



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра: Экспериментальной Физики Атмосферы (ЭФА)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(Магистерская диссертация)

На тему: «Пространственный анализ сети мониторинга атмосферы  
в Африке»

Исполнитель \_\_\_\_\_ Туйзере Винсент

(фамилия, имя)

Руководитель: Кандидат физико-математических наук, Доцент

\_\_\_\_\_ (ученая степень, ученое звание)

Симакина Татьяна Евгеньевна

\_\_\_\_\_ (фамилия, имя, отчество)

« защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ (подпись)

Доктор физико-математических наук, профессор

\_\_\_\_\_ (ученая степень, ученое звание)

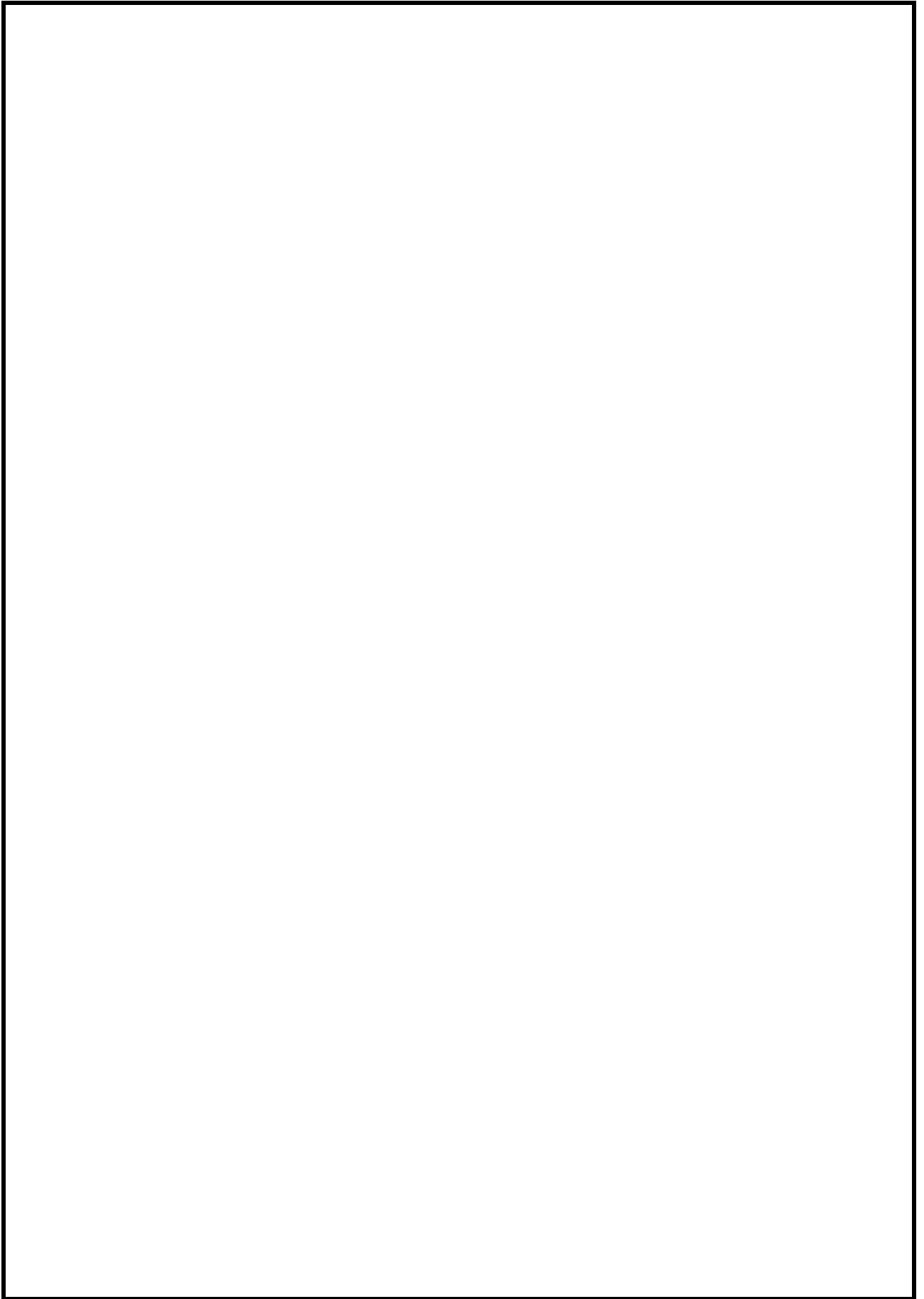
Кузнецов Анатолий Дмитриевич

\_\_\_\_\_ (фамилия, имя, отчество)

«20» июня 2022 г.

Санкт-Петербург

2022 года



## Содержание

Сокращения .....	2
Содержание .....	2
Введение .....	4
1. Проблема анализа пространственно-распределенной информации по окружающей среде. ....	7
1.1 Подходы к анализу характеристик распределений точечных объектов	8
1.2 Организация метеорологических наблюдений в восточной Африке .	10
1.2.1 Требования к размещению метеорологических станций.....	12
1.2.2 Состав метеорологических станций.....	13
1.2.3 Анализ периодов наблюдений на станциях по данным в открытом доступе.....	15
1.3. Исследуемая территория.....	17
1.3.1 Физико-географические особенности восточной Африки .....	17
1.3.2 Термический режим восточной Африки.....	20
1.3.3 Сеть метеорологических наблюдений в восточной Африке. ....	22
2. Методы анализа пространственных распределений точек.....	25
2.1 Методы оценки плотности сети точек наблюдений.....	26
2.2.1 Построения гистограмма расстояний между точками .....	26
2.1.2 Метод ближайшего соседа.....	27
2.2 Методы оценки кластерности сети точек наблюдений .....	29
2.2.1 Метод квадратов .....	29
2.2.2 Диаграмма Моришита .....	30

2.2.3	Метод полигонов Вороного.....	32
3.	Интерполяция данных .....	33
3.1	Методы интерполяции .....	34
3.1.1	Метод кригинг .....	34
3.1.2	Метод обратных расстояний.....	40
3.2	Методы оценки точности интерполяции .....	43
4.	Результаты пространственного анализа сети метеорологических станций в восточноафриканском сообществе .....	45
4.1	Результаты анализа оценки плотности сети точек наблюдений.....	45
4.2	Результаты анализа оценки кластерности сети точек наблюдений .....	49
5.	Интерполяция температуры воздуха .....	57
5.1	Интерполяция методом кригинга и методом обратных расстояний... ..	60
5.1.1	Построение вариограммы.....	60
5.1.2	Построение поля распределения температуры методом кригинга и методом обратных расстояний.....	65
5.2	Точность интерполяции.....	67
	Заключение .....	70
	Список литературы .....	72
	Приложение.....	74

## Введение

В решении различных задач физики атмосферы важными этапами являются измерения, численное моделирование и анализ полей концентраций содержащихся в атмосфере компонентов. Недостаточная густота сети мониторинга, особенно в зоне формирования засушливых областей, локальных мезонеоднородностей атмосферных процессов, влияет на точность мониторинга состояния атмосферы. Если данные собраны на нерегулярной кластерной сети мониторинга, то необходимо проведение пространственной декластеризации для получения репрезентативной глобальной статистики – средних, вариаций, гистограмм. Оценка эффективности имеющейся сети мониторинга, ее чувствительности, от которой зависят явления, которые она может детектировать, проводится на основе различных характеристик, описывающих топологию сети, включая фрактальную размерность.

Актуальность работы заключается в том, что в настоящее время, когда на Земле сложилась неблагоприятная метеорологическая обстановка, без знания законов метеорологии немислимо прогнозирование загрязнения природной среды. Прогноз погоды (прогноз загрязнения) зависит от точности данных, а точности данных зависит от наличия количества и размещении станций, соответственно, как размещено станция на структуре поля размещения влияет на оценке метеорологических и экологических параметров (средние значение по территории, дисперсия, гистограмма распределение любого параметра) зависит от наличия кластеров. Точности всего и соответственно их решения принято на основе этого оценок (решение прогноза), они зависят от точности данных от тех очередь структуры поля этих мониторинга. Поэтому оценивать пространственный распределение точки наблюдение. В этом случае, метеорологический условия снижают вредное воздействие загрязненного

воздуха (или загрязненной воды и почвы, на которую эти вещества оседают из атмосферы) на организм человека.

Настоящая работа заключалась в цели и задачи:

Цель: оценить равномерности/кластерности сети мониторинга и ее влияние на точность оценок температуры воздуха по территории Африки.

Чтобы достигать цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Выполнение обзора методик оценки равномерности/кластерности сетей;
- 2) Оценка кластерности сети точек наблюдений в восточной Африке различными методиками;
- 3) Построение карты пространственного распределения значений температуры воздуха с использованием различных методов интерполяции;
- 4) Вычисление ошибок интерполяции для всех используемых алгоритмов методом кросс-валидации;
- 5) Оценка влияния количества метеорологических станций в восточной Африке на точность интерполяций.
- 6) Оценка анизотропии температуры воздуха по территории восточно-Африканского сообщества с помощью построения вариограммы в разных направлениях.

Исследование носит теоретический характер, в качестве основных методов использовались: статистический анализ пространственно-распределенных величин, методы оценки густоты/разреженности пространственного распределения точек наблюдений, метод кросс-валидации.

Значимость работы заключается в применении различных методик, позволяющих качественно и количественно оценить структуру сети измерений в восточной Африке. Впервые была определена анизотропия температуры воздуха по территории восточной Африки.

Объект исследования: сеть из 101 станций мониторинга атмосферы в восточной Африке.

Предмет исследования: кластерность в структуре мест размещения станций мониторинга, точность интерполяции данных станций на всю территорию восточной Африки, анизотропия температуры воздуха по территории.

В этой диссертационной работе состоит из пяти части:

Первая часть представляет собой теоретический обзор материалов и методов интерполяции температуры воздуха.

Вторая часть содержит теоретический обзор методов, использованных для исследования. Представлены математические основы методов пространственной интерполяции, входящие в программный пакет обработки геопространственных данных Surfer и QGIS.

Третья до пяти части содержат интерполяция температуры воздух по территории восточной Африки с использованием двух методов интерполяции: кригинга и обратных расстояний, практические результаты применения методов кластерного оценивания: построение полигонов Вороного-Тиссена, вычисление площадей полученных полигонов и построение гистограмм. Также в этих части представлены результаты применения двух методов интерполяции: кригинга и обратных расстояний с вычислением ошибок интерполяции методом кросс-валидации, построены изолиниям температуры воздуха.

В заключение подводятся основные итоги работы. Приложение содержит программный код алгоритма оценки кластерности станций сети мониторинга с использованием индекса Моришита.

## **1. Проблема анализа пространственно-распределенной информации по окружающей среде**

Планета Земля страдает от серьезных экологических проблем из-за чрезмерной эксплуатации ее природных ресурсов, как возобновляемых, так и невозобновляемых, для удовлетворения все более жестокого потребления людей. Экологическими проблемами являются: изменение климата, загрязнение атмосферы, кислотные дожди, обезлесение, деградация почвы, загрязнение почвы. Как мы уже говорили, климатические вариации — это нечто нормальное и обусловлено вариациями нескольких факторов, таких как океанские течения или вариации солнечной радиации. Таким образом, причины изменения климата не ограничиваются деятельностью человека, на климат могут влиять и более естественные причины. Более того, вся история Земли отмечена естественными причинами изменения климата.

Данные, ежедневно собираемые спутниками наблюдения Земли, представляют собой ценный и уникальный источник информации для измерения воздействия деятельности человека на нашу планету. На сегодняшний день «основные климатические переменные», определенные Всемирной метеорологической организацией (ВМО), позволяющие анализировать и прогнозировать эволюцию климата, основаны исключительно на данных пространственного происхождения. Пространственный также является инструментом на службе территорий, населения, которое там живет, и деятельности, которую они там осуществляют. Действительно, космические возможности, связанные с другими технологиями, позволяют людям развивать новые формы сельского хозяйства, проектировать города завтрашнего дня или даже защищать свое непосредственное окружение.

Углубленный анализ и моделирование пространственных данных требует применения комплексного подхода и различных методов, характеризующих ту



или иную характеристику явления. Сложность такого анализа обусловлена несколькими факторами: наличием большого количества и качественной информации об изучаемом явлении, масштабными и сильными вариантами, наличием различных влияющих факторов [1].

### **1.1 Подходы к анализу характеристик распределений точечных объектов**

Анализ пространственного распределения объектов. На самом деле во многих случаях необходимо понимать не только количество площади, занимаемой объектами, но и расположение объектов в пространстве, которое можно охарактеризовать количеством объектов на определенной территории, например, распределением населения.

Прямые методы, применяемые в пространственном анализе, зависят от типа опоры изучаемых объектов (непрерывная или дискретная), а в случае изучения признака - от вида признака (качественный или количественный - измерительный или результирующий). Мы говорим о непрерывном пространстве, если любая точка в пространстве может представлять измерение или участвовать в анализе. Мы говорим о дискретном пространстве, если поддержка объектов или измерений ограничена конечным числом объектов, а локализация обычно представлена точкой. Затем мы говорим обо всех объектах точек посева. Пространственное распределение этого точечного паттерна не является частью поставленной задачи: анализ касается пространственного распределения значения атрибута этих точек.

