

Физика плазмы в солнечной системе
X конференция ИКИ РАН 16-20.02.2015

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА СБОИ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ GPS В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ.

В.И.Захаров^{1,2} , Ю.В.Ясюкевич² , М.А.Титова³

1 Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г.Москва, zvi_555@list.ru

2 ИСЗФ СО РАН, г.Иркутск, Россия

3 ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Москва, Россия

МОСКВА – 2015

Спутниковые навигационные и связные системы являются неотъемлемой частью инфраструктуры современного общества, **требования к оперативности и надежности которой в последнее время возрастают.**

Анализ работы навигационных и связных систем показывает, что в настоящее время надежность их функционирования определяется не только и не столько аппаратными сбоями, но все в **большей степени влиянием различных гео- и гелиофизических факторов**, т.е. космической погодой, что сильнее проявляется в высоких широтах, например, в Арктике.

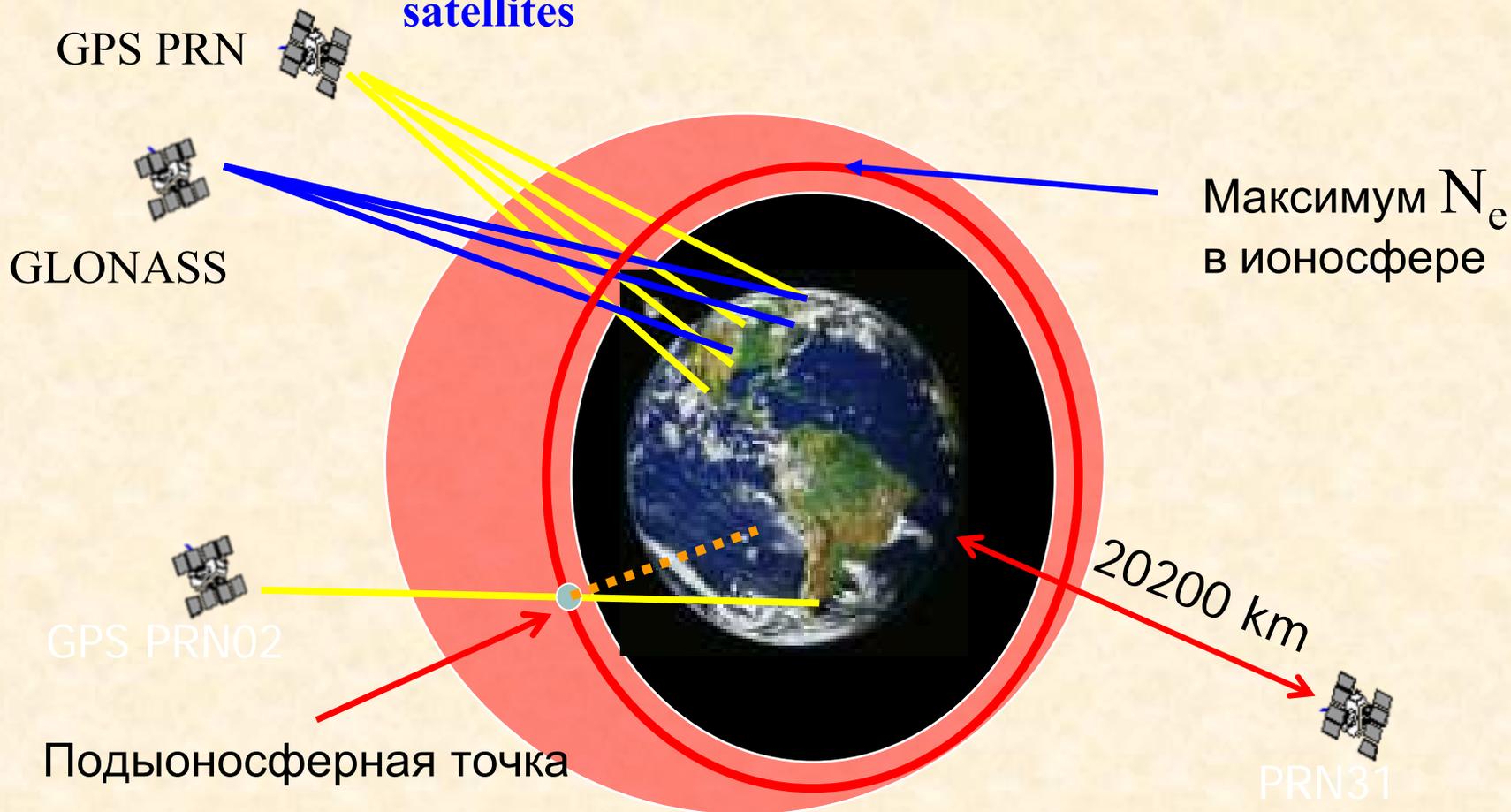
Глобальные навигационные системы - GNSS

$f_1=1575.42$ MHz
 $f_2=1227.60$ MHz
 $h=20\ 200$ km

GPS 30 satellites

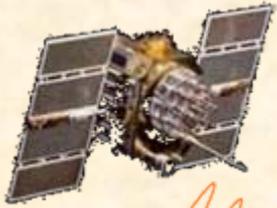
GLONASS 24 satellites

$f_1=1602.0+k\ 0.5625$ MHz
 $f_2=1246.60+k\ 0.4375$ MHz
 $h=19\ 100$ km



Местоопределение

PRN



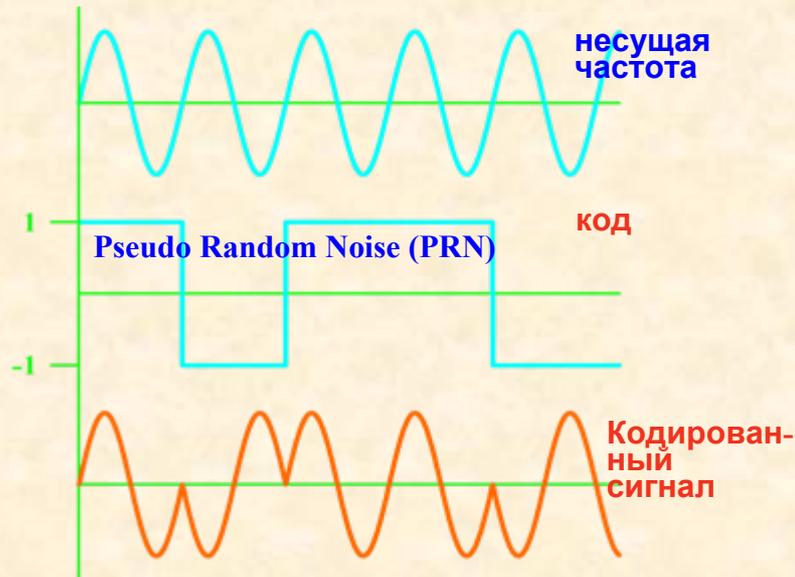
Определение координат в GNSS основано на точном измерении времени распространения сигнала от ИСЗ до приемника

Проблема синхронизации часов ИСЗ:

расхождение часов в 10 нс вызовет погрешность в определении координат до 30 м

Аппаратура на борту ИСЗ :
атомные часы
кодирующее устройство
передатчик $f_1 = 1.6 \text{ ГГц}$ (50 Вт)
передатчик $f_2 = 1.2 \text{ ГГц}$ (8 Вт)

Принцип кодирования сигналов GPS:



Кодирование позволяет регистрировать показания часов ИСЗ в приемнике GPS и передавать сведения о координатах ИСЗ

Типы кодов в GPS:
C/A – код свободного доступа
P – защищенный код
Y – закрытый код
Навигационное сообщение

Все о GPS: www.gps.ru



Что считать СБОЕМ?

