

СОГЛАСОВАНО

Первый заместитель
генерального директора —
заместитель по научной работе
ФГУП «ВНИИФТРИ»



А.Н. Щипунов

12 2020 г.

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
КОМПЛЕКСЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА КИГМ

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ

651-20-063 МП

р.п. Менделеево
2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие сведения	3
2 Перечень операций поверки	3
3 Метрологические и технические требования к средствам поверки.....	4
4 Требования к специалистам, осуществляющим поверку	5
5 Требования по обеспечению безопасности проведения поверки	5
6 Требования к условиям проведения поверки	5
7 Внешний осмотр средства измерений	6
8 Подготовка к поверке и опробование средства измерений.....	6
9 Проверка программного обеспечения средства измерений.....	7
10 Определение метрологических характеристик средства измерений	7
11 Подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям.....	11
12 Оформление результатов поверки	12
Приложение А Проведение измерений	14
Перечень сокращений	13

1 Общие сведения

1.1 Настоящая методика поверки распространяется на комплексы измерительные геодезического мониторинга КИГМ (далее по тексту — КИГМ), изготавливаемые АО «НПК «СПП», г. Москва, и устанавливает методы и средства их первичной и периодической поверок.

1.2 При проведении поверки должна быть обеспечена прослеживаемость к государственному первичному специальному эталону единицы длины – метра ГЭТ 199-2018 и к государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1 -2018 по государственной поверочной схеме для координатно-временных измерений, утвержденной приказом Росстандарта № 2831 от 29.12.2018 г.

1.3 При проведении поверки необходимо руководствоваться настоящей методикой и эксплуатационной документацией на используемое при поверке оборудование.

1.4 Методика поверки реализуется посредством методов удаленных измерений.

2 Перечень операций поверки

2.1 При поверке выполняют операции, представленные в таблице 1.

Таблица 1 — Перечень операций, выполняемых при поверке

Наименование операции	Номер пункта методики	Проведение поверки	
		при первичной поверке (или после ремонта)	при периодической поверке
1 Внешний осмотр средства измерений	7	да	да
2 Подготовка к поверке и опробование средства измерений	8	да	да
3 Проверка программного обеспечения средства измерений	9	да	да
4 Определение метрологических характеристик средства измерения	10		
4.1 Определение среднего квадратического отклонения случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе дальномерного кода	10.1	да	да
4.2 Определение среднего квадратического отклонения случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе несущей частоты	10.2	да	да

Наименование операции	Номер пункта методики	Проведение поверки	
		при первичной поверке (или после ремонта)	при периодической поверке
4.3 Определение изменения систематической составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе дальномерного кода до навигационного космического аппарата системы ГЛОНАСС на интервале времени наблюдения 8 сут	10.3	да	да
4.4 Определение относительной погрешности по частоте выходного сигнала 10 МГц на интервале 1 год	10.4	да	да
4.5 Определение среднего квадратического относительного двухвыборочного отклонения частоты выходного сигнала 10 МГц на интервале времени измерений 1 сут	10.5	да	да
5 Подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям	11	да	да

2.2 При получении отрицательных результатов при выполнении любой из операций, приведенных в таблице 1 поверка прекращается, и КИГМ бракуется.

2.3 Не допускается проведение поверки отдельных измерительных каналов или отдельных автономных блоков или меньшего числа измеряемых величин или на меньшем числе поддиапазонов измерений.

3 Метрологические и технические требования к средствам поверки

3.1 Рекомендуемые средства поверки КИГМ приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Средства измерений, используемые при поверке

Операции поверки, требующие применение средств поверки	Метрологические и технические требования к средствам поверки, необходимые для проведения поверки	Перечень рекомендуемых средств поверки
10.3-10.5	Пределы допускаемой относительной погрешности по частоте $\pm 1 \cdot 10^{-13}$, среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение частоты при времени измерения 1 сут, не более $\pm 7,0 \cdot 10^{-16}$	Эталон единиц времени, частоты номинальных значений и шкалы времени
10.3-10.5	Предел допускаемого медианного значения абсолютной погрешности определения эфемерид навигационных космических аппаратов 0,035 м	Система контроля и подтверждения характеристик радионавигационного поля системы ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей первой очереди

Операции поверки, требующие применение средств поверки	Метрологические и технические требования к средствам поверки, необходимые для проведения поверки	Перечень рекомендуемых средств поверки
10.3-10.5	Предел допускаемой погрешности воспроизведения/измерения беззапросной дальности по фазе дальномерного кода не более 0,05 м, предел допускаемой погрешности воспроизведения/измерения беззапросной дальности по фазе несущей частоты не более 0,002 м	Рабочий эталон координат местоположения I разряда согласно государственной поверочной схеме для координатно-временных средств измерений, утвержденной приказом Росстандартом № 2831 от 29 декабря 2018 г.

3.2 Все средства поверки, применяемые при поверке КИГМ, должны быть исправны, аттестованы или поверены.

