



ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА

ГЛОНАСС

Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС)

ПРИЛОЖЕНИЕ В
СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Редакция 2.2
(6.2019)

Королёв
2019 г.

[Чистая страница.]

СОДЕРЖАНИЕ

В.1	Комментарии по формулам расчета Global Average и Worst Case Single Point Average SIS URE	3
В.2	О переменном шаге при расчете доступности PDOP и погрешностей местоопределения	5
В.3	Справочная информация об особенностях процедуры оценки эксплуатационных характеристик ГЛОНАСС по данным сети станций IGS	6
В.4	О термине «целостность» и его отличии от термина «вероятности основного отказа навигационного обслуживания»	9
В.5	Оценка зависимости SIS URE от возраста ЭВИ и стабильности (вариации Аллана) стандартов частоты ГЛОНАСС ..	10
В.6	Примеры бюджета ошибок с учетом погрешностей, вносимых средой распространения и НАП	15
В.7	Оценка распределения PDOP	17

В.1 Комментарии по формулам расчета Global Average и Worst Case Single Point Average SIS URE

Погрешность определения псевдодальности от НКА до потребителя за счет космического сегмента SIS URE включает ошибки частотно–временных поправок (ЧВП) и ошибки эфемерид.

При оценке Global Average SIS URE используется эмпирическая формула [Kamran Ghassemi and Steven C. Fisher: Performance projections of GPS IIF]:

$$SISURE = \sqrt{(0.98 \cdot \Delta R - c \cdot \Delta T)^2 + \sin^2 \alpha \cdot (\Delta N^2 + \Delta B^2)},$$

где:

ΔR , ΔN , ΔB – погрешности эфемерид НКА, соответственно, по радиусу, вдоль орбиты и боковом направлении;

ΔT – погрешность ЧВП НКА;

c – скорость света в вакууме;

α – угол между радиус–вектором КА и вектором дальности от КА до потребителя.

При оценках обычно используется конкретное значение величины $\sin^2 \alpha$, равное 0.0225, что соответствует углу $\alpha \sim 9^\circ$. Расчеты, проведенные для оценки среднего значения величины α , для ГЛОНАСС и GPS при углах места 5 и 15 градусов, показывают, что α лежит в интервале от 10 до 12 градусов. Результаты расчетов приведены в таблице В.1.1.

Таблица В.1.1 – Значения угла α и его функций для ГЛОНАСС и GPS при углах места 5 и 15 градусов, осредненные глобально и по территории Российской Федерации.

Система	Регион	Угол места, градусов	Осреднение				
			Sin α	Cos α	α	Sin $^2 \alpha$	Cos $^2 \alpha$
ГЛОНАСС	Глобально	5	0.1975	0.9803	11.3900	0.0390	0.9610
		15	0.1840	0.9829	10.6033	0.0339	0.9661
	Россия	5	0.1932	0.9812	11.1398	0.0373	0.9627
		15	0.1796	0.9837	10.3447	0.0322	0.9678
GPS	Глобально	5	0.1900	0.9818	10.9517	0.0361	0.9639
		15	0.1763	0.9843	10.1559	0.0311	0.9689
	Россия	5	0.1930	0.9812	11.1258	0.0372	0.9628
		15	0.1791	0.9838	10.3155	0.0321	0.9679

Для оценки Worst Case Single Point Average SIS URE используется методика, предложенная Стэнфордским университетом для оценки отказов навигационных спутниковых систем (Liang, 2012). Уточненная формула для расчета Worst Case Single Point Average SIS URE имеет вид:

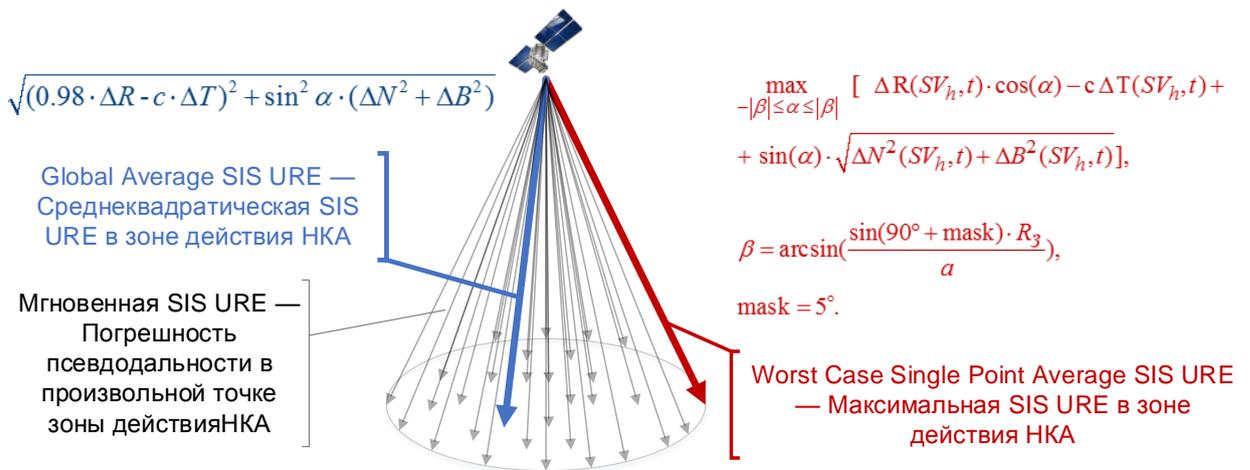
$$URE_{WorstCase}(SV_h, t) = \max_{-|\beta| \leq \alpha \leq |\beta|} [\Delta R(SV_h, t) \cdot \cos(\alpha) - c \Delta T(SV_h, t) + \sin(\alpha) \cdot \sqrt{\Delta N^2(SV_h, t) + \Delta B^2(SV_h, t)}],$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\sin(90^\circ + \text{mask}) \cdot 6731}{25508.2}\right),$$

$$\text{mask} = 5^\circ.$$

Рисунок В.1.1 иллюстрирует различные варианты определения погрешности псевдодальности.

SIS URE (ЭПД) — Погрешность псевдодальности за счет космического сегмента
URE — Погрешность псевдодальности с учетом погрешностей среды
UERE — Погрешность псевдодальности с учетом погрешностей среды и НАП



Основная характеристика точности SIS URE — 95% Global Average SIS URE на эргодическом интервале (при 1 закладке в день — 30 суток) для каждого пригодного SIS (каждого пригодного НКА).

