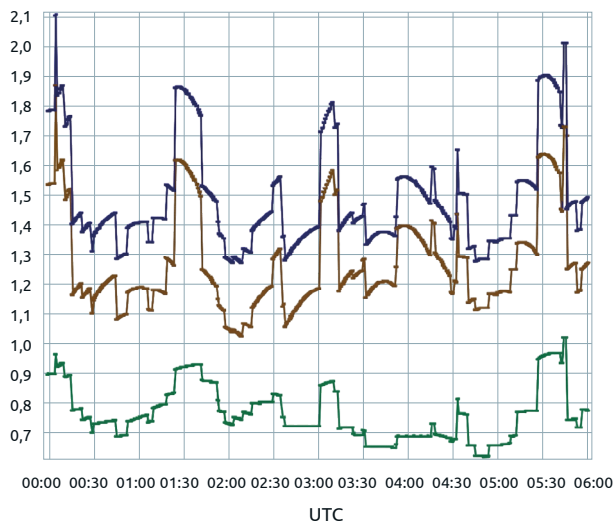
Условные обозначения

- PDOP
- HDOP
- VDOP

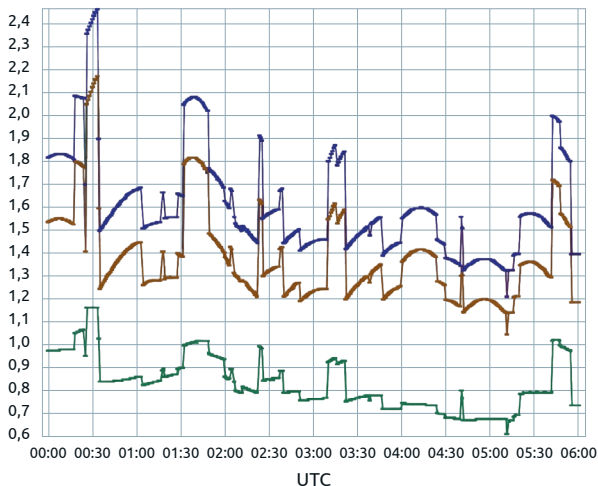
24.12.2022



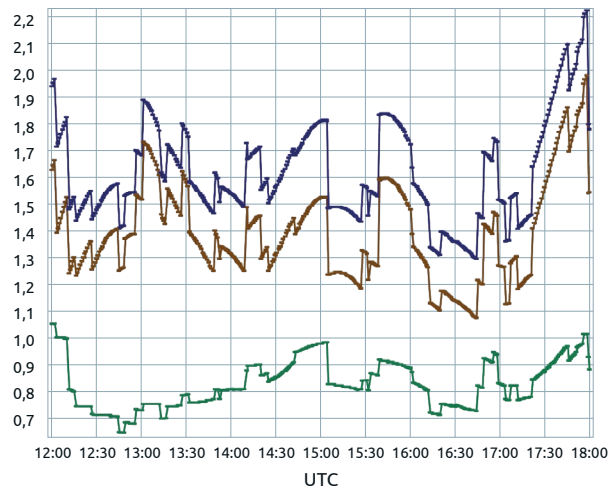
25.12.2022



23.12.2022



24.12.2022



25.12.2022

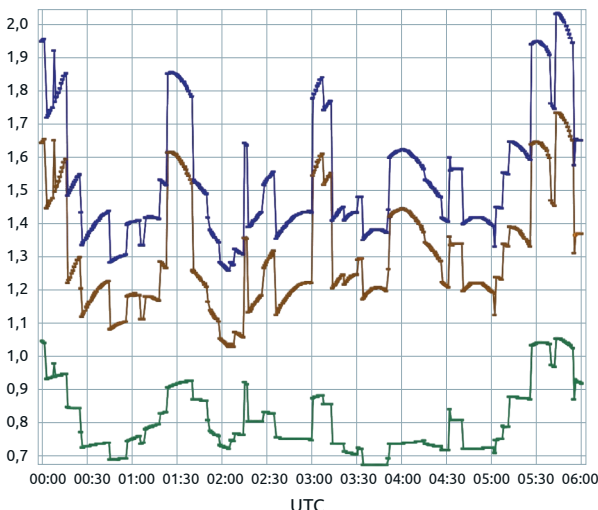


Рис. 4 Графики геометрического фактора линии Клин — Менделеево (23, 24 и 25 декабря 2022 г.)

