

МЕЖДУНАРОДНАЯ БАЙКАЛЬСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА
ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ



**МЕТОД ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛОСЫ
КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ
ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА**

Авторы: д.ф.-м.н., профессор Рябова Н.В., канд. техн. наук Кислицын А.А., аспирант Конкин Н.А.

Иркутск, 2022

Актуальность:

Для достижения эффективных показателей систем спутниковой связи существует необходимость в расширении полосы частот сверх полосы когерентности (предельно допустимой полосы канала) при влиянии фактора частотной дисперсии ионосферной плазмы и возможности дальнейшего прогнозирования полосы когерентности с использованием методов машинного обучения.

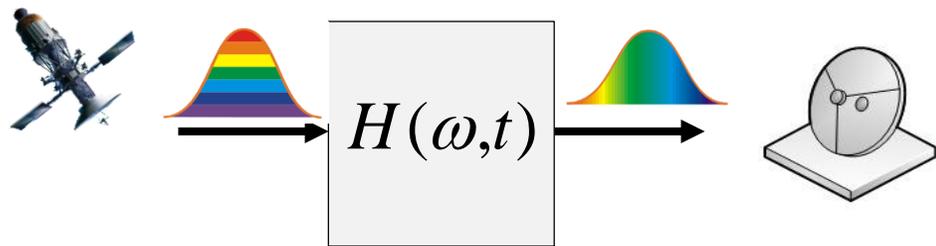
Цель работы:

Создание метода интеллектуального анализа данных для прогнозирования значений полосы когерентности с использованием методов машинного обучения.

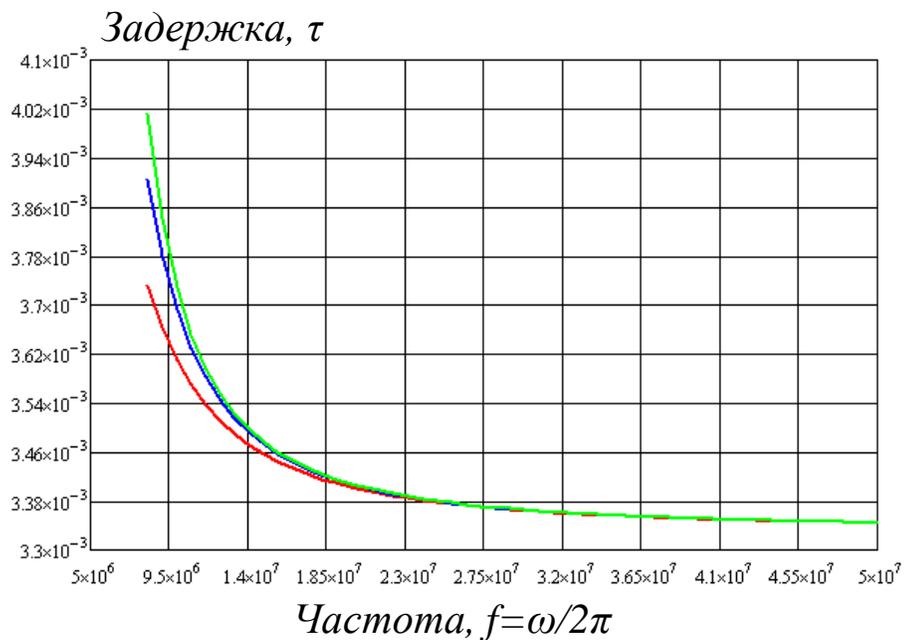
Решаемые задачи:

- I. Анализ особенностей трансionoсферного распространения сигналов;**
- II. Развитие математической модели для оценки полосы когерентности с учётом полученных первичных данных глобальных навигационных спутниковых систем;**
- III. Реализация алгоритма для обучения моделей прогнозирования значений полосы когерентности с применением интеллектуального анализа данных;**
- IV. Верификация метода**

Характеристики трансионосферного радиоканала



Линейная одномерная система



Дисперсионная характеристика трансионосферного радиоканала

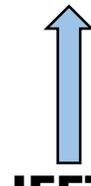
КАНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Частотная характеристика канала

$$H(\omega, t) = \underbrace{H_0(\omega, t)}_{\text{АЧХ}} \exp[-j \underbrace{\varphi(\omega, t)}_{\text{ФЧХ}}] \quad (1)$$

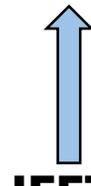
FFT:

$$h(\tau) = F[H(\omega)]$$



IFFT:

$$H(\omega, t) = F^{-1}[h(\tau, \omega)]$$



Импульсная характеристика

$$h(\tau, \omega) = F[H(\omega, t)] \quad (2)$$

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Фазо-частотная характеристика канала

$$\varphi(\omega, t) = \varphi(\bar{\omega}, t) + \varphi'_\omega \cdot \Omega + \varphi''_\omega \cdot \frac{\Omega^2}{2!} + \varphi'''_\omega \cdot \frac{\Omega^3}{3!} + \dots \approx \quad (3)$$

$$\approx \underbrace{\varphi(\bar{f}, t) + 2\pi\tau_g(f, t) \cdot (F)}_{\text{линейная часть}} + \underbrace{\pi s(f, t)(F)^2 + \frac{\pi}{3}v(f, t)(F)^3}_{\text{нелинейная часть}}, \quad F \in \left[-\frac{B_{ch}}{2}, \frac{B_{ch}}{2}\right]$$

линейная часть

нелинейная часть

Особенности трансionoсферных каналов радиосвязи

Трансионoсферное распространение $\longrightarrow \left(\frac{\omega_0^2(z)}{\omega^2}\right) < 1$

Показатель преломления для трансionoсферных радиолиний:

$$n(z) = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0^2(z)}{\omega^2}\right)} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_0^2(z)}{f^2}\right) - \frac{1}{8} \left(\frac{f_0^2(z)}{f^2}\right)^2 - \frac{1}{16} \left(\frac{f_0^2(z)}{f^2}\right)^3 - \dots =$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{k \cdot N_e}{f^2}\right) - \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{k \cdot N_e}{f^2}\right)^2 - \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{k \cdot N_e}{f^2}\right)^3.$$

(4)

ФЧХ для трансionoсферных радиолиний:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{c_s} \int [\omega \cdot n(\omega, z)] dz \approx$$

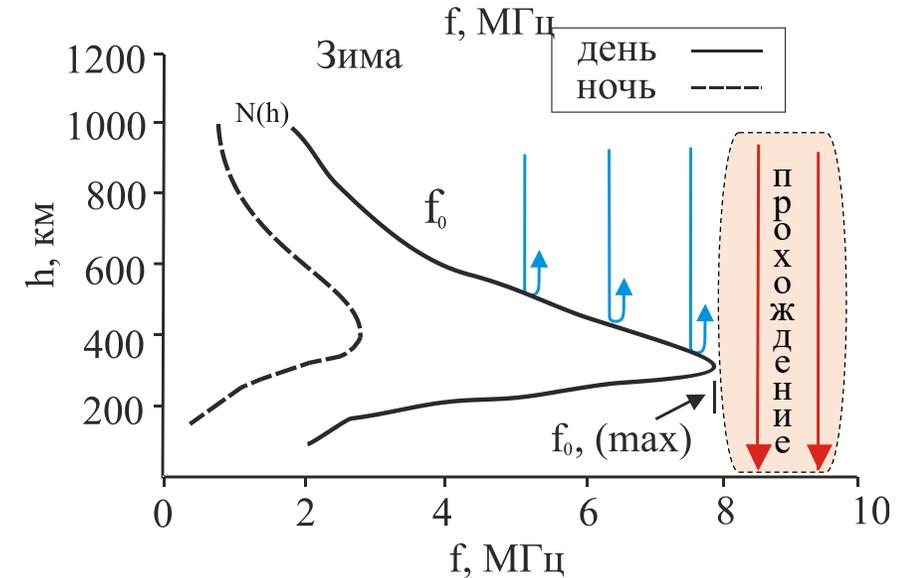
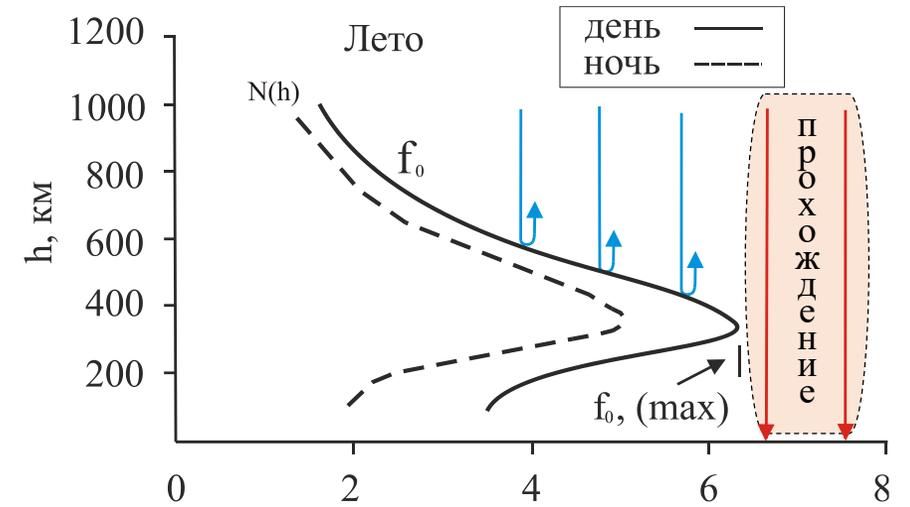
$$\approx \omega \int_s \frac{dz}{c} - \left[\frac{1}{f} \frac{\pi k}{c_s} \int N_e(z) dz + \frac{1}{f^3} \frac{\pi k^2}{4c_s} \int N_e^2(z) dz + \frac{1}{f^5} \frac{\pi k^3}{8c_s} \int N_e^3(z) dz \right] =$$

