Адаптация параметров модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ сигналов радиостанций на трассах Новосибирск - Якутск и Краснодар – Якутск

Козлов В.И.[1,2],
Корсаков А.А.[1], Муллаяров В.А.[1,2],
Каримов Р.Р.[1,2]

vkozlov@ikfia.sbras.ru

[1] Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

[2] Физико-технический институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

Во время солнечных вспышек происходит увеличение интенсивности рентгеновского излучения, являющегося основным источником ионизации нижней (D область: 60 – 85 км) ионосферы. Этот процесс приводит к повышению электронной концентрации. Такие резкие изменения приводят к внезапным фазовым аномалиям (ВФА) при регистрации электромагнитных сигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ: 3 – 30 кГц), способных распространяться на большие расстояния в волноводе земля – ионосфера [*Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. Москва: Мир. 1977. 370 с.*]. Такие вариации ОНЧ параметров дают возможность проводить дистанционный мониторинг околоземного пространства и изучать ионизационные процессы нижней ионосферы. В качестве эталонных ОНЧ сигналов используются сигналы радионавигационных станций.

В Якутске с 2009 года организована непрерывная регистрация сигналов радиостанций, расположенных около Новосибирска, Краснодара и Хабаровска, входящих в систему РСДН-20 («Альфа»).

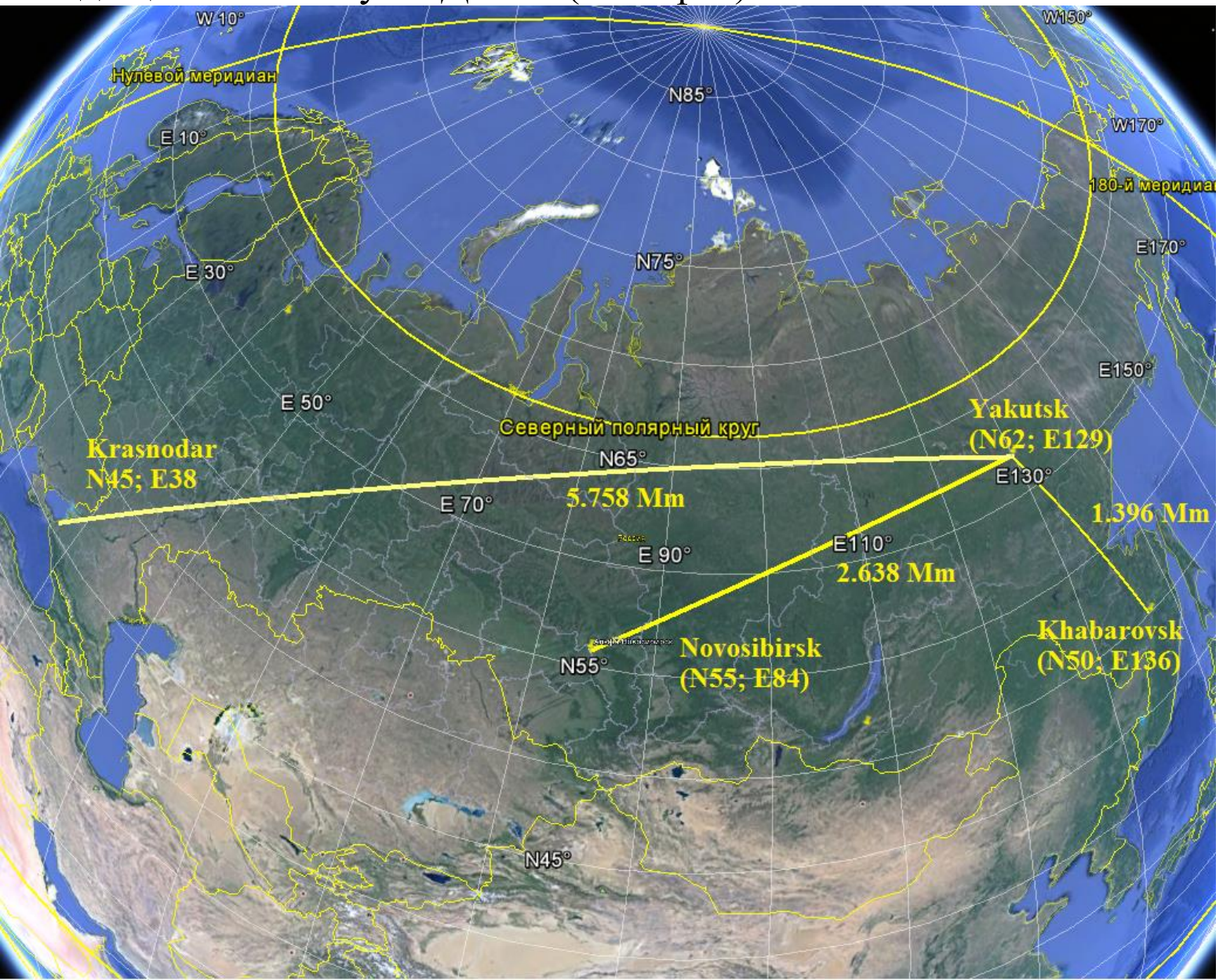
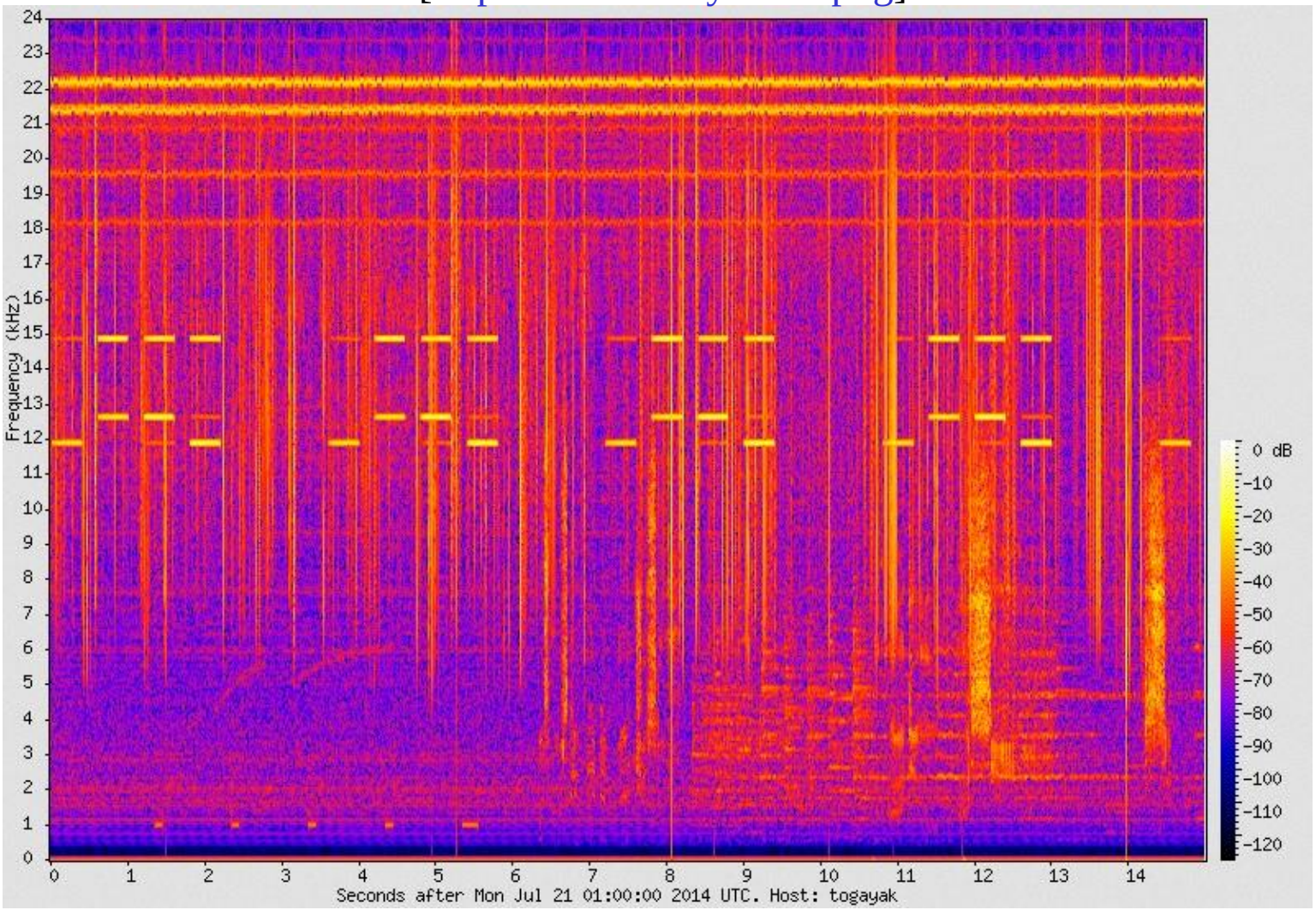


