



Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Московской области

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова

***ИНСТИТУТ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА МАТЕМАТИКИ И ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ДИСЦИПЛИН***

СОГЛАСОВАНО  
Научный руководитель  
Магистранта  
д.ф.-м.н., доцент Котонаева Н.Г

**Отчет по результатам  
научно-исследовательской работы**

Тема работы: Эмпирические методы долгосрочного и краткосрочного прогнозирования критической частоты ионосферы

Магистерская программа: **09.04.03 Прикладная информатика**

Профиль: **Моделирование и проектирование ИС**

Магистрант: Калайда Юлия Викторовна

ФИО руководителя магистерской программы:  
д.ф.-м.н., профессор Самаров К.Л.

ФИО научного руководителя магистранта:  
Котонаева Надежда Геннадьевна

Сроки проведения практики:  
с 28 декабря 2020г. по 17 января 2021г.

Королев  
2021

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с первым этапом НИР в ходе написания диссертационной магистерской работы, который звучит следующим образом:

*«7.3.1. НИР-1 (1 семестр) связана с определением темы исследования, основных характеристик и содержания работы, изучением необходимой литературы.*

*В отчете должно содержаться: обоснование темы диссертации, цель, задачи, объект и предмет исследования, а также актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; характеристика методического обеспечения, которое предполагается использовать; предварительные результаты изучения и анализа основных литературных источников, которые использованы в качестве теоретической базы исследования; план содержания магистерской диссертации; словесная и формализованная постановка задачи исследования, выводы о проделанной работе (Введение и часть главы 1).»*

Перейдём к непосредственному решению круга поставленных задач.

Тема магистерской диссертации:

«Эмпирические методы долгосрочного и краткосрочного прогнозирования критической частоты ионосферы».

Научные задачи исследования:

разработать ПО по методике разрабатываемой теории краткосрочного прогноза на основе фактических восходящих наблюдений, которая будет рассчитывать коэффициенты модели для прогноза состояния ионосферы. Для этого нужно будет провести анализ литературы, затем провести общий анализ характеристик объекта через зависимости его частей, провести

структурный анализ и в конце дать оценку прогнозирования эффективности математической модели.

Объект и предмет исследования:

Объектом исследования будет являться состояние ионосферного слоя Земли, а предметом – проектирование и реализация прогнозной модели ионосферы.

Целью дипломной работы является построение локальной ионосферной модели в Ростове-на-Дону для краткосрочного прогноза состояния ионосферы в данном регионе.

Гипотеза:

В качестве научной гипотезы выдвинуто предположение о том, что математическая модель ионосферы, учитывающая восходные параметры наблюдений, является эффективным методом прогнозирования ее коэффициентов, гарантирующих описание состояния верхних слоев атмосферы в заданный интервал времени.

Методы исследования:

- 1) Теоретический анализ и обобщение научной литературы и других источников;
- 2) Обобщение характеристик объекта через описание зависимостей его частей;
- 3) Описание структуры объекта в знаковой модели с помощью математических схем и формул;
- 4) Исследование объекта через математически смоделированный аналог.

Актуальность темы связана со значительным распространением исследуемого явления и заключается в необходимости разработки рекомендаций по совершенствованию работы в рассматриваемой области.

План содержания магистерской диссертационной работы:

1. Аналитическая часть

1.1. Анализ предметной области

1.2. Определение требований к функционалу разрабатываемой модели

1.3. Формулировка модели

Проектная часть

2.1. Проектирование системы

2.2. Теоретические расчёты

2.3. Архитектура информационной системы

2.4. Моделирование на языке высокого уровня

2.5 Разработка программного обеспечения

2.6. Анализ разработанной модели

Результаты проекта

3.1. Описание разработанного ПО

3.2. Оценка эффективности проекта

Планируемые результаты, которые будут получены после завершения работы над диссертацией:

- Разработанная модель ионосферы
- Функционирующий модульный продукт
- Оценка эффективности используемой модели

# СОЗДАНИЕ ФРАГМЕНТА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## Анализ разработанной ранее модели

Особенностью современных процессов прогнозирования состояния ионосферы является их сложность, проявляющаяся в большом числе параметров, определяющих течение процессов в ионосферных слоях, а также в значимом числе внутренних связей между параметрами, в их взаимном влиянии, причем изменение одного параметра вызывает нелинейное изменение других. На процесс накладываются возмущения, статистически распределенные во времени.