Кроме распределения плотности можно оценить форму распределения. Распределение точек происходит в одном из четырех возможных вариантов:

- равномерном (если количество точек в каждом малом регионе такое же, как и в любом другом регионе),

- регулярном (если точки, разделенные равными интервалами по всей области, расположены в узлах сетки),
- случайном (возникают тогда, когда равномерно распределенные точки располагаются в случайном порядке по всей рассматриваемой области.
- кластерном или сгруппированном (если точки собраны в тесные группы).



Рис.1.1 Пространственного распределения объектов (точек).

Распределение точек может быть описано не только количеством точек внутри под регионами. Часто анализируются локальные отношения внутри пар точек. Три основных типа пространственного распределения:

а) случайная пространственная структура, когда при заданном местоположении индивидуума вероятность нахождения поблизости другого индивидуума не изменяется;

б) совокупная пространственная структура при увеличении этой вероятности; а также в) однородная пространственная структура при уменьшении этой вероятности. Пространственное распределение объектов в ландшафте изучалось многими исследователями, с использованием различных методов. Этот метод состоит в случайном выборе определенного количества точек (случайные

координаты  $x$ ,  $y$ ) в пределах исследуемой области. Другими важными характеристиками являются ориентация, направленность и связность [2].

## **1.2 Организация метеорологических наблюдений в восточной Африке**

Для решения любой метеорологической задачи нужна информация о состоянии атмосферы. Качество и количество исходной информации определяют степень успешности и достоверности расчетов режимных характеристик, составления прогнозов погоды и метеобеспечения различных отраслей хозяйственной деятельности человека. Еще важнее качество информации для научных исследований.

Климатических и метеорологических станций наблюдения в восточной - Африке по-прежнему слишком мало, в то время как производство продуктов питания, прогнозирование урожая и снижение риска бедствий могли бы выиграть от улучшения наблюдения. Новая интеллектуальная сеть долгосрочных наблюдений за климатом и погодой в настоящее время работает над решением ключевой проблемы мониторинга погоды на континенте. Основным источником информации является сеть станций наблюдения (метеорологических и аэрологических).

Цель гидрометеорологии: предоставить странам лучшую информацию о метеорологических, гидрологических и климатических условиях, чтобы они могли предвидеть стихийные бедствия и готовиться к ним. Вопрос, который мобилизует правительства африканских стран и международные организации, а также исследователей и частных операторов. Конкретно цель состоит в том, чтобы предоставить местному населению доступ в режиме реального времени к прогнозам погоды, инструментам для прогнозирования долгосрочных засух и сложным системам гидрологического мониторинга. Не только для сети

станций в тропиках, но и для любой другой сети однозначных ответов на эти вопросы нет. В зависимости от информационных потребностей, характера и важности решаемых задач, а также экономических возможностей служб, содержащих сеть станций, на поставленные вопросы могут быть даны различные ответы.

По стандартам Всемирной метеорологической организации (ВМО) максимальное расстояние между метеостанциями не должно превышать 500 км на суше и 1000 км на океанах. Для аэрологических станций это расстояние составляет 1000 и 1500 км соответственно. Существующая сеть станций в тропиках не соответствует этим стандартам; более того, это не рационально.

Гидрометеорологические службы предоставляют в режиме реального времени информацию и данные о погодных, водных и климатических условиях, а также предупреждающие сигналы, все из которых имеют решающее значение для обеспечения экономического роста и устойчивого и климат устойчивого развития в Африке. Африканские правительства, академические круги, частный сектор лидеры и международные организации обязуются предоставлять улучшенную метеорологическую, климатическую и гидрологическую информацию, известную под общим названием гидромет. С точки зрения реального мира, сообщества могут получить доступ к прогнозированию погоды в реальном времени, инструментам долгосрочного прогнозирования засухи и передовым системам мониторинга воды среди других полезных гидрометеорологических услуг [3].

### 1.2.1 Требования к размещению метеорологических станций

Плотность сети метеорологических и аэрологических станций. Исторически сеть станций в тропиках по разным причинам оказалась гораздо реже, чем в умеренных и высоких широтах. На измерения ветра, температуры воздуха и давления водяного пара влияют тип и шероховатость поверхности, влажность почвы, региональная топография и препятствия.

Частота метеонаблюдений. Частота наблюдений в первую очередь определяется целью получения информации. Практика показывает, что для оперативных целей в нормальных условиях вполне достаточно восьмисрочных наблюдений в синоптические периоды.

Точность измерений. Точность измерений описывает качество измерений в целом, объединяя понятия правильность измерений и прецизионность измерений. Наземные станции не установлены хаотично. Действительно, чтобы разрешить сравнения, должны применяться строгие правила: станцию следует размещать на открытой местности, на коротко скошенной траве, инструменты должны быть размещены в тени, на расстоянии не менее 2 метров от земли и воздух должен свободно циркулировать внутри станции. станцию следует покрасить в белый цвет, чтобы уменьшить поглощение солнечной радиации.

На измерения ветра, температуры воздуха и давления водяного пара влияют тип и шероховатость поверхности, влажность почвы, региональная топография и препятствия. Участки, выбранные с учетом их применимости к более широкой территории, должны быть свободны от препятствий, таких как здания, деревья и крутые склоны. 10-метровые мачты часто используются для подъема измерительных высот над невысокими препятствиями. На высоте среднеквадратичные ошибки измерения не должно превышать  $\pm 2$  м/с для скорости ветра,  $\pm 1^\circ\text{C}$  для температуры и  $\pm 1$  мбар для давления. В ходе

эксперимента практически были достигнуты такие точности, чего нельзя сказать применительно к обычным ежедневным наблюдениям в тропической зоне [3].

### **1.2.2 Состав метеорологических станций**

Метеорологическая станция, иногда называемая синекдохой метеорологического укрытия, представляет собой набор датчиков, которые регистрируют и обеспечивают физические измерения и метеорологические параметры, связанные с изменениями климата, эти датчики размещаются в корпусе, метеорологическом укрытии, что обеспечивает тепловой баланс термометра с воздухом и защищает его от солнечного излучения. Измеряемыми переменными являются температура, давление, скорость и направление ветра, влажность, точка росы, осадки, высота и тип облаков, тип и интенсивность осадков, и видимость.

Станции могут включать в себя датчики всей или только части этой информации в зависимости от их типа: агрометеорологические, аэродромные, дорожные метеорологические, климатологические и т.д. Также возможны другие датчики, такие как радиозонд (набор автоматических измерительных приборов, закрепленных под аэростатом, которые регулярно передают результаты своих измерений по радио). Гелиограф — прибор, предназначенный для регистрации продолжительности солнечного сияния в течение заданного дня. Клинометр, инструмент, предназначенный для измерения высоты потолка облаков. Метеорологическая станция делится на ручной и автоматической станции:

Станция с ручным управлением — это станция, где измерения выполняются техником-метеорологом в соответствии с регулярным графиком, а автоматическая метеостанция — это станция, датчики которой сообщают ряд

метеорологических данных через определенные промежутки времени без вмешательства человека. Инструменты часто одни и те же в обоих случаях, но некоторые наблюдения более надежны, если они исходят от реального наблюдателя. Например, облачный покров и тип осадков легче наблюдать человеку, чем определить с помощью электронного прибора.

Автоматические станции разрабатывались для использования в труднодоступных местах (метеорологический буй в море или удаленные районы), но они все чаще вытесняют стационарные станции из-за более низкой стоимости. Разработанные для национальных метеорологических служб, они теперь также используются для исследования погоды, для различных пользователей-специалистов, таких как сельскохозяйственная метеорология и мониторинг состояния дорог, даже для метеорологов-любителей.

Чаще всего они группируются в сети для охвата определенной территории, их плотность варьируется от нескольких километров между станциями (мезонетами) до нескольких сотен километров в зависимости от потребностей и доступности участков. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) устанавливает стандарты для измерений и подходящих мест для установки метеорологических станций, которым должны соответствовать ее члены:

- Для измерения влажности и температуры датчики под крышкой должны быть установлены на стандартной высоте от 1,25 до 2 м;
- Для измерения приземного ветра (направление и скорость) датчики должны быть установлены на мачте на высоте 10 м над землей на открытой местности. Это значение может быть уменьшено до 2 метров для агроклиматических мероприятий [5].

### 1.2.3 Анализ периодов наблюдений на станциях по данным в открытом доступе

Результаты наблюдений с метеорологических станций, чтобы быть сопоставимыми, должны иметь достаточную степень точности и гомогенностью. Данные с метеостанции будут передаваться по каналам связи в зашифрованном виде. Наиболее известным является формат METAR, разработанный для авиационных служб, но отдельные пользователи могут использовать и другие форматы. Эти данные используются для составления текущих карт погоды и для прогнозирования элементов погоды в будущем. Координацию работы метеослужб разных стран осуществляет Всемирная метеорологическая организация (ВМО). Метеорологические наблюдения проводятся в определённые сроки. Сроками наблюдений называют определённые, точно установленные моменты времени, с наступлением которых во всех станциях производятся метеорологические наблюдения.

Метеорологические данные могут поступать из нескольких источников. Их можно получить с ручных или автоматических метеостанций или с помощью дистанционного зондирования. Есть много пользователей метеорологических данных. Синоптики используют данные о погоде для разработки полезных прогнозов для населения, авиации, судоходства, военных областей и т. д. Метеорологические данные также полезны для климатологических и гидроклиматических исследований.

В национальных метеорологических службах наблюдения проводятся каждый час (1 час) на главных станциях и каждые шесть часов (6 часов) на климатологических станциях (код SYNOP). На основных станциях при изменении погоды также будут производиться специальные наблюдения (начало дождя, уменьшение нижней границы облачности и т.д.). С другой



стороны, автоматические станции могут сдавать более частные наблюдения. Существуют также вторичные сети сбора данных, которые собирают более ограниченный набор параметров за более длительные периоды времени. Например, некоторые пользователи ежедневно собирают данные о температуре и осадках [17].

Производителем и разработчиком автоматических синоптических метеостанций для нескольких национальных метеорологических служб по всему миру. Автоматические метеостанции обеспечивают наблюдения за погодой в режиме реального времени 24 часа в сутки. Синоптические наблюдения проводятся в определенное время:

Синоптические часы: 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 (UTC)

Промежуточное синоптическое время: 03:00, 09:00, 15:00, 21:00 (UTC).

Этого времени придерживаются все члены Всемирной метеорологической организации (ВМО) во всем мире. Эти наблюдения дают синоптическую картину метеорологических условий всей планеты. Наблюдения производятся в час (00) и распространяются через информационную сеть ВМО менее чем за 15 минут. В этих сроках вычисляются: скорость и направление ветра на высоте 10 метров, температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление, метеорологическая дальности видимости, облако (тип, количество и высота). Наблюдатель начинает обход площадки за 30 минут до времени измерения. Во время тура следит за состоянием почвы, облачностью и другими показателями. Точно в установленное время температура воздуха измеряется с помощью сухого термометра [4-5].

## 1.3. Исследуемая территория

### 1.3.1 Физико-географические особенности восточной Африки

Африка – огромный и массивный континент. Его площадь составляет 30 000 000 км<sup>2</sup> с треугольной формой, он простирается с севера на юг на 8 000 км и с запада на восток на 7 500 км. Африка омывается на севере Средиземным морем, на северо-западе — Красным морем, на западе — Атлантическим океаном, на востоке – Индийским океаном и обоими океанами с юга, с разделением по 20 градусу восточной долготы. Это самый жаркий материк.

Африканский рельеф: все формы рельефа встречаются в Африке. Но этот рельеф состоит из огромных плоскогорий.

Нагорье (поднос): это форма рельефа, которая доминирует в Африке. Эти плато представляют собой огромные вырезы в твердых породах. Чаще всего они окаймлены обрывами и подвержены эрозии. Эти плато иногда могут достигать 1500 м. Равнины: они тесны и даже редки. Они ограничены вдоль побережья или сопровождают курсы воды. Горы: они обособлены, к ним относятся:

- Древние массивы, господствующие на высоких плато и вершинах, округлены эрозией.
- Вулкан, например: гора Килиманджаро 6010м. На них изображены молодые горы, расположенные цепями

Африканские пейзажи состоит из трех разных ландшафта:

Саванна: это большое пространство, где есть высокая трава, мало или совсем нет деревьев. Находится в жарких регионах.

Пустыня: это малонаселенный регион, в котором почти нет растительности.