Рис. 1. Трассы распространения ОНЧ сигналов радиостанций

Рис. 2. Спектрограмма сигналов, регистрируемых в Якутске [http://wwlln.net/yak/vlf.png]



Радиостанции последовательно на частотах 11,9, 12,6 and 14,9 кГц. Период повторения импульсов: 3,6 с. Длительность каждого импульса 0,4 с, а пауза составляет 0,2 с.

Последовательность излучения сигналов РСДН-20:

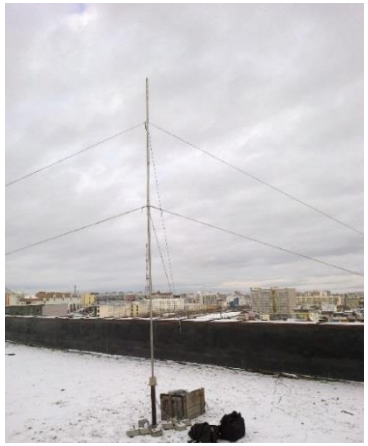
Segment station Frequency kHz	1	2	3	4	5	6
F3 14.880952 kHz	Novosibirsk	Novosibirsk F3p			Krasnodar	Khabarovsk
F2 12.648809 kHz	Khabarovsk	Krasnodar				Novosibirsk
F1 11.904761 kHz	Krasnodar	Khabarovsk			Novosibirsk	

Частоты РСДН-20

F0 744 1/21 Hz = 1MHz / 1344
F1 11904.76190 Hz = 16 x F0
F2 12648.80952 Hz = 17 x F0
F3 14880.95238 Hz = 20 x F0
F3p 14881.09127 Hz = F3 + (5/36)

Сигнал принимается штыревой антенной (эффективная высота 2 м), после предусиления передается на вход 14-разрядного АЦП. Высокая стабильность частоты дискретизации и управление запуском АЦП, необходимые для регистрации фазы радиосигналов, организованы с помощью GPS-часов.

Точность секундного импульса (PPS) составляет UTC ± 50 ns, а точность гармонического сигнала (10 МГц) составляет $1{,}16\times10^{-12}$ (3 сигма). Внешняя дискретизация АЦП частотой 2,5 МГц получена с помощью деления гармонического сигнала GPS (10 МГц).



whip antenna

GPS antenna

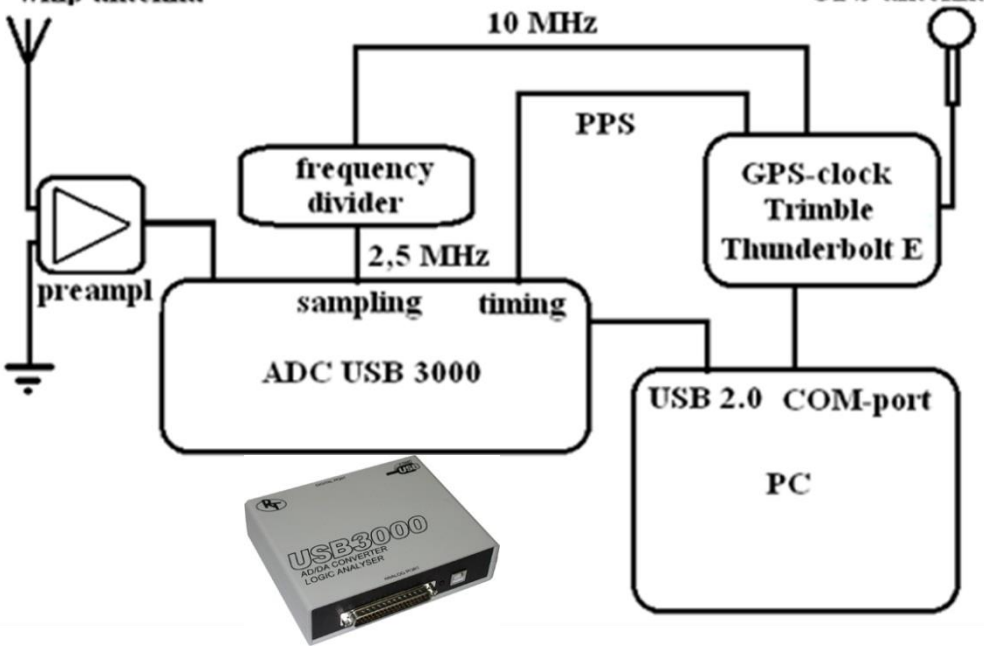


Рис.3. Блок-диаграмма регистратора в Якутске.