В качестве сбоев обсуждаются явления

- 1 - «инструментальной» потери измерений псевдодальности и фазы → *навигация*
- 2 - кратковременные вариации регистрируемого полного электронного содержания (ПЭС), величины которых не имеют физического смысла (*или связаны с неизвестными процессами?*) → *физика ионосферы и ОКП*

Пример: скачки ТЕС со скоростью в $(2...5)$ ТЕСУ/мин превосходят регулярную изменчивость ионосферы, которая обычно составляет до $(0.1...1)$ ТЕСУ/мин

Используемые данные

- Наблюдения в формате RINEX
- Данные ~200 GPS «северных» станций сетей IGS и CHAIN в период 2010-2014г.г.
- Анализ данных всех ИСЗ и построение карт сбоев во времени всех регистрируемых параметров
- Использование специальных высокоширотных индексов для описания периода магнитной бури.
- Для некоторых событий – анализ данных совместно с измерениями магнетометров и риометров

Численные характеристики сбоев

Характеристика изучаемого параметра

вероятность сбоя наблюдаемого параметра i

во время наблюдения T , например, 1 час

$N_i(T)$ – общее число сбоев параметра i в течение времени наблюдения

$S_i(T)$ – общее число наблюдений параметра i в течение заданного времени

i - наблюдаемый параметр : **P1, P2, L1, L2,**

скачки ТЕС различных уровней (1...5)ТЕСУ/мин

$$P_{T,i} = \frac{N_i(T)}{S_i(T)} \times 100\%$$

Характеристика одной

станции – общая вероятность

сбоя на станции во время T

$$P_{T,i,GPS} = \frac{1}{N_{GPS}} \frac{N_i(T)}{S_i(T)} \times 100\%$$

N_{GPS} - число видимых ИСЗ во время проведения измерений

Характеристика наблюдательной

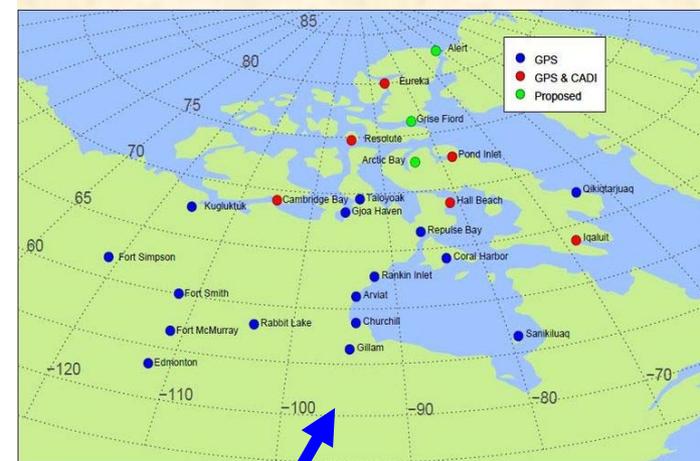
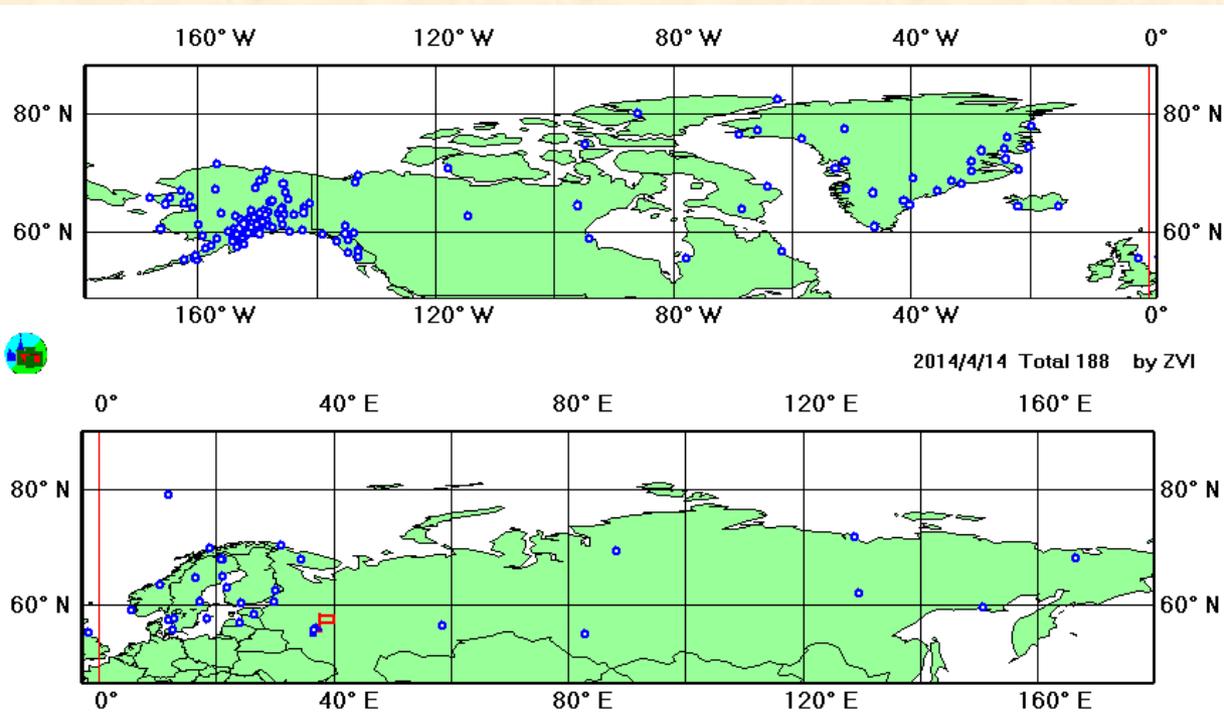
сети в регионе во время