3.3 Вместо указанных в таблице 2 средств поверки допускается применять другие аналогичные, обеспечивающие определение метрологических характеристик КИГМ с требуемой точностью.

4 Требования к специалистам, осуществляющим поверку

4.1 Поверка должна осуществляться лицами с высшим или средним техническим образованием, квалифицированными в качестве поверителей в области координатно-временных средств измерений.

5 Требования по обеспечению безопасности проведения поверки

5.1 При проведении поверки должны быть соблюдены все требования безопасности в соответствии с ГОСТ 12.3.019-80.

6 Требования к условиям проведения поверки

6.1 При проведении поверки КИГМ должны соблюдаться следующие условия:

- напряжение питания от сети переменного тока частотой от 48 до 52 Гц, В..... 220 ± 22 .
- для аппаратуры, размещаемой в помещении:
 - а) температура окружающего воздуха, °С от 5 до 40;
 - б) повышенная относительная влажность воздуха при температуре 20 °С, %..... 80
- для аппаратуры, размещаемой на открытом воздухе:
 - а) температура окружающего воздуха, °С от минус 40 до 40;
 - б) повышенная относительная влажность воздуха при температуре 25 °С, %..... 98

Примечание — Допускается проведение поверки, в реально существующих условиях, кроме особо оговоренных в данной методике поверки, если они не выходят за пределы рабочих условий, установленных в руководствах по эксплуатации средств измерений, применяемых при поверке.

7 Внешний осмотр средства измерений

7.1 При проведении внешнего осмотра проверить отсутствие механических повреждений и ослабления элементов, четкость фиксации их положения, чёткость обозначений, чистоту и исправность разъёмов и гнезд.

7.2 Результаты поверки считать положительными, если отсутствуют механические повреждения и ослабления элементов, фиксация их положения чёткая, разъёмы и гнезда чистые и исправные.

8 Подготовка к поверке и опробование средства измерений

8.1 Подготовка к поверке

8.1.1 Поверитель должен изучить техническую и эксплуатационную документацию изготовителя и руководства по эксплуатации применяемых средств поверки.

8.1.2 Перед проведением операций поверки необходимо:

- проверить комплектность КИГМ согласно эксплуатационной документации;
- проверить комплектность рекомендованных (или аналогичных им) средств поверки;
- заземлить (если это необходимо) рабочие эталоны, средства измерений и включить питание заблаговременно перед очередной операцией поверки (в соответствии со временем установления рабочего режима, указанным в РЭ).

8.2 Опробование

8.2.1 Включить источник бесперебойного питания согласно руководству по эксплуатации и проверить, чтобы зелёный индикатор включения светился постоянно.

8.2.2 Включить составные части КИГМ согласно их руководствам по эксплуатации.

8.2.3 Убедиться в наличии штатной индикации приема навигационного сигнала с НКА навигационными приемно-измерительными модулями.

8.2.4 Запустить СПО навигационных приёмников КИГМ, согласно руководству оператора ИБПА.01439-02 34 01.

8.2.5 Удостовериться в накоплении данных измерений.

8.2.6 Убедиться в наличии индикации работы и передачи сигнала стандарта частоты и времени и средства защиты информации на передних панелях изделий согласно их руководствам по эксплуатации.

8.2.7 Результаты поверки считать положительными, если выполняются пп. 8.2.3, 8.2.5, 8.2.6.

9 Проверка программного обеспечения средства измерений

9.1 Определить идентификационные данные ПО КИГМ в соответствии с руководством по эксплуатации.

9.2 Идентификационные данные ПО представлены в таблице 3.

Таблица 3 — Идентификационные данные ПО КИГМ

Идентификационные данные (признаки)	Значение
Идентификационное наименование	ИБПА.01439-02
Наименование программы и исполняемого файла	Комплекс программ передачи данных и управления
Номер версии (идентификационный номер), не ниже	1.0

9.3 Результаты поверки КИГМ считать положительными, если идентификационные данные ПО соответствуют данным, указанным в таблице 3.

10 Определение метрологических характеристик средства измерений

10.1 Определение среднего квадратического отклонения случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе дальномерного кода

10.1.1 Провести измерения приемно-измерительными устройствами из состава КИГМ на интервале времени длительностью 1 сут, получив файлы измерений в формате RINEX.

10.1.2 Выбрать измерения псевдодальности по фазе дальномерного кода и несущей частоты для СНС ГЛОНАСС в диапазоне L1OF с литерой 0 для углов места не менее 20 градусов.

10.1.3 Рассчитать значение комбинации:

$$MP_{C1Ci} = R_{C1i} - \Phi_{L1i} - 2 \cdot I_{L1i}, \quad (1)$$

где i — номер эпохи;

R_{C1i} — измерение псевдодальности по фазе дальномерного кода;

Φ_{L1i} — измерение псевдодальности по фазе несущей частоты;

$I_{L1i} = (\Phi_{L1i} - \Phi_{L2i}) \cdot \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$ — ионосферная задержка, оцененная по измерениям фазы несущей частоты в диапазонах $L1$ (Φ_1) и $L2$ (Φ_2) на частотах f_1 и f_2 соответственно.