VLF receiver program interface

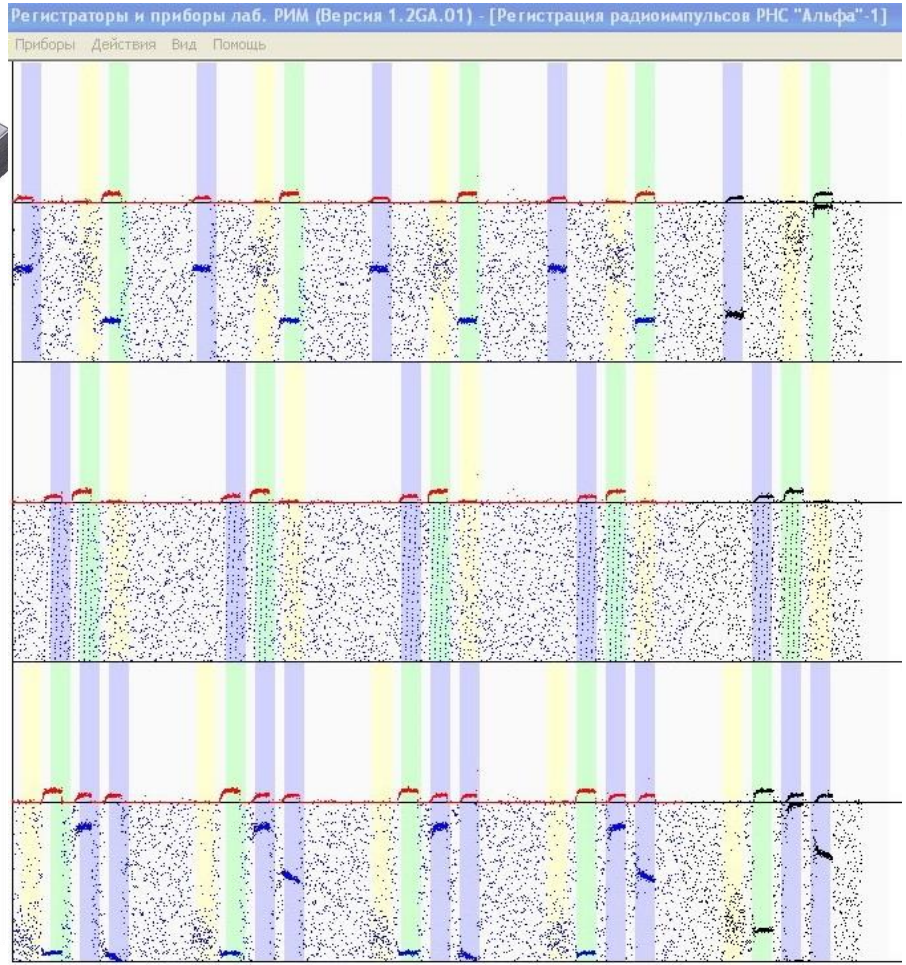
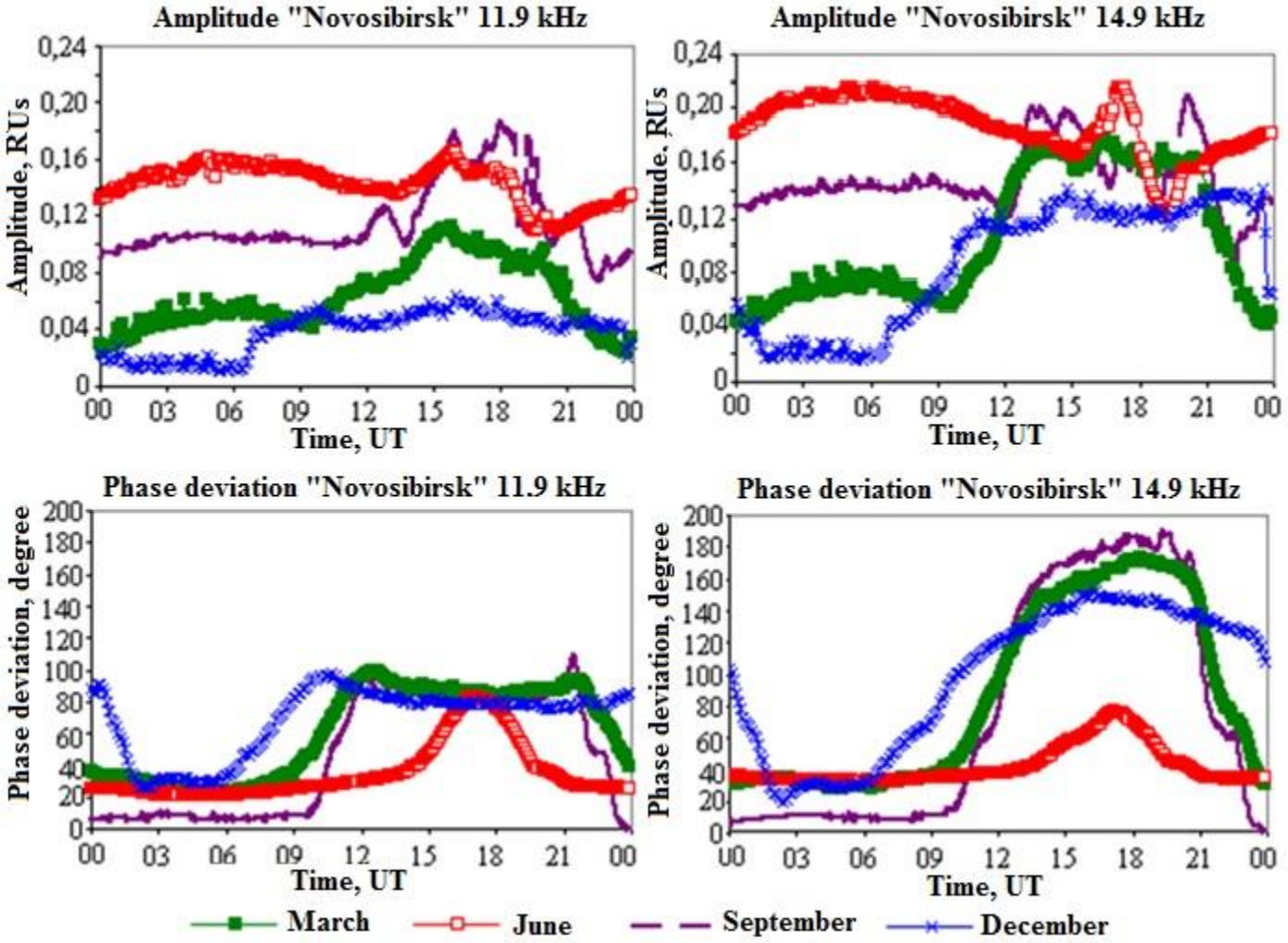
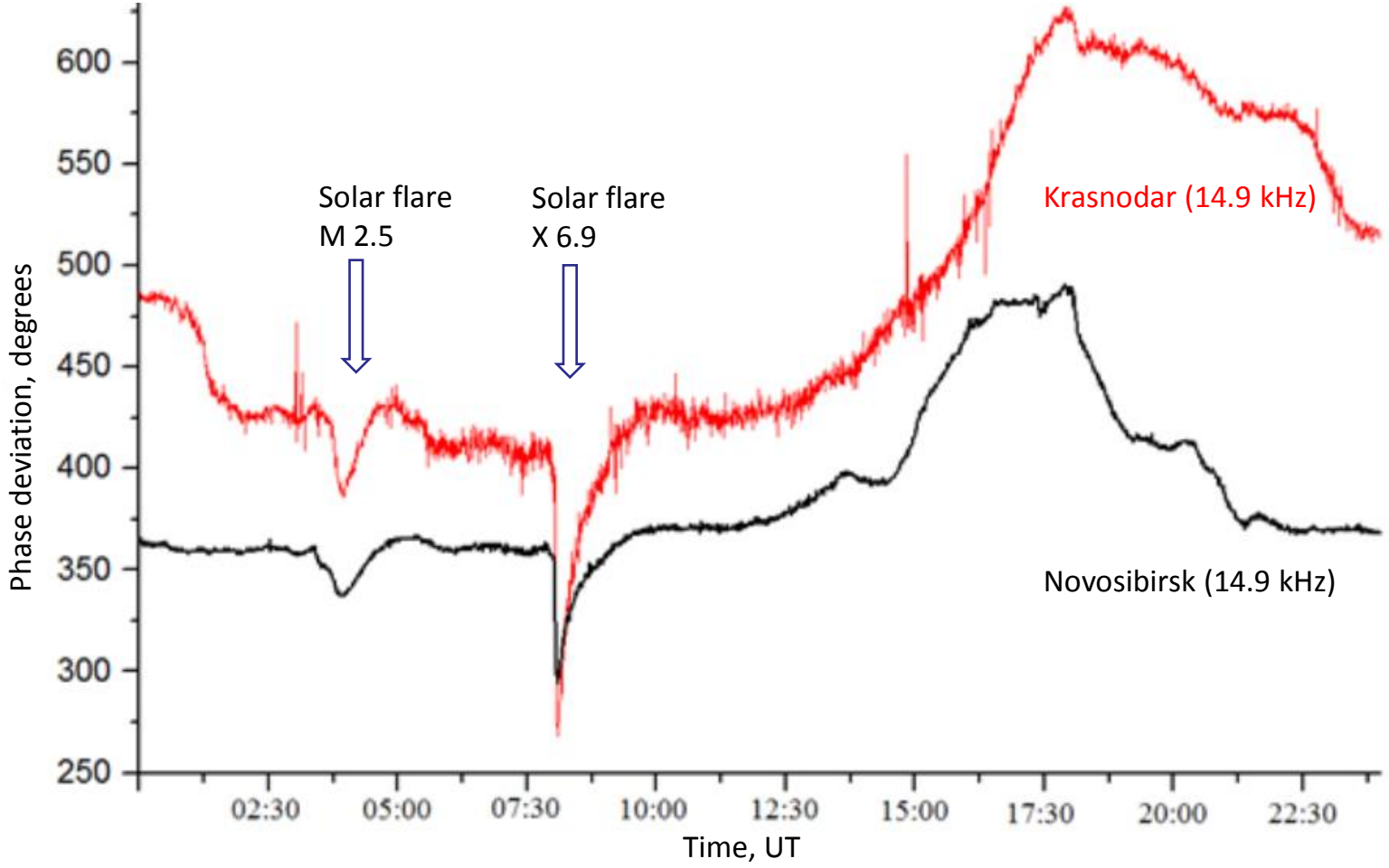


Рис.4. Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы (2009-2011 гг). Новосибирск 11,9 and 14,9 кГц.