Рисунок В.1.1 — Варианты определения погрешности псевдодальности

В.2.0 переменном шаге при расчете доступности PDOP и погрешностей местоопределения

В Стандарте расчет характеристик доступности навигационного поля, доступности сервиса, точности местоопределения и передачи времени UTC(SU) предполагает осреднение значений соответствующих характеристик по определенному сегменту поверхности (или глобально). Расчет может осуществляться с постоянным шагом по долготе и широте, но в таком случае при осреднении должна учитываться площадь поверхности, ограниченная узлами сетки, как показано ниже на примере доступности навигационного поля:

$$A_{PDOP_Global} = \frac{\sum_{i,j} A_{PDOP_Local}(\varphi_i, \lambda_j) \cdot S_{i,j}}{\sum_{i,j} S_{i,j}} = \frac{\sum_{i,j} A_{PDOP_Local}(\varphi_i, \lambda_j) \cdot (\sin(\varphi_i + \Delta\varphi) - \sin \varphi_i)}{\sum_{i,j} (\sin(\varphi_i + \Delta\varphi) - \sin \varphi_i)},$$

где:

- φ_i, λ_j — широта, долгота точки;
- $\Delta\varphi$ — шаг по широте;
- A_{local} — локальная доступность в точке;
- $S_{i,j}$ — элементарная площадь.

Более простым методом является расчет характеристик с постоянным шагом по времени и долготе и переменным шагом по широте, обеспечивающим равенство площадей, соответствующих точкам на поверхности Земли, что дает возможность непосредственного осреднения полученных значений:

$$A_{PDOP_Global} = \frac{\sum_{\varphi, \lambda} A_{PDOP_Local}(\varphi, \lambda)}{N_{Sites}}$$

В.3 Справочная информация об особенностях процедуры оценки эксплуатационных характеристик ГЛОНАСС по данным сети станций IGS

Оценка эксплуатационных характеристик может осуществляться по измерениям глобальной сети беззапросных измерительных станций, например, сети IGS. При этом необходимо учитывать ряд принципиальных особенностей, связанных с выбором шкалы привязки ЧВП и разнородностью типов НАП, используемой на измерительных станциях.

Согласно требованиям IGS, апостериорная ЭВИ привязывается к измерениям НАП P1–P2, выполняющей непосредственные измерения. Однако, наиболее существенно, что такой подход практически неприемлем к измерениям ГЛОНАСС из-за наличия существенных систематических погрешностей не только у различных типов НАП, но и у отдельных образцов одного типа НАП. Принципиально, что координатор центров анализа IGS не уточняет поправки часов НКА при расчете финальных решений. Это обусловлено существенными систематическими погрешностями кодовых измерений за счет частотного разделения сигналов (Рисунок В.3.1).

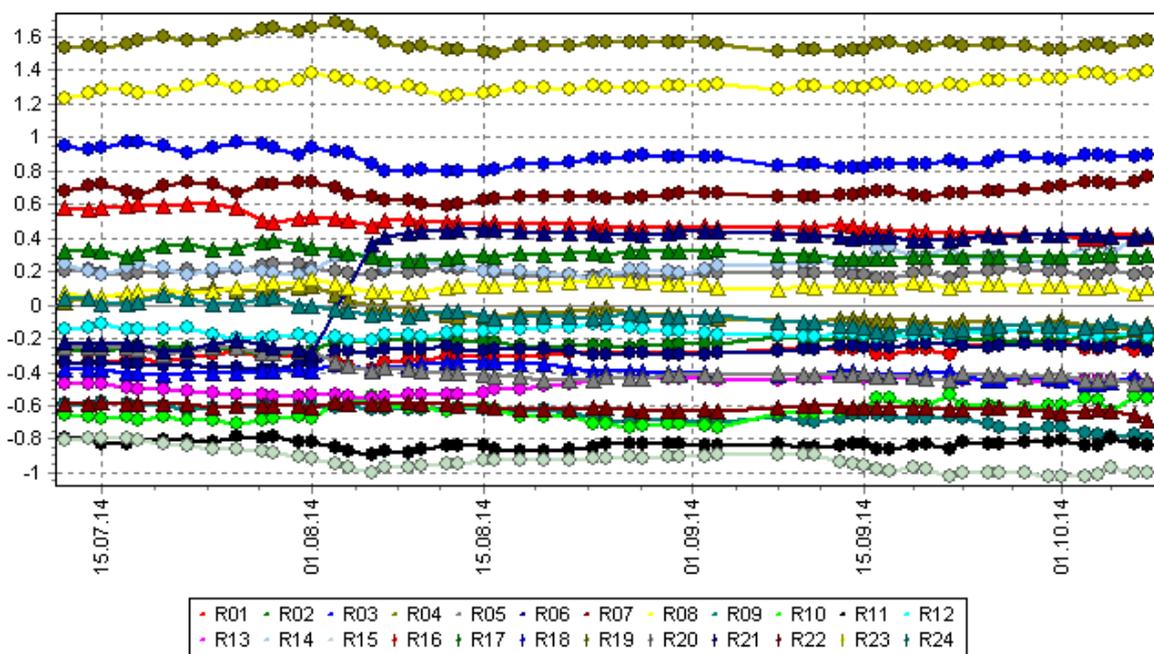


Рисунок В.3.1 — Систематические погрешности измерений по приемникам JAVAD, м

Эти систематические погрешности вызваны, в первую очередь, нелинейными характеристиками высокочастотных фильтров и в отдельных случаях достигают десятков наносекунд. Отсутствие фильтров с неизменной характеристикой в зависимости от частоты не позволяет выполнить абсолютную калибровку НАП. Поэтому обычно систематические погрешности уточняются для каждой НАП относительно некоторой абстрактной, усредненной по сети НАП.

Как правило, однотипная НАП имеет сходные задержки в каналах ГЛОНАСС. При этом уровень взаимного согласования зависит от производителя и типа НАП, т.е. от элементной базы и программного обеспечения. В большинстве случаев остаточные погрешности согласования измерений внутри однотипной НАП составляют не более 1 нс, что также является значимой величиной с учетом того, что шумовая погрешность апостериорных поправок часов НКА GPS и ГЛОНАСС составляет десятки пикосекунд. Анализ данных различных типов и образцов одного типа НАП позволяет сделать вывод, что незначительные систематические погрешности наблюдаются и в каналах GPS на уровне до 0.5 нс даже у НАП, выполняющей непосредственные измерения P1 и P2.