10.1.4 Рассчитать СКО случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе дальномерного кода по формуле:

$$\sigma_{RIC} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N \left(MP_{C1Ci} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MP_{C1Ci} \right)^2}, \quad (2)$$

где j — номер эпохи;

N — число измерений.

10.1.5 Выполнить пп. 10.1.3-10.1.4 для каждого принимаемого типа сигнала (ГНСС, номер НКА, частотный диапазон, селективность) для каждого файла RINEX.

10.1.6 Результаты поверки п. 10.1 считать положительными, если максимальное значение из всех рассчитанных СКО случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальностей по фазе дальномерного кода не более 0,3 м, по фазе дальномерного кода не более 0,001 м.

10.2 Определение среднего квадратического отклонения случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе несущей частоты

10.2.1 Провести измерения приемно-измерительными устройствами из состава КИГМ на интервале времени длительностью 1 сут, получив файлы измерений в формате RINEX.

10.2.2 Выбрать измерения псевдодальности по фазе несущей частоты для СНС ГЛОНАСС в диапазонах L1OF и L2OF с литерой 0.

10.2.3 Рассчитать разности измерений псевдодальностей по фазе несущей частоты открытых сигналов между диапазонами L1 и L2 для углов места не менее 20 градусов:

$$\Phi_{L1-L2i} = \Phi_{L1i} - \Phi_{L2i}, \quad (3)$$

10.2.4 Рассчитать СКО случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе несущей частоты по формуле:

$$\sigma_{\Phi_{L1}} = \sqrt{\frac{1}{8 \cdot (N-1)} \cdot \sum_{j=1}^N \left(\Phi''_{L1-L2}(t)_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi''_{L1-L2}(t)_i \right)^2}, \quad (4)$$

где $\Phi''_{L1}(t)$ — вторая производная измерений псевдодальности по фазе несущей частоты от времени, рассчитанная на i -ю эпоху.

10.2.5 Выполнить пп. 10.2.1-10.2.4 для каждого принимаемого типа сигнала (ГНСС, номер НКА, селективность доступа) для каждого файла RINEX.

10.2.6 Результаты поверки по п. 10.2 считать положительными, если максимальное значение из всех рассчитанных СКО случайной составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальностей по фазе несущей частоты не более 0,001 м.

10.3 Определение изменения систематической составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе дальномерного кода до навигационного космического аппарата системы ГЛОНАСС на интервале времени наблюдения 8 сут

10.3.1 Для каждого навигационного приемника из состава КИГМ выполнить измерения в течение 8 суток и расчёты согласно Приложению А, используя в качестве опорной НАП комплект навигационной аппаратуры из состава рабочего эталона координат местоположения 1 разряда, а в качестве его опорных сигналов — сигналы от стандарта частоты и времени из состава эталона единиц времени, частоты и шкалы времени.

10.3.2 Рассчитать средние суточные значения систематической погрешности измерения псевдодальности до каждого НКА по каждому типу сигналов для проверяемой аппаратуры относительно опорной НАП, используя мгновенные значения, полученные по результатам выполнения п. А.13.

10.3.3 Определить пределы изменения (разница между максимальным и минимальным значением) систематической погрешности измерения псевдодальности до каждого НКА по каждому типу сигналов на интервале наблюдения 8 сут.

10.3.4 Результаты поверки по п. 10.3 считать положительными, если для каждого навигационного приёмника из состава КИГМ для каждого НКА по каждому типу сигналов изменение систематической составляющей инструментальной погрешности измерений псевдодальности по фазе дальномерного кода до навигационного космического аппарата системы ГЛОНАСС на интервале времени наблюдения 8 сут находится в пределах $\pm 0,2$ м.

10.4 Определение относительной погрешности по частоте выходного сигнала 10 МГц на интервале 1 год

10.4.1 Для навигационного приемника из состава КГМ выполнить измерения согласно Приложению А, используя в качестве опорной НАП комплект навигационной аппаратуры из состава рабочего эталона координат местоположения 1 разряда, а в качестве его опорных сигналов — сигналы от стандарта частоты и времени из состава эталона единиц времени, частоты и шкалы времени, получив значения смещения шкалы времени блока приемных устройств относительно шкалы времени опорной НАП (относительно шкалы времени эталона частоты и времени) в п. А.3.

10.4.2 Выбрать значения смещения шкалы времени блока приемных устройств относительно шкалы времени эталона частоты и времени на интервале времени наблюдения 1 сут.

10.4.3 Аппроксимировать выбранные значения полиномом первой степени $(a \cdot t + b)$, где t — эпоха измерений, с.

10.4.4 Относительная погрешность частоты выходного сигнала 10 МГц опорного стандарта частоты блока приёмных устройств δf будет соответствовать коэффициенту a .