наблюдения T

N_{NET} - число станций в региональной
сети

$$P_{T,i,NET} = \frac{1}{N_{NET}} \frac{N_i(T)}{S_i(T)} \times 100\%$$

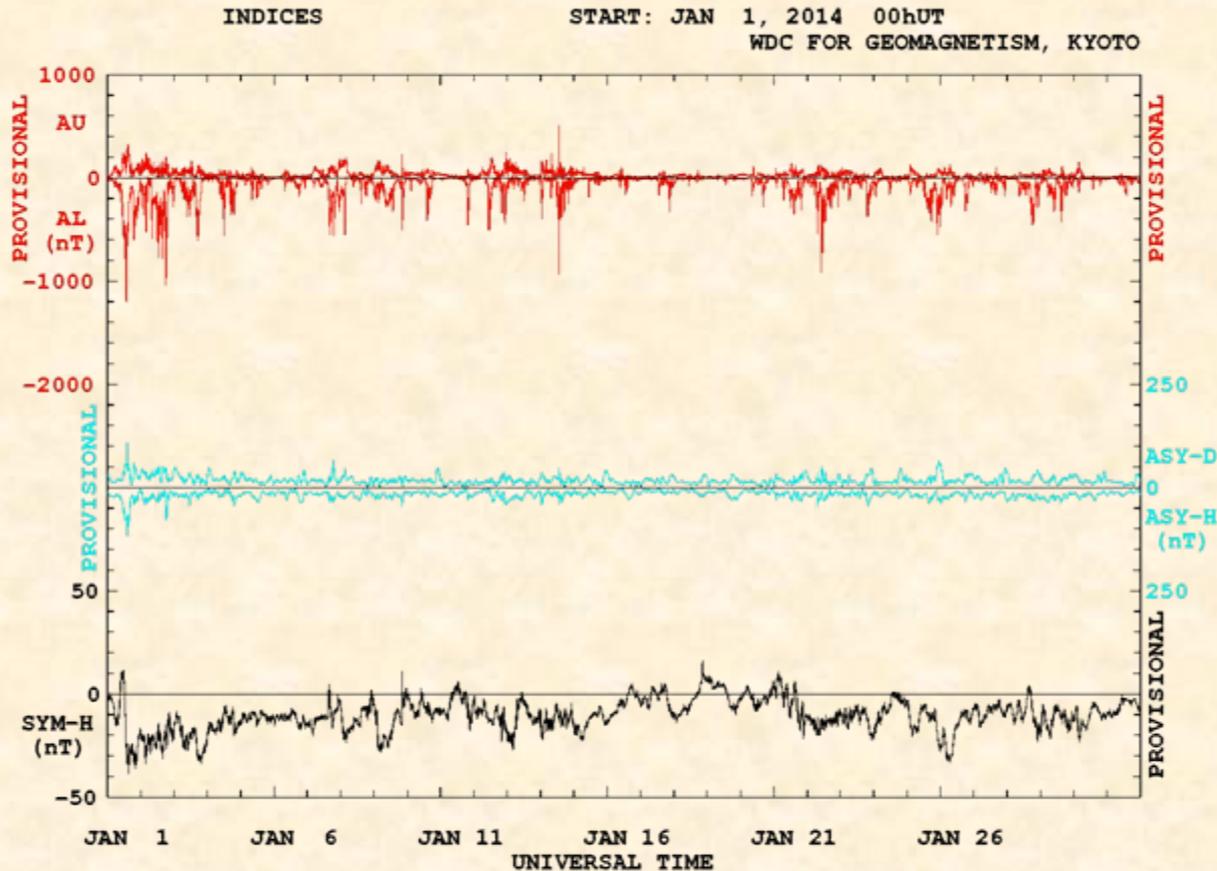
Сети и станции



Сеть CHAIN, GPS станции
отмечены синим

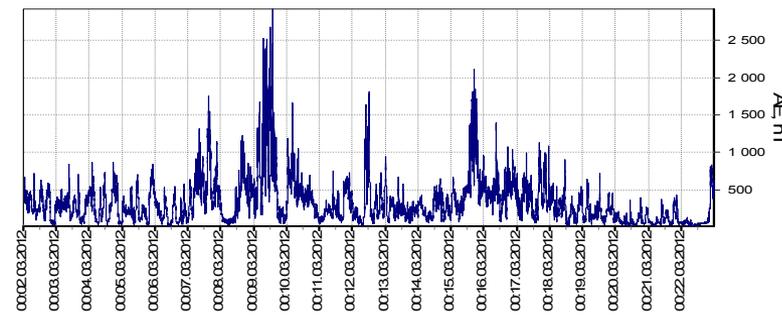
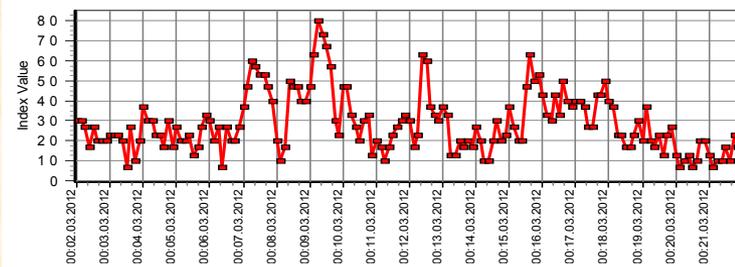
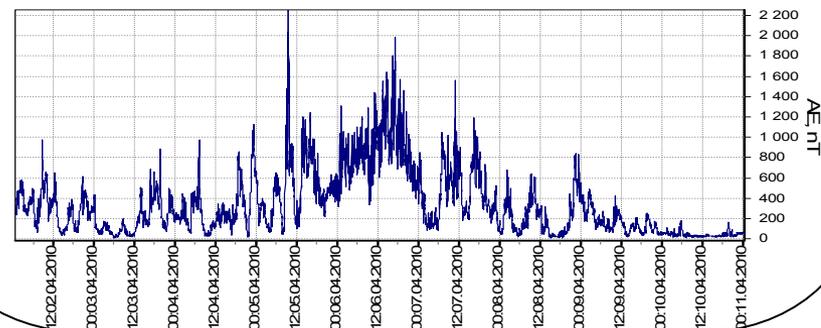
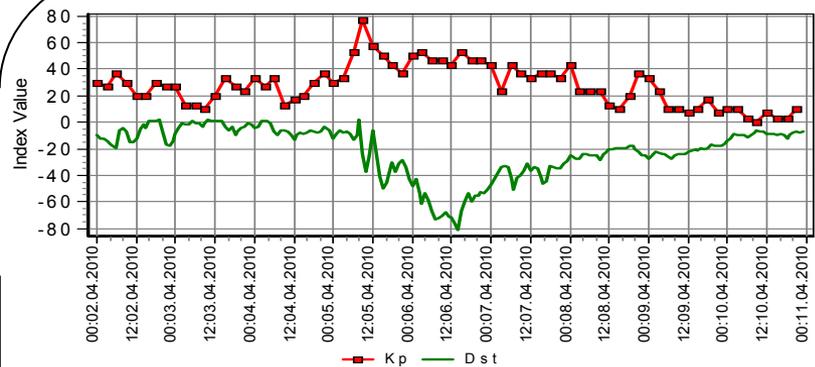
В работе методом **непрерывного мониторинга** исследована динамика сбоев для групп станций Арктического региона, расположенных севернее 55°N . В 2010г. в рассмотренном регионе в сети IGS было зарегистрировано 97 станций. В 2014г. число станций сети IGS достигло в этом регионе 188. Дополнительно использованы данные **сети CHAIN (Канада)** – 21, часть которых в IGS. **Особое внимание уделено цепочкам станций**, ориентированным преимущественно в северном направлении на территории Аляски, Канады, Европы.

Геомагнитные индексы и проявления магнитных бурь



Используемые индексы Dst и SYM-H мало пригодны для высоких широт, для которых разработаны спец. индексы AL, AU, **AE**

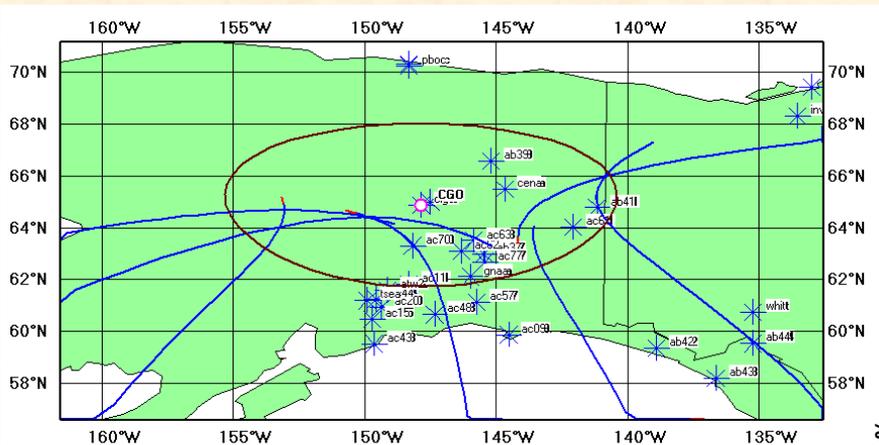
Год	дата	Кр	Класс	
2010	09:05.04	77	G5	
	21:03.08	67	G3-G4	
	18:04.08	63	G3	
2011	28.05	63	G3	
	00:05.06	63	G3	
	21:05.08	77	G5	
	00:25.10	73	G4	
2012	06:09.03	80	G5	
	09:12.03	63	G3	
	15:15.03	63	G3	
	00:24.04	67	G3- G4	
	21:16.06	63	G3	
	12:09.07	67	G3	
	15.07	67-70	G3- G4	
	00:01.10	67	G3- G4	
	06:08.10	63	G3	
	00:09.10	67	G3- G4	
	03:14.11	63	G3	
	2013	17.03	67	G3
		03:01.06	70	G4
03:02.10		67	G3- G4	
	00:08.12	60	G3	
2014	06:12.02	63	G3	
	06:08.06	63	G3	
	21:12.09	63	G3	