Джунгли: это пространство, где много растительности и влаги

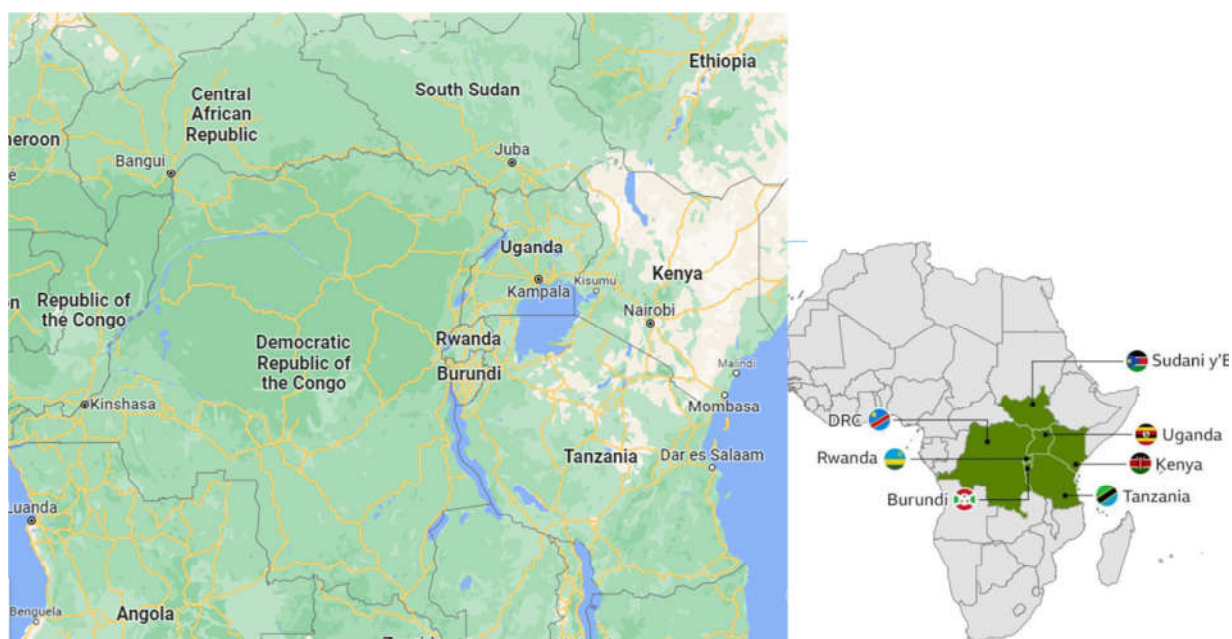


Рис.1.2 Карта расположены страны Восточно-Африканское сообщество (ВАС)

Восточная Африка - регион мира отличающийся, с одной стороны, великолепными природными богатствами и занимает значительную по площади территорию. На данной территории проживает значительная часть населения Африки.

Большую часть Восточной Африки занимает Восточно - Африканское плоскогорье. Климат жаркий, сезонно влажный, осадков от 500 до 3000 мм в год. В Восточной Африке одно из крупнейших — Восточная Африка. Физическая карта. Восточная Африка, природная страна в экваториальных и субэкваториальных широтах восточной части Африки, между Эфиопским нагорьем на севере. Ряд стран Восточной Африки -Танзания, Кения, Уганда, Бурунди, Руанда и ДР Конго образовали - Восточноафриканское сообщество (ВАС). Это регион занимает площадь около 5000000 Км<sup>2</sup>.

- Восточная Африка - самый сейсмически активный регион, расположенный в пределах Восточно-Африканской рифтовой долины.
- Здесь находится самая высокая точка материка — гора Килиманджаро, а также самое низкое место - озеро Ассаль.
- Здесь расположены крупные озера материка (Виктория, Танганьика).
- Здесь протекает одна из самых длинных рек в мире-Нир.
- Большая часть региона расположена в субэкваториальном климатическом поясе.
- На плато и нагорьях господствуют саванны, в долинах и предгорьях - влажные экваториальные и тропические леса.
- Восточная Африка выделяется среди других частей материка исключительным природным разнообразием. Наряду с тропическими пустынями есть массивы экваториальных лесов, однако преобладают саванны [6].

Климат Восточной Африки довольно нетипичен для экваториальных регионов. Из-за комбинации обычно большой высоты и дождевой тени западных муссонных ветров, создаваемых горами Рувензори и Эфиопское нагорье, Восточная Африка на удивление прохладная и сухая для своей широты. Фактически, на побережье Сомали многие годы могут проходить без каких-либо дождей. В других местах годовое количество осадков обычно увеличивается к югу и с высотой, составляя около 400 мм в Могадишо и 1200 мм в Момбасе на побережье, в то время как внутри страны он увеличивается с примерно 130 мм в Гароуэ до более 1100 мм в Моши около Килиманджаро. Необычно то, что большая часть дождя выпадает в два различных влажных сезона, один из которых приходится на апрель, а другой - на октябрь или ноябрь.

На восточноафриканском плоскогорье преобладают пассаты и муссоны с экватора. Погода здесь в основном жаркая и влажная. Зимой преобладают северо-восточные пассаты, приносящие мало осадков. Летом юго-западные муссоны устанавливают длительный период дождливой погоды. В среднем здесь выпадает около 1000 мм осадков в год, а на горных массивах отмечается более 3000 мм. Самым засушливым местом, где дожди отсутствуют течение 7-9 месяцев, является Кения.

к западу от Рувензори и Эфиопское нагорье, характер осадков более типичный, с дождями в течение всего года около экватора и одним влажным сезоном на большей части Эфиопского нагорья с июня по сентябрь - с сокращением до июля и августа около Асмэры. Годовое количество осадков здесь колеблется от более 1600 мм на западных склонах до примерно 1250 мм в Аддис-Абебе и 550 мм в Асмэре. В высокогорье количество осадков может превышать 2500 мм [6].

### **1.3.2 Термический режим восточной Африки**

Восточная Африка отличается по характеру климата от аналогичных районов, где формируются области гумидного климата. Меньшее общее увлажнение и наличие более продолжительного сухого сезона в Восточной Африке связано с нахождением вблизи материка большого по площади с высокогорным рельефом острова Мадагаскара, который перехватывает значительное количество влаги, которая выпадает в виде дождей на восточных склонах его горных хребтов. Для восточной части острова характерен постоянно влажный пассатный (гумидный) тип климата более 2000 мм. Западная подветренная часть острова расположена в области семигумидного климата.

Для всей физико-географической страны за исключением горных районов характерны высокие температуры. Среднемесячные не ниже  $+20^{\circ}\text{C}$ . Симметричное расположение Африки по отношению к экватору и в низких широтах обуславливают однотипность термического режима в экваториальном, субэкваториальном, тропическом поясах материка. Термический режим характеризуется следующими особенностями:

- внутритропическим ходом температуры – ни один месяц в году не имеет в среднем температуру ниже  $17^{\circ}$  (исключая горы и крайний север материка);
- отсутствием смены термических времен года;
- суточными амплитудами (разницу между низкой и высокой температурой, что зафиксированы в течении суток) температур выше годовых.

Почти повсеместно (восточная Африка), кроме высокогорья, в течение всего года преобладают среднемесячные температуры около  $24^{\circ}\text{C}$ , в высокогорьях и плоскогорьях прохладнее ( $14^{\circ}\text{C}$ ). Средние максимальные температуры достигают почти  $28^{\circ}\text{C}$ . В Бурунди, например, средняя температура самого жаркого месяца (сентября)  $+25^{\circ}\text{C}$ , самого холодного (июля)  $+23.1^{\circ}\text{C}$ . С высотой становится прохладнее, хотя годовой ход остается равномерным. Высокие горные вершины имеют температуру около  $16^{\circ}\text{C}$ .

Типы сезоны в восточной Африке:

- Сухой сезон в восточной Африке длится с июля по сентябрь, когда погода определяется солнечными и дождь свободных дней. Это зима в южном полушарии, и поэтому погода здесь прохладнее, чем в другое время года, что делает приятные дни и прохладные ночи.

Например, Северная Танзания и Кения переживают два сезона дождей: основной сезон дождей длится с апреля по июнь, и более эпизодический сезон дождей длится с октября по декабрь.

- Два сезона дождливых: с марта по май (основной сезон) и с ноября по декабрь (короткий сезон).

Например, В Бурунди, существует два сезона дождей: с февраля по май (основной сезон) и с сентября по ноябрь, когда осадков выпадении меньше. С июня по август длительный сухой сезон длится дольше, а с декабря по январь – короткий (малый) сухой сезон [7-8].

### **1.3.3 Сеть метеорологических наблюдений в восточной Африке**

В восточной Африке приводятся наименее развитая сеть метеорологических, гидрологических и климатологических наблюдений в мире, плотность которой составляет всего одну восьмую от требуемой, и менее чем 200 станциями, отвечающими нормам наблюдений Всемирной метеорологической организации (ВМО). Только 300 официальных метеостанций в Африке сообщают о своих наблюдениях Всемирной метеорологической организации (ВМО). Они распределены неравномерно — большинство из них находится на север-востоке и юге континента, что приводит к острой нехватке метеорологических данных для центра континента. Таким образом, национальным правительствам, региональным планировщикам, страховым компаниям и фермерам не хватает данных для принятия важных решений о том, на какие виды деятельности влияют погода и климат, или какие инвестиции в инфраструктуру следует сделать для повышения устойчивости к климатическим потрясениям. Благодаря более качественным, но менее дорогим датчикам и высокоразвитой инфраструктуре сотовой связи, позволяющей

размещать в сети данные, собранные метеорологическими станциями, Африка теперь может двигаться к цели получения точных климатических данных.

В условиях ухудшения метеорологических наблюдений, в результате изменения климата прибрежные города окажутся затопленными из-за повышения уровня моря, береговые линии будут затронуты циклонами и штормами, а аномальная жара и засухи серьезно повлияют на сельскохозяйственную деятельность, в результате чего миллионы людей столкнутся с отсутствием продовольственной безопасности. и парализует целые экономики. Как мы видим, африканские страны сталкиваются с комплексом рисков. Но эффективные гидрометеорологические службы могут помочь им справиться [9].

Работа включает в себя 101 стационарную станцию мониторинга, которые автоматически измеряют метеорологические элементы. Станции занимают территорию от 0° до 12° южная широта и от 0° до 50° восточная долгота. Африканского континента и включают 7 страны (Бурунди, Руанда, Танзания, Кения, Уганда, Южный Судан и ДР Конго). На западе и востоке территория ограничена с южным атлантическим и индийским океанами. Минимальная расстояния между станциями на территории восточно-Африки составляет 6,3км это между городами гома (Демократическая Республика Конго) и гисеньи (Руанда), а максимальная составляет 3185км это между городами кабинда (Демократическая Республика Конго) и лама (Кения). Схема расположения станций мониторинга на территории Восточно-Африканского сообщества показана на рис. 1.3.



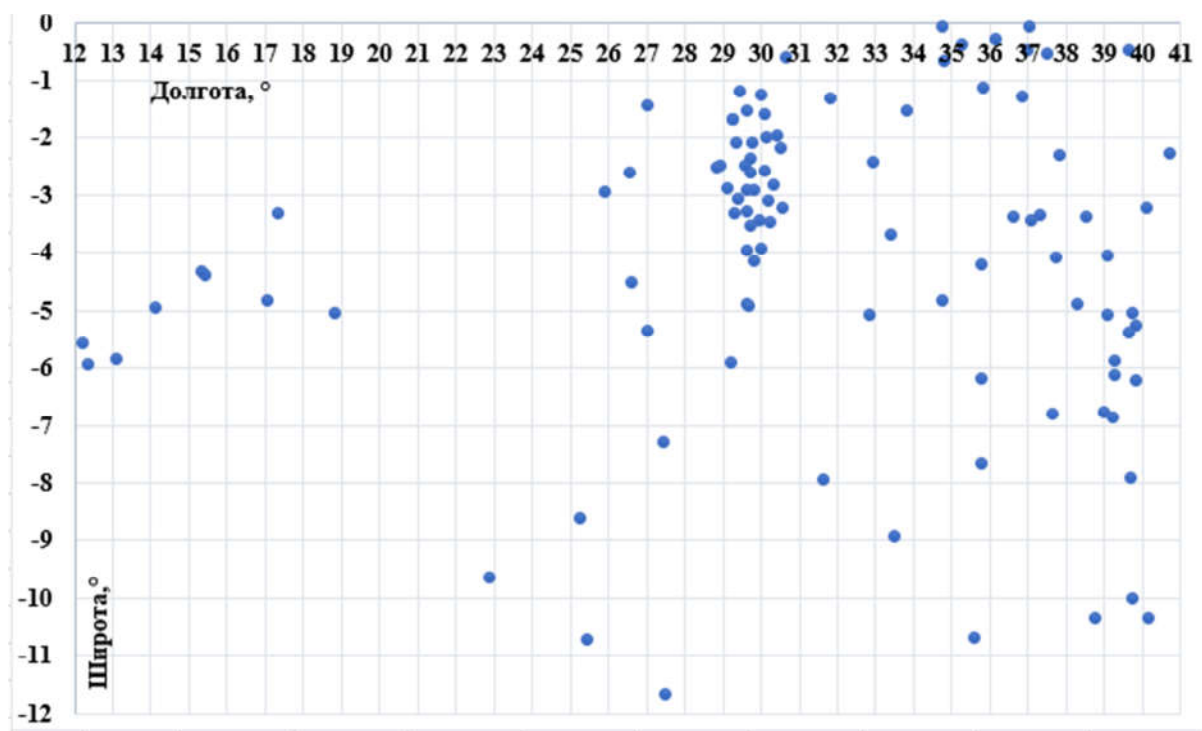


Рис. 1.3 Схема расположения станций наблюдения в восточноафриканском сообществе

Фрагмент адреса расположения метеорологических станций (постов) наблюдения на территории восточноафриканского сообщества проведены в табл. 1.1, а полные таблица расположения адреса находятся в части приложения.