10.4.5 Убедиться, что относительная погрешность частоты выходного сигнала δf находится в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-12}$.

Примечание — Выполнение п. 10.4.5 подтверждает, что относительная погрешность по частоте выходного сигнала 10 МГц на интервале 1 год находится в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-13}$.

10.4.6 В случае необходимости, если относительная погрешность частоты выходного сигнала находится вне пределов $\pm 5 \cdot 10^{-13}$, внести соответствующую корректировку действительного значения частоты в стандарт частоты и времени из состава КИГМ согласно РЭ.

10.4.7 Результаты поверки по п. 10.4 считать положительными, если относительная погрешность по частоте выходного сигнала 10 МГц на интервале 1 год находится в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-13}$.

10.5 Определение среднего квадратического относительного двухвыборочного отклонения частоты выходного сигнала 10 МГц на интервале времени измерений 1 сут

10.5.1 Для навигационного приемника из состава КИГМ выполнить измерения согласно Приложению А, используя в качестве опорной НАП комплект навигационной аппаратуры из состава рабочего эталона координат местоположения 1 разряда, а в качестве его опорных сигналов — сигналы от стандарта частоты и времени

из состава эталона единиц времени, частоты и шкалы времени, получив значения смещения шкалы времени блока приемных устройств относительно шкалы времени опорной НАП (относительно шкалы времени эталона частоты и времени) в п. А.3.

10.5.2 Выбрать значения смещения шкалы времени блока приемных устройств относительно шкалы времени эталона частоты и времени на интервале времени наблюдения 1 сут.

10.5.3 Выделить участки измерений по 1 ч и аппроксимировать каждый из них полиномом первой степени ($a \cdot t + b$).

10.5.4 Рассчитать относительную вариацию частоты выходного сигнала 10 МГц стандарта частоты и времени КИГМ по выражению:

$$\delta_{oi} = a_i - a_{i+1}. \quad (1)$$

10.5.5 Рассчитать СКДО частоты выходного сигнала 10 МГц:

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\frac{\sum \delta_{oi}^2}{2 \cdot (n-1)}}, \quad (2)$$

где n — число измерений.

10.5.6 Повторить операции пп. 10.5.2-10.5.5 пять раз и выбрать среднее значение СКДО частоты выходного сигнала 10 МГц.

10.5.7 Результаты поверки п. 10.5 считать положительными, если среднее квадратического относительное двухвыборочное отклонение частоты выходного сигнала 10 МГц на интервале времени измерений 1 сут не более $7 \cdot 10^{-15}$.

11 Подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям

11.1 При одновременном выполнении пп. 10.1.6, 10.2.6, 10.3.1, 10.4.1, 10.5.1 в результате поверки КИГМ:

- метрологические характеристики КИГМ соответствуют установленным при утверждении типа средства измерений;
- результаты поверки считаются положительными.

11.2 При получении отрицательных результатов в одном из пп. 10.1.6, 10.2.6, 10.3.1, 10.4.1, 10.5.1 результаты поверки считаются отрицательными, а КИГМ бракуется.

12 Оформление результатов поверки

12.1 Результаты поверки КИГМ подтверждаются сведениями о результатах поверки средств измерений, включенными в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

12.2 При положительных результатах поверки по заявлению владельца КИГМ или лица, предоставившего его на поверку, на средство измерений выдается свидетельство о поверке КИГМ.

12.3 Результаты поверки по требованию заказчика записываются на оборотной стороне свидетельства о поверке или оформляются отдельным приложением к свидетельству.

12.4 В случае отрицательных результатов поверки поверяемый КИГМ к дальнейшему применению не допускается, на него выдается извещение о непригодности к дальнейшей эксплуатации с указанием причин забракования.

Заместитель начальника НИО-8
по научной работе ФГУП «ВНИИФТРИ»

 В.Н. Федотов

Начальник отдела
ФГУП «ВНИИФТРИ»

 Д.С. Печерица

Начальник лаборатории
ФГУП «ВНИИФТРИ»

 С.Ю. Бурцев

Перечень сокращений

GNSS	— global navigation satellite system, глобальная навигационная спутниковая система
GPS	— global positioning system (United States of America)
IERS	— international earth rotation and reference systems service, международная служба вращения Земли
IGS	— international GNSS service, международное агентство ГНСС
RINEX	— receiver independent exchange format, формат обмена данными, независимый от получателя
UTC(SU)	— universal time coordinated (Soviet Union), национальная шкала координированного времени Российской Федерации
WGS	— world geodetic system, всемирная система геодезических параметров Земли
ГЛОНАСС	— глобальная навигационная спутниковая система (Российская Федерация)
ГНСС	— глобальная навигационная спутниковая система
ГСИ	— государственная система измерений
ИБП	— источник бесперебойного питания
КИГМ	— комплекс измерительный геодезического мониторинга
КИА	— контрольно-измерительная аппаратура
МП	— методика поверки
НАП	— навигационная аппаратура потребителей
НИО	— научное исследовательское отделение
НКА	— навигационный космический аппарат
ПО	— программное обеспечение
РЭ	— руководство по эксплуатации
СКО	— среднее квадратическое отклонение
СКПХ	— система контроля и подтверждения характеристик радионавигационного поля системы ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей
СПО	— специальное программное обеспечение
ФО	— формуляр
ШВ	— шкала времени

А.2 Рассчитать координаты и положение шкалы времени в пунктах размещения поверяемой аппаратуры и опорной НАП на момент времени $t_i \in [t_1, t_N]$.