$$= \omega \int_s \frac{dz}{c} - \left[\alpha_1 / f + \alpha_2 / f^3 + \alpha_3 / f^5 \right],$$

(5)

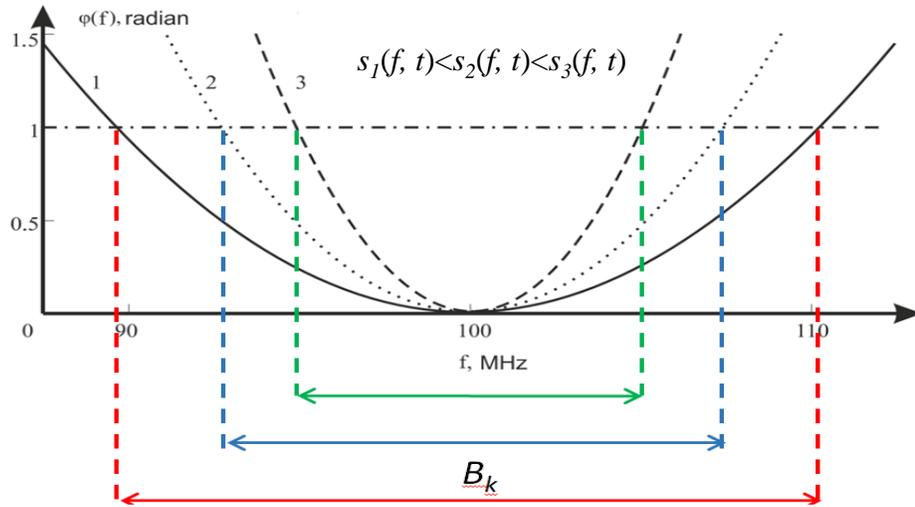
где $\alpha_1 = 8,43 \cdot 10^{-7} \cdot \int_s N_e(z) dz$; $\alpha_2 = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \int_s N_e^2(z) dz$; $\alpha_3 = 6,82 \cdot 10^{-4} \cdot \int_s N_e^3(z) dz$ – коэффициенты дисперсии изменчивого трансionoсферного радиоканала; $k = 80,5 \text{ [м}^3/\text{с}^2]$;

$N_t = \int_s N_e(z) dz$ – полное электронное содержание ионосферы [м^{-2}]

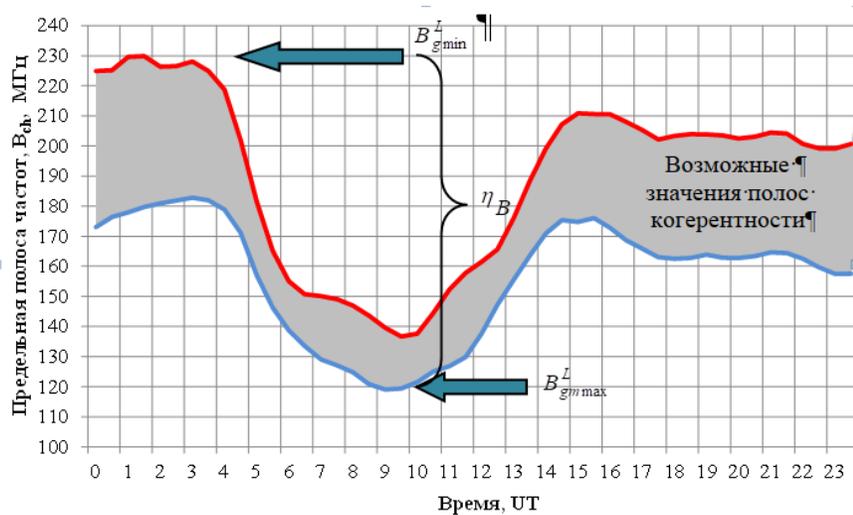


К вопросу особенностей трансionoсферных радиоканалов

Определение полосы когерентности трансионосферных радиоканалов



К пояснению понятия полосы когерентности



Пример суточного хода полосы когерентности для волнового пакета на опорной частоте

Полоса когерентности ограничивает полосу неискаженной передачи

$$B_k = \gamma / \sqrt{\pi \cdot |s|} \quad (6)$$

При известном параметре дисперсии второго порядка $s(\bar{f}, t) = -(1/\pi) \cdot (\alpha_1 / \bar{f}^3)$

$$B_k = \gamma / \sqrt{\pi \cdot |s(\bar{f}, t)|} = \sqrt{\frac{\gamma^2 \cdot c \cdot \bar{f}^3}{\pi k N_t}} = \sqrt{\frac{\gamma^2 \cdot \bar{f}^3}{\alpha_1}} \quad (7)$$

$$\alpha_1 = 8,43 \cdot 10^{-7} \cdot \int_s N_e(z) dz;$$

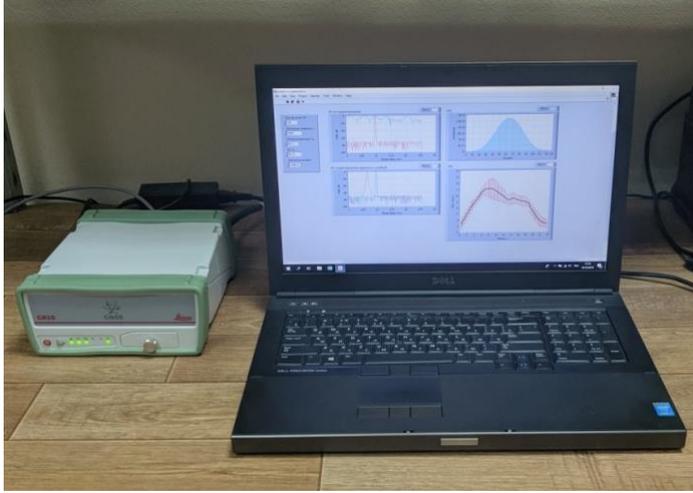
Выражение пересчёта для полосы когерентности на опорной частоте 1 ГГц будет иметь вид:

$$B_k = \sqrt{((\gamma^2 \cdot f_r^3) / (\alpha_1)) \cdot \hat{f}^3} = B_{kr} \cdot (\hat{f})^{1,5} \quad (8)$$