Вопросы, касающиеся создания математических моделей ионосферы являются очень актуальными, потому что благодаря моделям этой среды решаются многие важные прикладные задачи: передача радиоволн из одной точки Земного шара в другую, эксплуатация космической техники, практические задачи обеспечения надежности и защищенности функционирования радионавигации.

Для построения математической модели требуется разработать автоматизированную систему, которая будет использовать формализованное описание объекта исследования на математическом языке в виде некоторой системы уравнений и функциональных зависимостей между отдельными параметрами модели. Для качественного построения ионосферной модели, в свою очередь, требуется изучение необходимых для этого физических явлений и их параметров.

Проектирование автоматизированной системы управления (АСУ) для построения ионосферной модели

Для построения регрессионных зависимостей на практике была разработана специальная программа, позволяющая наглядно демонстрировать полный ряд наблюдений за критической частотой слоя F.

Для АСУ был разработан следующий формат интерфейса.

При открытии программы появляется начальное окно (Рис. 1), в котором есть три кнопки:

«Load indices» – отвечает за ввод и конвертирование файла с данными индексов T;

«Load freq» – отвечает за ввод и конвертирование файла с данными медианных значений критической частоты слоя F2;

«Run» – запускает работу программы.

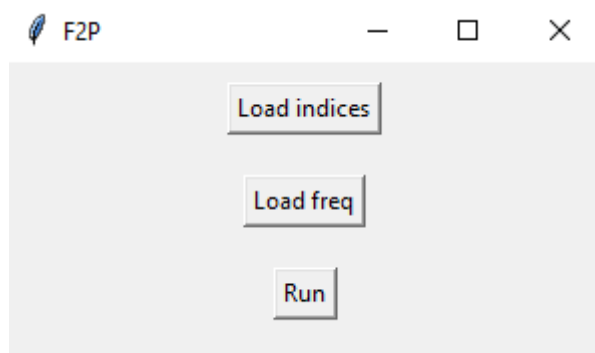


Рисунок 1 – Окно для ввода данных

Результатом работы программы являются следующие выходные файлы:

1. папка «graphs» с графиками кубических регрессий;

2. файл «result\_table» — таблица, в которой содержится информация о месяце, часе, переменных, коэффициенте корреляции и дельта F (dF2) — разность между верифицируемой величиной и модельной;
3. файл «dF2\_values» так же содержит в себе данные по dF2;
4. файл «statistic» — в нем рассчитаны две величины — среднее и дисперсия ряда dF2.

Программа при построении зависимостей применяет метод кубических регрессий. Кубическое уравнение регрессии имеет вид:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (1)$$

где  $y$  — независимая переменная;

$x$  — зависимая переменная;

$a, b, c$  — зависимые коэффициенты;

$d$  — независимый коэффициент.

Для задачи построения регрессионных зависимостей критической частоты в зависимости от ионосферного индекса  $T$  внешний вид формулы был приведен к следующему виду:

$$foF2_{med} = aT^3 + bT^2 + cT + d. \quad (2)$$

Для статистического анализа ряда наблюдений за критической частотой ионосферы на станции Ростов-на-Дону понадобятся построенные с помощью

программы графики на основе корреляционных зависимостей критической частоты от ионосферного индекса Т. Для наглядности ниже представлены графики, построенные на основе кубической регрессии по выборке критических частот слоя F2 с 1949 года по 2018 год за первые 3 месяца в 00 часов.