А.2.1 Рассчитать безионосферные комбинации псевдодальностей до НКА ГНСС $R_{ionfree}(t_i)$ по формуле (A1) и фазу несущей сигнала $\Phi_{ionfree}(t_i)$ по формуле (A2) на момент t_i :

$$R_{ionfree}(t_i) = \frac{f_{L1}^2 R_{L1}(t_i) - f_{L2}^2 R_{L2}(t_i)}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}, \quad (A1)$$

$$\Phi_{ionfree}(t_i) = \frac{f_{L1}^2 \Phi_{L1}(t_i) \lambda_{L1} - f_{L2}^2 \Phi_{L2}(t_i) \lambda_{L1}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}, \quad (A2)$$

где f_{L1}, f_{L2} — частоты навигационного сигнала в поддиапазоне L1 и L2 соответственно, Гц;

$R_{L1}(t_i), R_{L2}(t_i)$ — псевдодальности до НКА на момент t_i в поддиапазоне L1 и L2 соответственно, м;

$\Phi_{L1}(t_i), \Phi_{L2}(t_i)$ — фаза несущей сигнала на момент t_i в поддиапазоне L1 и L2 соответственно, м;

$\lambda_{L1}, \lambda_{L2}$ — длины волн сигналов в поддиапазоне L1 и L2 соответственно, м.

А.2.2 Рассчитать момент времени излучения навигационного сигнала с антенны k -го НКА по формуле:

$$t_b = t_i - \frac{R_{ionfree}}{c}, \quad (A3)$$

где t_b — момент времени излучения навигационного сигнала с НКА, с;

t_i — момент времени приема навигационного сигнала приемником, с;

c — скорость света, 299792458 м/с.

А.2.3 Определить координаты $(x^k(t_b), y^k(t_b), z^k(t_b))$ k -го НКА по данным файла эфемеридной информации в формате *.sp3, формируемой СКПХ.

А.2.4 Рассчитать геометрическую дальность k -го до НКА $\rho_n^k(t_i)$ по формуле:

$$\rho_n^k(t_i) = \sqrt{(x^k(t_b) - x_n)^2 + (y^k(t_b) - y_n)^2 + (z^k(t_b) - z_n)^2}, \quad (A4)$$

где $(x^k(t_b), y^k(t_b), z^k(t_b))$ — координаты k -го НКА в момент времени излучения навигационного сигнала t_b , рассчитываемые из файла эфемеридной информации в формате *.sp3, м;

(x_n, y_n, z_n) — координаты пункта размещения приемника из заголовка файла наблюдений в формате RINEX, м.

А.2.5 Определить смещение бортовой шкалы времени k -го НКА $\Delta T^k(t_b)$ относительно системной шкалы на момент времени излучения сигнала по данным файла с частотно-временными поправками в формате *.clk, формируемые системой СКПХ.

А.2.6 Рассчитать гравитационную поправку по формуле:

$$Grav = \frac{2GM}{c^2} \times \ln \left(\frac{\|r^k(t_b)\| + \|r_n\| + \rho_n^k(t_i)}{\|r^k(t_b)\| + \|r_n\| - \rho_n^k(t_i)} \right), \quad (A5)$$

где GM — константа гравитационного поля Земли, $398600,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$;

$\|r^k(t_b)\| = \sqrt{(x^k(t_b))^2 + (y^k(t_b))^2 + (z^k(t_b))^2}$ — расстояние между k -ым НКА и центром Земли на момент излучения навигационного сигнала (t_b) , м;

$\|r_n\| = \sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2}$ — расстояние между приемником и центром Земли, м.

А.2.7 Рассчитать релятивистскую поправку по формуле:

$$Rel = -\frac{2\mathbf{r}^k(t_b)\mathbf{V}^k(t_b)}{c}, \quad (A6)$$

где $\mathbf{r}^k(t_b) = [x^k(t_b), y^k(t_b), z^k(t_b)]$ — вектор координат k -го НКА в момент излучения сигнала t_b , рассчитанный по данным файла *.sp3, м;

$\mathbf{V}^k(t_b) = [\dot{x}^k(t_b), \dot{y}^k(t_b), \dot{z}^k(t_b)]$ — вектор скорости k -го НКА в момент излучения сигнала t_b , рассчитанный по данным файла *.sp3, м/с.