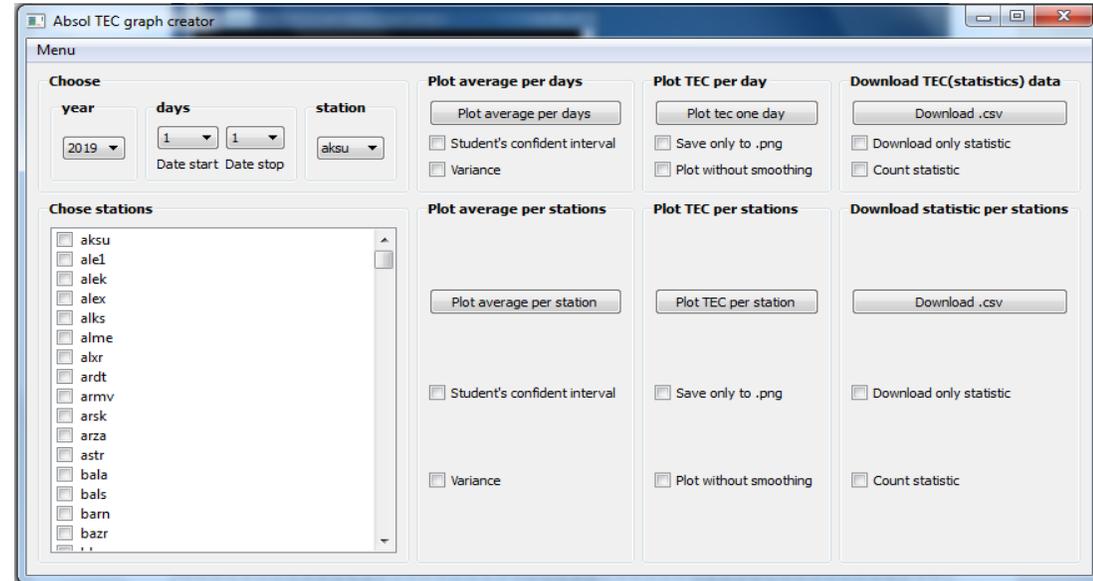
где $\hat{f} = \bar{f} / f_r$ – относительная частота; f_r – опорная частота;
 $B_{kr} = \mu_r \cdot N_t^{-1/2}$ – полоса когерентности для канала на опорной частоте;
 $\mu_r = \sqrt{((\gamma^2 \cdot f_r^3) / (\alpha_1))}$ – коэффициент для частоты, выбранной в качестве опорной.

Введение относительных частот позволяет разделить в исследованиях влияние двух факторов: геофизического, связанного с изменением ПЭС ионосферы и системного (рабочая частота).

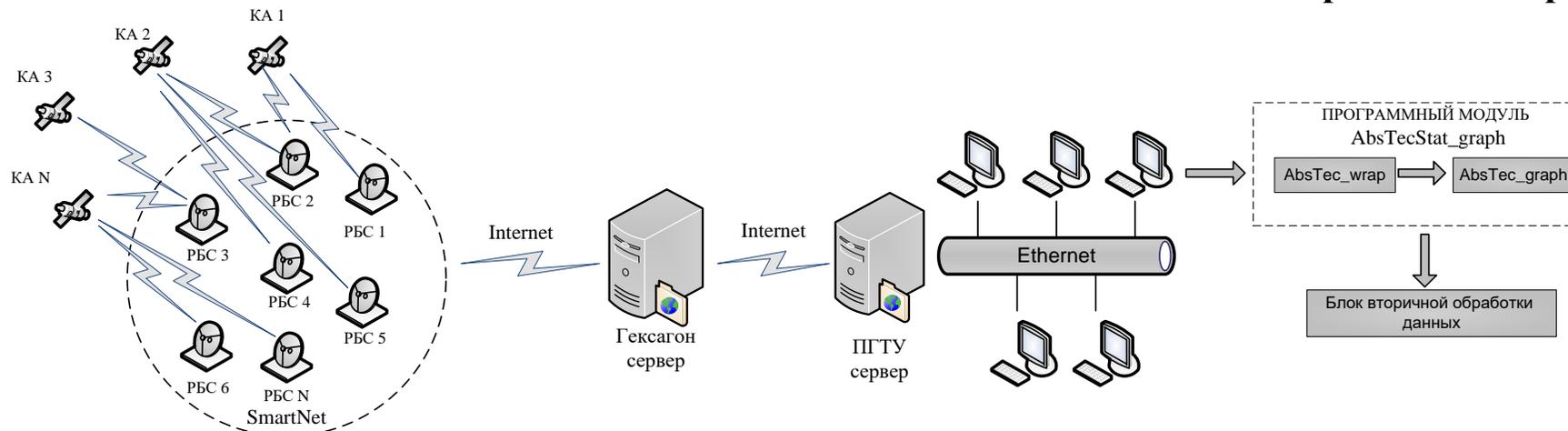
Экспериментальная техника и условия проведения экспериментов



Аппаратно-программный комплекс
для исследования



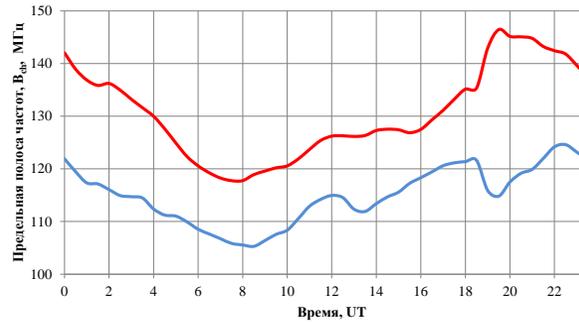
Интерфейс программы, предназначенной для построения
полного электронного содержания