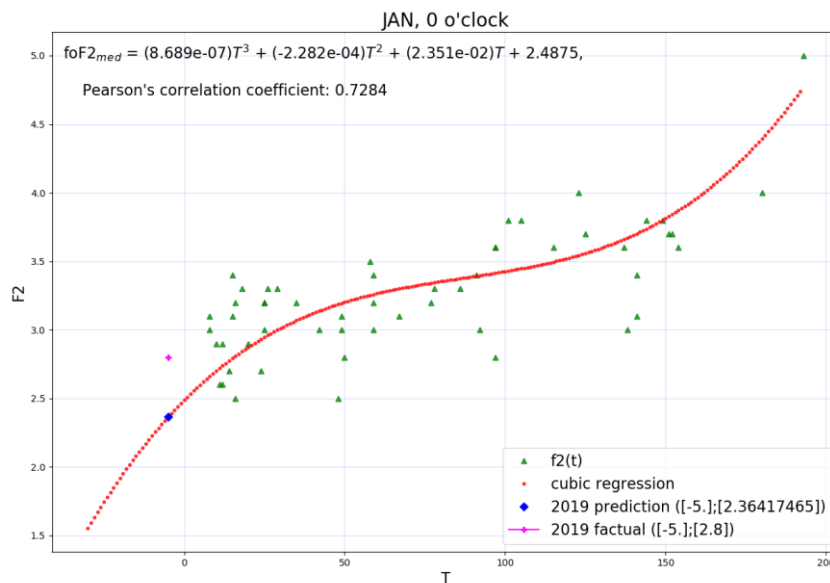


Рисунок 2 – Результат построения кубической регрессии в 00 часов для января.

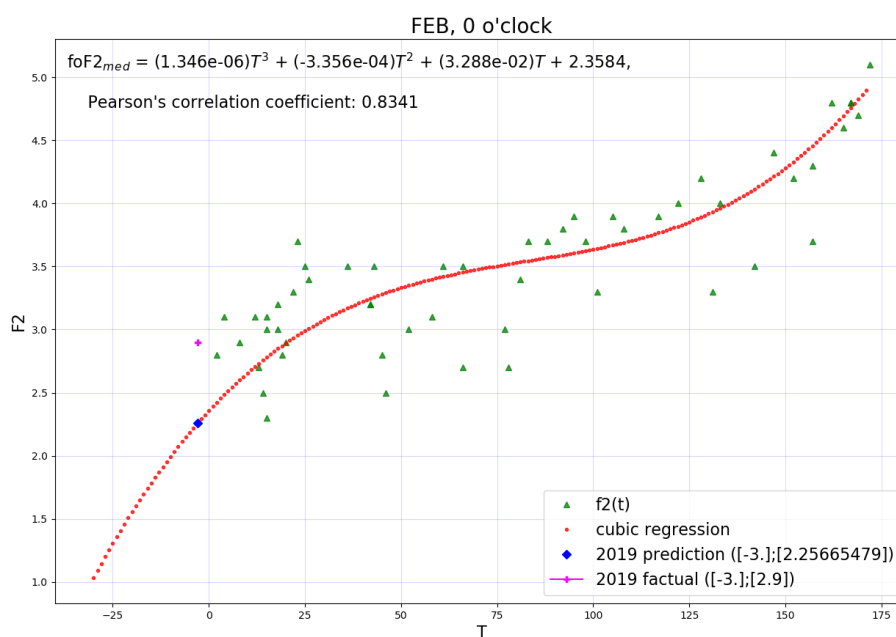




Рисунок 3 – Результат построения кубической регрессии в 00 часов для февраля.