А.2.8 Рассчитать ориентацию k -го НКА относительно Солнца

- вектор между положением Солнца $(x_{Sun}, y_{Sun}, z_{Sun})$ и центром масс k -го НКА

$$\rho_{Sun}^k(t_b) = \sqrt{(x^k(t_b) - x_{Sun})^2 + (y^k(t_b) - y_{Sun})^2 + (z^k(t_b) - z_{Sun})^2};$$

- ось Z k -го НКА относительно центра Земли

$$\mathbf{Z}^k = \frac{-\mathbf{r}^k(t_b)}{\|r^k(t_b)\|};$$

- направление k -го НКА относительно Солнца

$$\mathbf{D}^k = \frac{\mathbf{r}_{Sun}^k(t_b)}{\|\rho_{Sun}^k(t_b)\|};$$

- ось Y k -го НКА вдоль оси солнечных панелей

$$\mathbf{Y}^k = \frac{\mathbf{Y}^{k'}}{\|\mathbf{Y}^{k'}\|},$$

где $\mathbf{Y}^{k'} = [\mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_2^k, \mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_3^k, \mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_1^k]$,

$$\|Y^{k'}\| = \sqrt{(\mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_2^k)^2 + (\mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_3^k)^2 + (\mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_1^k)^2};$$

- ось X k -го НКА, указывающая на полуплоскость между Солнцем и панелями НКА

$$\mathbf{X}^k = \frac{\mathbf{X}^{k'}}{\|\mathbf{X}^{k'}\|},$$

где $\mathbf{X}^{k'} = [\mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_2^k, \mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_3^k, \mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_1^k]$,

$$\|\mathbf{X}^{k'}\| = \sqrt{(\mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_2^k)^2 + (\mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_3^k)^2 + (\mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_1^k)^2}.$$

А.2.9 Рассчитать поправки на wind-up эффект по формуле:

$$d_{wind-up}(t_b) = 2N \cdot \pi + \text{sign}(\mathbf{a}_n^k \cdot (\mathbf{d}^k \cdot \mathbf{d}_n)) \arccos\left(\frac{\mathbf{d}^k \cdot \mathbf{d}_n}{\|\mathbf{d}^k\| \cdot \|\mathbf{d}_n\|}\right), \quad (\text{A7})$$

где N — целое число циклов;

$\mathbf{a}_n^k = \frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{r}^k(t_b)}{\rho_n^k(t_i)}$ — вектор направления от k -го НКА к приемнику;

$\mathbf{r}_n = [x_n, y_n, z_n]$ — вектор координат приемника в момент приема сигнала t_i , приведенные в заголовке файла наблюдений;

$\mathbf{d}^k = \mathbf{X}^k - \mathbf{a}_n^k \cdot (\mathbf{a}_n^k \times \mathbf{X}^k) + \mathbf{a}_n^k \times \mathbf{Y}^k$ — вектор ориентации k -го НКА, вычисленный по координатам $(\mathbf{X}^k, \mathbf{Y}^k, \mathbf{Z}^k)$;

$\mathbf{X}^k, \mathbf{Y}^k$ — ортогональные векторы, указывающие на восток и север соответственно;

$\mathbf{d}_n = \mathbf{X}_n - \mathbf{a}_n^k \cdot (\mathbf{a}_n^k \times \mathbf{X}_n) + \mathbf{a}_n^k \times \mathbf{Y}_n$ — вектор ориентации приемника, вычисленный по координатам $(\mathbf{X}_n, \mathbf{Y}_n, \mathbf{Z}_n)$.

А.2.10 Рассчитать наклонную тропосферную поправку на момент времени t_i .

А.2.11 Для расчета использовать эмпирическую модель GPT2, которая позволяет определять давление, температуру, перепад температур, давление водяного пара, коэффициенты гидростатической и влажной функций отображения, а также неравномерность геоида в пункте размещения приемника.

А.2.12 Входными параметрами GPT2 являются координаты антенны и день года для моделирования перечисленных параметров, опираясь на глобальную карту средних значений параметров тропосферы с шагом в 5° (файл gpt2_5.grd).

А.2.13 Модель и используемые данные рекомендованы к использованию соглашением Международной службы вращения Земли IERS 2010 года, Petit G., Luzum B. IERS Conventions (2010): tech. rep. URL: https://webtai.bipm.org/iers/convupdt/convupdt_c9.html;

$$P, Temp, dTemp, e_p, a_h, a_w, u = GPT2(MJD, B, L, H), \quad (A8)$$

где P — давление, Па;

$Temp$ — температура, °С;

$dTemp$ — изменение температуры, °С/км;

e_p — давление водяного пара, Па;

a_h — коэффициент гидростатической функции отображения;

a_w — коэффициент влажной функции отображения;

u — неравномерность геоида в пункте размещения приемника, м;

MJD — дата проведения измерений в формате модифицированной Юлианской даты;

B, L — геодезическая широта и долгота соответственно, рад;

H — геодезическая высота, м.