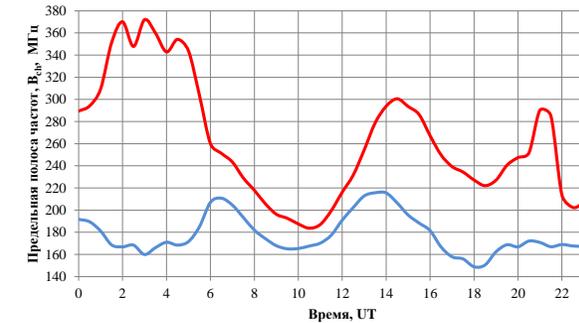
Структурная схема комплекса

Полоса когерентности трансионосферных радиоканалов

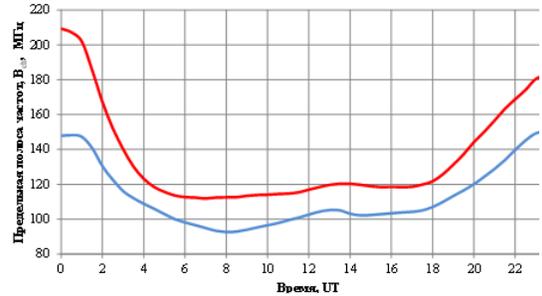
Станция MUSK, июнь - 2018



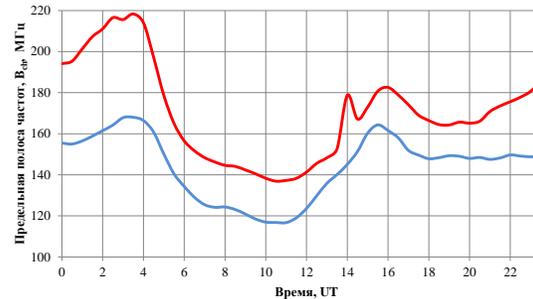
Станция MUSK, декабрь - 2018



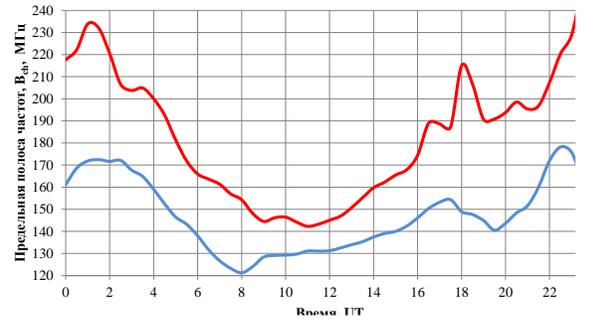
Станция ROST, июнь - 2018



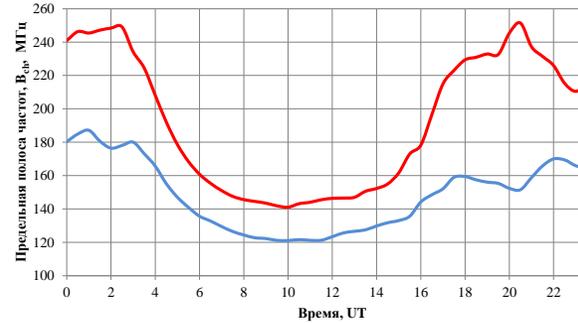
Станция ROST, декабрь - 2018



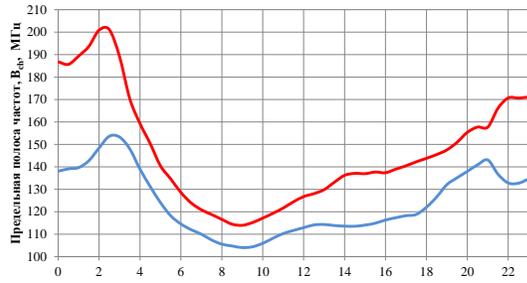
Станция MUSK, сентябрь - 2018



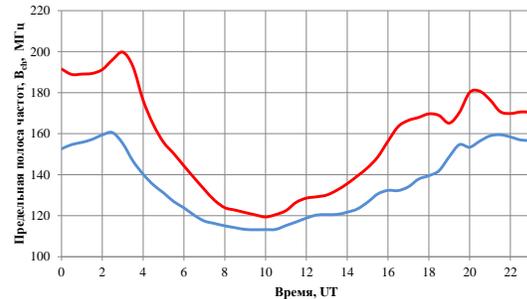
Станция MUSK, март - 2019



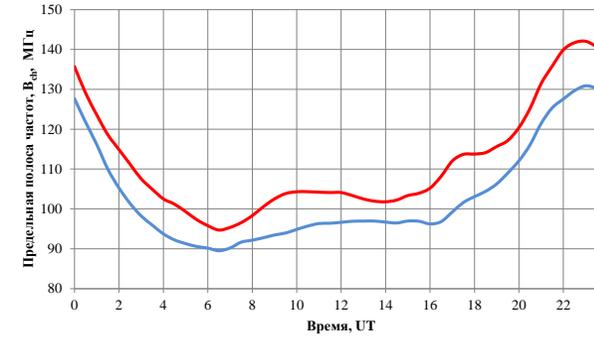
Станция ROST, сентябрь - 2018



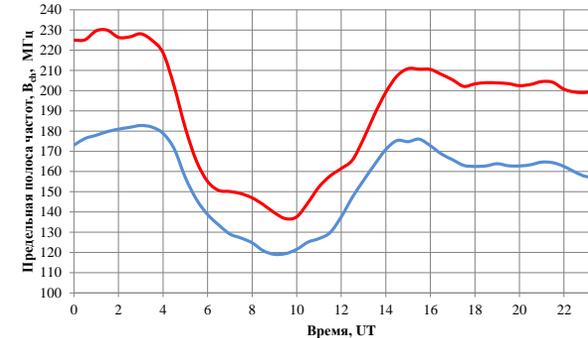
Станция ROST, март - 2019



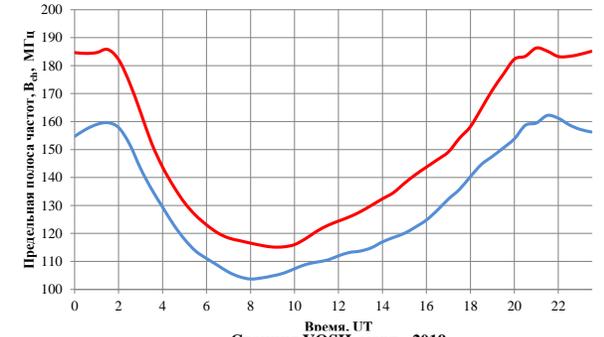
Станция YOSH, июнь - 2018



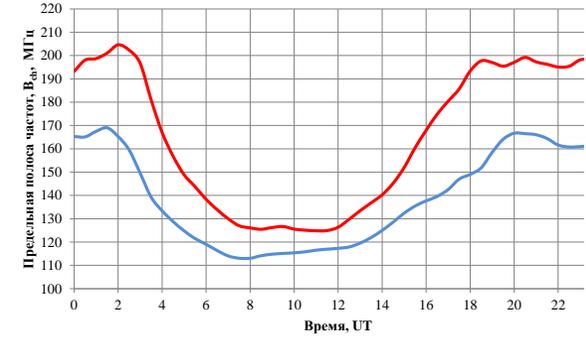
Станция YOSH, декабрь - 2018



Станция YOSH, сентябрь - 2018



Станция YOSH, март - 2019



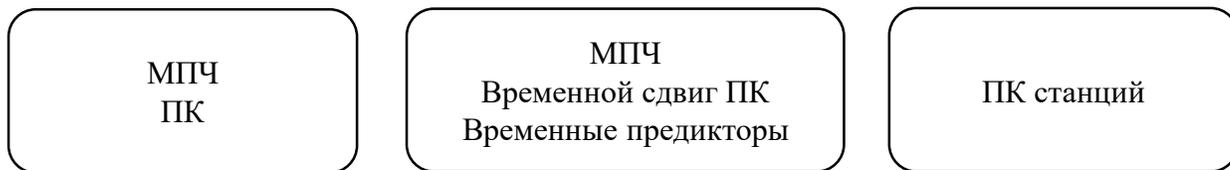
Экспериментальные результаты максимального и минимального значений полосы когерентности трансионосферного радиоканала

Месяц	Станция MUSK				Станция YOSH				Станция ROST			
	B_{chmin}^L , МГц		B_{chmax}^L , МГц		B_{chmin}^L , МГц		B_{chmax}^L , МГц		B_{chmin}^L , МГц		B_{chmax}^L , МГц	
	NS	DS										
июнь	125	105	145	118	130	90	142	95	150	92	209	112
сентябрь	162	104	186	115	162	104	186	115	154	104	201	114
декабрь	215	148	372	184	182	119	235	136	169	117	218	136
март	187	120	251	140	169	113	205	125	160	113	200	119

Алгоритм обучения модели прогнозирования значений ПК

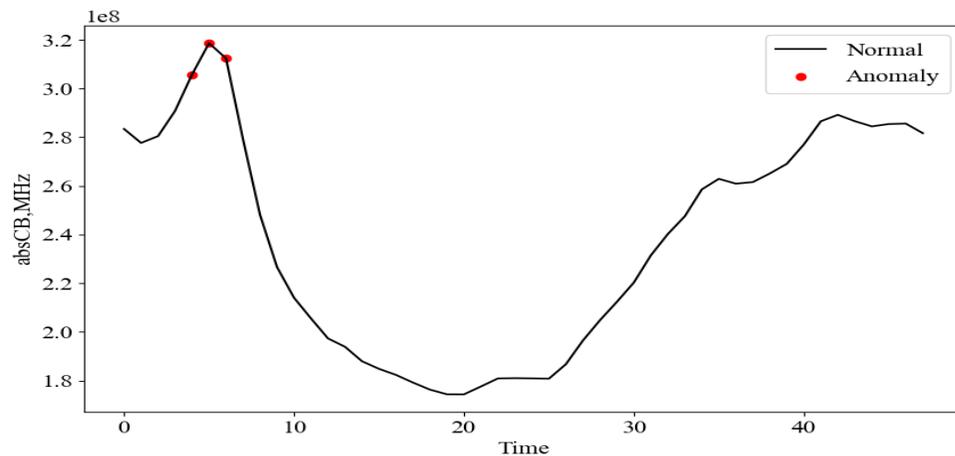


Используемые группы предикторов для прогнозирования полосы когерентности



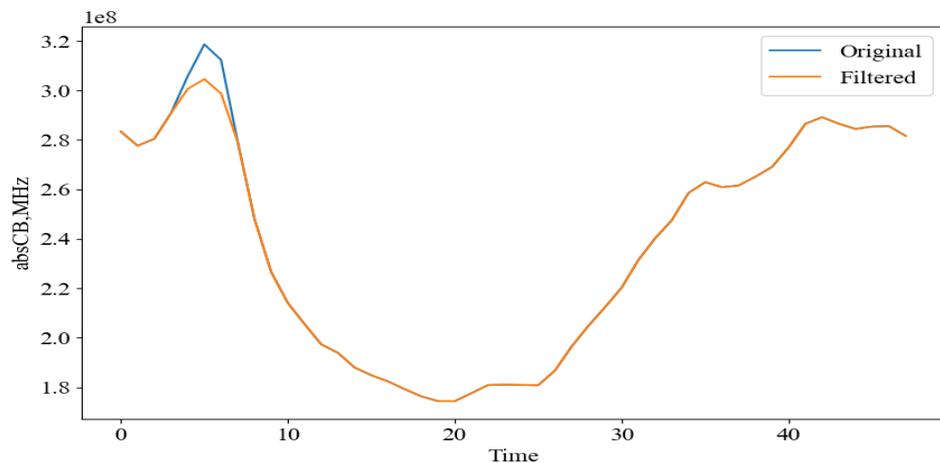
Очистка и экстраполяция временного хода предикторов (подготовка временных предикторов)