- Суточные вариации амплитуды и фазы соответствуют затенению трассы распространения.
- Наблюдается асимметрия в сезонных дневных вариациях амплитуды и фазы (значения осеннего равноденствия ближе к летнему солнцестоянию, а значения параметров весеннего солнцестояния ближе к зимнему солнцестоянию).

Рис. 5. Эффекты отклонений фазы сигналов ОНЧ (ВФА) при солнечных вспышках класса M 2,5 (03:54 UT) и X6,9 (08:05 UT), 9 августа 2011. Радиосигналы Новосибирск и Краснодар (14,9 кГц), регистрируемые в Якутске.



Для описания зависимости ВФА от потока интенсивности рентгеновского излучения (P) 1- 8 Å и от зенитного угла Солнца (X) используется эмпирическое аппроксимирующее выражение: [Беленький М.И., Орлов А.Б., Пронин А.Е., Уваров А.Н. О зависимости величины ВФА СДВ от зенитного угла Солнца на протяжённых трассах в различных широтах // Труды VIII региональной конференции по распространению радиоволн. Санкт-Петербург. 2002 г., С. 25]:

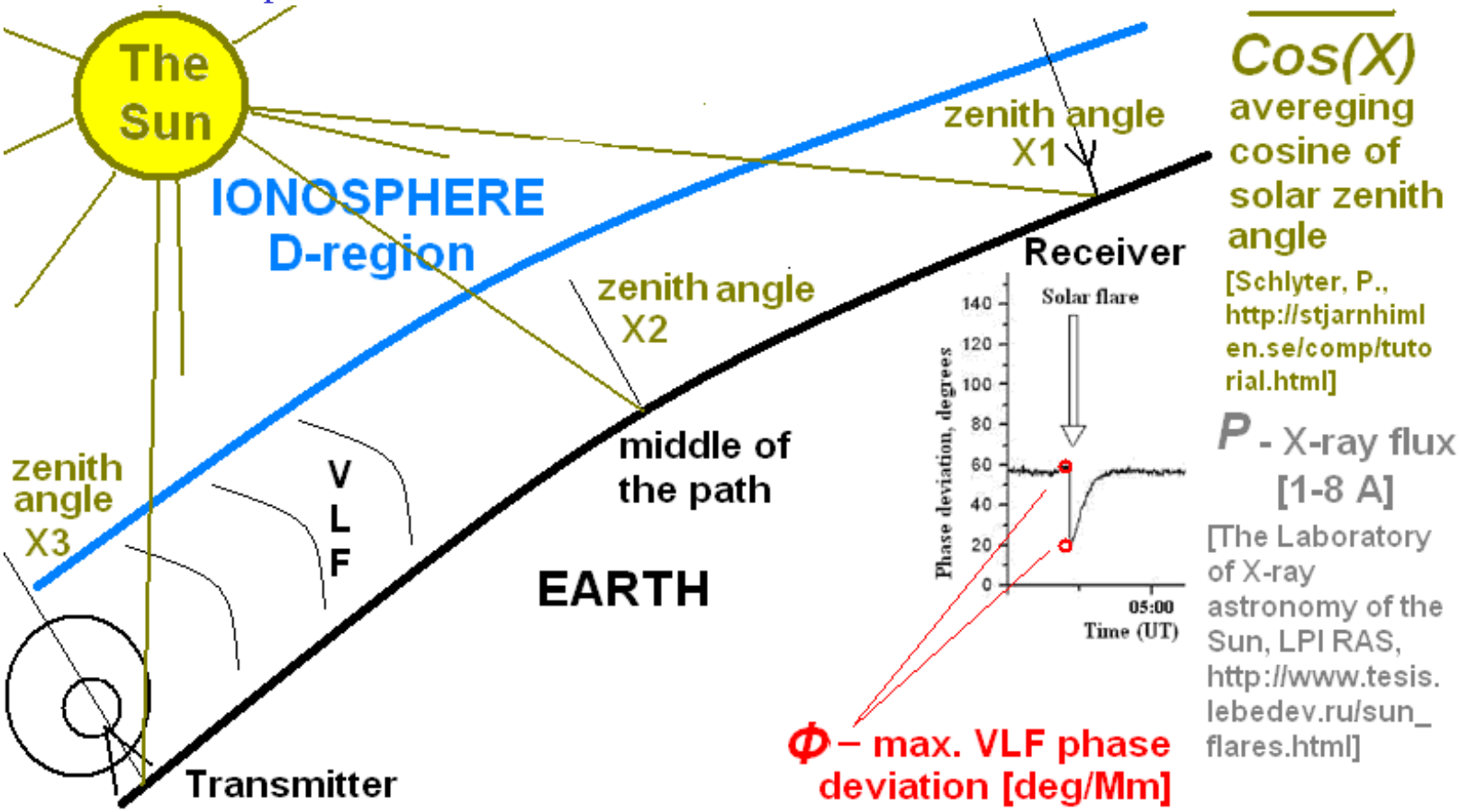
$$\Phi = A + B \cdot \lg(P) + C \cdot \lg(\overline{CosX}) \qquad (1)$$

где Φ – вариация фазы, приведённая к единице протяжённости трассы (градус / Мм);

P – поток интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 8 Å [Вт/м^2];

$\overline{CosX}$ – значение косинуса зенитного угла Солнца, усреднённого вдоль трассы распространения.

Для дневных условий распространения отобраны случаи ВФА (2009-2013 гг.) для сигналов станций Новосибирск и Краснодар (14,9 кГц), регистрируемых в Якутске. Оценены параметры модели (1) как для летних, так и для зимних событий. Зенитный угол Солнца по заданным координатам на трассе определялся с помощью алгоритма [Schlyter, P., "Computing planetary positions – a tutorial with worked examples", http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html].



A, B, and C

The least squares method

$$\Phi = A + B \cdot Lg(P) + C \cdot Lg(\overline{Cos(X)}) \qquad (1)$$

Таблица 1. Параметры зависимости ВФА от интенсивности рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца

$$\Phi = A + B \cdot \lg(P) + C \cdot \lg(\overline{CosX}) \qquad (1)$$

Трасса	Сезон	Объём выборки	*A*	*B*	*C*	Среднекв. значение остаточных невязок *S*
Новосибирск – Якутск	лето	33	53,67±3,08	9,26±0,62	6,06±3,02	1,77
	зима	20	60,97±5,03	10,78±0,93	2,17±1,75	1,71
Краснодар - Якутск	лето	30	51,14±2,36	8,87±0,47	5,85±2,23	1,19
	зима	14	64,64±13,31	11,56±2,64	2,45±3,22	2,77

- Соотношение *A* и *B* (пороговая чувствительность ВФА по потоку излучения *P*) слабо зависит от сезона.
- Отклонение фазы при фиксированных *P* и *X* от лета к зиме на рассматриваемых трассах увеличивается ($A_{лето} < A_{зима}$).
- Зависимость вариаций фазы (ВФА) на трассе Новосибирск-Якутск от *Cos(X)* отчётливей летом ($C_{лето} = 6{,}06 > C_{зима} = 2{,}17$).
- Зависимость ВФА на трассе Краснодар-Якутск от *Cos(X)* менее четкая зимой, из-за распространения вдоль большого интервала по долготе, дуга трассы пересекает высокие широты.