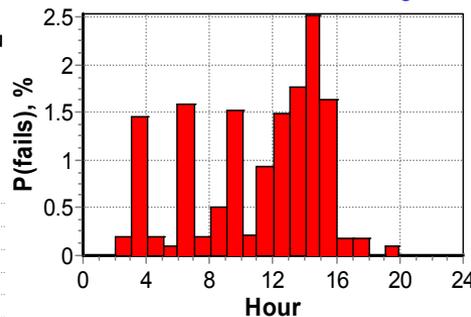
Примеры «карт» сбоев

Топология одной из измерительных цепочек (Аляска, магнитометр CGO)

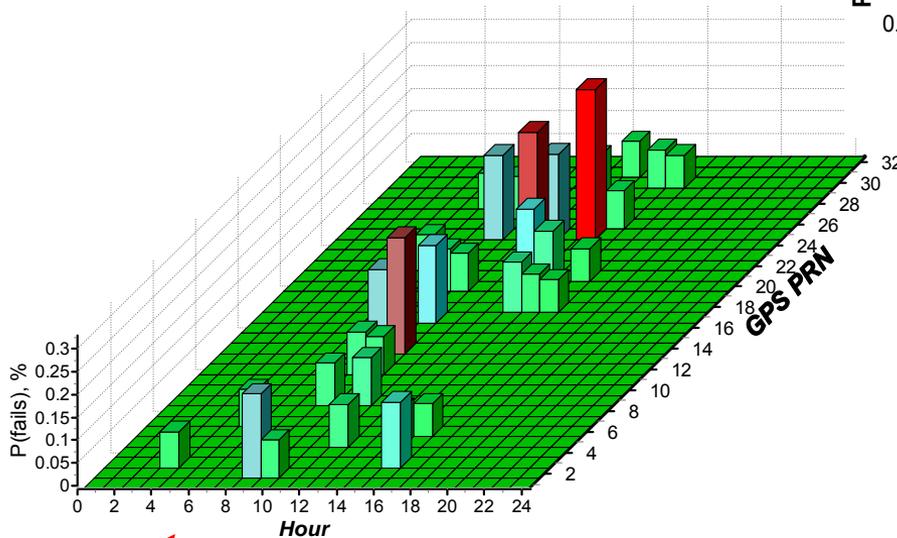
$$P_{T,i} = \frac{N_i(T)}{S_i(T)} \times 100\%$$



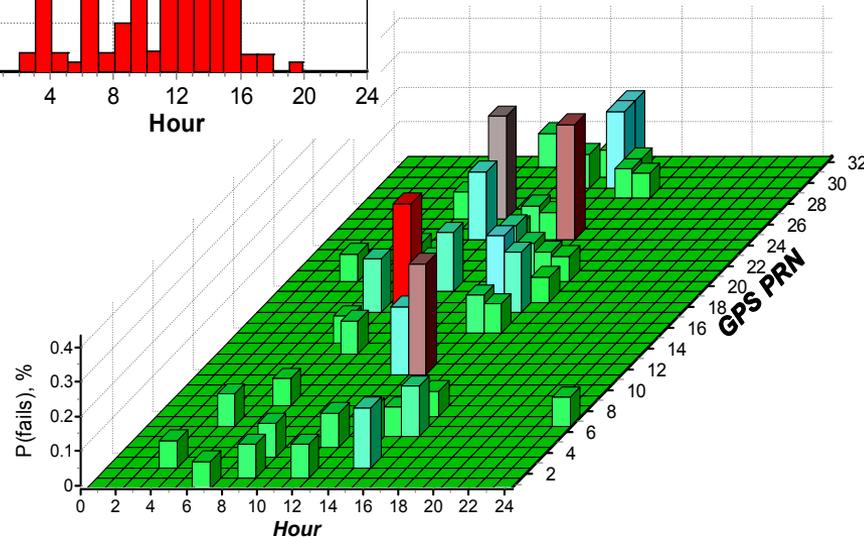
2012-3-9 cena L2-30 EI>10° All in Reg



2012-3-9 ab37 P2 EI>10°

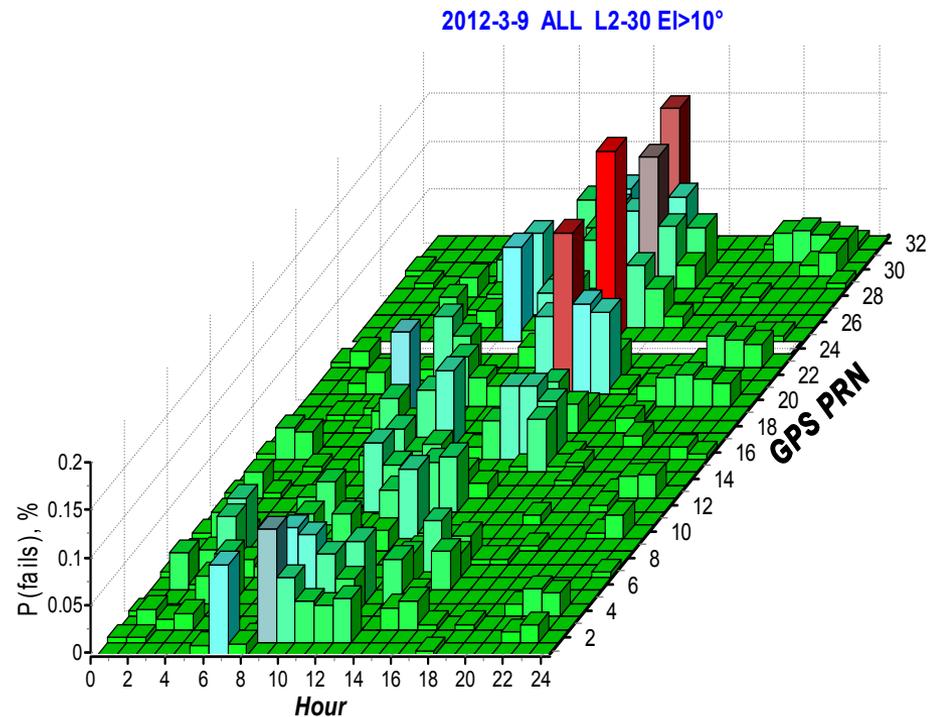
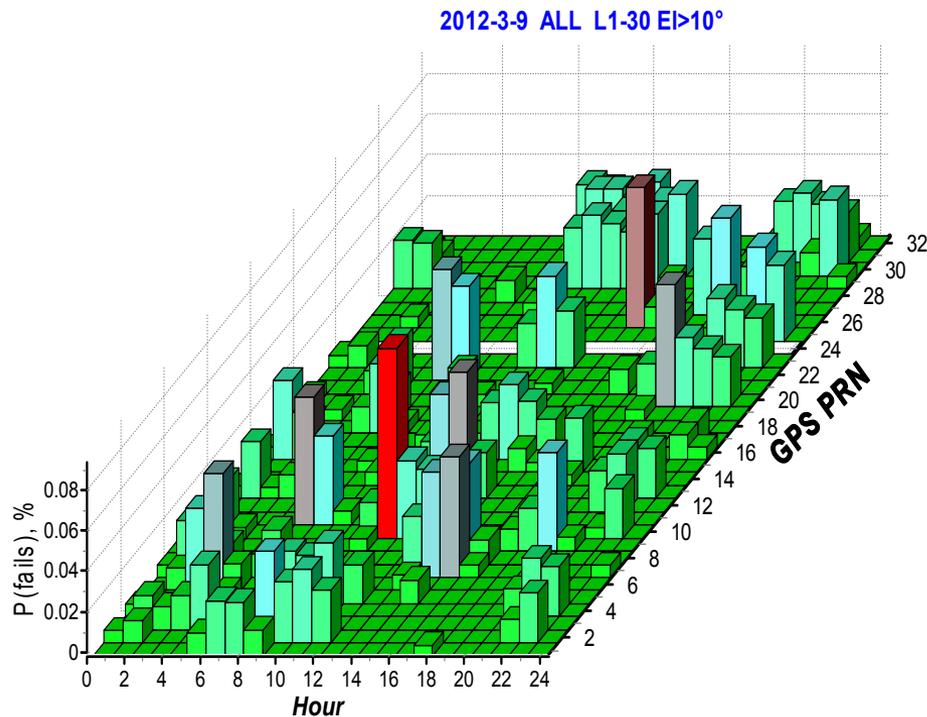