Аномалии absCB для одного дня (станция КАМН)



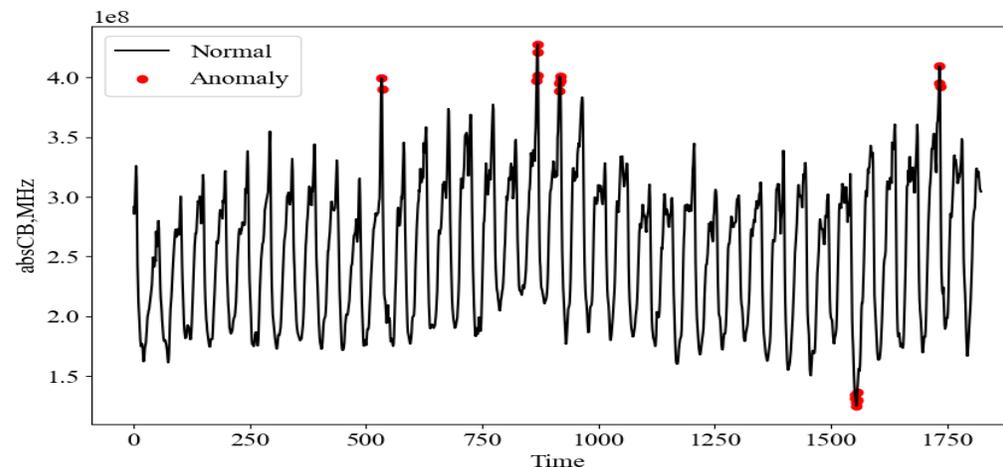
а) Обнаружение аномалий *ПК* для одного дня при помощи алгоритма «Isolation Forest»

Сравнение absCB до и после интерполяции аномалий (станция КАМН)



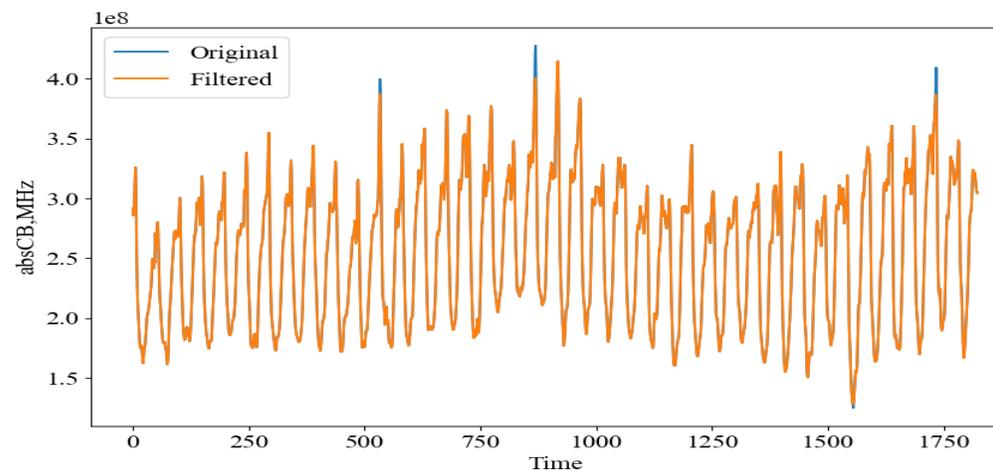
б) Сглаживание аномалий *ПК* для одного дня

Аномалии absCB для всех дней (станция КАМН)



в) Обнаружение аномалий *ПК* для всех дней при помощи алгоритма «Isolation Forest»

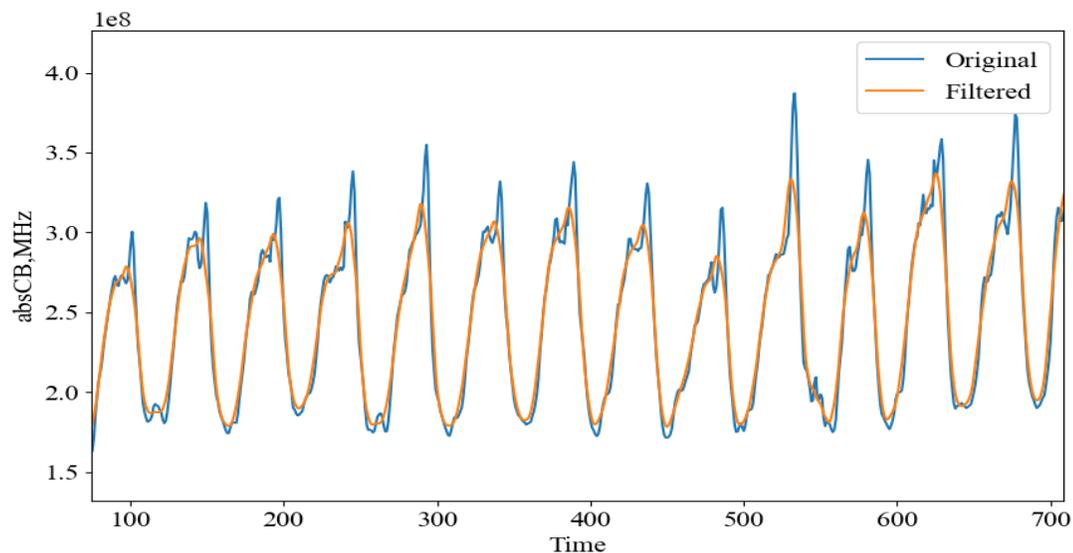
Сравнение absCB до и после интерполяции аномалий (станция КАМН)



г) Сглаживание аномалий *ПК* для всех дней

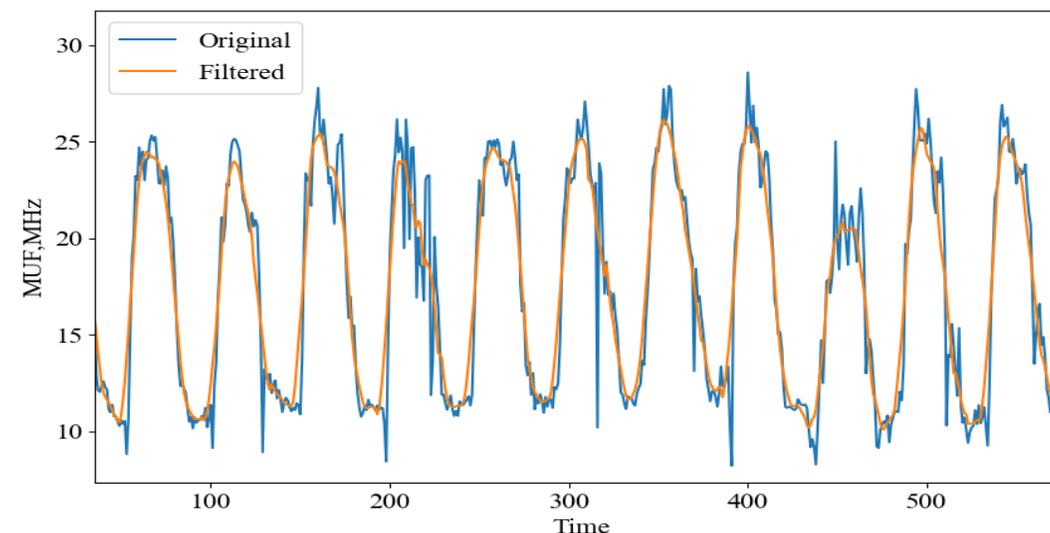
Фильтрация тренда временного хода предикторов (подготовка временных предикторов)