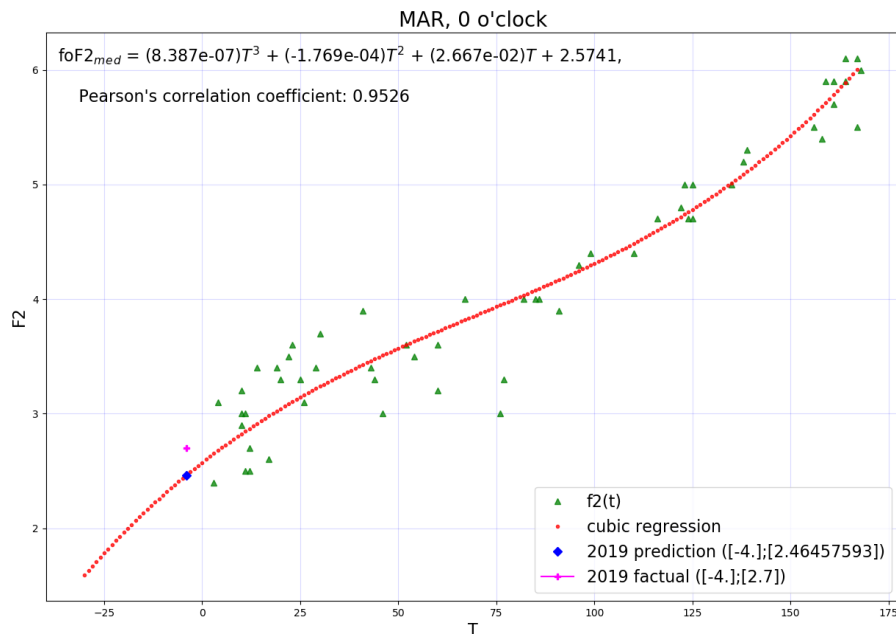


Рисунок 4 – Результат построения кубической регрессии в 00 часов для марта.

Также программой выполнена верификация с помощью входных данных по индексам Т. На графиках выше результаты представлены синими точками в виде ромбов. Эти точки характеризуют предсказанные на основе построения регрессий данные по медианным значениям критической частоты слоя F2 и по индексу Т для каждого месяца и часа 2019 года.

Отмеченная розовая точка на графике показывает фактические данные критической частоты и индекса Т за 2019 год.

Между фактическими и предсказанными данными наблюдается небольшая погрешность, это нормальное явление, т.к. для более точного сведения данных требуется более сложный подход к построению модели посредством решения

сложных системных уравнений. Также при помощи кубической регрессии нет возможности учесть особенности изменения критических частот при сезонных вариациях, поэтому разница между значением, по которому верифицируем, и значением, которое предполагает модель, особенно может быть видна в июне и декабре во времена верхнего и нижнего солнцестояний.

На основе построенных графиков программа выводит таблицу с полученными в ходе выполнения алгоритмов решения поставленных задач данными. В таблице ниже (Табл. 1) приведен только фрагмент данных из полной выборки.

Месяц	Час	a	b	c	d	Коэффициент корреляции	dF
JAN	0	8.68936e-07	-2.28161e-04	2.35111e-02	2.48754	0.72845	0.43583
FEB	0	1.34598e-06	-3.35605e-04	3.28822e-02	2.35836	0.83410	0.64335
MAR	0	8.38745e-07	-1.76933e-04	2.66713e-02	2.57415	0.95265	0.23542
APR	0	5.96938e-07	-1.13349e-04	2.87490e-02	2.74151	0.96241	0.27534
MAY	0	3.26721e-07	-9.82762e-05	3.11833e-02	3.21444	0.97158	-0.12559
JUN	0	1.79100e-07	-6.92255e-05	2.87312e-02	3.48573	0.96877	0.13056
JUL	0	-2.91389e-07	4.74381e-05	2.23345e-02	3.24315	0.97533	0.09640
AUG	0	7.03007e-07	-1.67716e-04	2.93457e-02	3.01693	0.95703	0.42871
SEP	0	8.40423e-07	-2.34544e-04	3.61085e-02	2.61778	0.93322	0.60891
OCT	0	1.51912e-06	-3.60400e-04	3.47036e-02	2.81000	0.91417	0.75066
NOV	0	1.45861e-06	-3.27484e-04	2.66800e-02	2.83166	0.75971	0.68503
DEC	0	1.22277e-06	-3.19511e-04	2.87307e-02	2.63393	0.62983	0.95896

Таблица 1 – Статистические данные, полученные по результатам построения регрессионных зависимостей

Для определения точности модели также были рассчитаны данные о дисперсии и математическом ожидании с помощью функции `std ()` из библиотеки `pandas`, выглядит это следующим образом:

```
mdF = np.mean(dF2);  
  
ddF = np.var(dF2);  
  
s = "mean dF value: {} \n var dF value: {}".format(mdF, ddF);  
  
md_data = np.array([s])
```

С помощью этой функции вывелись следующие значения: математическое ожидание равно 0.223, а дисперсия – 0.119.

Дисперсия представляет собой меру того, как далеко значение в наборе данных находится от среднего значения. Построенная модель показала, что разброс значений от математического ожидания достаточно мал. Отсюда можно сделать вывод, что построенная модель достаточно точно прогнозирует ионосферные данные и может быть применена в других, более сложных задачах.