2012-3-9 atw2 P2 EI>10°



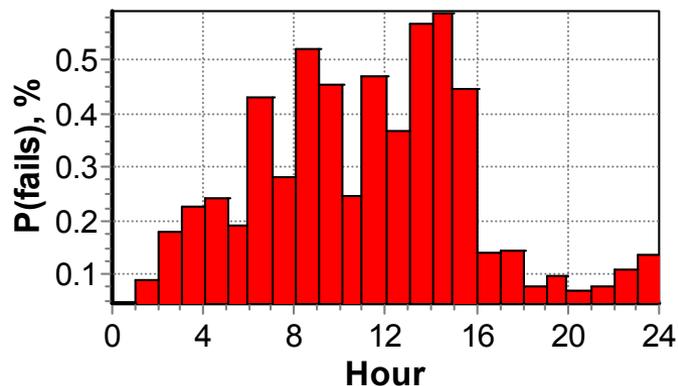
Топология сбоев – усреднение по «сети»

$$P_{T,i,NET} = \frac{1}{N_{NET}} \frac{N_i(T)}{S_i(T)} \times 100\%$$

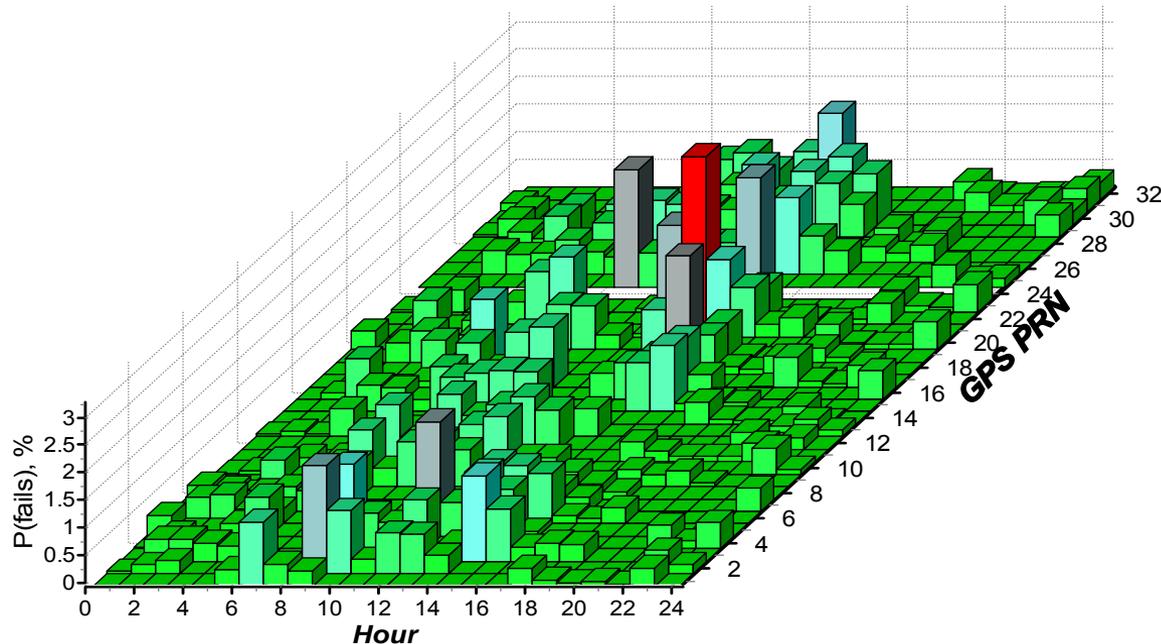


Топология сбоев TEC vs L2 – среднее по сети для одного PRN $\langle N_{net}, N_{GPS} \rangle$

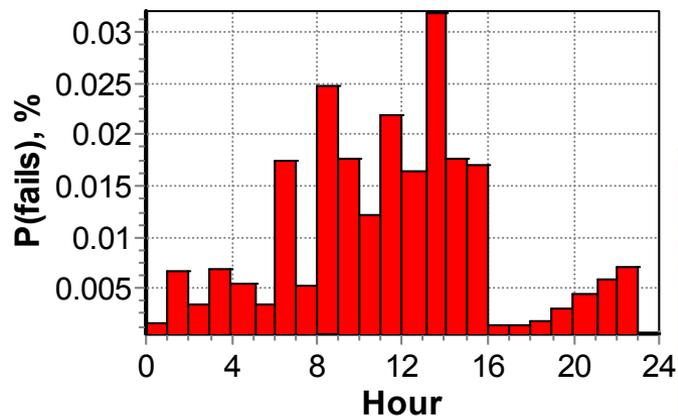
2012-3-9 ALL >1[TECU/min] EI>10°
AVE by PRN