В отличие от IGS, где используется статический способ калибровки НАП в предположении идентичности всей НАП, выполняющей непосредственные измерения P1 и P2, в Стандарте рекомендуется использовать динамический метод калибровки измерений на интервале около 2 недель. Такой подход можно использовать как для измерений GPS, так и для измерений ГЛОНАСС. Важно, что за счет использования достаточно большого двухнедельного интервала времени уточнения систематики распределенной сети измерительных станций эти данные не оказывают влияния ни на оценку стабильности БСУ, ни на оценку изменения разности системных шкал ГЛОНАСС–GPS.

В связи с вышесказанным, непосредственное использование апостериорных и бортовых (штатных) поправок часов ГЛОНАСС в отличие от GPS дает некоторую усредненную оценку ЧВП, т.е. то, что видит средний потребитель, имеющий несколько разнотипных приемников. Однако непосредственное использование апостериорных и бортовых (штатных) поправок часов ГЛОНАСС не дает ответа на вопрос о погрешностях ЧВО ГЛОНАСС, а следовательно, не может быть использовано для оценки технических характеристик системы.

Очевидно, что средства подсистемы наземной космической инфраструктуры (ПНКИ), используемые для расчета штатных ЧВП, также имеют систематические погрешности измерений. В отсутствии доступа независимой системы мониторинга к физической шкале ГЛОНАСС для привязки апостериорных поправок часов ГЛОНАСС к штатным данным используются

остаточные взаимные погрешности штатных ЧВП и апостериорных поправок. Обработка этих данных производится на интервале 24 суток, т.е. 3 циклов повторения трассы НКА ГЛОНАСС. В идеале, такая привязка должна быть сделана 1 раз на длительном интервале времени. Однако анализ наблюдаемых разностей штатных и апостериорных поправок часов на длительном интервале показывает, что систематики средств ПНКИ изменяются не меньше, чем у большинства постоянно действующей НАП. Это может быть вызвано заменами или перенастройками оборудования, либо программного обеспечения, температурной зависимостью и пр. Поэтому рекомендуется регулярное согласование систематических погрешностей штатных и апостериорных данных на достаточно длительном интервале, кратном периоду повторяемости трассы. Уменьшение интервала согласования приводит к повышенному «шуму» систематик за счет ошибок прогноза ЧВП, увеличение интервала нежелательно из-за необходимости реагирования на флуктуации систематик частотно-временного обеспечения (ЧВО).

Особой спецификой является недостоверность признаков пригодности НКА ГЛОНАСС, формируемых отдельными типами НАП. Часть НАП ошибочно формирует навигационные форматы RINEX, например, некоторые НАП в режиме ALL-IN-VIEW выдают все НКА как пригодные, а некоторые типы НАП формируют время начала кадра со сдвигом на 3 ч и др. Из-за большого числа разнородной НАП, к тому же использующих различные конверторы «сырых» данных, в некоторых случаях корректное формирование признаков пригодности затруднительно, что приводит к погрешностям оценки.

Существенно изменить ситуацию возможно путем создания собственной глобальной сети распределенных станций, на каждой из которых будет установлено по несколько образцов однотипной НАП.

Альтернативным, более доступным для независимых служб мониторинга, вариантом на период отсутствия собственной сети может быть продвижение в IGS идеи формирования, наряду с RINEX-файлами, файлов, содержащих полный объем цифровой информации навигационных сообщений. Примером формата требуемой информации может служить формат GRIL, использующийся в НАП производства Javad и Topcon. Наличие на текущий момент существенного количества такой НАП в составе сети IGS может способствовать созданию в рамках сети IGS подсети из НАП, предоставляющей наиболее полную информацию.

В.4.0 термине «целостность» и его отличии от термина «вероятность основного отказа навигационного обслуживания»

В соответствии с определением ИКАО целостность определена как мера доверия, которая может быть отнесена к правильности информации, выдаваемой системой в целом. Целостность подразумевает способность системы обеспечить пользователя своевременными и обоснованными предупреждениями (сигналами тревоги) в тех случаях, когда система не должна использоваться для планируемой операции (этапа полета и др.).

Для проверки на приемлемость уровня ошибки определения местоположения, установлен порог, при котором выдается сигнал тревоги, представляющий собой максимальную ошибку определения местоположения, при которой обеспечивается безопасная операция. Ошибка определения местоположения не может превышать данный порог без срабатывания оповещения. По аналогии с курсо-глиссадной системой в авиации (Instrumental Landing System – ILS) система может деградировать в сторону увеличения ошибки сверх 95 %, не превышая при этом контрольного порога.

Требование к показателю целостности навигационной системы для отдельного воздушного судна по обеспечению полета по маршруту, операций в зоне аэродрома, начального этапа захода на посадку, неточного захода на посадку (NPA) и вылета полагается равным $1 \times 10^{-5}/ч$. Это вероятность отсутствия оповещения за 5 мин, 15 и 10 с в зависимости от операции (следование по маршруту, следование по маршруту в зоне аэродрома и неточный заход на посадку). Сигнал-в-пространстве, передаваемый спутниковыми навигационными системами, одновременно обслуживает в широкой зоне большое количество воздушных судов, летящих по маршруту, и поэтому последствия потери целостности системы будут для системы управления воздушным движением значительно, чем в случае использования традиционных навигационных средств. В связи с этим требования к характеристикам являются более высокими.

Основной отказ в навигационном обслуживании по СВП КСТ (SIS URE Major Service Failure) определяется как событие, происходящее в определенный период времени, в течение которого признаки пригодности НКА в навигационном сообщении являются ложными, т.е. значение SIS URE превышает пороговое значение, при котором должен быть выставлен признак непригодности НКА. Фактически, вероятность отказа основного обслуживания рассчитывается как процент времени в течение оговоренного временного интервала, когда значение CSA SIS URE для пригодного НКА превышает 70 м, что существенно отличает эту характеристику от характеристики целостности отсутствием времени оповещения.

В.5 Оценка зависимости SIS URE от возраста ЭВИ и стабильности (вариации Аллана) стандартов частоты ГЛОНАСС

В Стандарте приведены характеристики SIS URE вне зависимости от возраста ЭВИ, передаваемой в составе навигационного сообщения. Такая характеристика является наиболее ощутимой характеристикой по влиянию SIS URE непосредственно на НАП, работающие по ОС ГЛОНАСС.

Ниже описан общий характер изменения погрешности псевдодальности в зависимости от интервала старения и возраста данных внутри интервала старения. На текущий момент ЭВИ закладывается на борт НКА от 1 до 3 раз в сутки, что обусловлено региональным характером ПНКИ ГЛОНАСС.