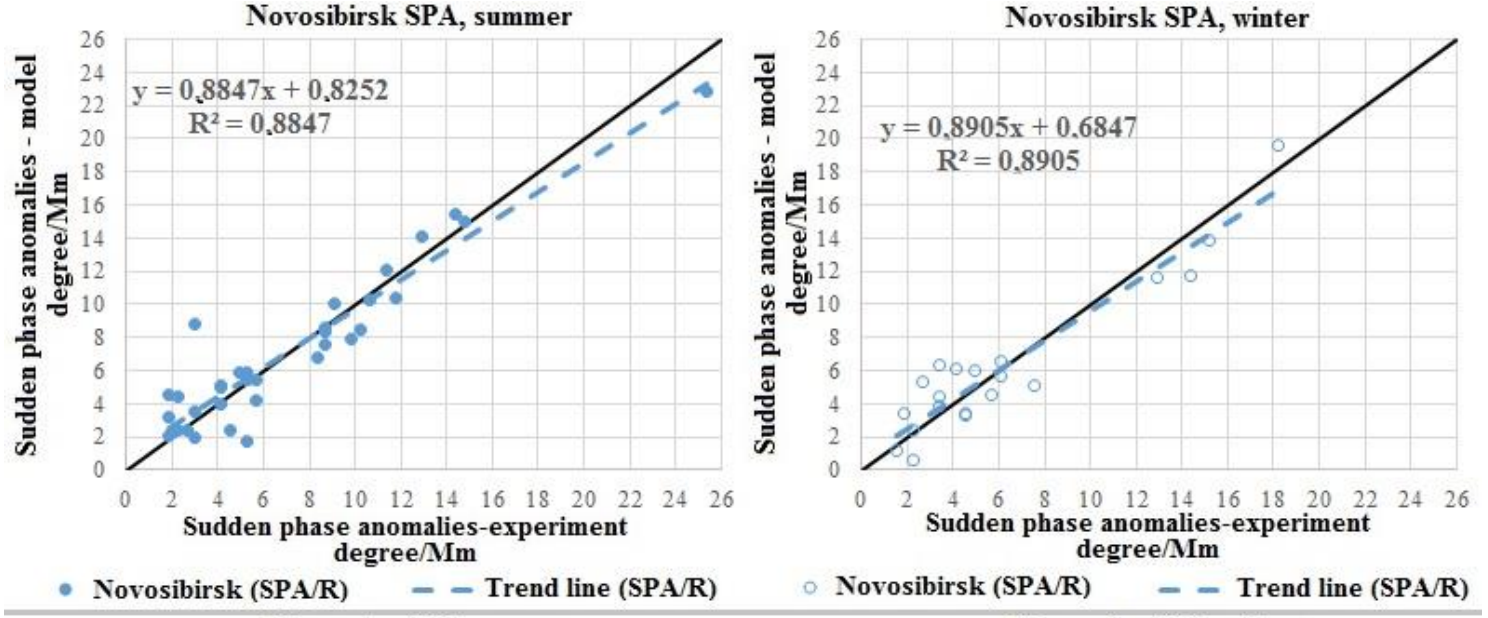
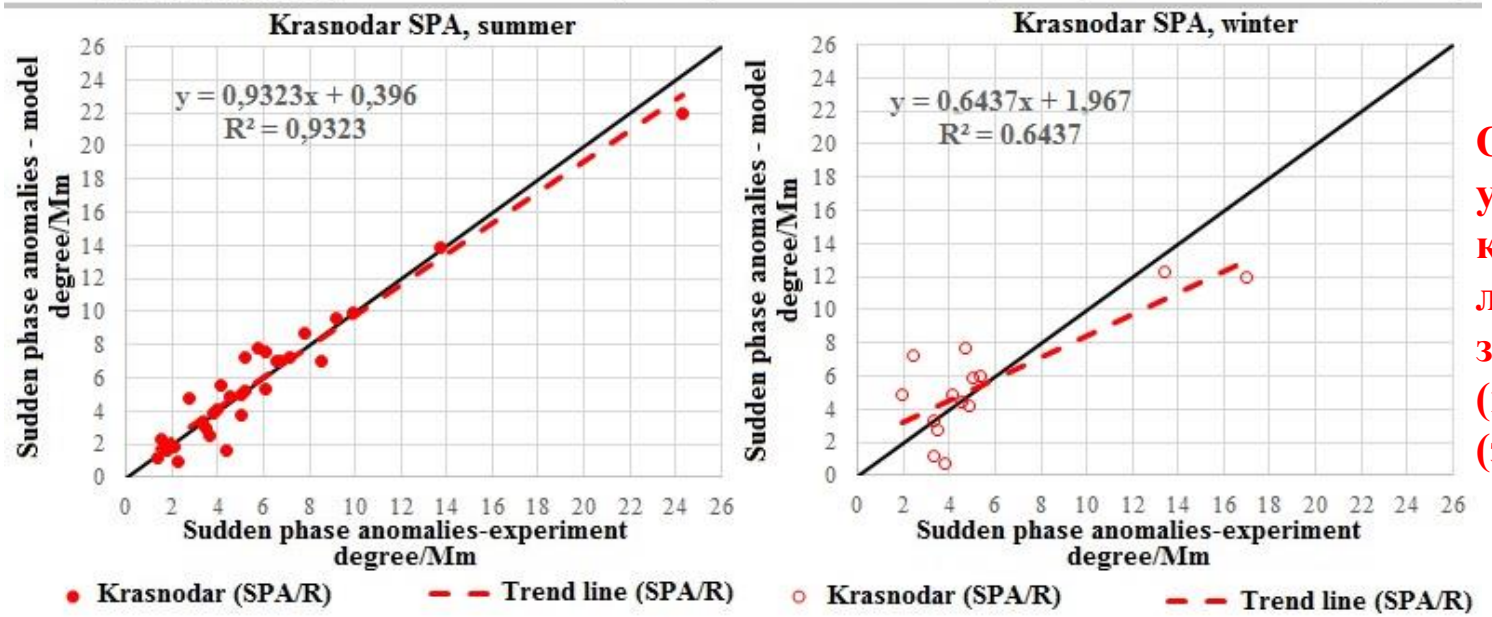


Рис. 6. Сравнение модельных значений ВФА с экспериментальными данными.



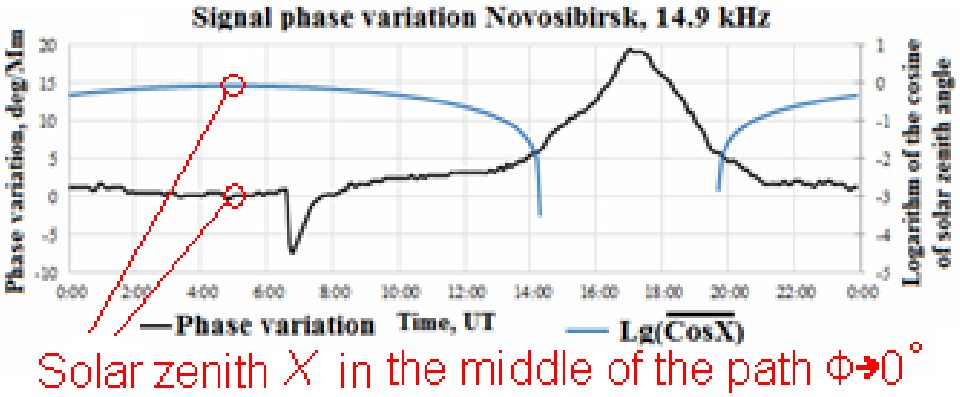
Определены усреднённые коэффициенты линейной зависимости ВФА (модель) от ВФА (эксперимент).

Полученные значения сосредоточены близко к прямой ВФА (модель) = ВФА (эксперимент), возможность описания линейным трендом (R^2> 0,6) свидетельствует об адекватности выбранной модели и оценок её параметров.

Оценка фонового потока рентгеновского излучения

С помощью выражения (1) для дневных условий распространения сигнала Новосибирск (14,9 кГц) вариации фазы (с усреднением 6 мин) сопоставлялись с усреднённым вдоль трассы распространения значением косинуса зенитного угла и потоком рентгеновского излучения (с усреднением 6 мин) [NOAA National geophysical data center. Solar-Terrestrial Physics, http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_full]. Вариация фазы отсчитывалась относительно значения, соответствующего времени минимального зенитного угла Солнца на середине трассы.