Сравнение absCB до и после фильтрации временных значений (станция KAMN)



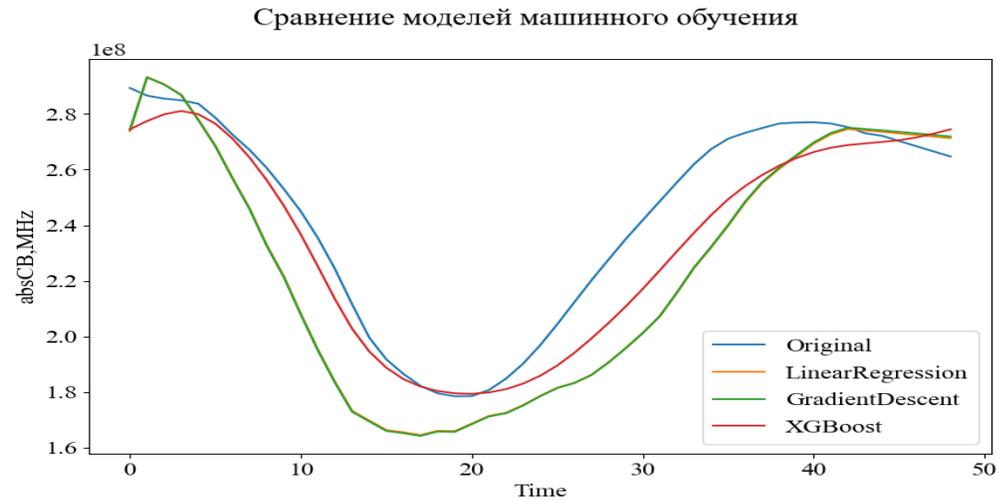
а) Фильтрации временных значений *ПК*

Сравнение MUF до и после фильтрации временных значений (станция KAMN)

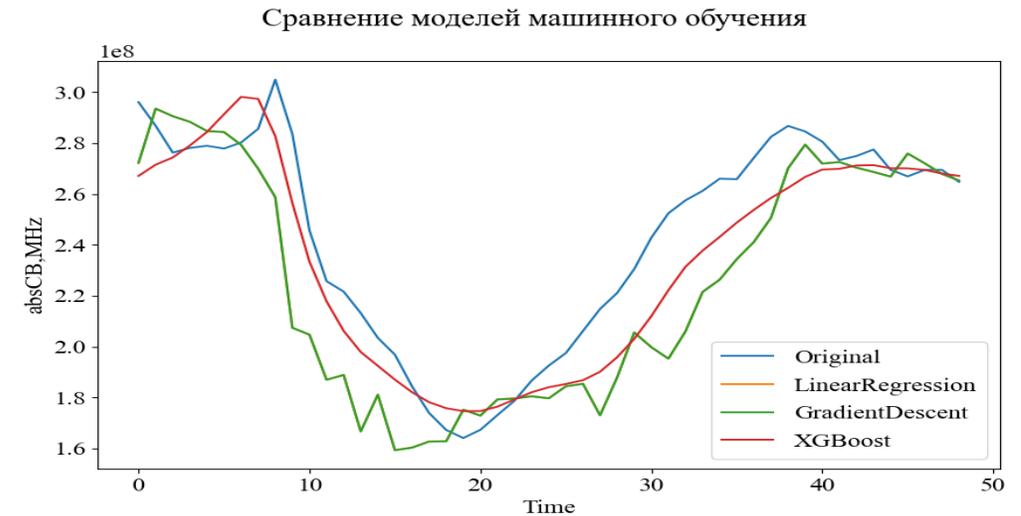


б) Фильтрации временных значений *МПЧ*

Анализ результатов моделей машинного обучения до и после фильтрации аномалий и фильтрации тренда



а) Прогнозные кривые регрессионных алгоритмов машинного обучения после фильтрации аномалий и тренда (станция KAMN)

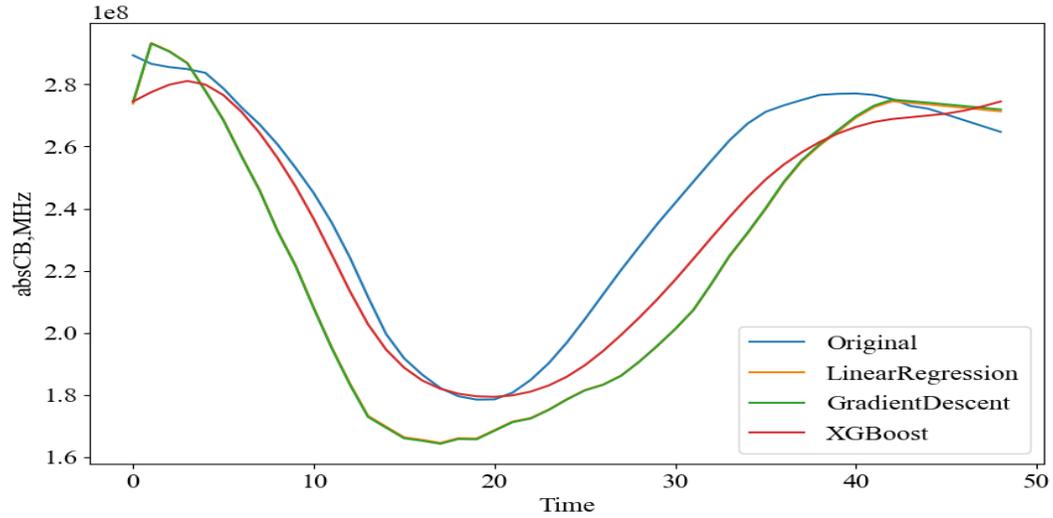


б) Прогнозные кривые регрессионных алгоритмов машинного обучения до фильтрации аномалий и тренда (станция KAMN)

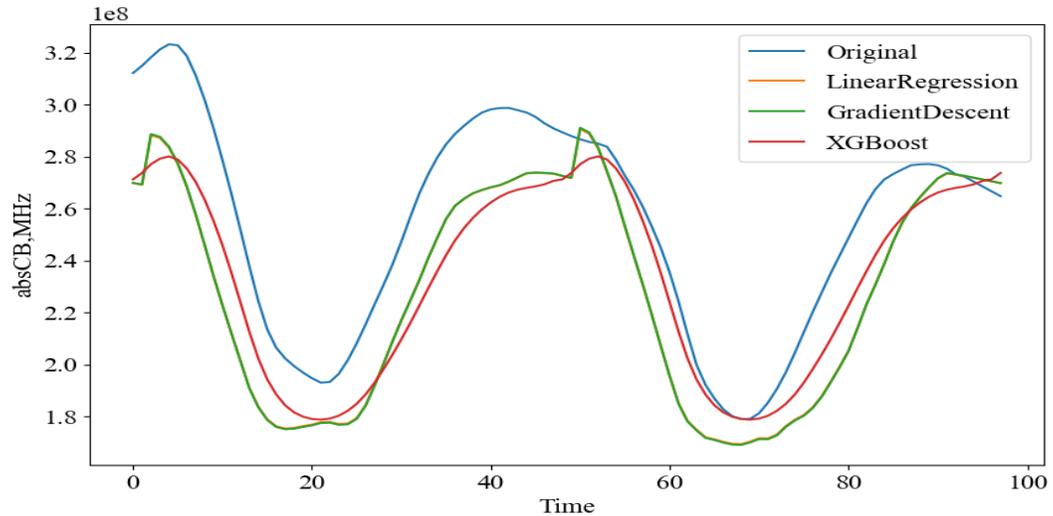
Сравнительный анализ прогнозных значений полосы когерентности моделей машинного обучения до и после фильтрации аномалий и фильтрации тренда (станция KAMN)

	R2		СКО, МГц	
	до	после	до	после
Линейная регрессия	0,63	0,69	27	23
Градиентный спуск	0,63	0,69	28	24
XGBoost	0,84	0,87	16	13