Зависимость ЭВИ от интервала старения определяется нестабильностью бортовых стандартов и точностью бортовой модели прогнозирования эфемерид. В данном разделе представлены примеры типичного характера зависимости ЭВИ от интервала старения на основе реальных данных.

На рисунке В.5.1 приведен пример вариации Аллана БСУ НКА ГЛОНАСС по данным за 23 суток.

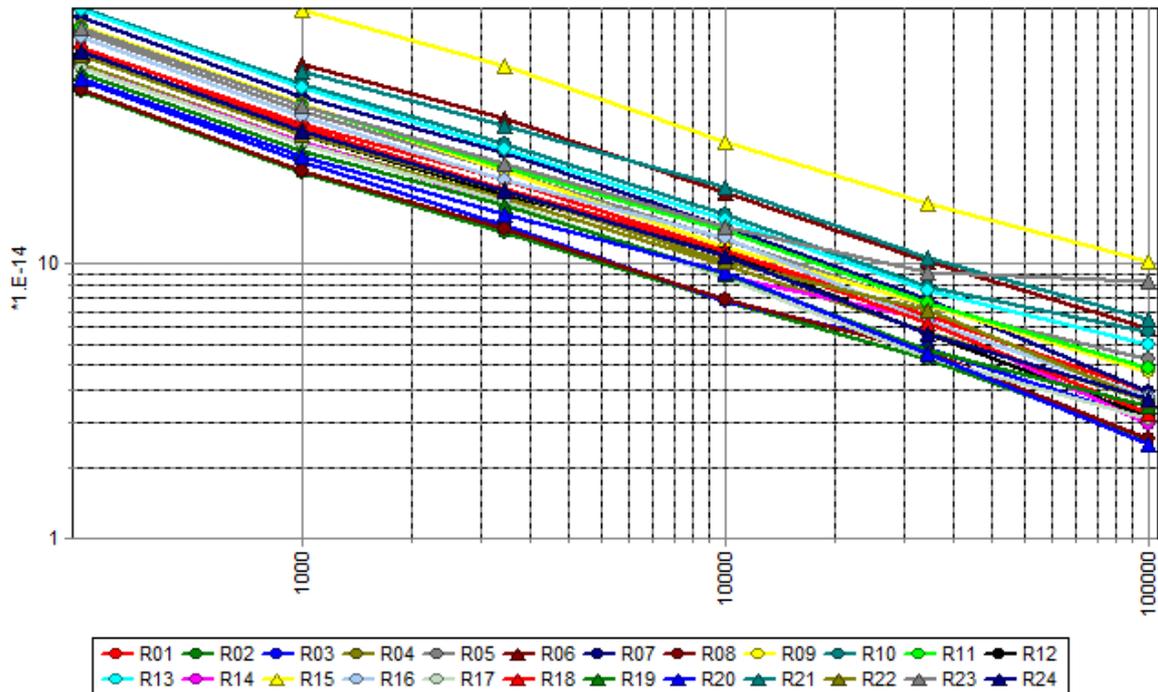


Рисунок В.5.1 — Вариация Аллана БСУ НКА ГЛОНАСС

Анализ приведенного графика показывает, что суточная нестабильность стандартов частоты ГЛОНАСС для среднего НКА составляет $5-6 \cdot 10^{-14}$, что за сутки приводит к вкладу в ЭПД от 0.7 до 1.2 м в зависимости от частоты закладки.

Оценка зависимости SIS URE от интервала старения проводилась на суточном и 15-суточном интервалах. Штатные значения эфемерид и ЧВП сравнивались с соответствующими апостериорными значениями.

На первом этапе анализа проводились оценки SIS URE на суточном интервале с шагом полчаса. Полученные значения SIS URE последовательно усреднялись на 0.1 ... 24 ч. Результаты расчета представлены на рисунке В.5.2, зависимость средней по ОГ SIS URE – на рисунке В.5.3.