Fig. 4 Geometric factor graphs of the Klin – Mendeleevo line (December 23, 24 and 25, 2022)

Условные обозначения

- PDOP
- HDOP
- VDOP

Таблица 5 Ведомость результатов по линии Клин — Менделеево

Table 5 Statement of results on the line Klin – Mendeleevo

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
Auto	Разность координат dx, dy, dz , м	-8788,3797	-8788,3945	8788,4074	-8788,3872	-8788,3886	-8788,396
		73 558,0295	73 558,0096	73 558,0082	73 558,0220	73 558,0123	73 558,0075
		-25 211,6305	-25 211,6514	-25 211,6733	-25 211,6373	-25 211,6457	-25 211,6494
	Расстояние / S_b , м	78 253,7260 / $6,927E-2$	78 253,7157 / $6,875E-2$	78 253,7229 / $7,001E-2$	78 253,7220 / $6,903E-2$	78 253,7157 / $6,924E-2$	78 253,7132 / $6,874E-2$
		Нормальная высота, м	194,2614 183,0503	195,6019 184,3551	192,4942 181,2192	193,1511 181,9230	195,5048 184,2700
	S_x , S_y , S_z , м	3,994E-2	3,965E-2	4,033E-2	3,977E-2	3,993E-2	3,964E-2
		3,980E-2	3,960E-2	4,010E-2	3,971E-2	3,979E-2	3,960E-2
		4,023E-2	3,983E-2	4,083E-2	4,008E-2	4,021E-2	3,982E-2
Результ. СКО, м	0,0116	0,0114	0,0130	0,0105	0,0125	0,0112	
Коэффициент, %	97,33	98,23	98,45	99,94	99,78	98,52	
Контраст	4,260E+0	4,461E+0	5,576E+0	9,470E+0	8,607E+0	4,569E+0	

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
L1 & L2	Разность координат dx, dy, dz , м	-8788,4032 73 558,0595 -25211,6265	-8788,3676 73 558,0679 -25211,6217	-8788,4050 73 558,1062 -25 211,6292	-8788,4013 73 558,0673 -25 211,6725	-8788,4133 73 558,0510 -25 211,6642	-8788,4035 73 558,0576 -25 211,6608
	Расстояние / S_i , м	78253,7556/ 6,863E-2	78253,7579/ 6,851E-2	78253,8005/ 6,916E-2	78253,7775/ 6,860E-2	78253,7608/ 6,855E-2	78253,7649/ 6,843E-2
	Нормальная высота, м	194,2614 183,0535	195,6019 184,4117	192,4942 181,2904	193,1511 181,9031	195,5048 184,2570	196,0630 184,8219
	S_x , S_y , S_z , м	3,962E-2 3,957E-2 3,968E-2	3,954E-2 3,953E-2 3,960E-2	3,985E-2 3,992E-2 4,003E-2	3,958E-2 3,958E-2 3,967E-2	3,957E-2 3,954E-2 3,962E-2	3,950E-2 3,949E-2 3,954E-2
	Результ. СКО, м	0,0265	0,0274	0,0327	0,0300	0,0177	0,0203
	Коэффициент, %	76,15	96,98	72,26	99,80	95,56	98,74
	Контраст	1,507E+0	3,695E+0	1,328E+0	6,663E+0	3,556E+0	4,622E+0

Для проведения эксперимента взяты ГНСС-данные на протяжении трех суток (23–25 декабря 2022 г.) с интервалом 6 ч. и длительностью 1 ч. по четырем пунктам наблюдений (Менделеево, Одинцово, Орехово-Зуево и Клин). В процессе анализа ГНСС-данных обнаружилась определенная закономерность изменения высотного положения пунктов, поэтому интервал выборки был сокращен. Вычисление и уравнивание выполнено способом Auto (по умолчанию), критерий для статики установлен 2,5 м, для O-файлов — 2,5 м.