Таблица 1.1

Фрагмент адреса расположения автоматических метеорологических станций

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	Н у.м, в м
пост 1	Бубанза	-3,08	29,38	1067
пост 2	Бужумбура	-3,32	29,32	782
пост3	Бурури	-3,95	29,62	1859
пост 4	Гитега	-3,43	29,93	1689
пост 5	Дар-эс-Салам	-6,87	39,21	55
пост 6	Кигома	-4,88	29,63	882

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	Н у.м, в м
пост 7	Накуру	-0,29	36,16	1909
пост 8	Наньюки	-0,06	37,04	1905
пост 9	Кигали	-1,98	30,13	1491
пост 10	Гисени	-1,70	29,26	1556
пост 11	Гома	-1,66	29,23	1552
пост 12	Букаву	-2,51	28,85	1612
пост 13	Киншаса	-4,38	15,43	309
пост 20	Занз. Кисауни	-6,22	39,81	15
пост 15	Руйиги	-3,48	30,25	1592
пост 16	Рутана	-3,93	29,98	1771
пост 17	Аруша аэроп.	-3,37	36,63	1387
пост 19	Додома аэр	-6,18	35,75	1121
пост 20	Занз. Коани	-6,13	39,28	50
:	:	:	:	:

## 2. Методы анализа пространственных распределений точек

Пространственный анализ — это географический подход, изучающий пространственное положение и взаимодействие как активные компоненты общественного функционирования. Она начинается с постулата о том, что пространство — это организованный актор. Это номотетическая наука. Примечания 1, поэтому она направлена на то, чтобы предложить смоделированный подход к географическому пространству, выделяя повторяющиеся формы пространственной организации и теории, в частности, через различные ключевые понятия: расстояние, сети, структура, ситуация... Таким образом, пространство рассматривается не только как простой опорой, а решающим элементом социальной организации.

Он включает в себя учет сложного набора физических и человеческих данных для анализа пространственного распределения различных явлений,

стараясь не впасть в строгий детерминизм. Рассуждения пространственного анализа в значительной степени опираются на статистические данные и на изотропные пространства (это позволяет разрабатывать теории, которые затем применяются к реальному пространству, которое, по существу, анизотропно с учетом особенностей).

С момента обобщения географических информационных систем пространственный анализ имеет множество инструментов для исследования наблюдаемых пространственных конфигураций или предложения моделирования пространственной организации. Таким образом, они позволяют изменять пространственные объекты, измерять отношения между объектами в зависимости от их расстояния, идентифицировать определенные конфигурации или даже предлагать многочисленные методы пространственной интерполяции. Затем пространственный анализ может привести к геостатистическому моделированию [10].

## **2.1 Методы оценки плотности сети точек наблюдений**

### **2.2.1 Построения гистограмма расстояний между точками**

Для того, чтобы иметь возможность вычислить расстояние между двумя точками на плоскости, вы должны иметь координаты каждой из двух точек. В двумерной системе координат необходимо знать абсциссы и ординаты. Некоторые общие положения: Абсциссы обычно обозначаются «х» и относятся к горизонтальному измерению плоскости. Ординаты часто обозначаются буквой «у» и относятся к вертикальному измерению плоскости. Если координаты точек  $X_1(x_1; y_1)$  и  $X_2(x_2; y_2)$  известны, то расстояние  $Z$  между этими двумя точками определяется соотношением:

$$z = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2.1)$$

Где  $x_1$ , и  $x_n$  — значения первой точке и n-ой точке (долгота),

$y_1$  и  $y_n$  — значения второй точке и n-ой точке (широта),

$z$  - Расстояния между двумя точками на плоскости.

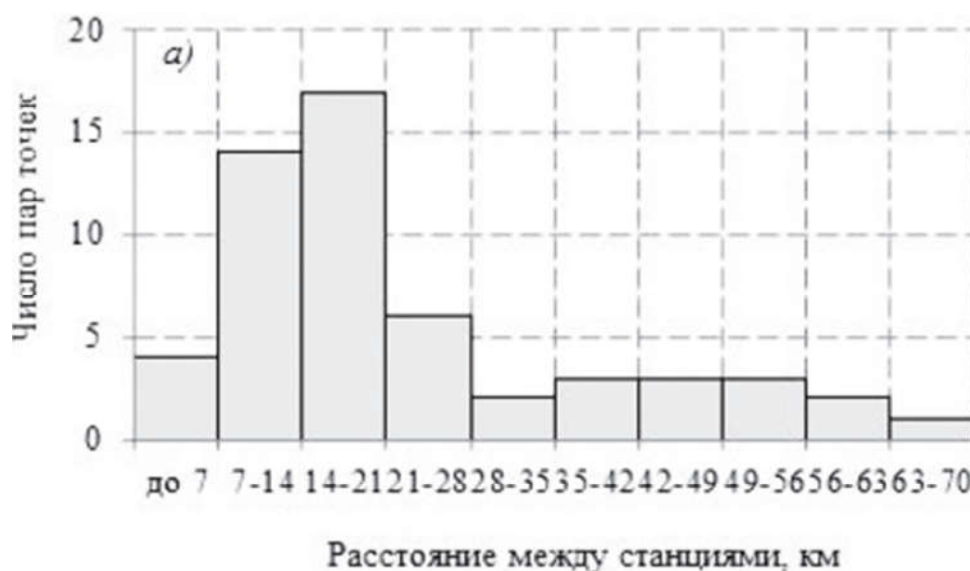


Рис. 2.1 Пример гистограмма расстояний между станциями сети мониторинга в Санкт-Петербурге.

При равномерном распределении точек в пространстве число пар должно быть одинаковым для всех расстояний. Уменьшение числа пар точек с увеличением расстояния между точками свидетельствует о наличии кластеров. Гистограмма в этой случае представляет собой график количества случаев (количества точек), попавших в какой-либо диапазон значений [11].

### 2.1.2 Метод ближайшего соседа

Метод анализ ближайших соседей — это метод классификации наблюдений на основе их сходства с другими наблюдениями. В машинном обучении он был разработан как способ распознавания шаблонов данных без необходимости прибегать к точному сопоставлению с другими сохраненными шаблонами или наблюдениями. Подобные наблюдения близки друг к другу, а

разные наблюдения далеки друг от друга. Следовательно, расстояние между двумя наблюдениями является мерой их непохожести. Алгоритм k ближайших соседей — это алгоритм обучения с учителем, необходимо иметь размеченные данные. По набору E размеченных данных можно будет классифицировать (определить метку) новых данных (данных, не принадлежащих E).

Принцип метода ближайших соседей:

После завершения фазы обучения алгоритма, чтобы сделать прогноз на основе нового неизвестного наблюдения, алгоритм находит наблюдение, наиболее близкое к нему, в наборе обучающих данных, затем алгоритм присваивает метку этих обучающих данных новому наблюдению, которое было неизвестно. Число k в формуле «k ближайших соседей» означает, что вместо ближайшего соседа неизвестного наблюдения мы можем рассматривать фиксированное число k соседей из обучающей выборки.

Наблюдения, расположенные близко друг к другу, называются «соседями». Когда наблюдение представлено (обработано), вычисляется его расстояние от каждого из наблюдений в модели. Классификации наиболее похожих наблюдений - ближайших соседей - подсчитываются, и новое наблюдение помещается в категорию, содержащую наибольшее количество ближайших соседей. Вы можете указать количество ближайших соседей для проверки, это значение называется k.

Анализ ближайших соседей также можно использовать для расчета значений непрерывной цели. В этой ситуации целевое значение медианы или среднего значения ближайшего соседа используется для получения прогнозируемого значения нового наблюдения. Критерий индекс максимальной рассеянности точек определяется по формуле:

$$I = \frac{1.07453}{\sqrt{n/s}} \quad (2.2)$$

Где: I- индекс максимальной рассеянности точек

n- число точек

S- площадь

При максимальной сгруппированности точек, расстояние ближайшего соседа равно нулю (РБС = 0) [10].

## 2.2 Методы оценки кластерности сети точек наблюдений

### 2.2.1 Метод квадратов

Равномерные распределения точки определяются на основе соотношения одинаковых подобластей, называемых квадратами. Если в каждом квадрате примерно одинаковое количество точек, то распределение называется равномерным.

Относительно простой статистический коэффициент, называется критерием  $\chi^2$  (хи-квадрат), может использоваться для проверки равномерности (однородности) распределения и выражается формулой:

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(Q-E)^2}{E} \quad (2.3)$$

Где: Q - наблюдаемое количество точек в квадрате,

E – ожидаемое (среднее) число точек в квадрате,

n - Количество точек.

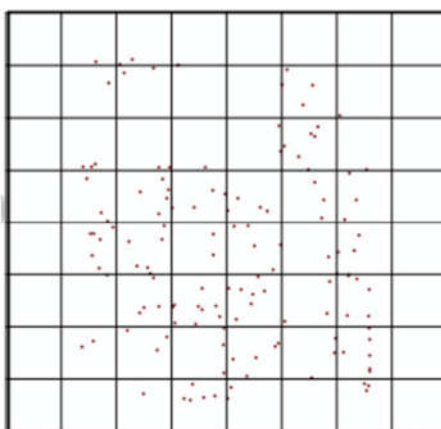


Рис.2.2 пример количества точки в форме квадратической территории [6].

Если  $\chi^2 < \chi^2_{\text{критический}}$ , то станции расположено неравномерно и на оборот.  
 $\chi^2_{\text{критический}} = \text{ХИ2.ОБР}(p, k)$ .

где  $r$  -Параметр любой распределении. При нормальном распределении  $r = 2$ (ско и м.о)

$p$ - уровня значимости или вероятности

$k$ - число степень сבודь =  $n - r = n - 2$

Высокие значения  $\chi^2$  свидетельствуют на большой разброс между числом точек в каждой области и средним для всей области в целом, т. е. мы имеем кластерное (групповое) распределение. И наоборот, малые значения  $\chi^2$  означают, что распределение более равномерное. Промежуточные значения указывают на то, что распределение более тесно связано со случайным процессом, где некоторые квадраты имеют немного больше, а другие немного меньше число, чем среднее [10].

### 2.2.2 Диаграмма Моришита

Диаграмма Моришита представляет собой зависимость между индексом Моришита и размером ячейки разбиения. Распределение точек можно характеризовать с помощью статистических показателей (индексов). Примером такого подхода является диаграмма Моришита. Индекс Моришита ( $I_\delta$ ) рассчитывается для области, разделенной на прямоугольные ячейки равного размера, по формуле:

$$I_\delta = Q * \sum_{i=1}^Q \frac{n_i * (n_i - 1)}{N * (N - 1)} \quad 2.4$$

где  $N$  —число точек измерения в рамках сети мониторинга данных;

$Q$  — число ячеек разбиения сети мониторинга данных;

$n_i$  ( $i = 1, 2, \dots, Q$ ) — число точек, попавших в  $i$ -ю ячейку сети мониторинга данных.

Таким образом, индекс Моришита является характеристикой вероятности того, что при выборе двух случайных точек измерения они окажутся в одной ячейке, на которую разбита сеть мониторинга данных. Существует три основных типа диаграммы Моришита, которые позволяют дать оценку структуре сети мониторинга данных, а именно:

- Значение индекса Моришита с ростом размера ячейки растет или снижает и стремится к 1; то распределение точек можно считать равномерным;
- Значение индекса Моришита с ростом размера ячейки уменьшается или увеличивается выше 1, то распределение точек сети считать кластерным.
- Значение индекса Моришита не зависит от размера ячейки и примерно равно 1 (колеблется около 1); это означает, что распределение точек является случайным и не имеет кластерных структур.

На рис. 2.3 показаны примеры диаграмм Моришита для различных типов сетей мониторинга. Таким образом, в случае мониторинга на регулярной равномерной сетке диаграмма имеет вид гладкой логарифмической кривой, стремящейся к единице (рис. 2.3а). При наличии многочисленных кластеров в плотной сети мониторинга, кривая Моришита заполняется точками перегиба, которые характеризуют размер различных кластеров (рис. 2.3б). В случае произвольного мониторинга с несколькими четко выраженными кластерами кривая Моришита имеет более гладкую форму и уменьшается, стремясь к единице (рис. 2.3в). Размер кластеров характеризует в данном случае точки изменения кривизны.