Далее с помощью этой же программы были выведены три суточных хода для  $T = 25, 75, 125$ . Итого было построено 36 графиков, по 12 для каждого индекса  $T$ . Из ряда построенных графиков ниже представлены лишь некоторые (рис. 14 – 16).

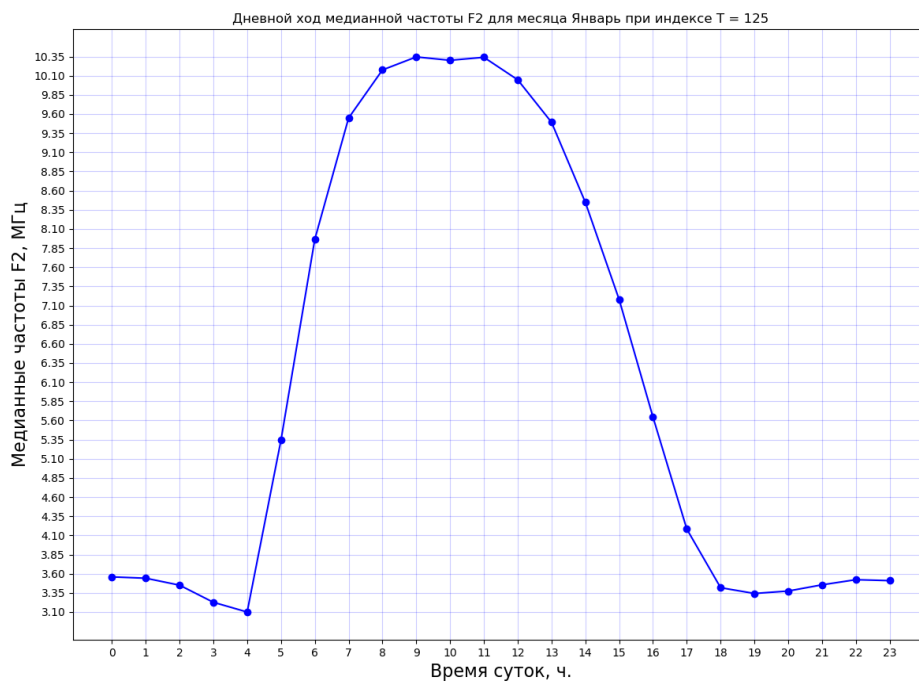


Рисунок 14 – Дневной ход медианной частоты F2 для января при T = 125

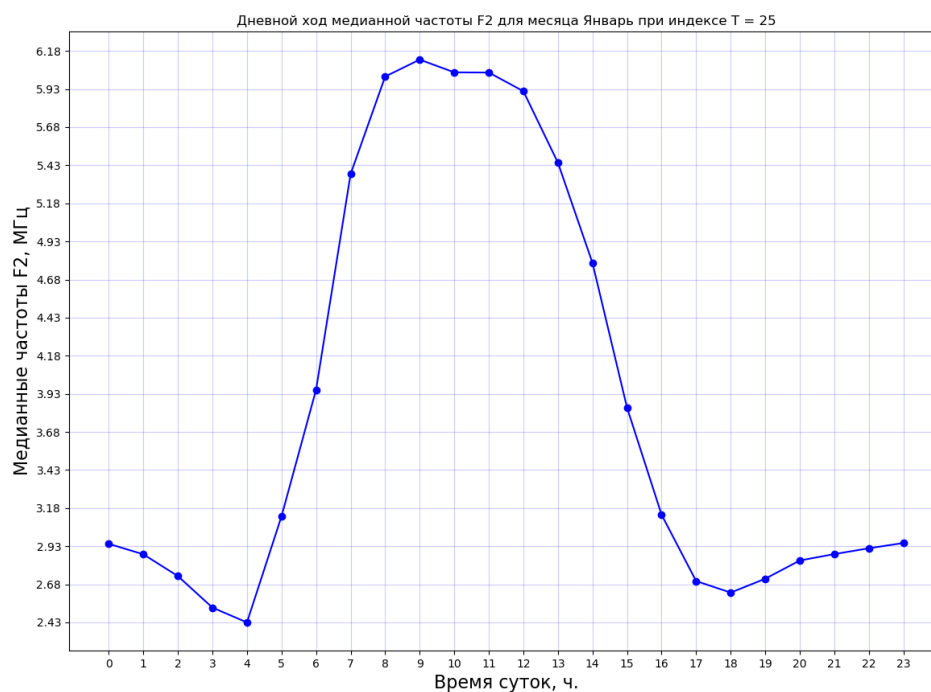


Рисунок 15 – Дневной ход медианной частоты F2 для января при T = 25

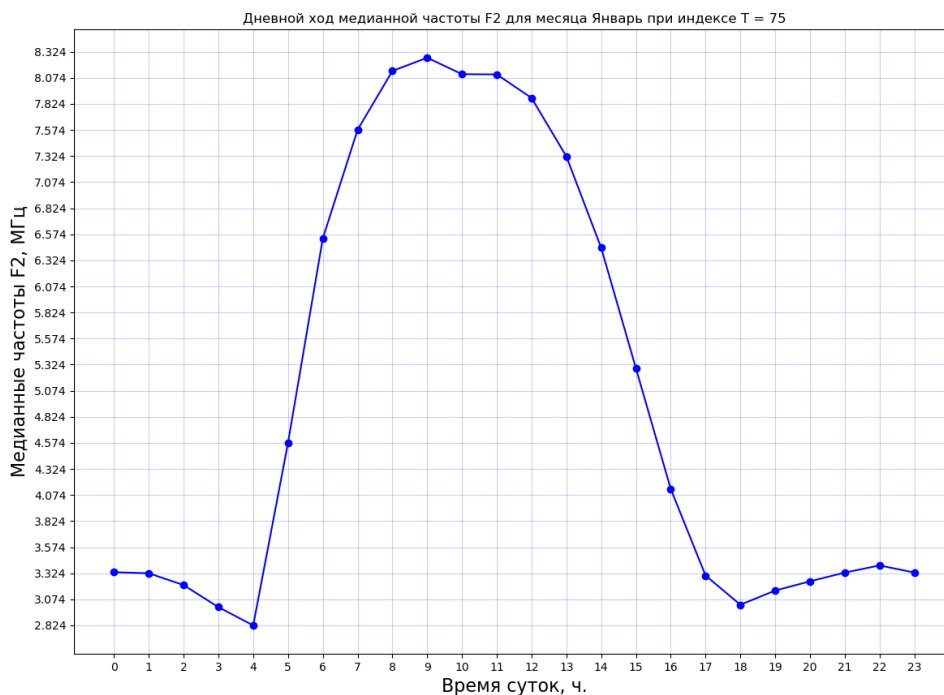


Рисунок 16 – Дневной ход медианной частоты F2 для января при T = 75

На основе приведенных графиков делаем вывод, что пик критической частоты слоя F2 приходится на полуденное время суток, после уменьшая свои значения. Также можно сделать вывод о корреляционных зависимостях – критическая частота зависит от индекса T и меняется в соответствии с ним. Зимой значение минимальной действующей высоты слоя  $F_2$  уменьшается после восхода Солнца. Также слой  $F_2$  наблюдается круглые сутки. Максимум концентрации заряженных электронов приходится на околополуденные часы зимой, а летом он перемещается на вечернее время. Суточные вариации высот в слое  $F_2$  велики как зимой, так и летом.

Годовой ход полуденных значений критической частоты в слое  $F_2$  достигает минимума в июне – июле и двух максимумов: один приходится на февраль – март, а второй на октябрь – ноябрь.

**Вывод:**

В ходе НИР было сформулировано описаны следующие объекты для магистерской диссертации: цель, задачи, объект и предмет исследования, а также актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; предварительные результаты план содержания магистерской диссертации; словесная и формализованная постановки задачи исследования. В результате работы над НИР был сделан общий анализ статистических данных локальной прогнозной модели ионосферы, требуемый для дальнейшей разработки усовершенствованной модели, разрабатываемой в магистерской диссертации.

Оценка 5 «Отлично»

Магистрант \_\_\_\_\_ 17.01.2021г  
(подпись, дата)

Научный руководитель \_\_\_\_\_ 17.01.2021г  