А.2.14 Коэффициенты a_h , a_w являются входными данными для вычисления функций отображения (модель VMF1):

$$m_h(e), m_w(e) = VMF1(a_h, a_w, MJD, B, L, H, e), \quad (A9)$$

где $m_h(e)$ — гидростатическая отображающая функция;

$m_w(e)$ — влажная отображающая функция;

e — угол возвышения НКА, рад.

А.2.15 Оценить гидростатическую (A10) и влажную (A11) зенитные тропосферные задержки:

$$d_{hz} = 0,0022768 \times \frac{P}{1 - 0,00268 \cdot \cos(2B) - 0,00000028H}, \quad (A10)$$

$$d_{wzm} = 0,0022768 \times \left(\frac{1255}{Temp + 273.15} + 0.05 \right) \times \frac{e_p}{1 - 0,00268 \cdot \cos(2B) - 0,00000028H}, \quad (A11)$$

где d_{hz} — зенитная гидростатическая тропосферная поправка, м;

d_{wzm} — моделируемая составляющая зенитной влажной тропосферной поправки, м.

А.2.16 Значение тропосферной поправки $Trop'(t_i)$ рассчитать по формуле:

$$Trop'(t_i) = d_{hz} \cdot m_h(e) + d_{wzm} \cdot m_w(e) \quad (A12)$$

А.2.17 Решение линейной модели наблюдения $Y = GX$ с помощью фильтра Калмана для K видимых НКА в пункте размещения приемника на момент времени t_i :

- вектор невязок

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} R_{ionfree}^1 - \rho_n^1 + c\Delta T^1 - Trop_n^1 - Grav^1 - Rel^1 \\ \Phi_{ionfree}^1 - \rho_n^1 + c\Delta T^1 - Trop_n^1 - Grav^1 - Rel^1 - d_{wind-up}^1 - (\lambda\omega)^1 \\ \vdots \\ R_{ionfree}^K - \rho_n^K + c\Delta T^K - Trop_n^K - Grav^K - Rel^K \\ \Phi_{ionfree}^K - \rho_n^K + c\Delta T^K - Trop_n^K - Grav^K - Rel^K - d_{wind-up}^K - (\lambda\omega)^K \end{bmatrix},$$

где $(\lambda\omega)^K$ — фазовая неоднозначность для K -ого НКА,

- матрица частных производных:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{x_n - x^1}{\rho_n^1} & \frac{y_n - y^1}{\rho_n^1} & \frac{z_n - z^1}{\rho_n^1} & 1 & m_w^1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_n - x^1}{\rho_n^1} & \frac{y_n - y^1}{\rho_n^1} & \frac{z_n - z^1}{\rho_n^1} & 1 & m_w^1 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_n - x^K}{\rho_n^K} & \frac{y_n - y^K}{\rho_n^K} & \frac{z_n - z^K}{\rho_n^K} & 1 & m_w^K & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_n - x^K}{\rho_n^K} & \frac{y_n - y^K}{\rho_n^K} & \frac{z_n - z^K}{\rho_n^K} & 1 & m_w^K & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix};$$

- вектор оцениваемых параметров:

$$\mathbf{X} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad c \cdot \Delta T_n \quad d'_{wz} \quad b^1 \quad \dots \quad b^K]^T,$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — смещение координат антенны приемника относительно приведенных в заголовке файла наблюдений на момент времени t_i , м;

$c \cdot \Delta T_n$ — смещение шкалы времени приемника относительно системной шкалы на момент времени t_i , м;

d'_{wz} — оцениваемая тропосферная влажная зенитная задержка на момент времени t_i , м;

b^K — оценка дробной фазовой неоднозначности для K -ого НКА на момент времени t_i , м.

А.3 Рассчитать смещение шкалы поверяемой НАП относительно опорной НАП по выражению:

$$\Delta T_{исп-оп} = \Delta T_{оп} - \Delta T_{исп} \quad (A13)$$

А.4 Рассчитать полную тропосферную поправку навигационных сигналов на каждый момент времени на интервале времени проведения наблюдений $[t_1, t_N]$ для всех НКА в пункте размещения приемника.

А.5 Оценить полную влажную зенитную тропосферную поправку по выражению:

$$d_{wz} = d_{wzm} + d'_{wz} \quad (A14)$$

где d_{wz} — зенитная влажная тропосферная поправка, м;

d'_{wz} — оцененная составляющая зенитной влажной тропосферной поправки из п. А.2.15, м.

А.6 Значение полной тропосферной поправки рассчитать по формуле (А12).

А.7 Рассчитать ионосферную поправку навигационных сигналов на каждый момент времени на интервале времени проведения наблюдений $[t_1, t_N]$ для всех НКА в пункте размещения НАП

А.8 Рассчитать функцию отображения $m_{ion}(e)$ для ионосферной поправки по выражению:

$$m_{ion}(e) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_n^2 \cos^2(e)}{(r_n + h)^2}}}, \quad (A15)$$

где h — высота ионосферного слоя, указываемая в файле формата IONEX, м.