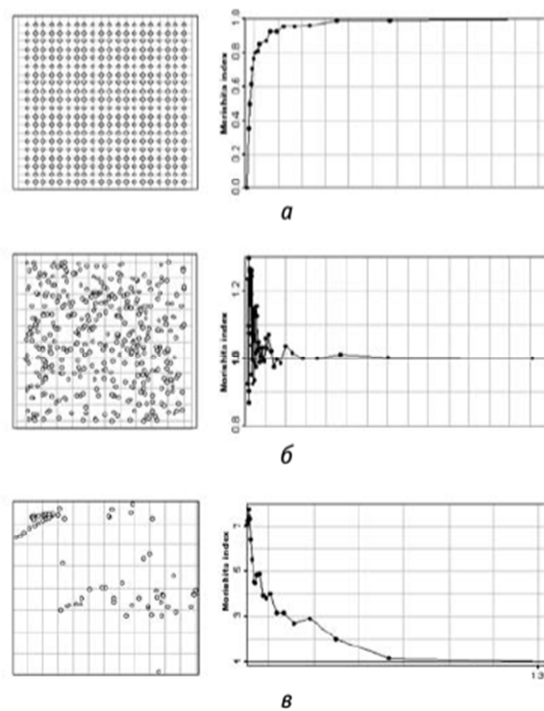


Рис. 2.3. Примеры диаграммы Моришита для различных сетей мониторинга: регулярная равномерная сеть (а), произвольная сеть со слабой кластерной структурой (б), произвольная слабо связанная кластеризованная сеть (в) [11].

### 2.2.3 Метод полигонов Вороного

Диаграмма Вороного, также называемая полигоном Тиссена, представляет собой разложение пространства на области, определяемые заданным набором точек в пространстве, называемых здесь центрами. Каждая область определяется ровно одним центром и включает в себя все точки пространства, находящиеся ближе к центру области, чем к любому другому центру в терминах евклидовой метрики. Эти районы также называют районами Вороного. Диаграмма Вороного создается из всех точек, которые имеют более одного ближайшего центра и, таким образом, образуют границы областей.

Полигоны Вороного создаются таким образом, что каждое место в полигоне находится ближе к точке выборки, присутствующей в этом полигоне, чем к любой другой точке выборки. Например, на этом рисунке желтая точка

окружена полигоном, окрашенным в красный цвет. Когда полигоны созданы, можем видеть, где находится много станций, а где их мала.

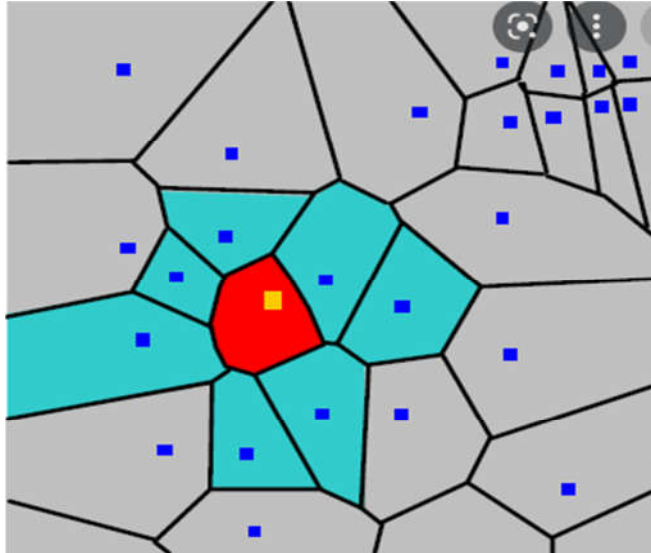


Рис 2.4 пример точек наблюдения и полигонов Вороного.

Таким образом, каждая ячейка содержит только одну точку и замкнутый полигон. Диаграммы Вороного используются в самых разных научных областях, таких как биология, химия, метеорология, кристаллография, архитектура и другие научные дисциплины, такие как вычислительная геометрия и материаловедение. Частным случаем диаграммы Вороного в трехмерном пространстве является ячейка вороного. Диаграммы Вороного, безусловно, можно использовать и как декомпозицию многомерных пространств. В литературе определение в основном ограничивается двумерным реальным пространством. [12].

### 3. Интерполяция данных

Интерполяция данных — это математический инструмент, используемый для оценки данных, попадающих в известный диапазон. Зная крайние значения, вы можете интерпретировать те, которые существуют в этом наборе. Противоположность интерполяции известна как экстраполяция и соответствует

данным за пределами известного диапазона. Эти методы предназначены для создания ряда с более высокой частотой наблюдений на основе ряда с более низкой частотой.

### **3.1 Методы интерполяции**

#### **3.1.1 Метод кригинг**

Метод кригинг — один из наиболее гибких методов, который полезен для интерполяции практически любого типа набора данных для большинства наборов данных кригинг с линейной вариограммой по умолчанию весьма эффективен. Кригинг может быть медленным. Кригинг может быть точным или сглаживающим интерполятором и может экстраполировать значения сетки за пределы диапазона  $z$  значениями.

В статистике, первоначально в геостатистике, кригинг, также известный как регрессия гауссовского процесса, представляет собой метод интерполяции, основанный на гауссовском процессе, управляемом априорными ковариациями. При соответствующих допущениях априорного анализа кригинг дает наилучший линейный несмещенный прогноз в точках без выборки.

Кригинг — это метод интерполяции, основанный на теории районированных переменных. Он зависит от выражения пространственной вариации свойства как функции вариограммы и минимизирует ошибки прогнозирования, которые сами по себе оцениваются.

В зависимости от статистических свойств случайного поля и различных предполагаемых степеней стационарности могут быть выведены разные методы расчета весов, т. е. применяются разные типы кригинга. Главные методы:

- 1) Обычный (ординарный) кригинг предполагает постоянное неизвестное среднее значение только в окрестности поиска.  $Z(x) = m + e(x)$ ,

Где  $m$ - неизвестное значение константа (неизвестное постоянное среднее всех функций  $Z(x)$ ). Неизвестное значение  $Z(x)$  интерпретируется как случайная величина, расположенная в  $\{x\}$ , а также значения соседних выборок  $Z(x_i)$ . Оценка  $Z(x_0)$  также интерпретируется как случайная величина, расположенная в  $\{x_0\}$ , результат линейной комбинации переменных.

- 2) Простой кригинг предполагает стационарность первого момента по всей области с известным средним:  $Z(x) = m + e(x)$ , где  $m$  — известное среднее.

Он предполагает, что математическое ожидание случайного поля известно, и опирается на ковариационную функцию. Однако в большинстве приложений ни математическое ожидание, ни ковариация неизвестны заранее.

- 3) Универсальный кригинг предполагает наличие общего полиномиального тренда, такого как линейный тренд:  $Z(x) = m(x) + e(x)$ , где  $m(x)$  — некоторая детерминистская функция.

Вариограмма представляет собой описание пространственной непрерывности данных. Экспериментальная вариограмма представляет собой дискретную функцию, вычисляемую с использованием меры изменчивости между парами точек, находящихся на разных расстояниях. Точное используемое измерение зависит от типа выбранной вариограммы. Вариограмма является эффективным инструментом для описания поведения нестационарных пространственных случайных процессов. Он в основном используется в пространственной статистике, геостатистике и статистическом проектировании; В геостатистике это «важный шаг» для анализа пространственной изменчивости. Вариограмма измеряет несходство относительно простым способом. Пары точек данных разделены заданным расстоянием смещения. Смещения выбираются пользователем и зависят от типа данных, с которыми вы имеете дело. Эти задержки анализируются на предмет

их среднеквадратичной разницы. Степень несходства между функциями  $Z(x_i)$  и  $Z(x_i + h)$  определяется функцией вариограммы  $\gamma(h)$ : в отличие от функции ковариации, вам не нужно знать среднее значение. Вариограмма является мерой степени пространственной зависимости между показаниями в заданном направлении и определяется по формуле:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad 3.1$$

где  $Z(x_i)$  – значение параметра, взятое в местоположении (точке)  $i$ ;

$Z(x_i + h)$  – значение переменной в местоположении, взятое через интервал  $h$ .

$N$ - количества пар точек.

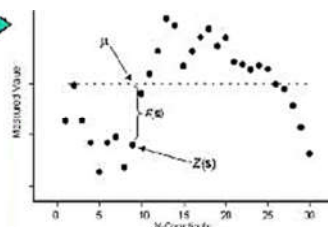
$x$  - пространственная координата.

Формула (3.1) рассчитывается путем суммы половины квадрата разности значений  $z$  по всем парам точки наблюдений с разделением расстояния  $h$ . На следующей диаграмме показано несколько типов моделей кригинга.

### Ординарный:

$$Z(s) = m + e(s),$$

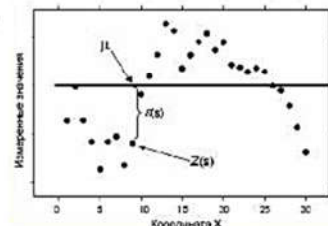
где  $m$  – **неизвестная** константа  
(**неизвестное** постоянное среднее всех значений  $Z(s)$ )



### Простой

$$Z(s) = m + e(s),$$

где  $m$  – **известная** константа  
(**известное** среднее)



### Универсальный:

$$Z(s) = m(s) + e(s),$$

где  $m(s)$  – некоторая  
детерминистская функция

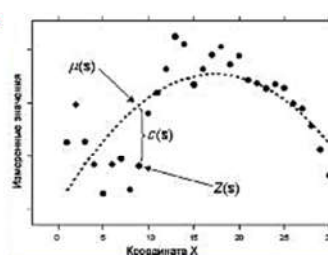


Рис. 3.1 схема, имеющая три основных вида кригинга и их вариограммы.

График вариограммы показан на рис. 3.2. Плоскую область вариограммы называется порогом отображаемого параметра. Расстояние, на котором вариограмма приближается к дисперсии, называется рангом или зоной влияния параметра – см. рис. 3.2. Она определяет окрестность, в которой все значения  $Z_i$  статистически связаны друг с другом. В пределах этой окрестности значение интерполируемого параметра во всех наблюдаемых точках связано со значением параметра в центральной точке и поэтому может быть использовано для оценки его значения. Если использовать набор измерений, сделанных в точках в пределах этой окрестности для оценки значения поля параметров в центральной точке, то вариограмма предоставит свои веса, которые должны быть приписаны каждому измерению.

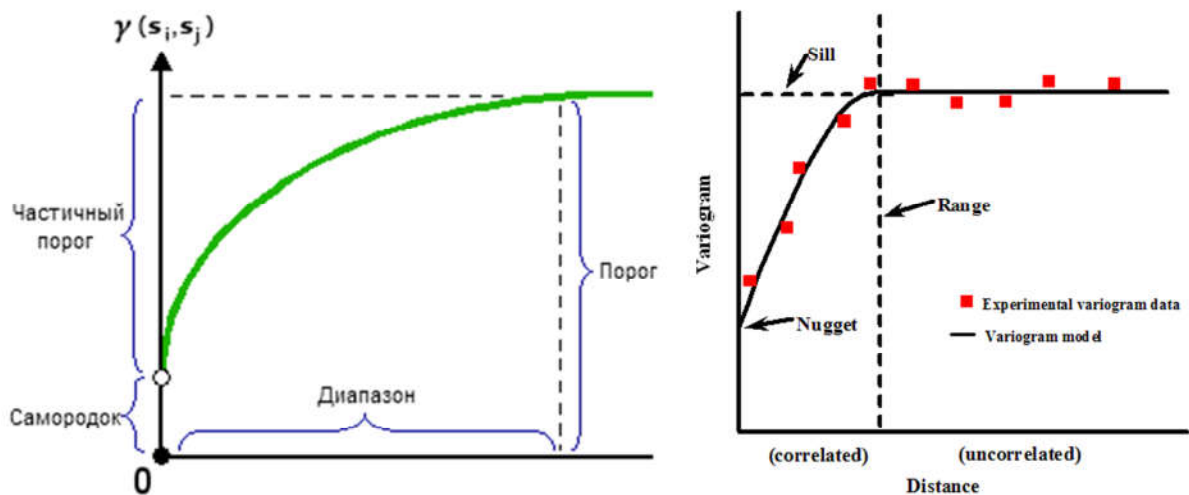


Рис. 3.2 Пример экспериментальная и модель вариограмма

Вариограмма является ключевой функцией в геостатистике, поскольку она будет использоваться для подбора модели временной/пространственной корреляции наблюдаемого явления. Таким образом, проводится различие между экспериментальной вариограммой, которая представляет собой визуализацию возможной пространственно-временной корреляции, и моделью вариограммы,

которая в дальнейшем используется для определения весов функции кригинга. Обратите внимание, что экспериментальная вариограмма является эмпирической оценкой ковариации гауссовского процесса. Таким образом, он может не быть положительно определенным и, следовательно, не может использоваться непосредственно в кригинге без ограничений или дальнейшей обработки. Это объясняет, почему используется лишь ограниченное количество моделей вариограмм: чаще всего это линейная, сферическая, гауссовская и экспоненциальная модели.

Существует бесконечно много возможных моделей вариограмм. Surfer позволяет строить тысячи различных моделей вариограмм, выбирая комбинации из десяти доступных типов компонентов. В сочетании с эффектом самородка для большинства целей подходит одна из трех моделей. наборы данных: линейная, экспоненциальная и сферическая модели. Примеры этих трех моделей показаны на рисунке 3.3.