2012-3-9 ALL >2[TECU/min] EI>10°

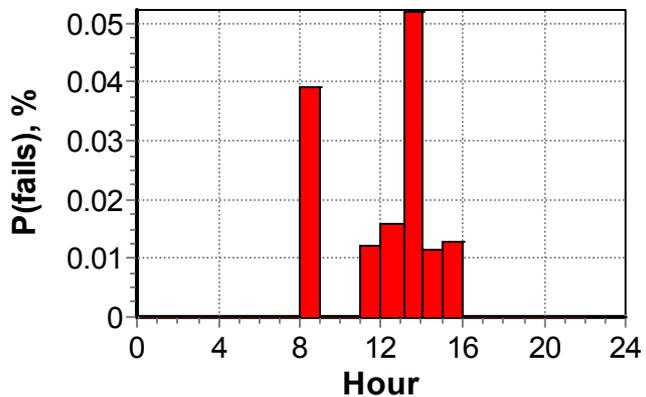


2012-3-9 ALL L2-30 EI>10° AVE by PRN

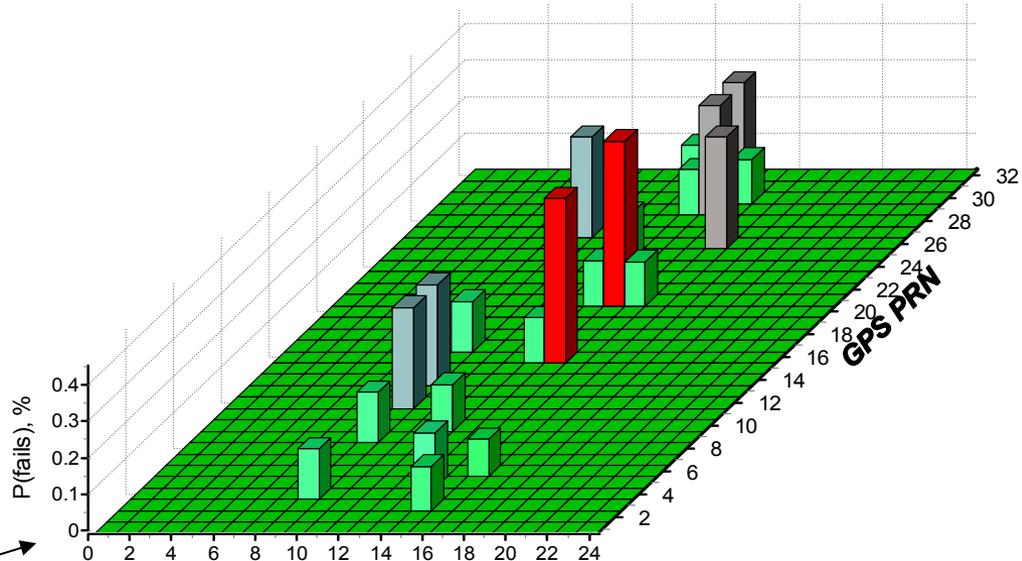


$$P_{T,i,GPS} = \frac{1}{N_{GPS}} \frac{N_i(T)}{S_i(T)} \times 100\%$$

2012-3-9 ac44 L2-30 EI>20° AVE by PRN



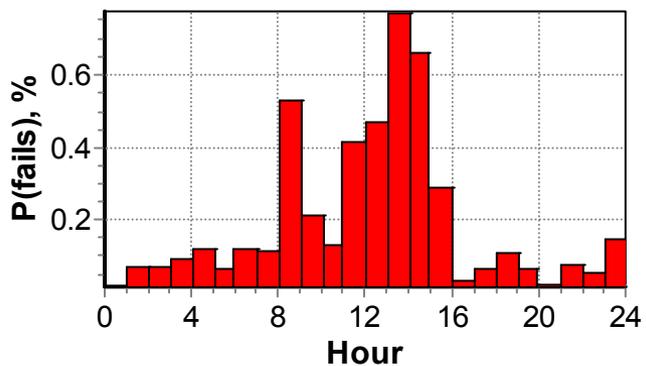
2012-3-9 ac44 L2-30 EI>20°



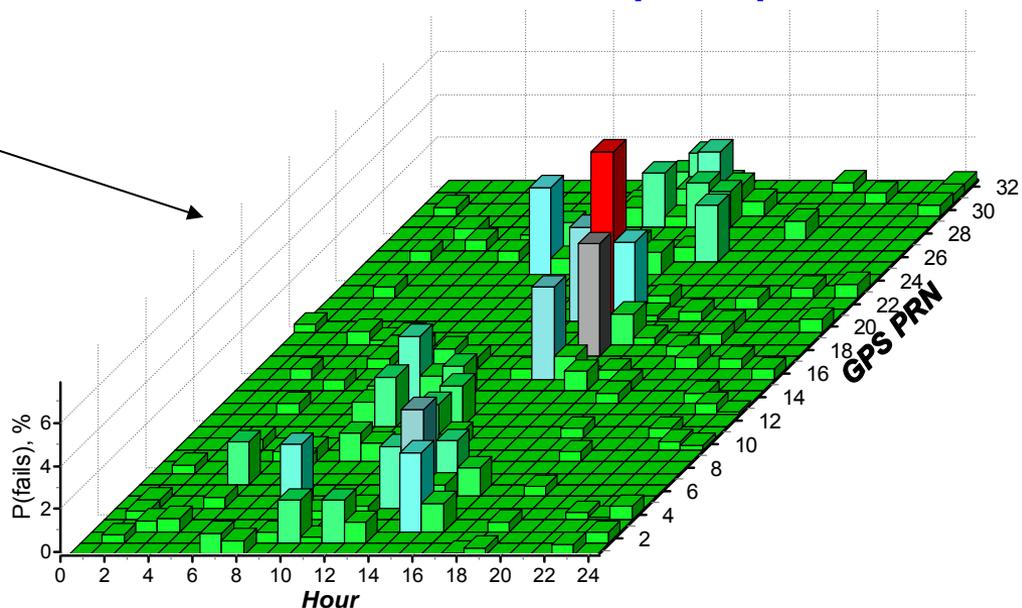
Влияние угла

возвышения на L2 vs TEC

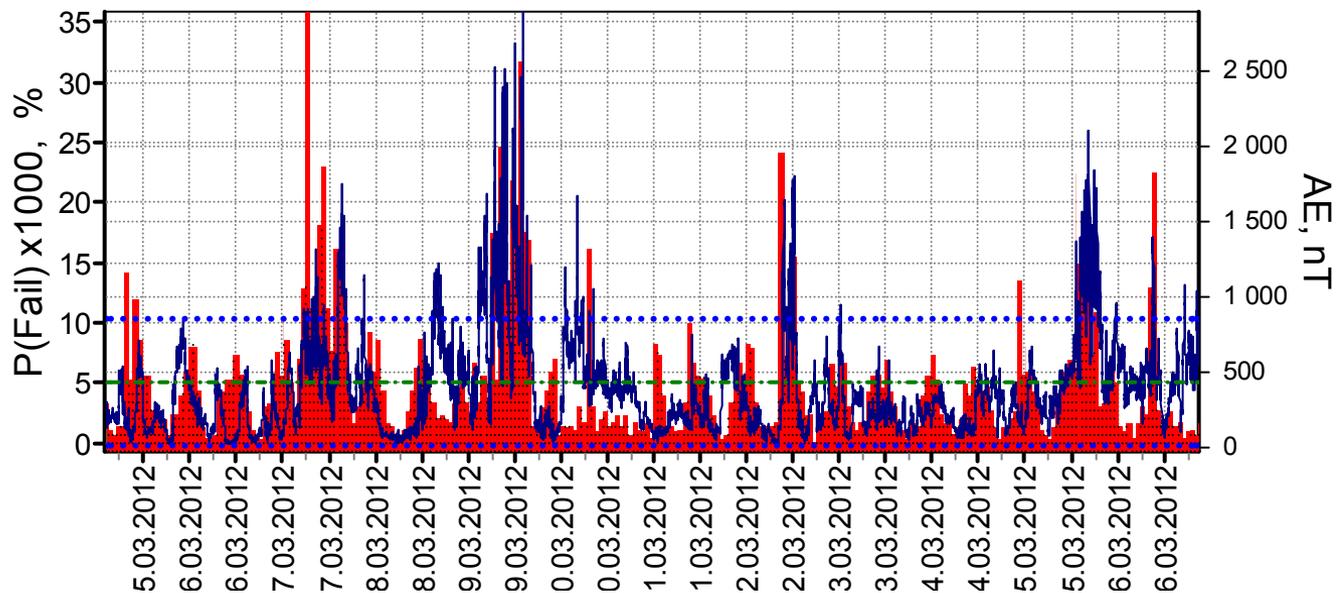
2012-3-9 ac44 >1[TECU/min] EI>20° AVE by PRN