А.9 Определить значения вертикального общего электронного содержания ионосферы $VTEC$ на основе публикуемых Международной службой ГНСС IGS ионосферных карт в международном формате IONEX (IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1), <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/ionosphere/>.

А.10 Расчёт выполнять по математической модели по выражению:

$$Ion(t_i) = \frac{40.3 \cdot VTEC}{(f^{k,m})^2} \cdot m_{ion}(e), \quad (A16)$$

где $VTEC$ — вертикальная полная электронная концентрация;

$f^{k,m}$ — частота сигнала k -ого НКА, Гц.

А.11 Выполнить пп. А.2-А.10 по данным, полученным с поверяемой аппаратуры.

А.12 Рассчитать систематическую погрешность псевдодалности в поддиапазонах L1 и L2 поверяемой аппаратуры и опорной НАП по псевдодалномерным кодовым измерениям с помощью метода синхронных наблюдений в пунктах размещения НАП на каждый момент $t_i \in [t_0, t_m]$:

$$B^{k,m}(t_i)_n + B^{k,m}(t_i) = R^{k,m}(t_i)_n - \rho^{k,m}(t_i)_n + c \cdot (\Delta T(t_i)_n - \Delta T^k(t_i)) + Trop^k(t_i)_n + Ion^{k,m}(t_i)_n + Grav^k(t_i)_n + Rel^k(t_i), \quad (A17)$$

$$B^{k,m}(t_i)_{зм} + B^{k,m}(t_i) = R^{k,m}(t_i)_{зм} - \rho^{k,m}(t_i)_{зм} + c \cdot (\Delta T(t_i)_{зм} - \Delta T^k(t_i)) + Trop^k(t_i)_{зм} + Ion^{k,m}(t_i)_{зм} + Grav^k(t_i)_{зм} + Rel^k(t_i), \quad (A18)$$

где $B^{k,m}(t_i)_n$, $B^{k,m}(t_i)_{\text{оп}}$ — поправка задержки навигационного сигнала поверяемой аппаратуры и опорной НАП для m -го типа сигнала на момент времени t_i , соответственно, м;

$B^{k,m}(t_i)$ — поправка задержки навигационного сигнала для k -ом НКА m -го типа сигнала на момент времени t_i , м;

$R^{k,m}(t_i)_n$, $R^{k,m}(t_i)_{\text{оп}}$ — измеренная псевдодальность до k -ого НКА m -го типа сигнала для поверяемой аппаратуры и опорной НАП на момент времени t_i , м;

$\rho^{k,m}(t_i)_n$, $\rho^{k,m}(t_i)_{\text{оп}}$ — геометрическая дальность до k -ого НКА m -го типа на момент времени t_i поверяемой аппаратуры и опорной НАП, рассчитанная в п. А.2.4, м;

c — скорость света, м/с;

$\Delta T(t_i)_n$, $\Delta T(t_i)_{\text{оп}}$ — шкала времени поверяемой аппаратуры и опорной НАП соответственно, рассчитанная в п. А.2.17, с;

$\Delta T^k(t_i)$ — бортовая шкала времени НКА поверяемой аппаратуры и опорной НАП, рассчитанная в п. А.2.5, с;

$Trop^k(t_i)_n$, $Trop^k(t_i)_{\text{оп}}$ — тропосферная поправка для поверяемой аппаратуры и опорной НАП, рассчитанная в п. А.6, м;

$Ion^{k,m}(t_i)_n$, $Ion^{k,m}(t_i)_{\text{оп}}$ — ионосферная поправка для поверяемой аппаратуры и опорной НАП, рассчитанная в п. А.7, м;

$Grav^k(t_i)_n$, $Grav^k(t_i)_{\text{оп}}$ — гравитационная поправка для поверяемой аппаратуры и опорной НАП, рассчитанная в п. А.2.6, м;

$Rel^k(t_i)$ — релятивистская поправка для k -ого НКА, рассчитанная в п. А.2.7, м.

А.13 Рассчитать значение систематической погрешности псевдодальности для поверяемой аппаратуры $B^{k,m}_n$ относительно опорной НАП по результатам разности уравнений (А17) и (А18) на интервале времени наблюдений.

А.14 Рассчитать скорректированную псевдодальность до k -го НКА для поверяемой аппаратуры $R^{k,m}(t_i)_n$ с учетом рассчитанной поправки $B^{k,m}(t_i)_n$ из п. А.13 по выражению:

$$R^{k,m}(t_i)_n = \rho^{k,m}(t_i)_n + c \cdot (\Delta T(t_i)_n - \Delta T^k(t_i)) + Trop^k(t_i)_n + Ion^{k,m}(t_i)_n + Grav^k(t_i)_n + Rel^k(t_i)_n + B^{k,m}_n + B^{k,m}, \quad (\text{А19})$$