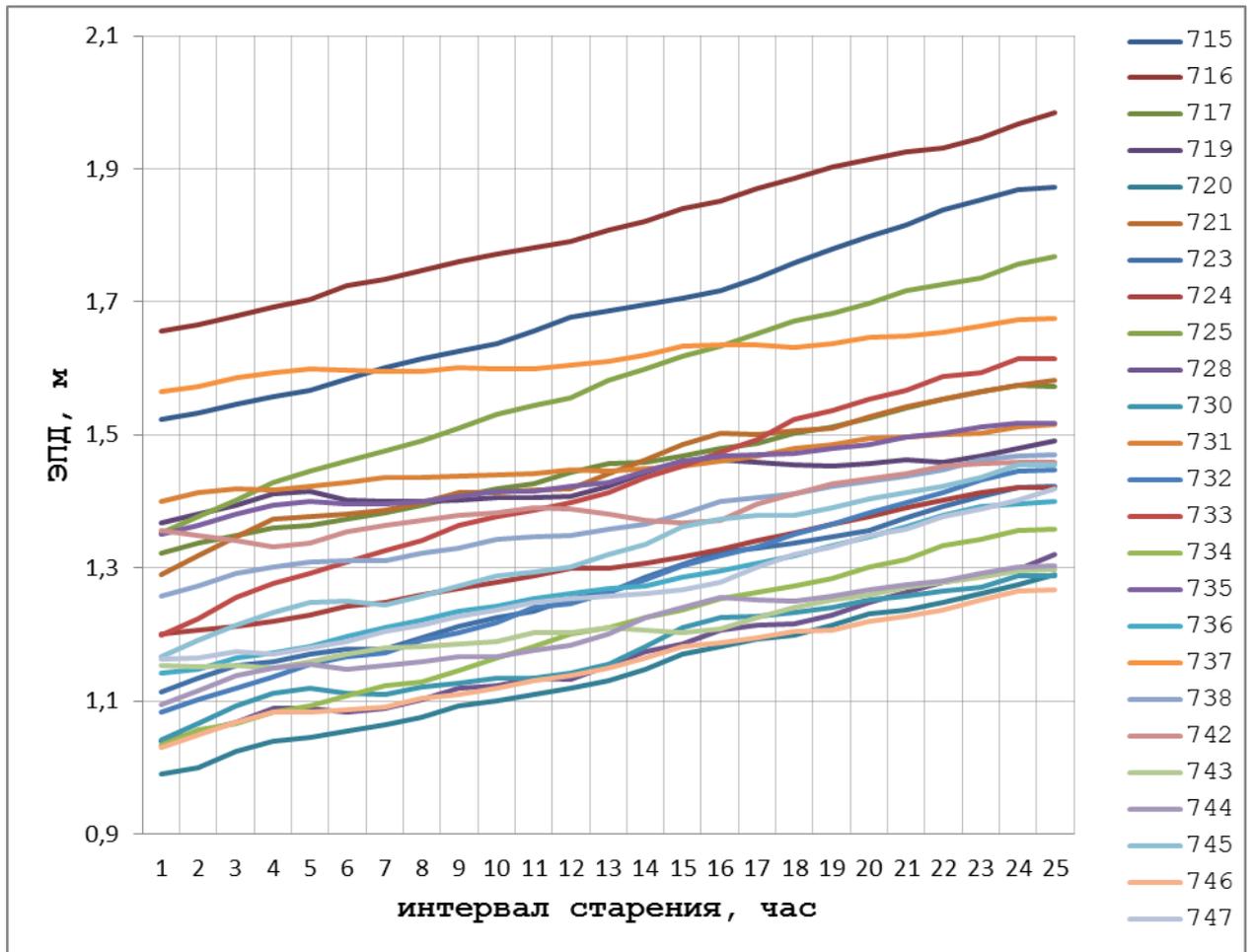


Рисунок В.5.2 — Зависимость ЭПД от интервала старения исходных данных

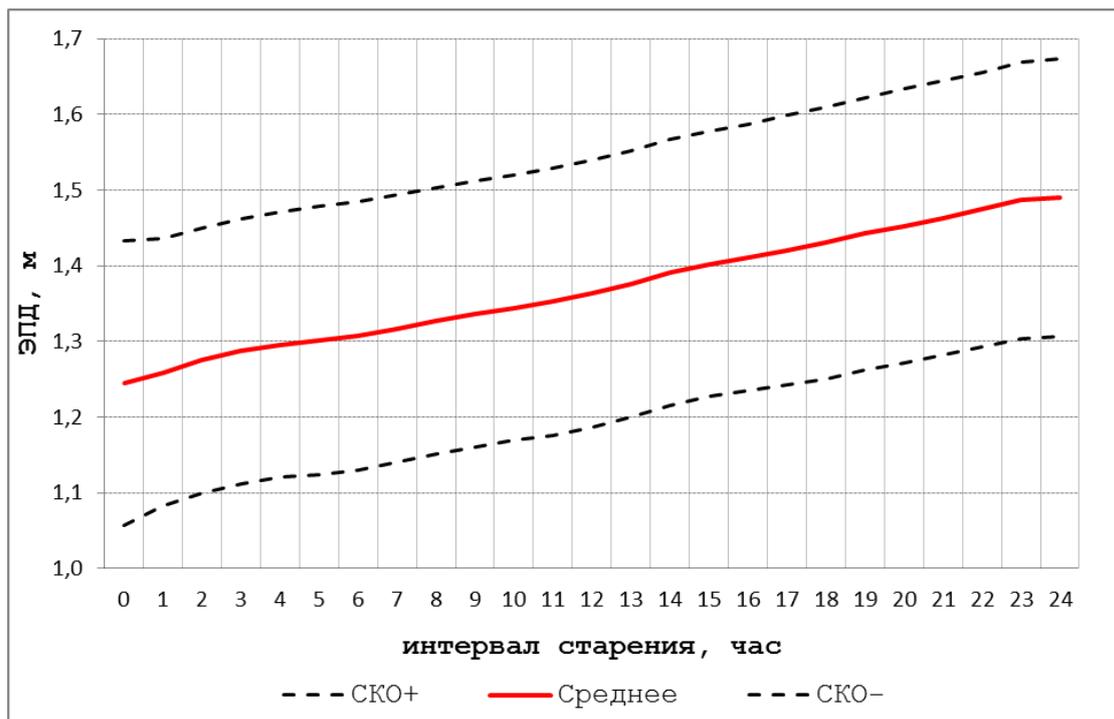


Рисунок В.5.3 — Зависимость ЭПД от интервала старения исходных данных, среднее по группировке

На втором этапе анализа проводились оценки SIS URE на интервале в 15 суток с шагом 6 ч. Такой шаг был выбран из-за трудоемкости расчета и с учетом того, что шаг расчета близок к половине периода обращения НКА. Для расчетов использовался такой же подход, как и для расчетов на суточном интервале. Результаты оценок представлены на рисунках В.5.4 и В.5.5.