При установке параметров обработки оказалось, что данные дневных спутниковых измерений отличаются от ночных своей раздробленностью в течение всего интервала измерения. Результаты представлены в **табл. 6** (отклонение от средней высоты) и одном графике (**рис. 5**).

На **рис. 5** приведена гистограмма отклонения от средней высоты ГНСС-пунктов.

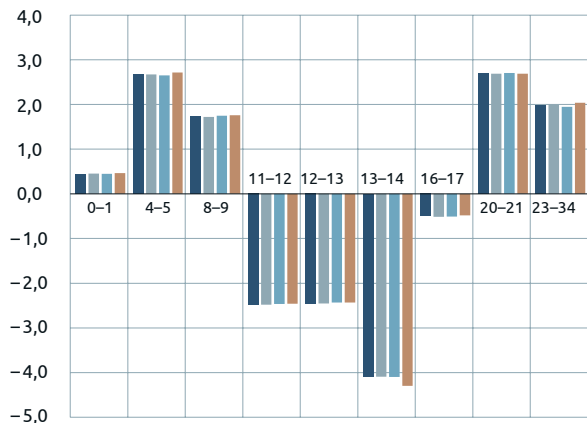
Таблица 6 Отклонение от средней высоты ГНСС-пункта

Table 6 Deviation from the average altitude of the GNSS point

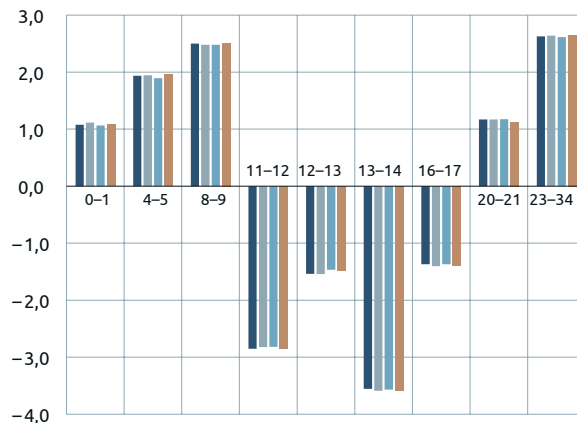
Дата	Отклонение от средней нормальной высоты, м				
	Временной интервал, ч.	Менделеево	Одинцово	Орехово-Зуево	Клин
23.12.2022	0–1	0,4469	0,4525	0,4461	0,4639
	4–5	2,6762	2,6746	2,6509	2,7177
	8–9	1,7341	1,7228	1,7503	1,7587
	11–12	-2,4864	-2,4790	-2,4657	-2,4609
	12–13	-2,4681	-2,4553	-2,4314	-2,4330
	13–14	-4,0944	-4,0931	-4,0969	-4,2952
	16–17	-0,4979	-0,5137	-0,5076	-0,4801
	20–21	2,6985	2,6880	2,7036	2,6921
23–24	1,9913	2,0029	1,9503	2,0372	

Дата	Отклонение от средней нормальной высоты, м				
	Временной интервал, ч.	Менделеево	Одинцово	Орехово-Зуево	Клин
24.12.2022	0–1	1,0784	1,1151	1,0631	1,0787
	4–5	1,9362	1,9473	1,8930	1,9567
	8–9	2,5004	2,4820	2,4782	2,5105
	11–12	-2,8523	-2,8224	-2,8189	-2,8561
	12–13	-1,5377	-1,5398	-1,4675	-1,4745
	13–14	-3,5556	-3,5901	-3,5676	-3,5844
	16–17	-1,3703	-1,4022	-1,3709	-1,4043
	20–21	1,1718	1,1704	1,1746	1,1232
	23–24	2,6287	2,6395	2,6160	2,6505
25.12.2022	0–1	3,4369	3,4579	3,4447	3,4340
	4–5	2,6949	2,6770	2,6403	2,7312
	8–9	0,6016	0,5919	0,6205	0,5978
	11–12	-3,0038	-2,9986	-2,9866	-2,9935
	12–13	-2,9944	-2,9816	-2,9717	-3,0044
	13–14	-5,4025	-5,4191	-5,3976	-5,4215
	16–17	-1,2141	-1,2296	-1,2264	-1,2060
	20–21	2,8558	2,8607	2,8475	2,8290
	23–24	3,0259	3,0413	3,0291	3,0336