Анализ результатов моделей машинного обучения с разными размерами тренировочной и тестовой частей (станция КАМН) с применением фильтрации



Прогнозные кривые для одного дня



Прогнозные кривые для двух дней

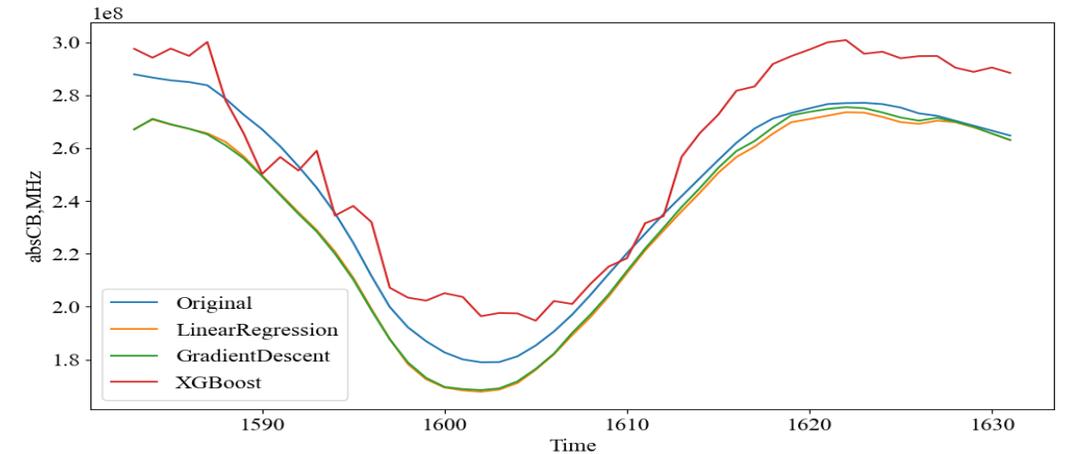
Сравнительный анализ моделей МО с разными размерами тренировочной и тестовой частей

Кол – во прогнозных дней	R ² / СКО	Линейная регрессия	Градиентный спуск	XGBoost
1 день	R ²	0,69	0,69	0,87
	СКО, МГц	23	24	13
2 дня	R ²	0,49	0,47	0,53
	СКО, МГц	30	30	25
3 дня	R ²	0,36	0,35	0,33
	СКО, МГц	31	31	29
4 дня	R ²	0,34	0,34	0,34
	СКО, МГц	31	31	29
5 дней	R ²	0,35	0,34	0,36
	СКО, МГц	29	30	28
6 дней	R ²	0,43	0,43	0,45
	СКО, МГц	27	27	26
7 дней	R ²	0,48	0,48	0,48
	СКО, МГц	26	26	25

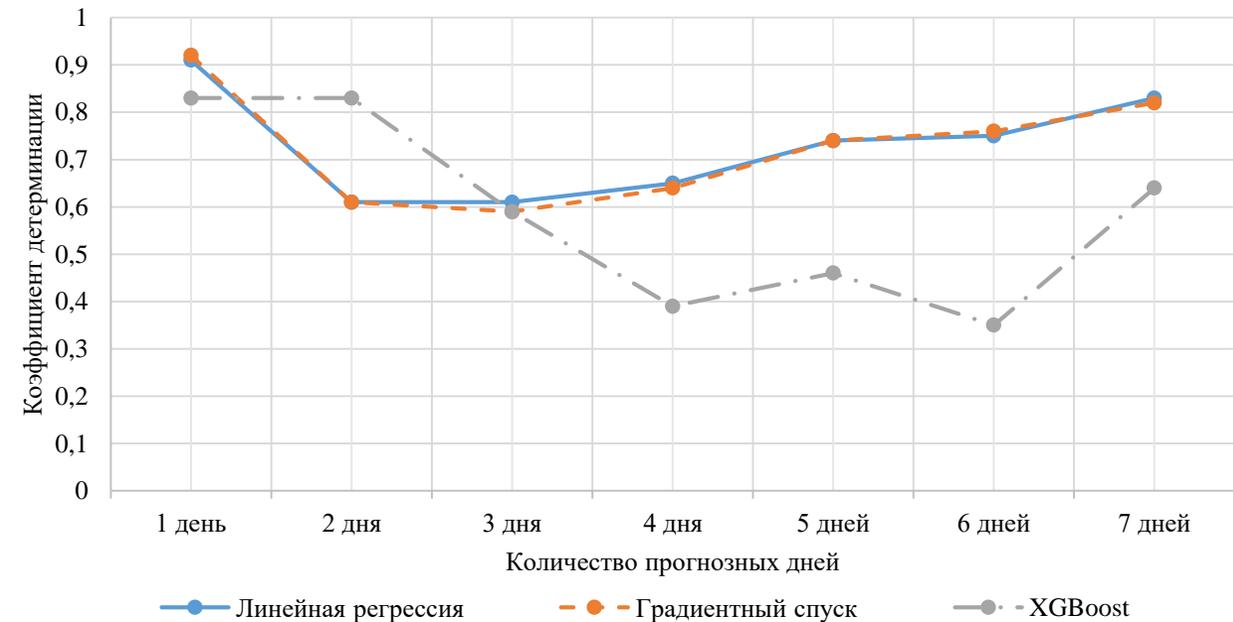
Функция генерации дополнительных признаков для повышения точности прогнозирования с применением фильтрации

Результаты моделей машинного обучения до и после применения функции генерации признаков (станция KAMN)

Кол – во прогнозных дней	R ² / СКО	Линейная регрессия		Градиентный спуск		XGBoost	
		до	после	до	после	до	после
1 день	R ²	0,69	0,91	0,69	0,91	0,87	0,83
	СКО, МГц	23	11	24	11	13	16
2 дня	R ²	0,49	0,61	0,47	0,61	0,53	0,83
	СКО, МГц	30	26	30	26	25	21
3 дня	R ²	0,36	0,61	0,35	0,59	0,33	0,59
	СКО, МГц	31	28	31	28	29	30
4 дня	R ²	0,34	0,65	0,34	0,64	0,34	0,39
	СКО, МГц	31	28	31	28	29	36
5 дней	R ²	0,35	0,74	0,34	0,74	0,36	0,46
	СКО, МГц	29	25	30	25	28	27
6 дней	R ²	0,43	0,75	0,43	0,76	0,45	0,35
	СКО, МГц	27	23	27	23	26	29
7 дней	R ²	0,48	0,83	0,48	0,82	0,48	0,64
	СКО, МГц	26	19	26	19	25	25