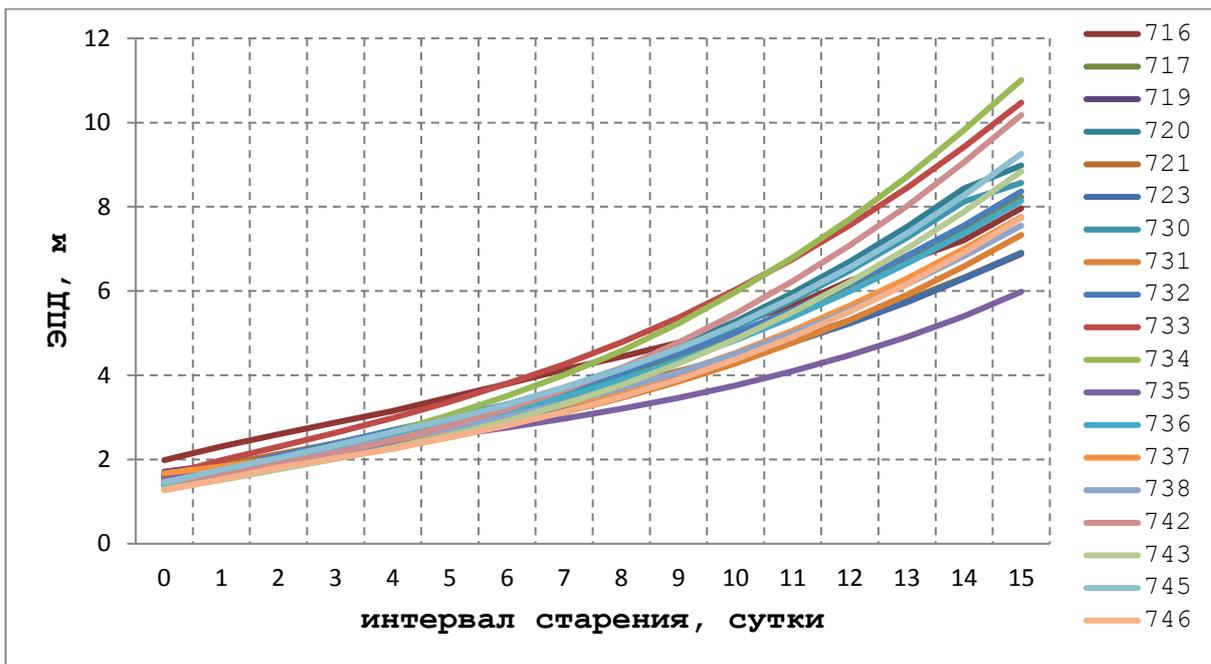


Рисунок В.5.4 — Зависимость SIS URE от интервала старения исходных данных

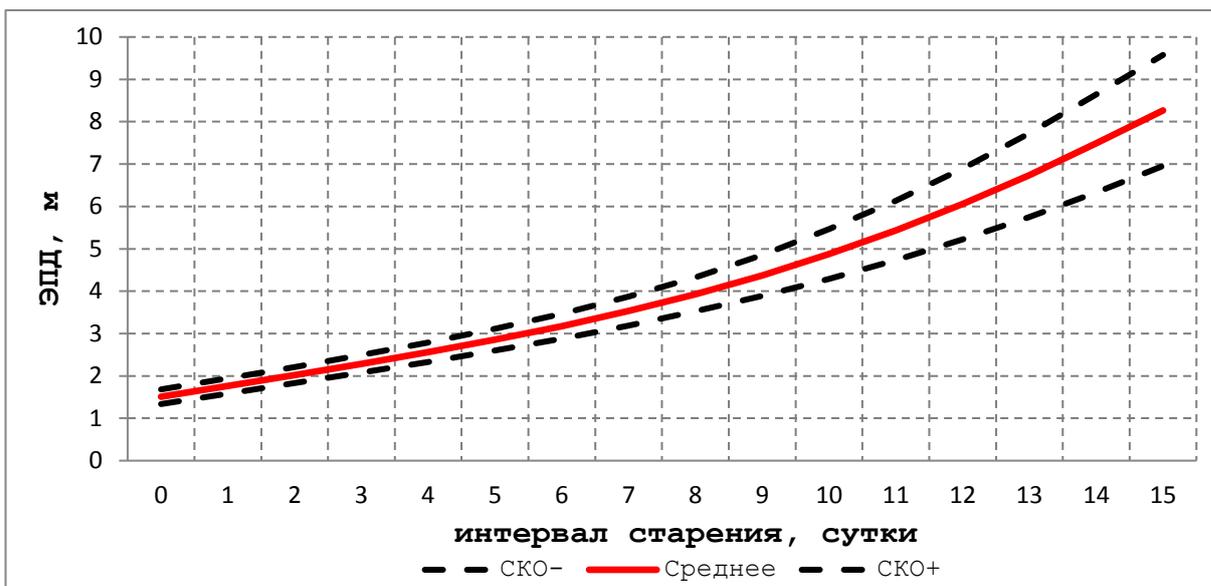


Рисунок В.5.5 — Зависимость SIS URE от интервала старения исходных данных, среднее по группировке

На рисунке В.5.6 приведены примеры зависимости глобальной средней погрешности псевдодальности от возраста ЭВИ на суточном интервале.

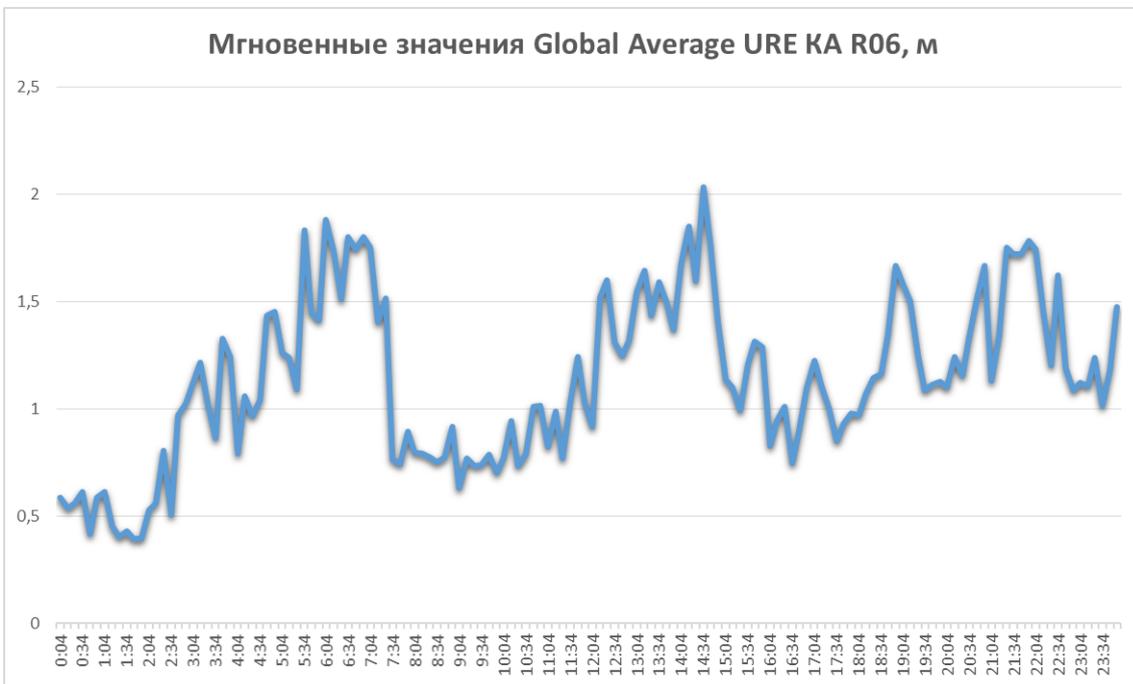
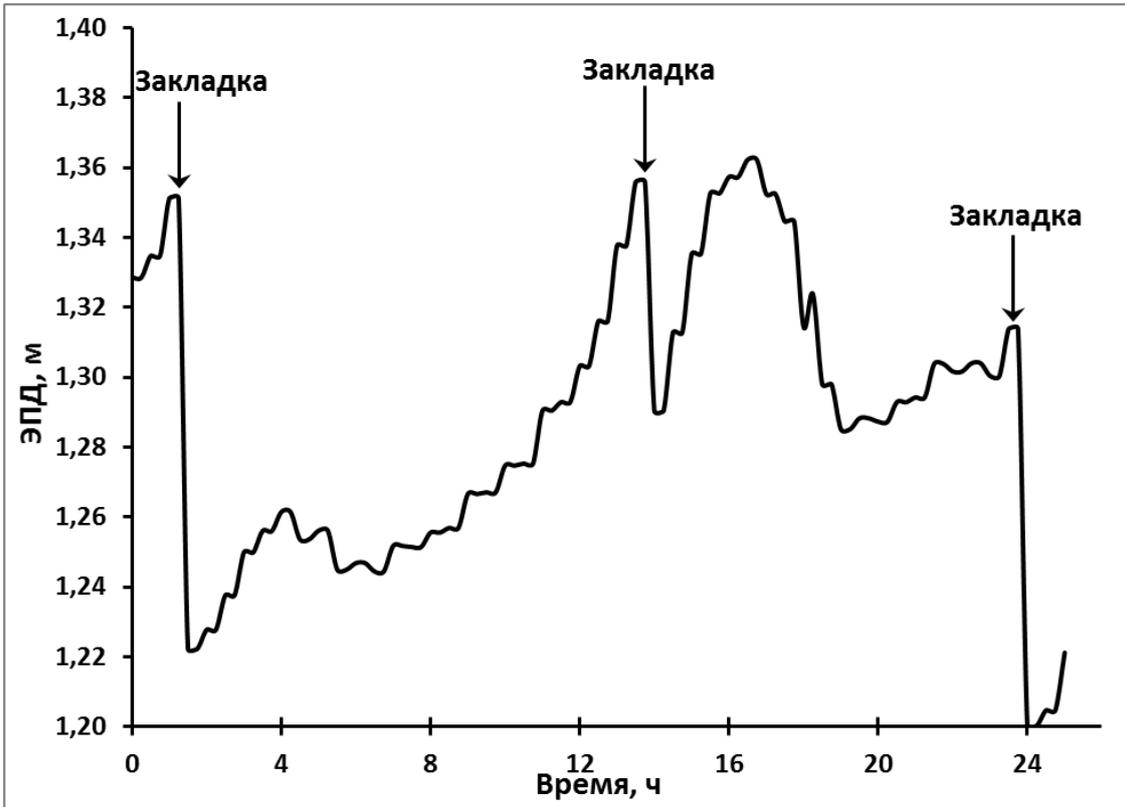