23.12.2022



24.12.2022



25.12.2022

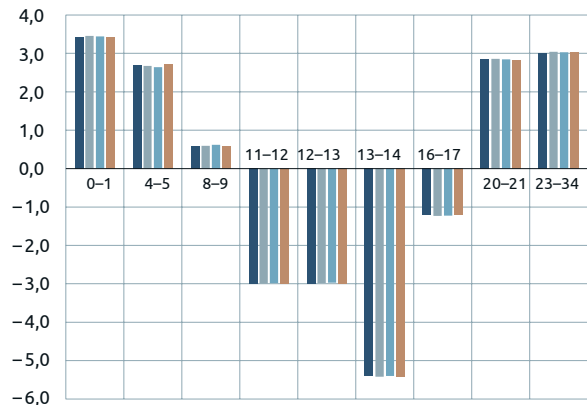


Рис. 5 Гистограммы отклонений от средней нормальной высоты ГНСС-пунктов Менделеево, Одинцово, Орехово-Зуево и Клин по датам наблюдений

Fig. 5 Histograms of deviations from the average normal altitude of GNSS points Mendeleevo, Odintsovo, Orekhovo-Zuyevo and Klin by observation dates

Условные обозначения

- Менделеево
- Одинцово
- Орехово-Зуево
- Клин

Разности высот ГНСС-пунктов в течение одного интервала почти не изменяются. По графикам прослеживается изменение высот ГНСС-пунктов в зависимости от времени суток, что, вероятно, связано с влиянием ионосферы на измерения и неточностью эфемерид искусственного спутника Земли (в меньшей степени).

5 Выводы

В программное обеспечение может быть заложен так называемый пакетный сценарий, состоящий из предобработки, обработки по кодовым измерениям (точность 3–5 м), обработки плавающим и фиксированным сценарием. Предусмотрена возможность изменения типа данных со статического на кинематический и наоборот.

При отбраковке грубых ошибок по полученным невязкам ГНСС-измерений рекомендуется не проводить тщательно эту процедуру, поскольку вместе с грубыми измерениями могут быть исключены точные данные, которые влияют на конечный результат обработки и уравнивания (имеется несовершенство механизма отбраковки в ручном режиме). Следует учесть, что при малом числе измерений оценка решения улучшается, но становится менее надежной. Оптимальный контраст решения (коэффициент надежности) составляет не менее 95 %, отбраковка измерений — не более 10 % [1].

В процессе обработки ГНСС-измерений влияние результирующего геометрического фактора PDOP было незначительным (варьировалось от 1,4 до 1,9). Из статей [4–6] следует, что наиболее выгодные в геометрическом смысле условия наблюдений можно реализовать на широте в 50–60°. Именно в этом интервале широт расположена Москва с ее окрестностями. Следовательно, здесь целесообразно создавать метрологические полигоны для аттестации спутниковой аппаратуры и ее программного обеспечения.

Для расстояний свыше 30 км рекомендуется использовать максимально возможное количество ГНСС-измерений — увеличить временной интервал выборки ГНСС-измерений до четырех часов. Кроме того, следует учесть, что для расстояний больше 40 км возрастают ошибки вычисления длины (табл. 4–5), превышающие предельную, согласно Государственной поверочной схеме [3]. Рекомендуется обработать ГНСС-измерения на одночасовых интервалах с использованием точных эфемерид, устранить грубые ошибки по полученным невязкам, а затем объединить все одночасовые файлы в четырехчасовой.

В процессе анализа высот ГНСС-пунктов выявлено влияние ионосферы на ГНСС-данные измерений и на результаты обработки и уравнивания. Рекомендуется проводить ночные ГНСС-измерения с целью значительного уменьшения влияния на них ионосферы. Для ослабления влияния ионосферного фактора на ГНСС-измерения в программных комплексах рекомендуется выполнить

обработку в режимах Only L1 и Only L2, сравнить полученные результаты, а затем обработать в режиме L1 & L2. Основными ограничениями метода L1 & L2 на этапе определения неоднозначностей является неточность поправки, определяемой с помощью навигационной информации по ионосферной модели.