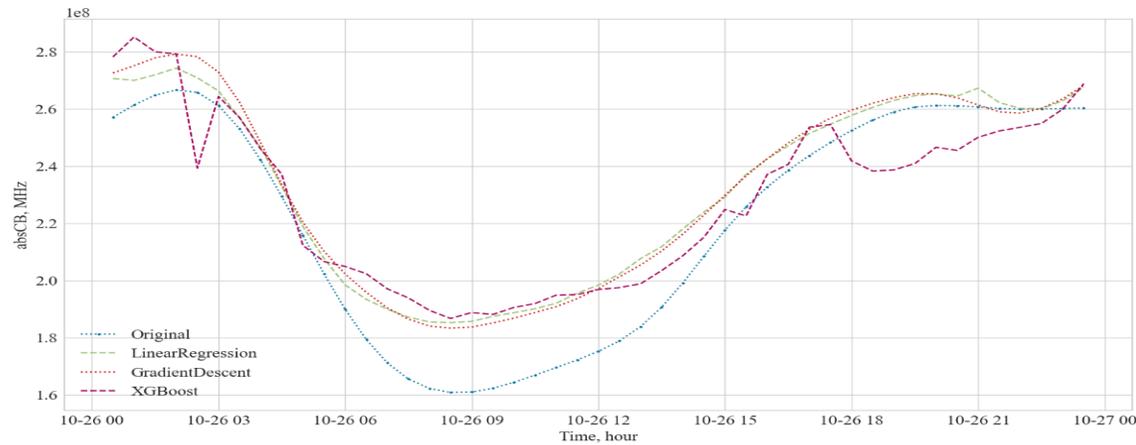
Прогнозные кривые для одного дня



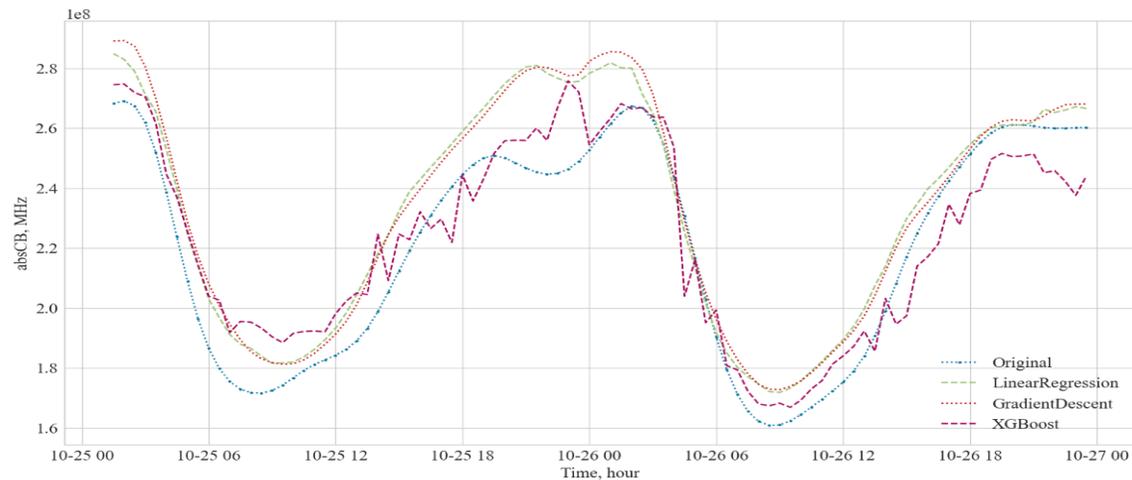
Сравнение прогноза моделей МО после генератора признаков

Апробация результатов исследования на генеральной выборке

(станция КАМН)



Прогнозные кривые для одного дня

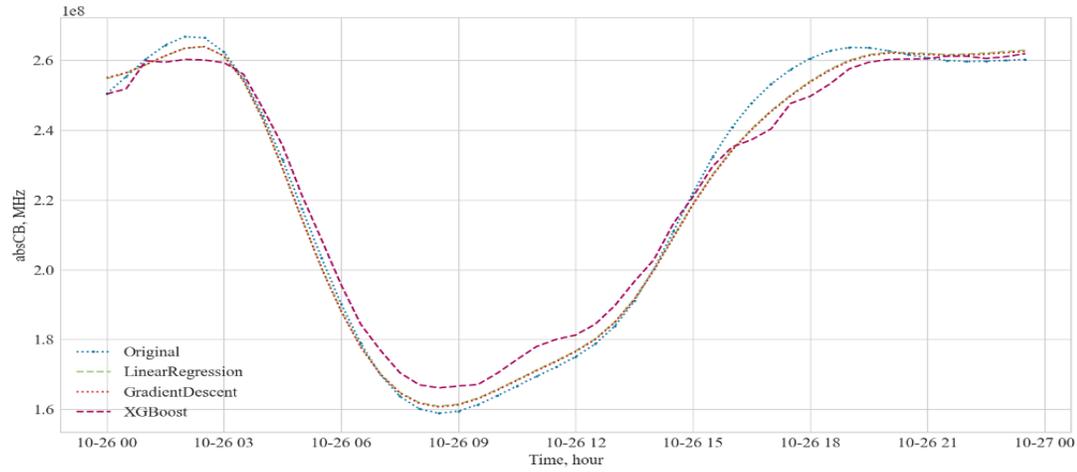


Прогнозные кривые для двух дней

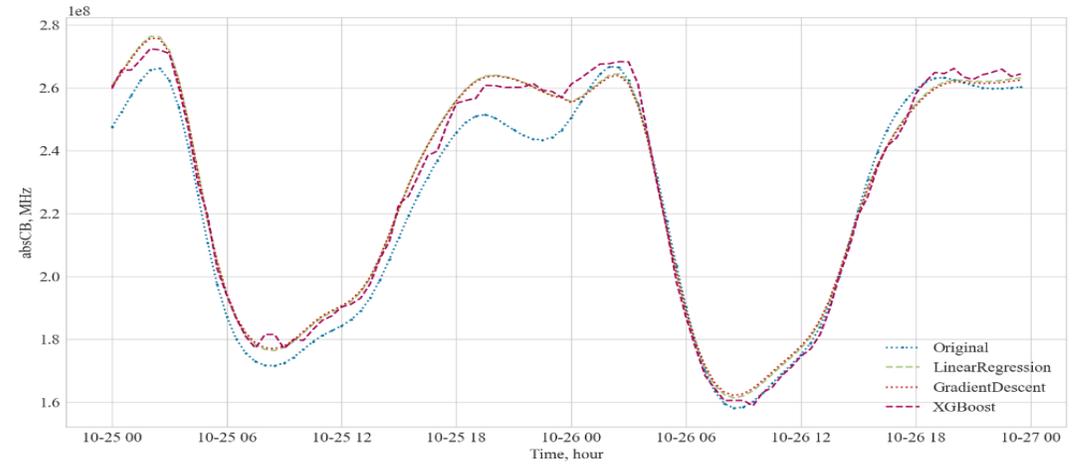
Сравнительный анализ моделей машинного обучения с разными размерами тренировочной и тестовой частей (станция КАМН)

Кол – во прогнозных дней	R ² / СКО	Линейная регрессия	Градиентный спуск	XGBoost
1 день (100 дней)	R ²	0,8	0,81	0,67
	СКО, МГц	14	14	17
2 дня (100 дней)	R ²	0,83	0,8	0,84
	СКО, МГц	15	16	13
3 дня (100 дней)	R ²	0,82	0,83	0,85
	СКО, МГц	16	15	14
4 дня (100 дней)	R ²	0,82	0,82	0,6
	СКО, МГц	16	16	21
5 дней (100 дней)	R ²	0,82	0,83	0,41
	СКО, МГц	16	15	24
6 дней (100 дней)	R ²	0,81	0,79	0,5
	СКО, МГц	16	18	23
2 дня (290 дней)	R ²	0,84	0,79	0,87
	СКО, МГц	15	18	12

Апробация результатов исследования на генеральной выборке (станции KAMN, NOVC, ROST, SALS, SEMK, SHAH, TAGN, VOLD, ZERN)



Прогнозные кривые для одного дня



Прогнозные кривые для двух дней

Сравнительный анализ моделей МО с разными размерами тренировочной и тестовой частей

Кол – во прогнозных дней	R^2 / СКО	Линейная регрессия	Градиентный спуск	XGBoost
1 день	R^2	0,99	0,99	0,97
	СКО, МГц	3,15	3,2	5,78
2 дня	R^2	0,96	0,96	0,97
	СКО, МГц	7,24	7,24	6,6

Основные полученные результаты

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, можно сделать ряд обобщающих **выводов**:

1. Проанализированы особенности трансионосферного распространения сигналов;
2. Развита математическая модель для оценки полосы когерентности с учётом первичных данных глобальных навигационных спутниковых систем;
3. Развита модели прогнозирования полосы когерентности и проведен их сравнительный анализ моделей машинного обучения с разным размером тренировочной выборки для прогнозирования полосы когерентности;
4. Установлено, что максимальное количество прогнозных дней для прогнозирования равно двум дням. При прогнозировании двух дней наибольший коэффициент детерминации R^2 оказался у модели *XGBoost* который составил примерно 97% . Наименьшее *СКО* показала также модель *XGBoost*, у которой отклонение составило примерно 7 МГц.
5. Полученные результаты в дальнейшем позволят с гарантированной надёжностью перспективным системам спутниковой связи функционировать в трансионосферных радиоканалах связи с достаточно широкой полосой частот и оптимальными показателями

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда: проект № № 22-19-00073.

Спасибо за внимание!

E-mail: KislitsinAA@volgatech.net

**Поволжский государственный технологический университет
424000, Российская Федерация, Республика Марий Эл, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3
Phone/fax: +7-8362-68-28-36
www.volgatech.net**