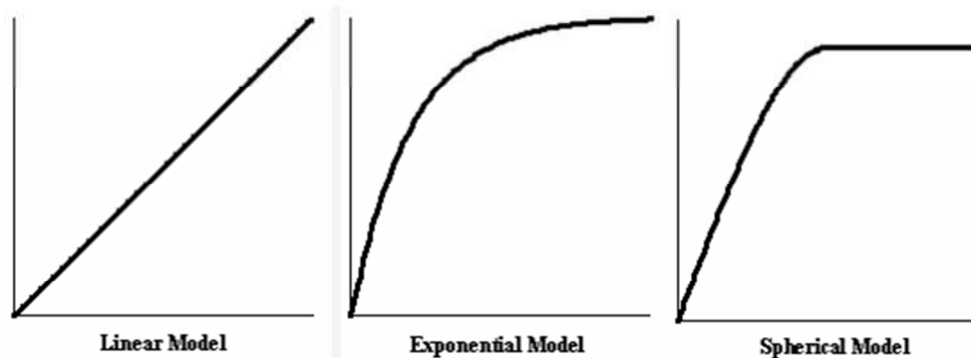


Рис. 3.3 Пример виды модели вариограмма.

Если экспериментальная вариограмма никогда не выравнивается, то обычно подходит линейная модель. Если экспериментальная вариограмма выравнивается, но "изгибается" на всем протяжении, то следует рассмотреть экспоненциальную модель. Если экспериментальная вариограмма начинается

прямо, затем резко изгибается и выравнивается, сферическая модель является хорошим первым выбором.

Кригинг более эффективен, когда в данных присутствует смещение по направлению или пространственно коррелированное расстояние. Он широко используется в геологии и почвоведении. Кригинг присваивает веса ближайшим расчетным значениям для прогнозирования неизмеренного местоположения и, таким образом, аналогичен IDW. Формулы как для IDW, так и для кригинга включают расчет взвешенной суммы данных:

$$Z_{x_0} = \sum_{i=1}^n w_i * Z_{x_i} \quad 3.2$$

Где :  $Z_{x_i}$  - расчетное значение в  $i$ -й месте,  $w_i$  - неизвестный вес вычисляемого значения в  $i$ -й точке,  $n$  - количество измеряемых значений и  $x_0$  - местоположение прогноза.

Значение веса основано на расстоянии области прогноза в методе IDW, тогда как в кригинге веса зависят от комплексного географического порядка вычисляемых точек, расстояния между измеренными точками и области прогнозирования. Пространственная автокорреляция определяется количественно, поэтому ее можно использовать в географическом порядке весов. Следовательно, вес в обычном кригинге основан на расстоянии до прогнозируемого местоположения, подобранной модели до расчетных точек и географическом отношении между расчетными значениями по всей прогнозируемой области. Кригинг можно проводить в стационарном или нестационарном контексте. Простой кригинг выбирается, если известно среднее значение, что происходит только в исключительных случаях. Вместо этого часто верно обратное: среднее значение неизвестно и должно быть найдено. Это относится к исследованиям, посвященным глобальному потеплению.



Этапы интерполяции по методу кригинга:

1. Расчет эмпирической вариограммы
2. Подбор теоретической функции к полученной эмпирической полувариограмме (методом наименьших квадратов).
3. Нахождение весов  $\lambda_i$  на основе полученной модели вариограммы.
4. Выполнение интерполяции – на основе рассчитанных весов кригинга  $\lambda_i$  ( $w_i$ ) и известных значений  $Z_i$  в опорных точках в пределах заданного радиуса поиска вычисляется значение в искомой точке  $Z_0$ .

В зависимости от количества используемых опорных точек разделяют:

- глобальные методы - вычисляют искомые значения по набору опорных точек (глобальный полиномиальный метод);
- локальные методы - вычисляют неизвестные значения по опорным точкам, расположенным близко к искомому (метод обратных взвешенных расстояний и метод сплайн) [13-14].

### **3.1.2 Метод обратных расстояний**

Обратное расстояние — это метод пространственной интерполяции, процесс присвоения значения любой точке пространства из набора известных точек. Это очень быстрый метод интерполяции, но он имеет тенденцию генерировать шаблоны вокруг точек данных. Обратное расстояние может быть точным или сглаживающим интерполятором. Этот метод не экстраполирует значения  $z$  за пределы диапазона данных. Значения, присвоенные неизвестным точкам, рассчитываются на основе средневзвешенного значения значений, доступных в известных точках. Название, данное этому типу метода, было мотивировано применяемым средневзвешенным значением, поскольку оно

использует обратное расстояние до каждой известной точки («количество близости») при назначении весов.

Метод обратное взвешивание расстояний— это детерминированный алгоритм, основанный на предположении, что значения в близких точках оказывают более сильное влияние на прогнозируемое значение, чем значения в более удаленных точках. Интерполяция выполняется по известным значениям из окрестности заданной точки. Предполагается, что каждая точка известного значения (далее, мы будем называть эти опорные точки) оказывает локальное влияние, уменьшающееся с расстоянием. Общей формой для нахождения интерполированного значения  $Z_0$  из заданной точки (о) с использованием обратного взвешивания расстояний является интерполяционной функцией:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_{io} * Z_i}{\sum_{i=1}^n w_{io}} \quad 3.4a$$

Где:  $Z_0$ -вес, среднее значение;

$Z_i$ - значение функции  $Z$  в точке  $i$ ,

$W_{io}$ -некоторая обратная функция расстояния.

$n$  - общее количество известных точек, используемых при интерполяции.

Где:

$$w_{io} = \frac{1}{\sqrt{(d_{io}^2 + \delta^2)^\beta}} \quad 3.4b$$

Где  $d_{io}$  – расстояние между искомой точкой  $(X_0, Y_0)$ , например, узлом регулярной сетки, и  $i$ -ой точкой измерения;

$\beta$  — степенной параметр, определяющий скорость положительное действительное число, называемое параметром мощности.

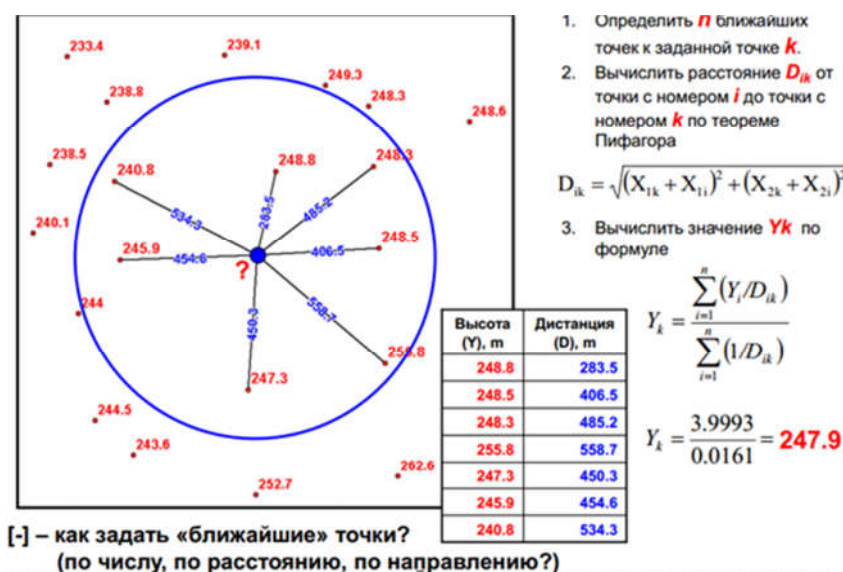
Здесь вес соседних точек уменьшается с увеличением расстояния. Большие значения  $\beta$  дают большее влияние на значения ближе к интерполируемой точке:

При  $0 < \beta < 1$  в  $Z_i$  наблюдаются плавные пики вокруг точки интерполяции, а при  $\beta > 1$  пик становится более резким. Таким образом, выбор  $\beta$  является функцией степени сглаживания, необходимой для интерполяции, плотности и распределения интерполированных выборок и максимального расстояния, за пределами которого отдельная выборка может влиять на окружающие точки. Как описано, функция интерполяции не определена в точках интерполяции (деление 0/0). В этом случае вес будет принят равным 1 для точки на расстоянии 0 от  $x$  и 0 для всех остальных точек.

$\delta$  — Параметр  $\delta$  представляет собой коэффициент сглаживания от 0 до 1.

- ✓ Если  $\delta = 0$ , то метод работает как точный интерполятор.
- ✓ Если  $\delta > 0$ , то метод работает как сглаживающий интерполятор, и чем больше параметр сглаживания, тем слабее подавляющее влияние конкретного наблюдения при вычислении оценки в произвольной точке.

Схема алгоритма IDW представлена на рис. 3.4. Заметно, что измерения, выполненные близко от интерполируемого местоположения, оказывают большее влияние на результат оценки, с ростом расстояния от интерполируемого положения вес измерений уменьшается.



### Рис. 3.4 Алгоритм метода обратных расстояний

Этот метод является методом локальной интерполяции. В этом методе оцениваемое значение в точке изучаемой области определяется с помощью средневзвешенного значения ближайших к рассматриваемой точке точек. Поэтому вначале мы измеряем расстояние между желаемой точкой и известными точками в окружении. В дальнейшем вычисление точки поиска производится с использованием среднего значения окружающих точек. Таким образом, чем ближе интерполируемая точка к точке, значение которой известно, тем ближе значение интерполируемой точки будет к известному значению.

Рассмотрев основные методы интерполяции, можно с уверенностью сказать, что эффективность любого метода будет зависеть только от правильного выбора, в соответствии с имеющимися данными и анализом поставленной задачи [13-14].

### 3.2 Методы оценки точности интерполяции

В этом методе, различаем разные типы алгоритмов для количественной оценки качества сгенерированной модели, наиболее распространенными являются: перекрестная проверка (cross-validation), метод складного ножа, бутстрап (bootstrap).

Простым и часто рассматриваемым подходом к сравнению результатов интерполяции разными методами или одним и тем же методом, но с разными параметрами является перекрестная проверка. Алгоритм кросс-валидации следующий:

- Одна точка удаляется из базы данных и ее значение оценивается выбранным методом;
- После этого полученное значение сравнивается с известным значением и вычисляется отклонение (ошибка интерполяции) - разница между

значениями, полученными после выбранного метода и рассчитанными: первые два шага выполняются для всех выбранных точек база данных.

Метод складного ножа является более общим:

- Несколько точек измерения (произвольный набор) снимаются с рассмотрения, они оцениваются;
- Ошибки интерполяции (остатки) анализируются так же, как мы делали выше у метода перекрестной проверки.

Алгоритм бутстрепа (bootstrap) следующий:

- Производится случайная выборка точек измерения из базы данных;
- Выбранная точка не замеряется, поэтому ее можно замерить много раз;
- Оценка выполняется по оставшимся невыбранным точкам;
- Обычно процедура выборки и оценки повторяется несколько раз [15].

Для оценки различных методов интерполяции использовались абсолютной ошибки интерполяция и относительной ошибки интерполяция, которые вычислялись с помощью следующих формулы:

$$\Delta t = t_{\text{факт}} - t_{\text{интерп}} \quad 3.5$$

$$\delta t = \frac{|\Delta t|}{t_{\text{факт}}} * 100\% \quad 3.6$$

Где:  $\Delta t$  – Абсолютная ошибок интерполяция температура воздух,

$t_{\text{факт}}$  - фактическая температура воздух,

$t_{\text{интерп}}$  - интерполяция температура воздух.

$\delta t$  - Относительная ошибок интерполяция температура воздух.

#### **4. Результаты пространственного анализа сети метеорологических станций в восточноафриканском сообществе**

##### **4.1 Результаты анализа оценки плотности сети точек наблюдений**

Результаты анализа оценки плотности сети точек наблюдений выполняются с помощью следующих метода:

- Построения гистограмма расстояний между станциями

При построении гистограммы расстояний между метеорологическими станциями определяются с помощью формулы 2.1 и занести его фрагмент в табл.4.1, а полная таблица представлена в части приложения. Знаем, что,  $1^\circ = 111\text{км}$ , рассчитаем разных расстояния между станциями.