Рекомендуемые значения ионофактора варьируются в диапазоне от 2 до 4, что соответствует состоянию ионосферы от спокойной до возмущенной. Большее значение данной величины расширяет границы допустимых значений остаточных уклонений [2]. Дальнейшее исследование будет связано с оценкой влияния ионосферы на точность определения высот ГНСС-пунктов с применением математического фильтра Калмана и с учетом исследований [7–10].

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бойков А.В., Разумовский А.И. JUSTIN — алгоритмы и приемы обработки измерений // Геопрофи. 2011. № 5. С. 30–33.
2. Артемов М.А., Кочкин Д.Е. Особенности использования фазовых измерений систем типа ГЛОНАСС для повышения точности в навигационных задачах // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2010. № 2. С. 19–26.
3. Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Мазуркевич А.В. и др. Изменения в обновленной Государственной поверочной схеме для координатно-временных средств измерений // Альманах современной метрологии. 2019. № 3(19). С. 25–30.
4. Кравчук И.М. Особенности оценки точности результатов фазовых измерений спутниковыми приемниками // Пространственные данные: наука и технологии. 2022. № 13. С. 95–103. DOI:10.30533/scidata-2022-13-07.
5. Шануров Г.А., Остроумов В.З., Остроумов Л.В. О влиянии геометрии спутниковых наблюдений на погрешности определения координат пунктов опорной геодезической сети // Геопрофи. 2008. № 2. С. 57–60.
6. Шануров Г.А., Мельников С.Р., Лопес-Кьерво С. и др. Геометрия спутниковых наблюдений при создании метрологического полигона // Геодезия и картография. 2001. № 7. С. 7–14.
7. Кауфман М.Б., Филонов Д.Н. Определение ионосферных задержек по сигналам GPS по данным измерений одночастотным приемником // Геодезическое образование: сборник материалов Международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. М.: МИИГАиК, 2004. С. 196–200.
8. Карауш Е.А. О проблеме компенсации ионосферной задержки навигационных сигналов в целях проведения калибровки ГНСС-приемников // Альманах современной метрологии. 2021. № 4(28). С. 40–48.

9. Мышерин А.В. Применение фильтра Калмана для оценки полного электронного содержания ионосферы по данным GPS-наблюдений // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2005. № 1-2. С. 141–146.
10. Комаров Р.В., Фахрутдинова А.Н., Нугманов И.С. Методические аспекты оценки точности спутниковых измерений // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Физико-математические науки. 2008. Т. 150, № 3. С. 46–56.

АВТОР

Филонов Дмитрий Николаевич

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево (Московская область), Россия

Поступила 01.07.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.

UDC 528.1

DOI:10.30533/scidata-2025-16-07



Recommendations on the Methodology for Processing GNSS Measurements Based on the Analysis of the Accuracy of the Moscow Geodetic Network

Dmitry N. Filonov¹

AFFILIATIONS

¹ All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radio-Engineering Measurements, Mendeleevo settlement, Moscow region, Russia

filonov_dn@vniiftri.ru

CITATION

Filonov DN. Recommendations on the Methodology for Processing GNSS Measurements Based on the Analysis of the Accuracy of the Moscow Geodetic Network. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(2): 76–97. DOI:10.30533/scidata-2025-16-07.

KEYWORDS

processing of GNSS measurements, GNSS point, network, software, adjustment, analysis, processing scenario, processing parameter, accuracy, coordinate difference, normal height

ABSTRACT

Currently, many software packages for processing GNSS measurements have been developed. The most well-known are Justin, Giodis, Trimble Business Center, various specialized programs for various types of receivers, Bernese, etc. The Justin software is suitable for processing local (partly regional) GNSS networks. The “User’s Guide” for using the software does not cover specific points (features) of the GNSS measurement processing methodology. Moreover, the “User’s Guide” does not always explain specific parameters, values when choosing a specific scenario for processing

GNSS measurements. This article will consider various scenarios (methods) for processing GNSS measurements embedded in the Justin software. Various processing methods will be analyzed to obtain specific results and analyze the accuracy of the calculation. In conclusion, specific recommendations are given for various stages of processing GNSS measurements.