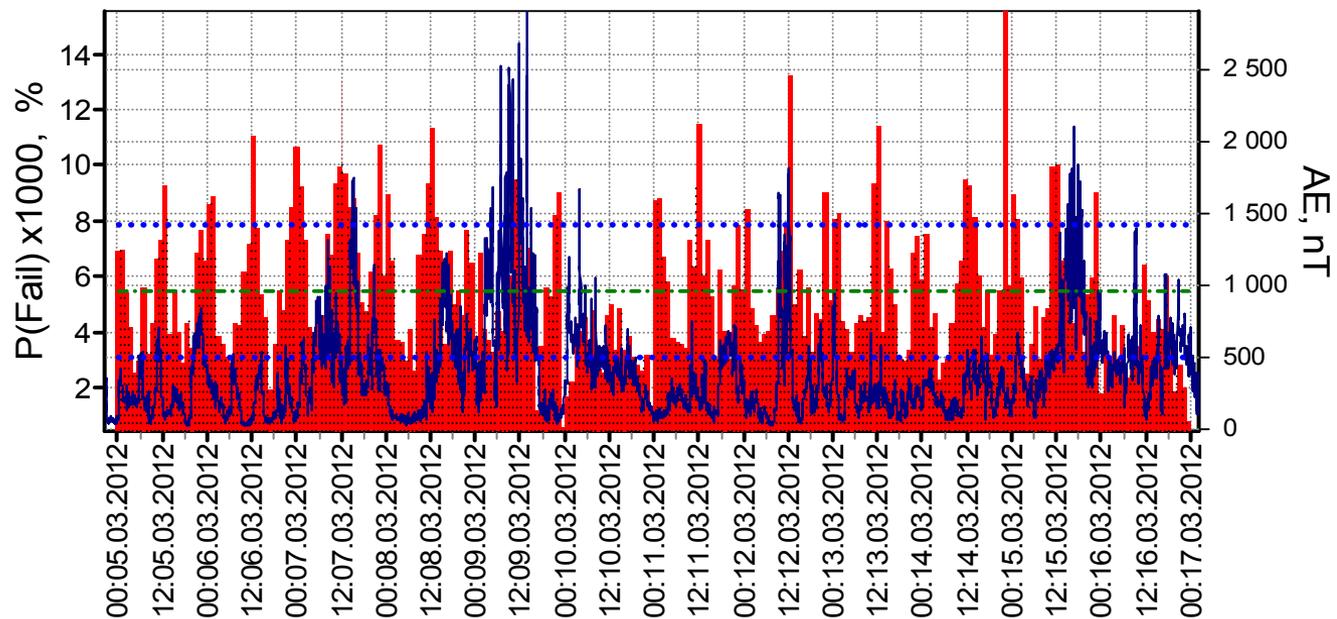
2012-3-9 ac44 >1[TECU/min] EI>20°



2012-03-05..2012-03-16 L2-30 GPS EI>10°



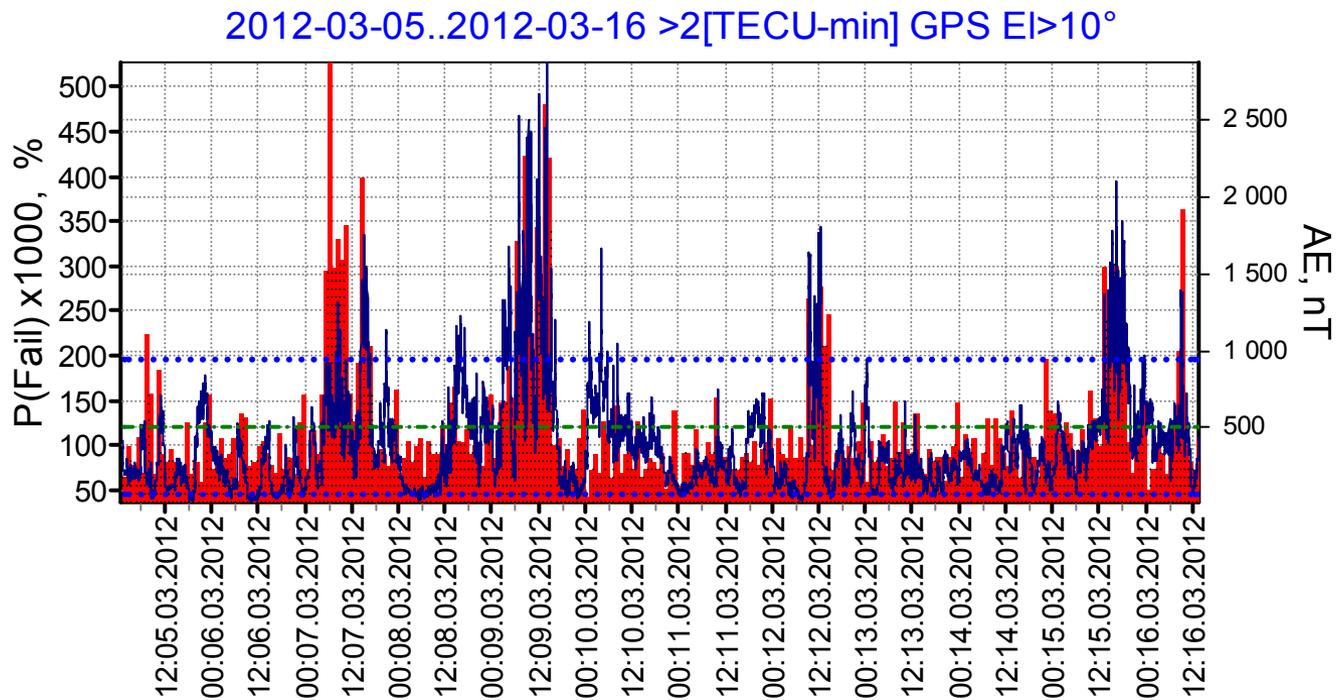
2012-03-05..2012-03-16 L1-30 GPS EI>10°



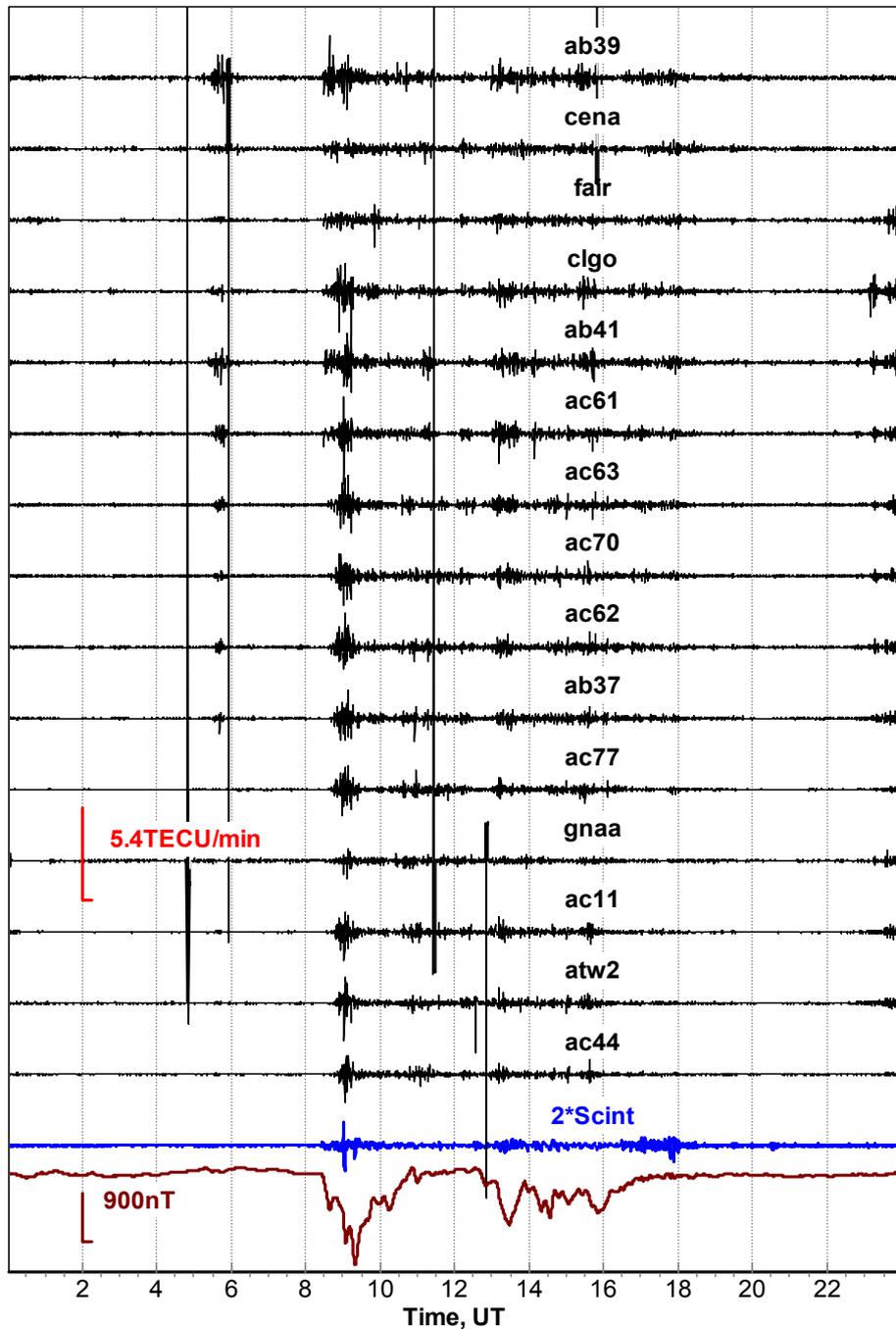
Сравнение
динамики
сбоев
 $\langle N_{net}, N_{GPS} \rangle$
для
L1 и L2

СБОИ в определении ТЕС -

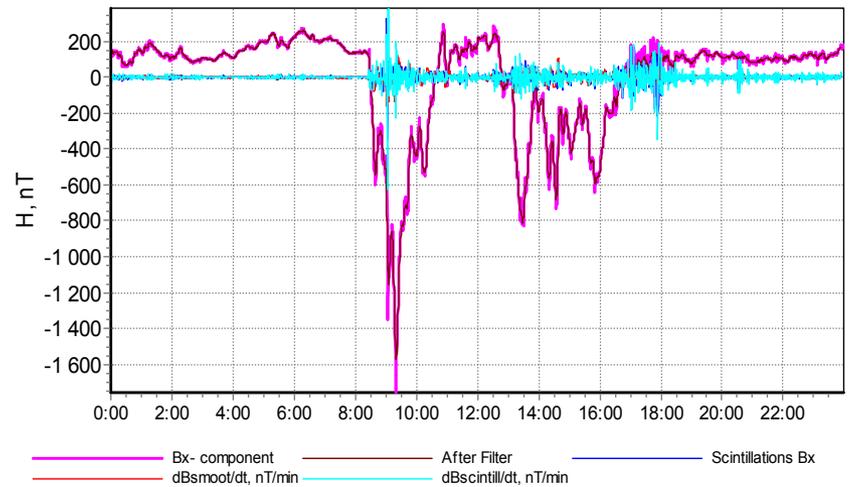
$$\langle N_{\text{net}}, N_{\text{GPS}} \rangle$$



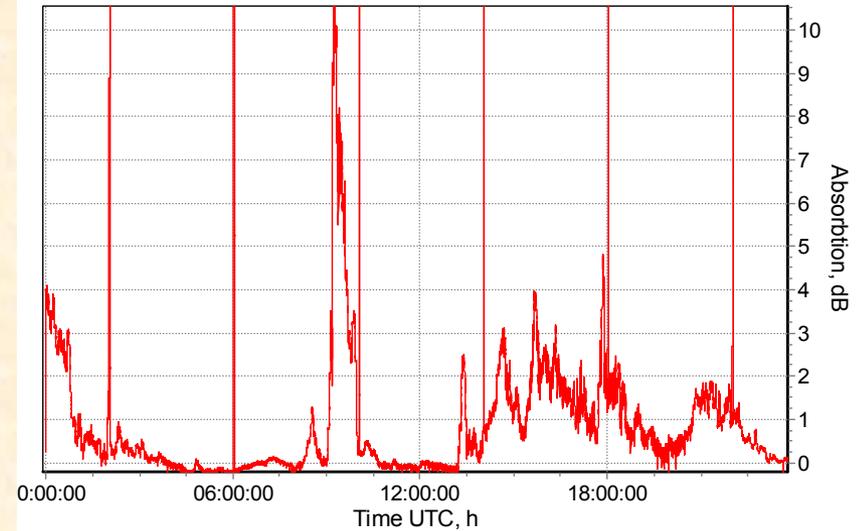
20100405 CGO & <dTEC/dt> on 15 cites EI> 10° x



CGO 20100405



norstar_k2_rio-daws_20100405



Рост поглощения в среде распространения сигнала – основная причина сбоев

Диапазоны величин сбоев

Вероятность сбоев для одного приемника и углах возвышения
КА более 10^0

Класс бури	*Величин AE, nT	Max P(L1),%	Max P(L2) ,%	Max P(TEC 1) ,%	Max P(TEC 2)
G3	~600	0.1-0.2	0.9-1.5	1-6	0.6-4
G4	~600...1500	0.15-0.25	1.2-3.5	5-15	3-6
G5	>1500	0.25-0.45	3.5-5.5	15-35	7-15

Вероятность сбоев для одного приемника и углах возвышения
КА более 20^0 -- уменьшается в среднем на 15-20%

Основные результаты

Выполнен анализ данных в течение 2010-2014г.г. (~1.5 млн часов совместных наблюдений P1, P2, L1, L2) в высоких широтах.

Получено:

- **Вероятность фазового сбоя по частоте L2** даже в спокойных условиях приема **больше в несколько раз**, чем по частоте кода захвата L1.
- Аналогичное соотношение справедливо для вероятностей сбоя по прецезионному коду и коду захвата.
- **Наличие геомагнитного возмущения приводит к росту** этой величины в 5-20 раз для рассмотренных бурь.
- **Вероятности сбоев при определении ПЭС значительно** – в 100 раз – **больше**, чем чисто инструментальные и также растут во время гео- гелиомагнитных возмущений различной природы.
- Анализ показывает, что **возможным решением для уменьшения влияния сбоев** на работу навигационной системы GPS является увеличение маски на угол возвышения спутника до 15-20⁰.