Таблица 4.1

Фрагмент расчёт для определения расстояния между станциями в километрах

Пост	Широта, °	Долгота, °	Z=1	Z= 2	Z= 3	Z= 4	Z= ...
Пост 1	-3,08	29,38					
Пост 2	-3,32	29,32	27,5				
Пост 3	-3,95	29,62	100,2	77,5			
Пост 4	-3,43	29,93	72,4	68,8	67,2		
Пост 5	-2,92	29,62	32,0	55,5	114,3	66,2	
Пост 6	-3,22	30,55	130,8	137,0	131,2	72,7	108,5
Пост 7	-2,88	29,12	36,4	53,6	131,1	108,7	55,7
Пост 8	-3,11	30,17	87,8	97,2	111,4	44,4	64,6
Пост 9	-2,58	30,11	98,2	120,2	161,5	96,4	66,2
Пост10	-4,13	29,81	125,9	105,1	29,1	78,8	136,0
Пост11	-3,52	29,71	61,1	48,7	48,8	26,4	67,3
Пост 12	-2,83	30,33	109,0	124,6	147,2	80,0	79,4
Пост 13	-3,27	29,62	34,0	33,8	75,5	38,7	38,9
Пост 14	-2,92	29,82	52,0	71,1	116,5	57,9	22,2
Пост 15	-3,48	30,25	106,3	104,7	87,2	36,0	93,6
Пост 16	-3,93	29,98	115,5	99,8	40,0	55,8	119,0
Пост 17	-3,37	36,63	805,4	811,4	780,8	743,7	779,7
Пост 18	-6,87	39,21	1169,4	1166,4	1112,7	1098,6	1151,3
:	:	:	:	:	:	:	:

После вычисления расстояний между станциями, с помощью пакета анализ данных, получен автоматические значения, которые приведены в таблице 4.2 и построим гистограмму, показывающую зависимость частоты эксперимента от расстояния между станциями и представленную на рис.4.1

Таблице 4.2

Расстояние между станциями, км	Количество событий
6	176
321	860
639	720
957	1121
1275	850
1594	454
1912	231
2230	158
2548	255
2867	125
> 2867	75

Гистограмма представляет собой график количества пар точек измерения (частоты) попадавших в определенном диапазоне значений расстояния. При равномерном распределении станций в пространстве количество пар должно быть одинаковым для всех расстояний, т. е. гистограмма, построенная на пространственно-однородной сети, имеет однородную форму или равномерный вид

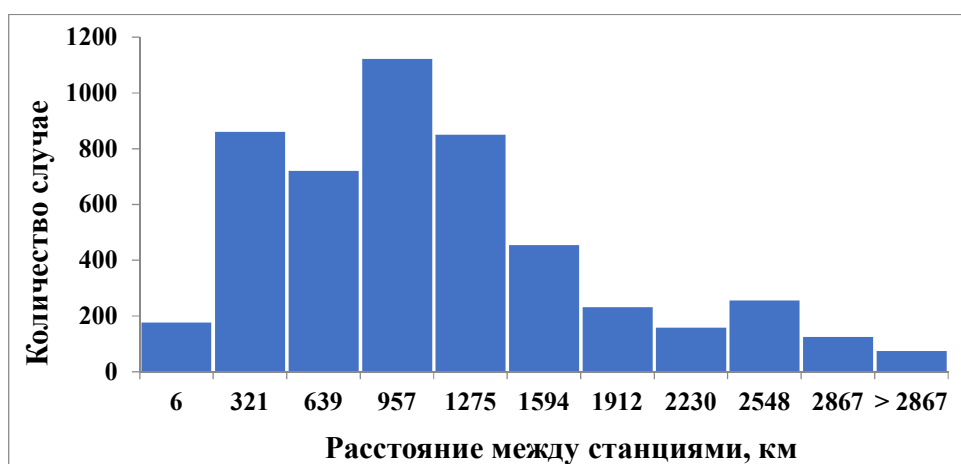


Рис. 4.1 Гистограмма расстояний между станциями в восточной Африке для 101-го станции.

С этой графикой видно, что пар точек должен уменьшаться с ростом расстояния). Тогда, В нашем случае, сети мониторинга на территории восточно-Африки, расположены неравномерно, потому что количество пар точек разные с увеличением расстояния. Наблюдается единый пик числа пар на расстоянии 957 км говорят о наличии кластера. Следовательно, сети распределений метеорологического станция наблюдений в восточноафриканском сообществе является кластерной.

- Результаты для расстояния до ближайшего соседа

После расчета вычислений расстояния между метеорологическими станциями на территории восточноафриканского сообщества определяем расстояния до ближайшего соседа с помощью рис. 1.3 и вычисляем расстояние до ближайшего соседа на всех станциях с использованием формуле 2.1 и



проведен его фрагмент в таблице 4.3, а полная таблица представлена в части приложения.

Таблица 4.3

Фрагмент вычислений расстояния до ближайшего соседа

№ постов	Широта, °	Долгота, °	Ближайший сосед	РБС (Z), км
пост 1	-5,57	12,19	пост 2	44,2
пост 2	-5,93	12,36	пост 3	81,5
пост 3	-5,85	13,09	пост 3	81,5
пост 4	-4,95	14,13	пост 6	149,5
пост 5	-4,38	15,43	пост 6	13,9
пост 6	-4,32	15,32	пост 5	13,9
пост 7	-4,83	17,07	пост 9	194,4
пост 8	-3,31	17,35	пост 9	171,6
пост 9	-5,03	18,81	пост 7	194,4
пост 10	-9,63	22,85	пост 11	288,6
пост 11	-8,63	25,25	пост 12	233,0
пост 12	-10,72	25,45	пост 13	248,8
пост 13	-11,67	27,48	пост 12	248,8
пост 14	-7,28	27,43	пост 11	284,6
пост 15	-5,35	27,01	пост 16	103,8
пост 16	-4,52	26,58	пост 15	103,8
пост 17	-2,95	25,92	пост 18	80,5
пост 18	-2,59	26,55	пост 19	139,5
пост 19	-1,42	27,01	пост 18	139,5
пост 20	-1,18	29,45	пост 21	59,3
пост 21	-1,25	29,98	пост 22	48,4
пост 22	-1,51	29,63	пост 23	49,5
пост 23	-1,58	30,07	пост 24	91,6
пост 24	-1,67	29,25	пост 28	2,5
пост 25	-0,61	30,65	пост 21	102,8
пост 26	-1,32	31,82	пост 25	151,9
пост 27	-1,98	30,13	пост 28	33,5
:	:	:	:	:

Вычисляем общий площадь всех территории находятся станция, которые обозначаем S

$$S = \Delta y * \Delta x,$$

Где  $\Delta y = y_{\max} - y_{\min}$ , а  $\Delta x = x_{\max} - x_{\min}$

$$\Delta y = y_{\max} - y_{\min} = (-0,06+11,67) * 111\text{км}=1288,71\text{км}$$

$$\Delta x = x_{\max} - x_{\min} = (40,69-12,19) * 111\text{км}=3163,50\text{км}$$

$$S = \Delta y * \Delta x = 4076834,5\text{км}^2$$

РБС случайный представляет собой отношение между количествами станциями по территории в единицу площадей где находятся эти станция. Тогда,

$$\text{РБС случайный} = 101 / S = 101 / (\Delta y * \Delta x) = 2,48\text{E-}05 \text{ км}$$

$$\text{Среднее РБС}(Z) = 97,1\text{км}$$

$$\text{Индекс максимальной рассеянности} - 1.07453 / (n/S)^{1/2} = 215,9 \text{ км}$$

Можно оценивать этих числа в долях =  $97,1/215,9 = 0,45$  или 45%

При максимальной сгруппированности (кластерности), РБС = 0

Наше значение доля (45%) ближе к нулю что означает кластерности или среднее РБС намного меньше, чем этот индекс и намного больше, чем 0, который соответствует идеально сгруппированному(кластерному) распределению. Таким образом, мы нашли, что наше распределение несколько более рассеянное, чем случайное. Наше среднее РБС намного больше, чем, РБС случайного, который соответствует идеальному сгруппированному распределению ( $97.1 > 2.48\text{e-}5$ ).

#### **4.2 Результаты анализа оценки кластерности сети точек наблюдений**

Результаты анализа оценки кластерности сети точек наблюдений выполняются с помощью следующих метода:

- С помощью метода квадратов

Для проверки равномерности распределения метеорологическими станциями на территории восточноафриканского сообщества, которые представлен на рис.1.3, можно использовать относительно простой статистический коэффициент, называемый критерием  $\chi^2$ . С помощью этой рисунки определим количества точек паподавших в каждом квадрате, результаты всех квадратов определяются с помощью формулы 2.3 и занести фрагмент этих результаты в таблице 4.4, а полная таблица представлена в части приложения.

Таблице 4.4

Фрагмент для расчета результаты по методу квадратов

№ квадратов	Q	E (Средняя).	$(Q-E)^2/E$
1	2	1,507	0,16
2	1	1,507	0,17
3	1	1,507	0,17
4	2	1,507	0,16
5	1	1,507	0,17
6	1	1,507	0,17
7	1	1,507	0,17
8	1	1,507	0,17
9	1	1,507	0,17
10	1	1,507	0,17
11	1	1,507	0,17
12	1	1,507	0,17
13	1	1,507	0,17
14	1	1,507	0,17
15	1	1,507	0,17
16	1	1,507	0,17
17	1	1,507	0,17
18	1	1,507	0,17
19	1	1,507	0,17
20	1	1,507	0,17
21	1	1,507	0,17
22	1	1,507	0,17

№ квадратов	Q	E (Средняя).	$(Q-E)^2/E$
23	1	1,507	0,17
:	:	:	:
m=101			$\chi^2 = 69.5$

Находим хи квадрат фактический

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(Q-E)^2}{E} = 69.5$$

При равномерном распределении с вероятностью (уровня значимости) 0,95; находим  $\chi^2$  критическая, тогда  $k = m - r = 101 - 2 = 99$

где  $r$  – число степеней свободы. При равномерном распределении  $r = 2$  (ско и м.о),  $m$  – количества точек

$$\chi^2_{\text{крит}} = \text{ХИ2.ОБР.ПХ} (0.95, 99). = 77,1$$

Можно сделать вывод что, получим малые значения  $\chi^2$  (69,49), чем  $\chi^2$  критические означают, что распределение метеорологических станции более неравномерное. Значения  $\chi^2$  свидетельствуют о большом разбросе между количеством точек в каждом регионе и средним точкам во всех регионах, то есть, мы имеем кластер распределение метеорологических станции на территории ВАС.

- Построена диаграмма Моришита для метеорологических станций на территории восточноафриканского сообщества

Метод анализа сети мониторинга, основано на статистическом индексе, называемом индексом Моришита. Область исследования, заданный в виде квадрата и содержащий определенное количество точек измерений, разбивается на прямоугольные ячейки одинакового размера, для каждой ячейки рассчитывается количество попадающих на нее метеостанций. Индекс

Моришита  $I_8$ , характеризующий вероятность попадания двух точек в одну ячейку.

В работе использовалась программа Java Script, характеризующая расчет вычисление индекса Моришита при последовательном разбиении территории Восточно-Африканского сообщества на сетке с размером 100x100, 98x98 и т.д. до 2x2 ячеек. После обработки, результаты этой программы Java Script занесен в таблице 4.5.

Таблице. 4.5.

Результаты вычисления индекса Моришита  $I_8$

Количество ячеек разбиения	Индекс Моришита $I_8$	Размер ячейки разбиения, км
2x2	2,05	1581,8
4x4	2,19	790,9
6x6	2,90	527,3
8x8	2,78	395,4
10x10	3,88	316,4
12x12	4,80	263,6
14x14	5,07	226,0
16x16	3,83	197,7
18x18	3,67	175,8
20x20	6,06	158,2
22x22	5,18	143,8
24x24	5,59	131,8
26x26	5,19	121,7
28x28	5,23	113,0
30x30	5,46	105,5
40x40	4,97	98,9
34x34	4,90	93,0
36x36	5,24	87,9
38x38	4,96	83,3
40x40	5,50	79,1
42x42	4,99	75,3
44x44	3,13	71,9
46x46	3,42	68,8

Количество ячеек разбиения	Индекс Моришита $I_{\delta}$	Размер ячейки разбиения, км
48x48	5,12	65,9
50x50	4,04	63,3
52x52	2,73	60,8
54x54	4,71	58,6
56x56	4,44	56,5
58x58	2,72	54,5
60x60	3,64	52,7
62x62	3,88	51,0
64x64	3,31	49,4
66x66	4,40	47,9
68x68	2,80	46,5
70x70	1,98	45,2
72x72	3,14	43,9
74x74	4,43	42,8
76x76	1,17	41,6
78x78	3,69	40,6
80x80	1,29	39,5
82x82	1,36	38,6
84x84	0,00	37,7
86x86	1,49	36,8
88x88	1,56	35,9
90x90	0,00	35,2
92x92	0,00	34,4
94x94	0,00	33,7
96x96	0,00	33,0
98x98	0,00	32,3
100x100	2,02	31,6

В основном однообразный уменьшается значений индекса Моришита с увеличением размеров клеток (ячеек). По результатам рассчитаны индекса Моришита  $I_{\delta}$  построится диаграмма Моришита, показанная на рис. 4.2, на графике есть кривая, стремящаяся к двойке.