Рисунок В.5.6 — Примеры зависимости мгновенной глобальной средней погрешности псевдодальности от возраста ЭВИ на суточном интервале

В.6 Примеры бюджета ошибок с учетом погрешностей, вносимых средой распространения и НАП

Указанные в Стандарте эксплуатационные характеристики зависят от работы космического сегмента и сегмента управления системой. Точность определения пространственных координат потребителя определяется многими факторами, основными из которых являются следующие:

- погрешности за счет космического сегмента и сегмента управления (погрешности эфемерид КА и ЧВП в части их определения в комплексе ЭВО и представления в навигационном сообщении, бортовой аппаратуры, обеспечивающей формирование и излучение навигационного сигнала). Для краткости используется термин «погрешность за счет космического сегмента»;
- погрешности за счет распространения сигнала в ионосфере и тропосфере Земли;
- погрешности за счет условий приема НС в наземной аппаратуре (эффект многолучевости) и погрешности аппаратуры спутниковой навигации за счет шумов и задержек в канале обработки.

Погрешность пространственных определений местоположения потребителя, ее составляющие в плане (на поверхности геоида) и по высоте, а также погрешность определения времени потребителя могут быть соответственно рассчитаны по формулам:

$$PE = PDOP \cdot UERE,$$

$$HPE = HDOP \cdot UERE,$$

$$VPE = VDOP \cdot UERE,$$

$$TCE = TDOP \cdot UERE,$$

где:

PE — погрешность определения координат потребителя в пространстве;

HPE — погрешность определения координат потребителя в плоскости горизонта;

VPE — погрешность определения высоты потребителя;

TCE — погрешность определения времени потребителя в шкале времени системы;

UERE — погрешность псевдодальности потребителя, определяемая по формуле:

$$UERE^2 = URE^2 + UEE^2$$

$$URE^2 = SIS \cdot URE^2 + UAE^2$$

где:

SIS URE — эквивалентная погрешность псевдодальности за счет космического сегмента, т.е. за счет погрешности бортовой эфемеридно-временной информации;

UAE — погрешность псевдодальности за счет среды распространения сигнала, различная для одночастотной, двухчастотной и трехчастотной аппаратуры, с использованием и без использования метеопараметров;

URE — погрешность псевдодальности за счет космического сегмента и среды распространения сигнала;

UEE — погрешность псевдодальности за счет условий приема навигационных сигналов в наземной аппаратуре (эффект многолучевости или мультипути) и погрешности аппаратуры спутниковой навигации.

В качестве примера в таблице В.6.1 приведен бюджет ошибок потребителя в зависимости от типа используемой НАП. Бюджет ошибок приводится здесь в качестве справочного материала и не является объектом рассмотрения данного Стандарта.

Таблица В.6.1 — Пример бюджета ошибок псевдодальности

Источник погрешностей	Одночастотный приемник (м)	Двухчастотный приемник (м)
Аппаратурные шумы	2.57	8.0
Многолучевость	7.28	7.28
Тропосфера	0.2	0.2
Ионосфера	8.5	–
Эфемериды	0.5	0.5
ЧВП	3.2	3.2
Суммарная погрешность	9.1	8.5

В.7 Оценка распределения PDOP

При известной (заданной или оцененной) погрешности псевдодальности может быть вычислена погрешность местоопределения потребителя по формулам, указанным в разделе В.6. Для этого необходимо знать текущее значение соответствующего геометрического фактора. Геометрический фактор может быть получен как по результатам мониторинга, так и на основе аналитических данных для номинальной ОГ ГЛОНАСС. На рисунках В.7.1, В.7.2 представлены функции и плотности распределения HDOP и VDOP на поверхности для номинальной ОГ ГЛОНАСС, а также для ОГ без средних 1 и 2 КА.