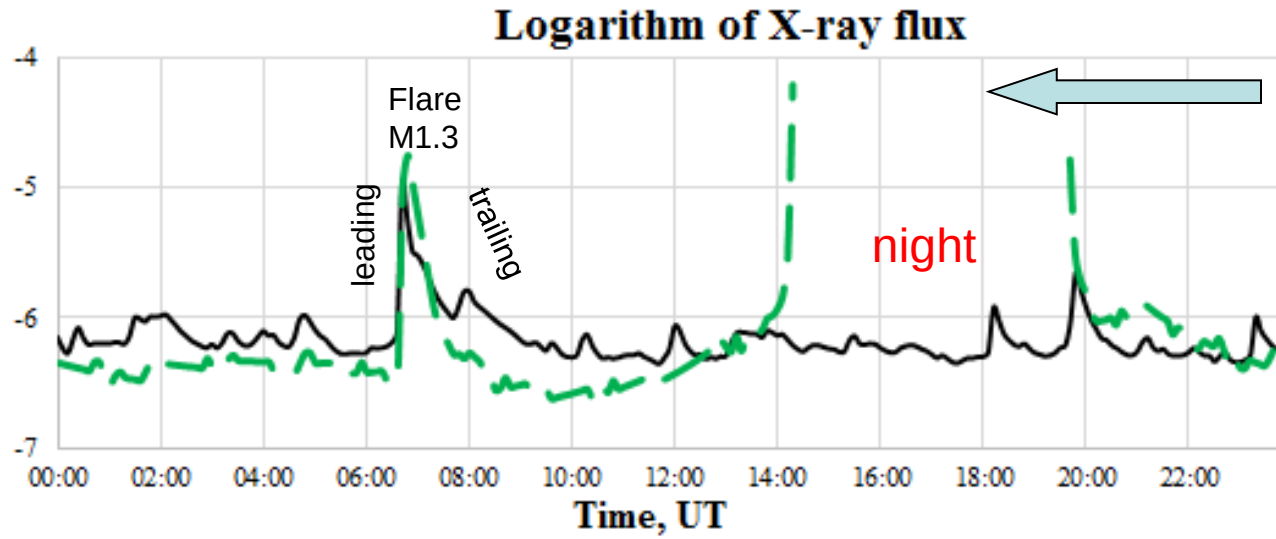
$$\Phi = A1 + B1 \cdot \lg(P) + C1 \cdot \lg(\overline{CosX})$$



Вариация фазы приводилась к протяжённости трассы распространения радиосигнала (Новосибирск-Якутск: 2,638 Мм). Коэффициенты *A1*, *B1* and *C1* получены методом наименьших квадратов. Параметры модели (1) представлены в Таблице, где также указаны среднеквадратичные значения остаточных невязок *S1* модели и экспериментальных значений вариаций фазы (градус / Мм).

Path	Season	Sample size	*A1*	*B1*	*C1*	Среднекв. значение остаточных невязок *S1*
Novosibirsk – Yakutsk	summer	820	-31.10±0.92	-4.81±0.15	-4.83±0.32	1.60
	winter	322	-21.67±1.43	-3.03±0.20	-5.08±0.53	1.59

Соответствие моделируемых значений и спутниковых данных имеет удовлетворительную оценку для дневных условий.



Соответствие значений потока нарушается в ночных условиях распространения ОНЧ сигналов