REFERENCES

1. Boykov AV, Razumovsky AI. JUSTIN – algoritmy i priemy obrabotki izmerenii [JUSTIN – Algorithms and Methods for Processing Measurements]. *Geoprofi*. 2011;5: 30–33. (In Russian).
2. Artemov MA, Kochkin DE. Osobennosti ispol'zovaniya fazovykh izmerenii sistem tipa GLONASS dlya povysheniya tochnosti v navigatsionnykh zadachakh [Features of Using Phase Measurements of GLONASS-type Systems to Improve Accuracy in Navigation Tasks]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2010;2: 19–26. (In Russian).
3. Denisenko OV, Silvestrov IS, Mazurkevich AV, et al. Izmeneniya v obnovlennoi Gosudarstvennoi poverochnoi skheme dlya koordinatno-vremennykh sredstv izmerenii [Changes in the Updated State Verification Scheme for Coordinate-Time Measuring Instruments]. *Almanac of Modern Metrology*. 2019;3(19): 25–30. (In Russian).
4. Kravchuk IM. Osobennosti otsenki tochnosti rezul'tatov fazovykh izmerenii sputnikovymi priemnikami [Features of the Accuracy Assessment of the Results of Phase Measurements by Satellite Receivers]. *Spatial Data: Science and Technology*. 2022;13: 95–103. (In Russian). DOI:10.30533/scidata-2022-13-07.
5. Shanurov GA, Ostroumov VZ, Ostroumov LV. O vliyanii geometrii sputnikovyykh nablyudenii na pogreshnosti opredeleniya koordinat punktov opornoj geodezicheskoi seti [On the Influence of the Geometry of Satellite Observations on the Errors in Determining the Coordinates of Points of the Reference Geodetic Network]. *Geoprofi*. 2008;2: 57–60. (In Russian).
6. Shanurov GA, Melnikov SR, Lopez-Quervo S, et al. Geometriya sputnikovyykh nablyudenii pri sozdanii metrologicheskogo poligona [Geometry of Satellite Observations in the Creation of a Metrological Test Site]. *Geodesy and Cartography*. 2001;7: 7–14. (In Russian).
7. Kaufman MB, Filonov DN. Opredelenie ionosfernykh zaderzhok po signalam GPS po dannym izmerenii odnochastotnym priemnikom [Determination of Ionospheric Delays for GPS Signals Based on Measurements by a Single-Frequency Receiver]. *Geodetic Education: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 225th Anniversary of MIIGAiK*. Moscow: MIIGAiK; 2004: 196–200. (In Russian).
8. Karaush EA. O probleme kompensatsii ionosfernoi zaderzhki navigatsionnykh signalov v tselyakh provedeniya kalibrovki GNSS-priemnikov [On the Problem of Compensation for Ionospheric Delay of Navigation Signals for the Purpose of Calibration of GNSS Receivers]. *Almanac of Modern Metrology*. 2021;4(28): 40–48. (In Russian).

9. Mysherin AV. Primenenie fil'tra Kalmana dlya otsenki polnogo elektronnoogo sodержaniya ionosfery po dannym GPS-nablyudenii [Application of the Kalman Filter to Estimate the Total Electron Content of the Ionosphere Based on GPS Observations]. *Bulletin of the I. Kant Baltic Federal University*. 2005;1-2: 141–146. (In Russian).
10. Komarov RV, Fakhrutdinova AN, Nugmanov IS. Metodicheskie aspekty otsenki tochnosti sputnikovykh izmerenii [Methodological Aspects of Assessing the Accuracy of Satellite Measurements]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya: Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2008;150(3): 46–56. (In Russian).

AUTHOR

Dmitry N. Filonov

All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radio-Engineering Measurements,
Mendeleevo settlement, Moscow region, Russia

Submitted: July 1, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.