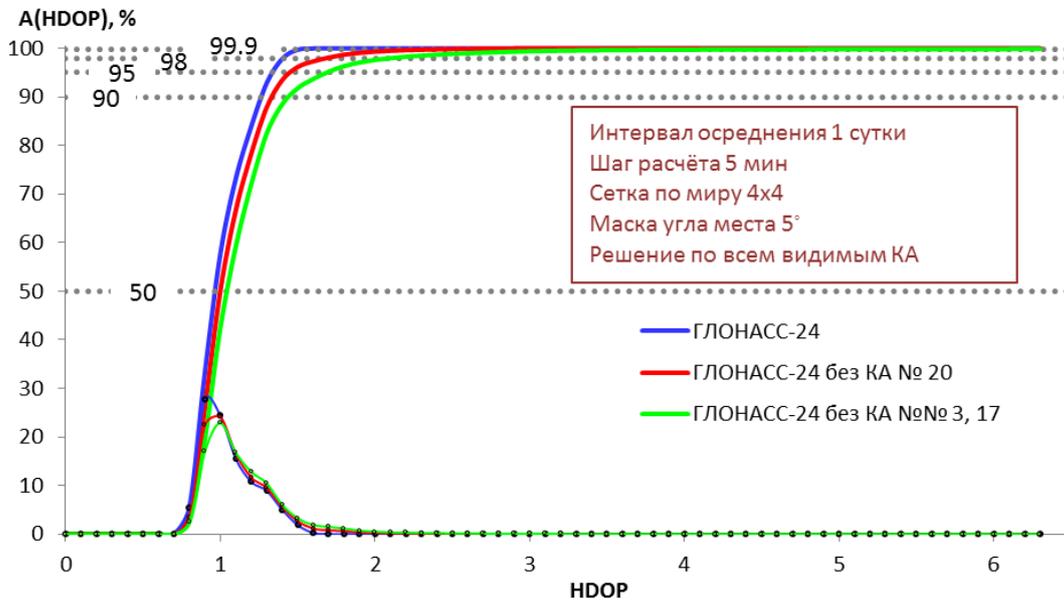


Рисунок В.7.1 — HDOP для ОГ ГЛОНАСС из 24, 23, 22 НКА

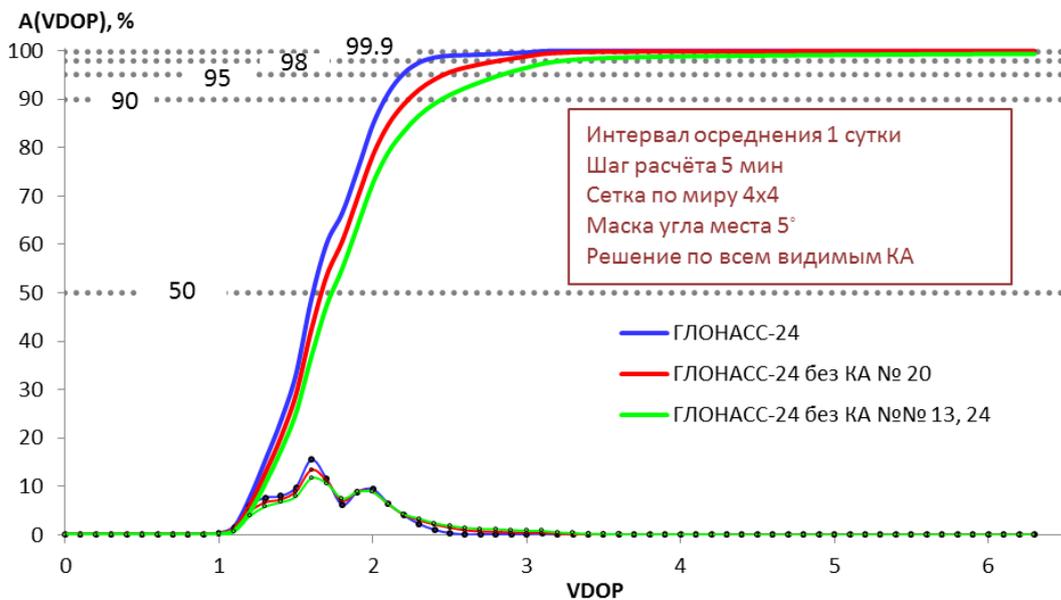


Рисунок В.7.2 — Распределение VDOP для ОГ ГЛОНАСС из 24, 23, 22 НКА

Средние КА определены, как КА, при выходе из ОГ которых осредненные по миру HDOP или VDOP соответственно обладают средними значениями по сравнению с вариантами при выбывании других КА. Аналогично могут быть определены наихудшие КА, при выходе из ОГ которых усредненные по миру HDOP или VDOP соответственно обладают наихудшими (самыми высокими) значениями по сравнению с вариантами при выбывании других КА.

Помимо распределения по всей поверхности, распределение HDOP, VDOP может быть рассчитано отдельно в каждой точке поверхности, в том числе в наихудшей точке, т.е. точке с наихудшим среднесуточным локальным значением HDOP, VDOP (Таблица В.7.1).

Таблица В.7.1 — Распределение HDOP, VDOP для ОГ ГЛОНАСС из 24, 23, 22 НКА

Варианты ОГ	Наихудший вариант* HDOP	Наихудший вариант* VDOP	Средний вариант** HDOP	Средний вариант** VDOP
	99.90%			
ГЛОНАСС–24	~1.50	~2.00	~1.55	~3.05
ГЛОНАСС–23	~2.95	~3.40	~2.65	~4.35
ГЛОНАСС–22	>6	>6	>6	>6
	99.00%			
ГЛОНАСС–24	~1.54	~2.00	~1.45	~2.50
ГЛОНАСС–23	~2.80	~3.20	~1.90	~3.05
ГЛОНАСС–22	>6	>6	~2.60	~4.40
	98.00%			
ГЛОНАСС–24	~1.45	~2.00	~1.40	~2.35
ГЛОНАСС–23	~2.55	~3.10	~1.70	~2.85
ГЛОНАСС–22	>6	>6	~2.10	~3.25
	90.00%			
ГЛОНАСС–24	~1.40	~1.95	~1.25	~2.05
ГЛОНАСС–23	~2.05	~2.50	~1.32	~2.25
ГЛОНАСС–22	~2.90	~3.15	~1.40	~2.45

* Наихудший вариант выбывания КА и точка с наихудшим распределением.

** Средний вариант выбывания КА и распределение по всей поверхности.

Несмотря на возможность оценки погрешностей местоопределения путем перемножения ЭПД и соответствующего среднего геометрического фактора, такая оценка не в полной мере отражает реальное распределение характеристик, а является некой обобщенной характеристикой.

Предпочтительным же является пересчет в ошибки координат потребителя мгновенных погрешностей SIS URE, в каждой точке для каждого пригодного НКА, для чего погрешности эфемерид и часов проектируется на направление из точки на НКА.