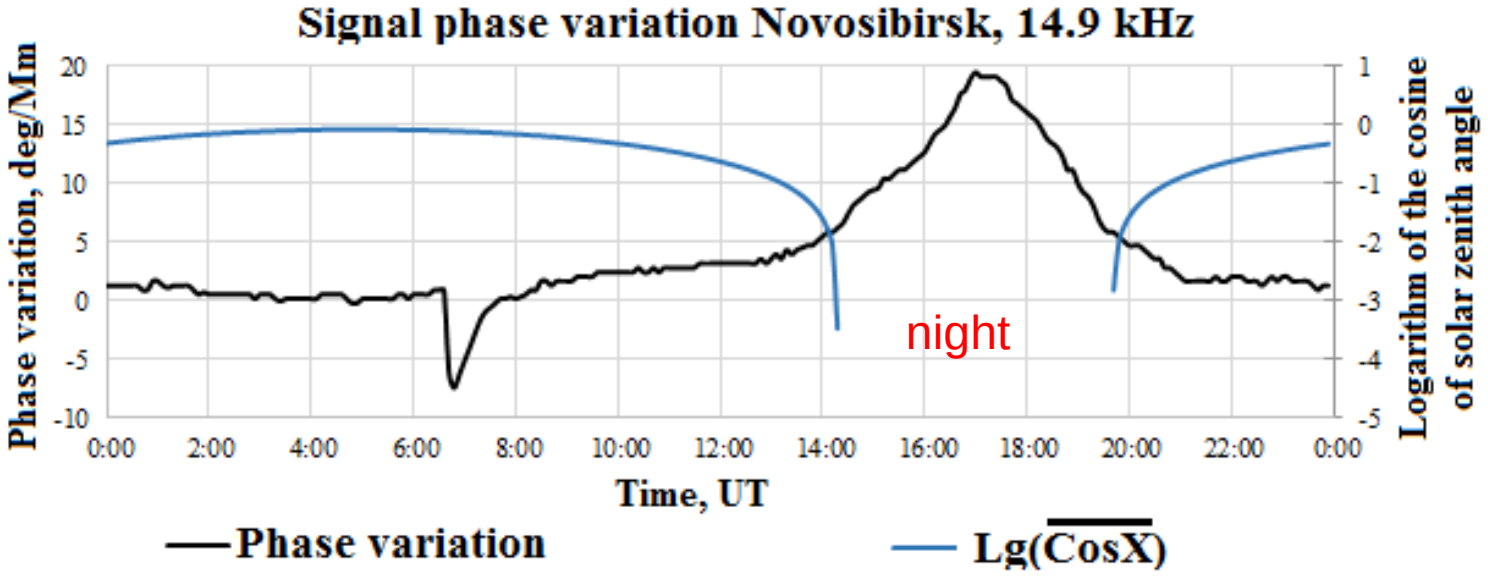
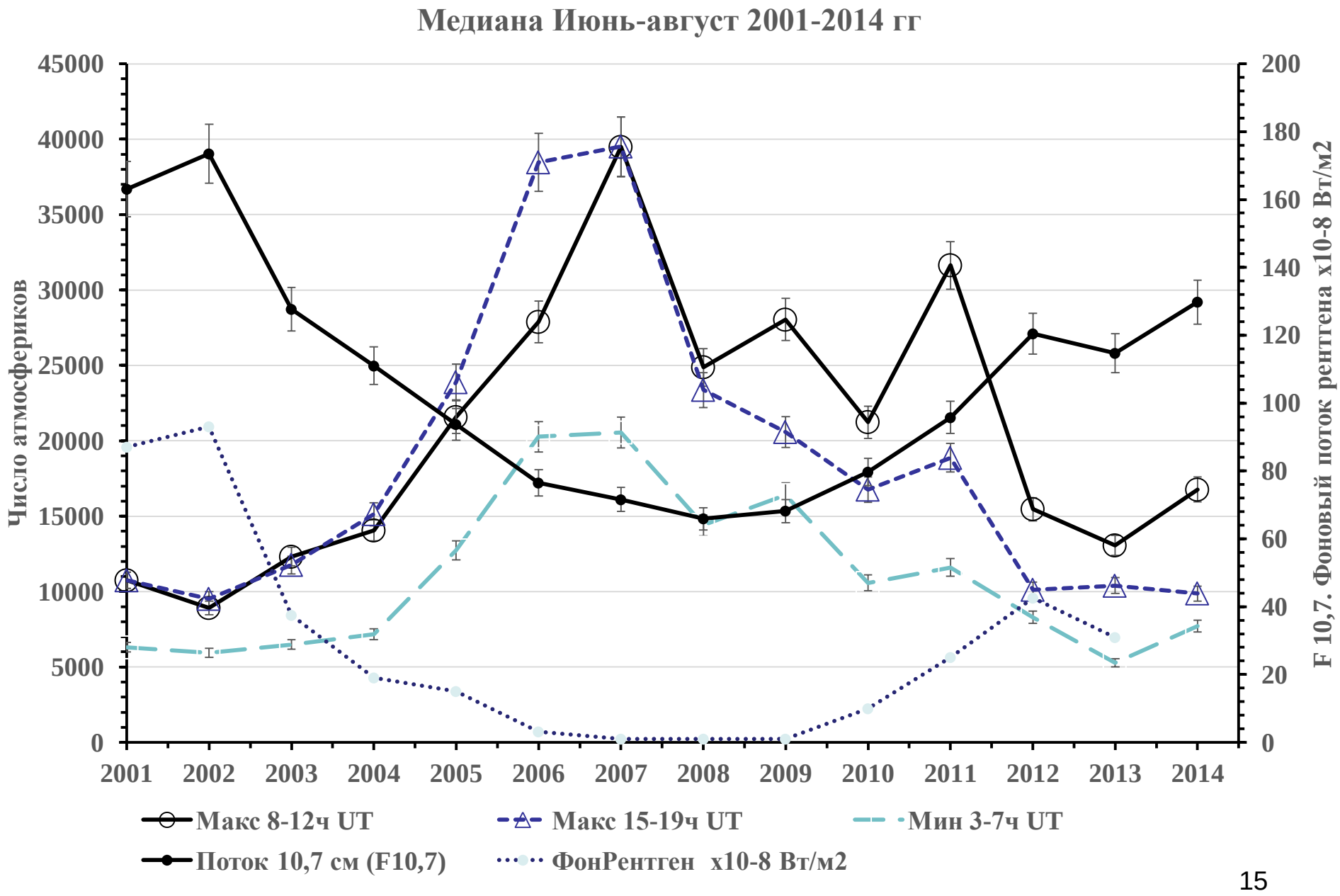
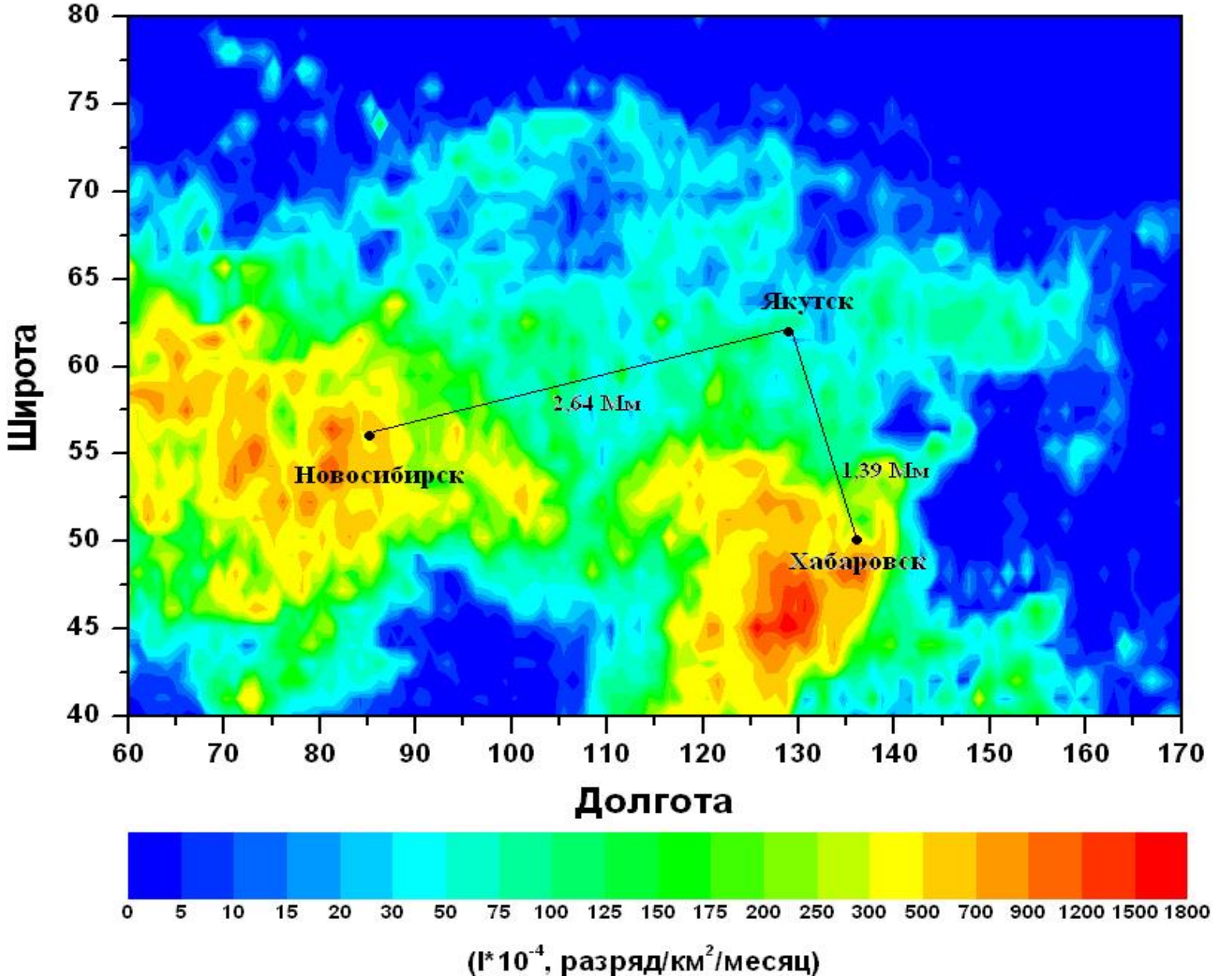
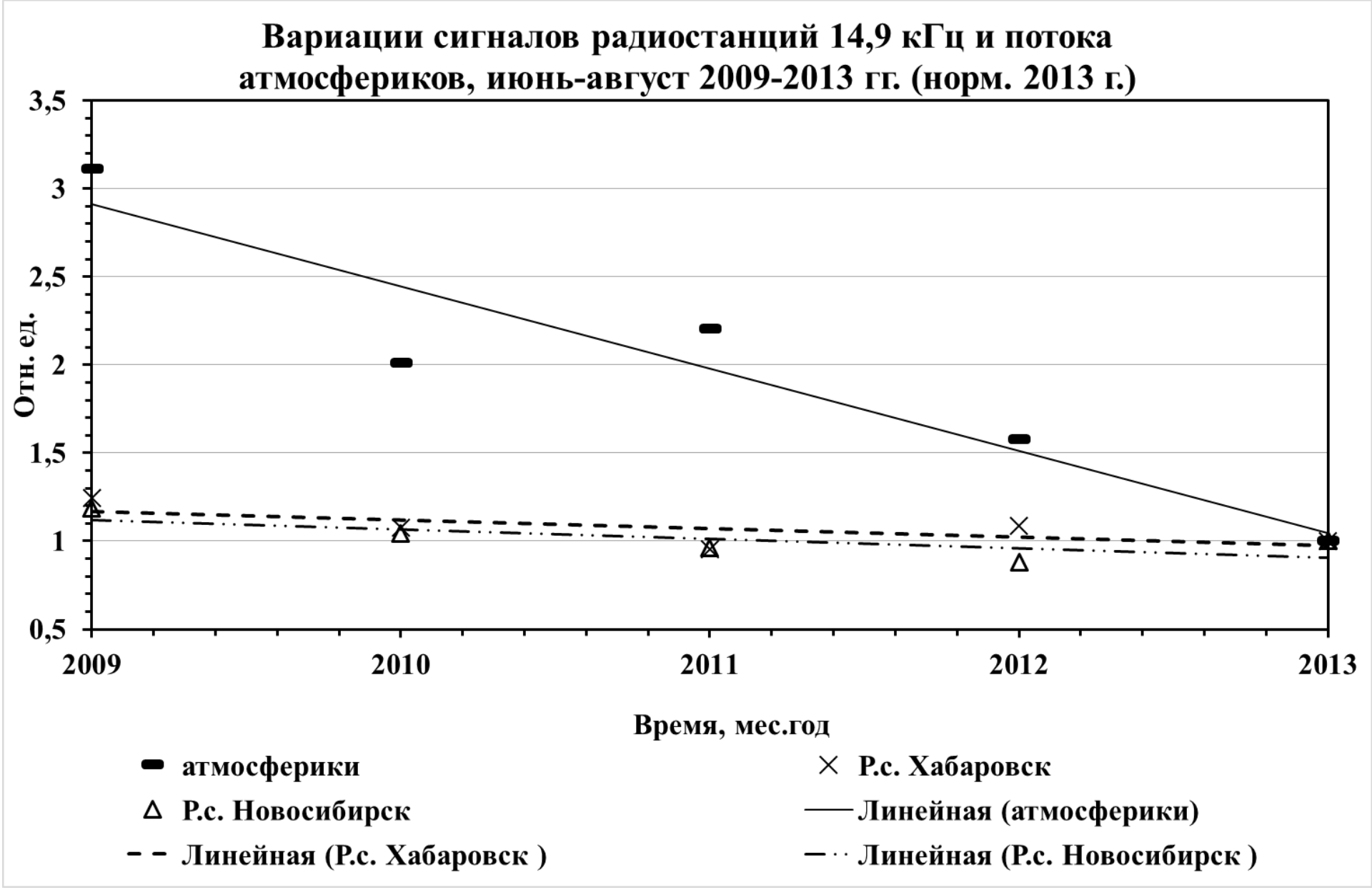


Рис. 7. Сравнение данных о потоке рентгеновского излучения (GOES-15) со значениями, полученными по модели, по данным о вариациях фазы сигнала Новосибирск (14,9 кГц) и косинуса зенитного угла на трассе Новосибирск-Якутск (10 июня 2012).


Медиана Июнь-август 2001-2014 гг
Число атмосфериков
F 10,7. Фоновый поток рентгена x10-8 Вт/м2
45000
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
Макс 8-12ч UT
Макс 15-19ч UT
Мин 3-7ч UT
Поток 10,7 см (F10,7)
ФонРентген x10-8 Вт/м2



Усреднённая плотность грозовых разрядов в летний период 2009-2010 гг.


Вариации сигналов радиостанций 14,9 кГц и потока атмосфериков, июнь-август 2009-2013 гг. (норм. 2013 г.)
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
Отн. ед.
2009
2010
2011
2012
2013
Время, мес.год
атмосферики
Р.с. Хабаровск
Р.с. Новосибирск
Линейная (атмосферики)
Линейная (Р.с. Хабаровск)
Линейная (Р.с. Новосибирск)

Заключение

•Рассмотрены ВФА сигналов радиостанций Краснодар и Новосибирск при регистрации в Якутске. Показано, что пороговая чувствительность ВФА по потоку излучения *P* (отношение *A* и *B*) слабо зависит от сезона.

•При фиксированном потоке излучения *P* и косинусе зенитного угла Солнца *X*, отклонение фазы от лета к зиме на рассматриваемых трассах увеличивается ($A_{лето} < A_{зима}$).

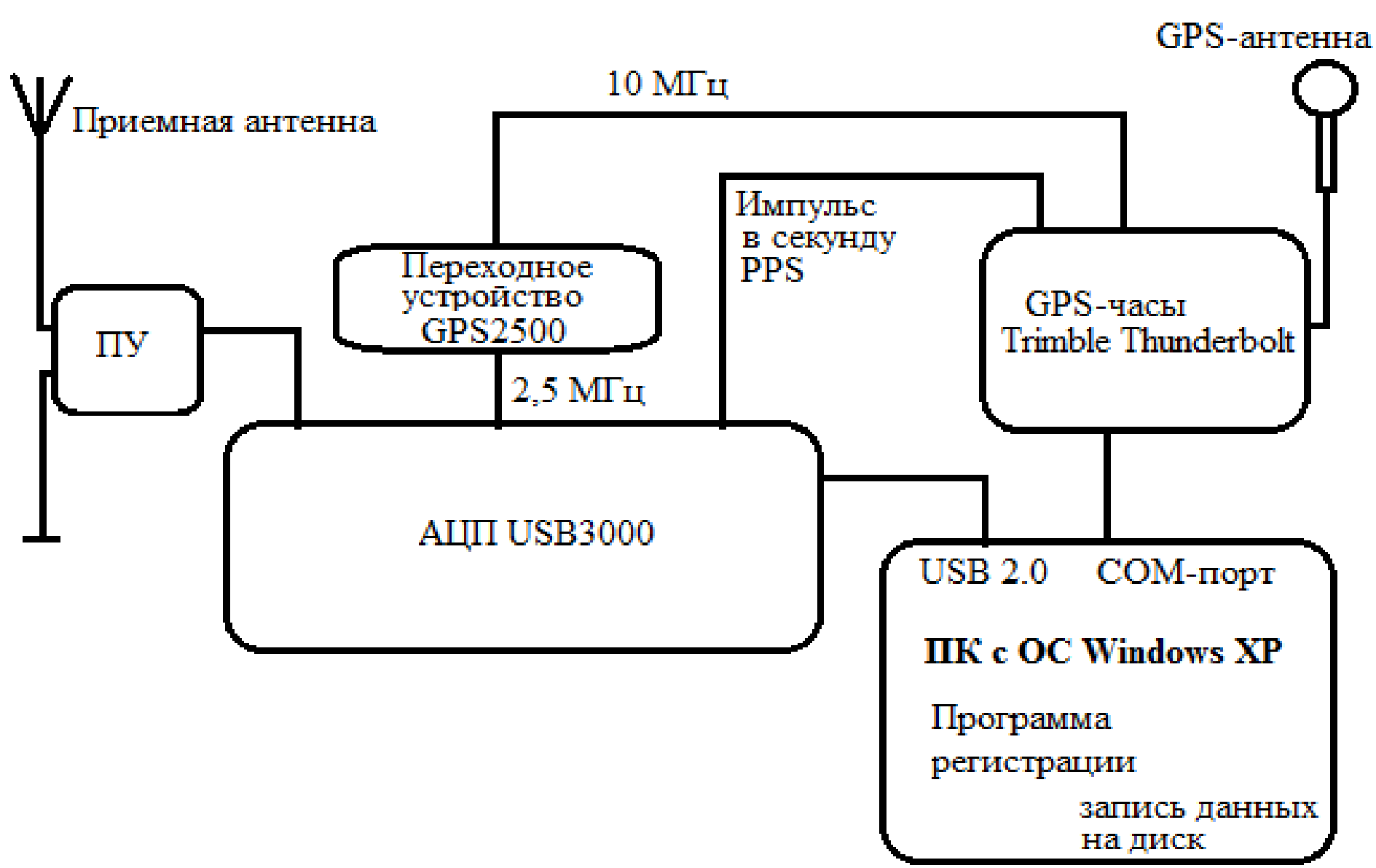
•Зависимость вариаций фазы (ВФА) на трассе Новосибирск-Якутск от *Cos(X)* отчётливей летом ($C_{лето} = 6{,}06 > C_{зима} = 2{,}17$).

•Проведена адаптация параметров модели вариаций фазы ОНЧ сигналов в зависимости от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца как для внезапных ионосферных возмущений, так и в невозмущённых условиях распространения на протяжённой трассе Новосибирск-Якутск (2,638 Мм).

Спасибо за внимание!

Благодарности:

•Отдельная благодарность Орлову Александру Борисовичу (СПбГУ) за замечания и проявленное внимание к работе.
•Работа выполнена при поддержке РФФИ: № 12-05-98528-р_восток_а, № 12-02-00174-а, № 14-05-31056 мол_а.
•Работа выполнена при поддержке «Научно-образовательного фонда поддержки молодых учёных Республики Саха (Якутия)» № 2014-01-0015.



Блок-схема регистратора радиосигналов радиостанций и ОНЧ радиошума