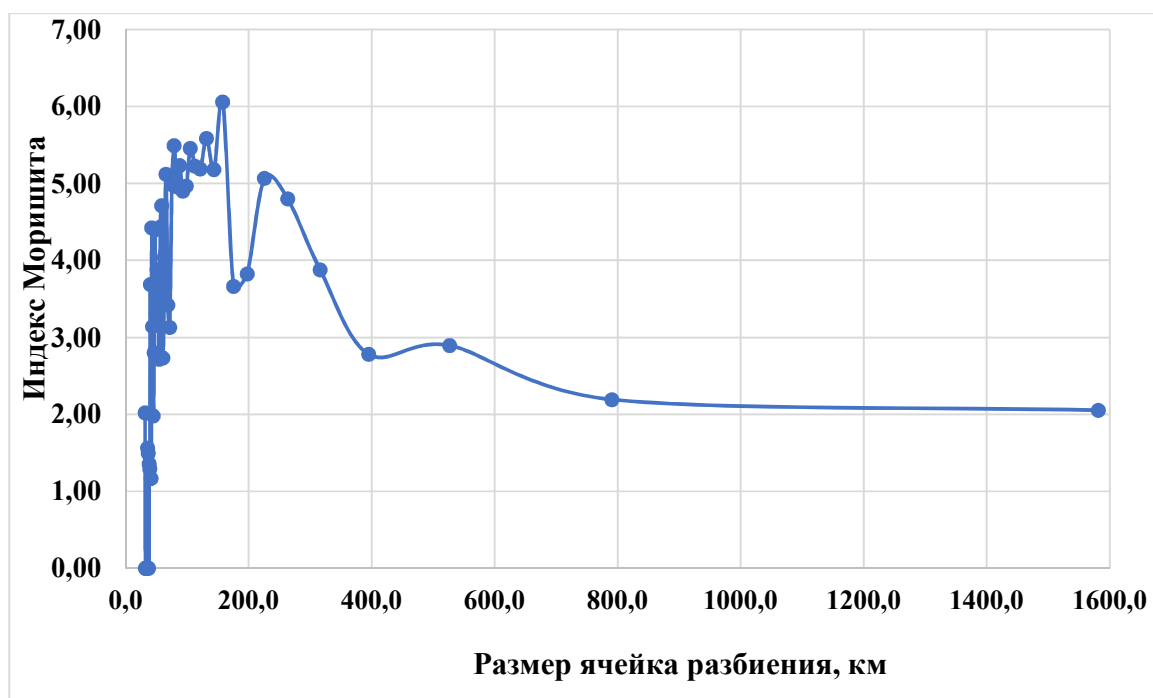


Рис.4.2 Диаграмма Моришита для метеорологических станций в ВАС.

Из графика видно, что с увеличением размера ячейки, значения индекса Моришита сначала растут, затем уменьшаются, стремясь к значению 2, что говорит о наличии кластерных структур в сети метеостанция на территории восточно-Африканского сообщества.

- Построение гистограмма площадей полигонов Вороного

Гистограмма площади полигона Вороного представляет собой график, зависящий от количества событий (количества полигонов), попадающих в диапазон значений площадей. С помощью пакета программ QGIS были получены диаграмма Вороного и метеостанции на территории восточноафриканского сообщества, показано на рис. 4.3а.

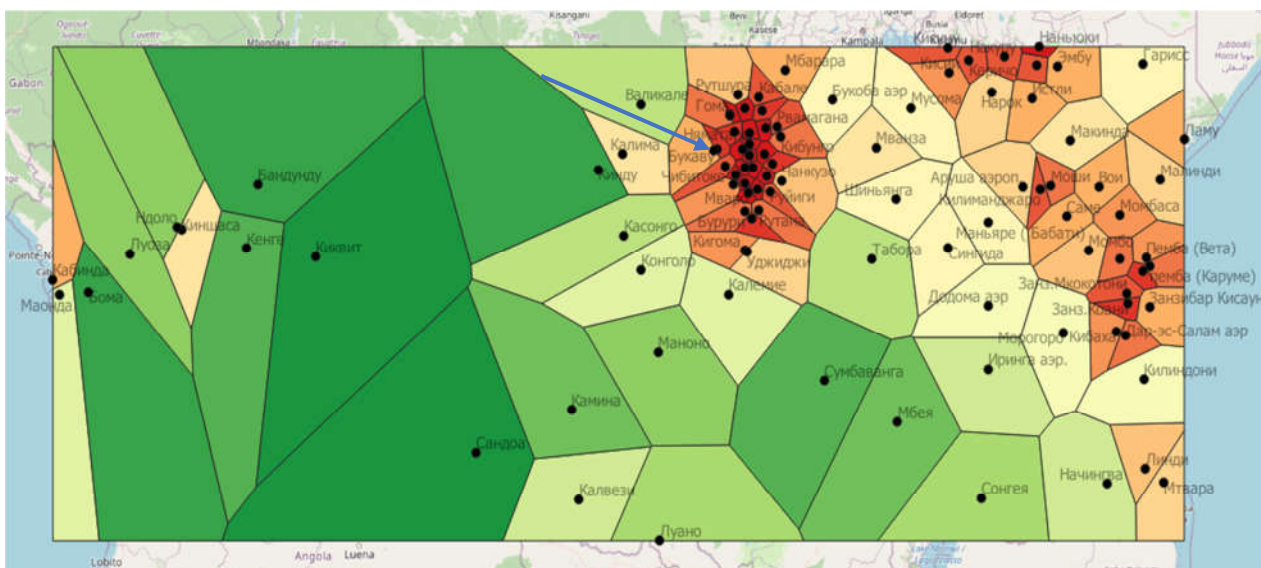


Рис.4.3а Точки станций и полигоны Вороного

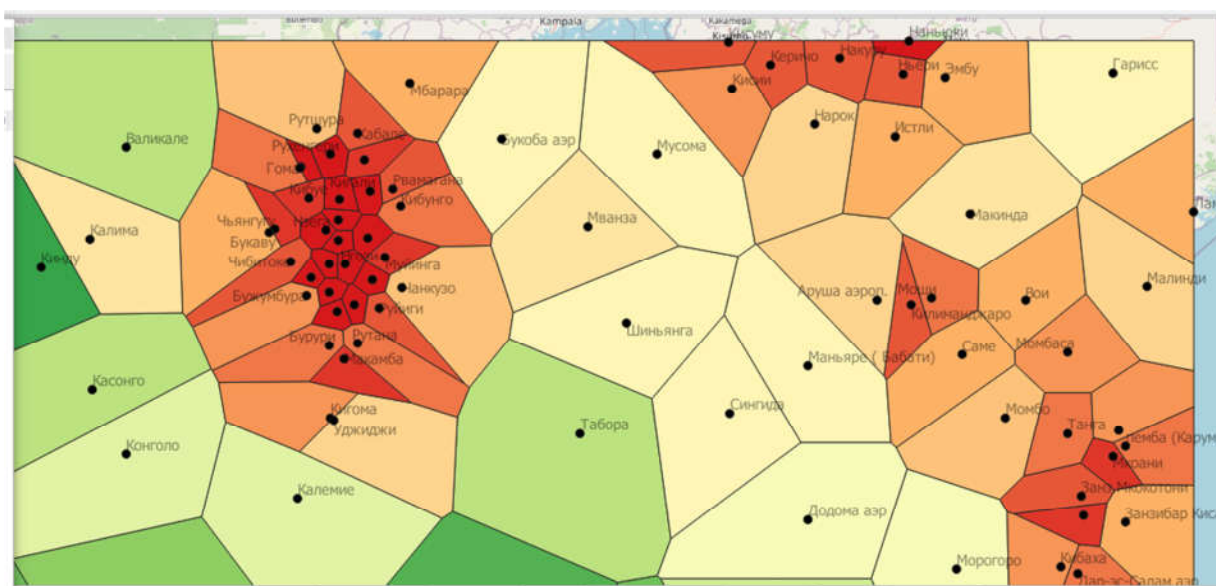


Рис.4.3б. Увеличений фрагмент, где находится кластерности станция.

Полигоны Вороного характеризуются тем, что каждый следующий установленный полигон имеет только одну точку (станцию). с другой стороны, даже если часть этого ребра ближайшей точкой является именно то, что лежит внутри многоугольников. Когда полигоны созданы, мы видим, где станций много, а где мало. Используя этот метод полигонов, мы можем получить очень



полезные данные о районах, где мало станций и где их много. Используя, программа QGIS метеорологических станции на территории восточноафриканского сообщества расположены неравномерны.

С помощью этого программного комплекса QGIS были рассчитаны площади каждого полигона, занести в таблице 4.6 и построена гистограмма зависимости площади полигона от числа случаев (частоты), представленная на рисунке 4.4.

Таблице 4.6

Площадь, км <sup>2</sup>	Количества полигонов
107	6
3198	44
6288	12
9379	8
12470	6
15561	10
18651	5
21742	3
24833	4
27923	1
31014	2

Где град/км<sup>2</sup> — это град на квадратическом километре.

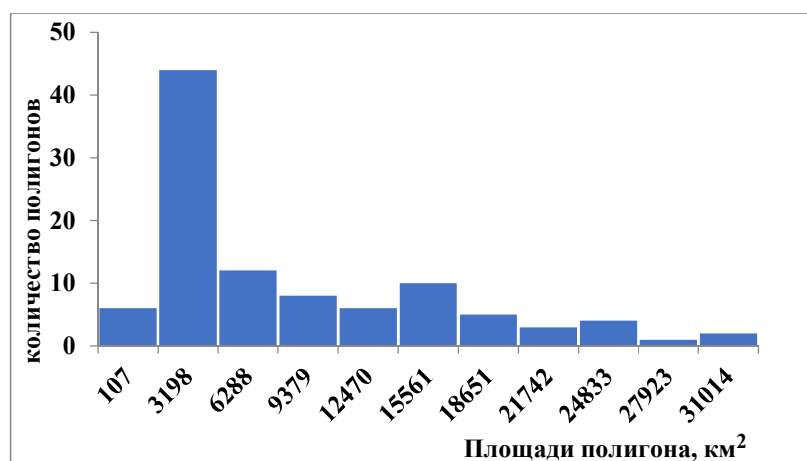


Рис.4.4 Гистограмма площади полигона

Очевидно, из гистограммы много метеорологических станции на территории восточноафриканского сообщества попадали в площади 3198 квадратных километров которые имеют количества случаев 44. На большую площадь имеет 31014 квадратных километров. Смотри на рисунке 4.4, наша гистограмма площади полигоны Вороного имеет один широкий пик. Любое деформации гистограмме (широкий пик, много пиков) указывает на наличие кластеров в сети мониторинга.

## 5. Интерполяция температуры воздуха

По данным значению среднесуточная температура воздуха с разными метеостанциями расположены на территории восточноафриканского сообщества (ВАС) со значительными разрывами покрывали 1 года – с 04/08/2021, был взят на сайте [gr5.ru](http://gr5.ru). В таблице 5.1 приведены фрагмент значения среднесуточных температуры воздуха измеренными в разных постах сетей, а полная таблица представляет в части приложения.

Таблице 5.1

Фрагмент значения среднесуточных температуры воздуха

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	T, °C
---------------	----------------	------------	-------------	-------

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	T, °C
пост 1	Бубанза	-3,08	29,38	25
пост 2	Бужумбура	-3,32	29,32	25
пост 3	Бурури	-3,95	29,62	21
пост 4	Гитега	-3,43	29,93	21
пост 5	Дар-эс-Салам	-6,87	39,21	29
пост 6	Кигома	-4,88	29,63	23
пост 7	Накуру	-0,29	36,16	25
пост 8	Наньюки	-0,06	37,04	25
пост 9	Кигали	-1,98	30,13	23
пост 10	Гисени	-1,67	29,25	21
пост 11	Гома	-1,68	29,23	24
пост 12	Букаву	-2,51	28,85	21
пост 13	Киншаса	-4,38	15,43	29
:	:	:	:	:

С помощью пакета анализ данных, получен автоматические значения, которые приведены в таблице 5.2 и построим гистограмму, показывающую зависимость частоты эксперимента от среднесуточных температуры воздуха в разных станциях и представленную на рис.5.1

Таблице 5.2

t, °c	Количества случае
20	2
21	13
22	9
23	19
24	9
25	14
26	3
27	2
28	2
29	10
30	16
31	2

На рис. 5.1 приведена диаграмма среднесуточных значений температуры воздуха наблюдались в разных станциях в 2021 г.



Рис.5.1 Среднесуточные температуры воздуха в разных станциях восточной Африки.

Как видно из рис. 5.1:

- Среднее значение температуры составляет  $25,1^{\circ}\text{C}$
- Максимальное значение наблюдалось 67й и 69й постов (Бои и Малинди), который составляют  $31^{\circ}\text{C}$ .
- Минимальное значение наблюдались на 34-ом постов (Мбея), который составляет  $20^{\circ}\text{C}$ .

После этого, с используем пакет анализ данных, получим все характеристики

исходных данных (температуры воздуха) и занести в таблице 5.3.

Таблице 5.3

Среднее	25,1°C
Стандартная ошибка	0,3°C
Медиана	24,0°C
Мода	23,0°C
Стандартное отклонение	3,3 (°C) <sup>2</sup>
Дисперсия выборки	12,0
Эксцесс	-1,2
Асимметричность	0,4
Интервал	12,0
Минимум	20,0°C
Максимум	31,0°C
Сумма	2535,0
Счет	101,0

Где:

- Среднее значение — некоторое число, заключённое между наименьшим и наибольшим из их значений.
- Стандартная ошибка среднего в математической статистике — статистический параметр, величина, характеризующая выборочное распределение, в частности стандартное отклонение выборочного среднего, рассчитанное по выборке размера.
- Медиана чисел – это число, стоящее посередине упорядоченного по возрастанию ряда чисел.
- Мода – число повторяется много раз или совокупность привычек в заданном ряде.
- Низкое стандартное отклонение указывает на то, что значения имеют тенденцию быть близкими к среднему значению. Стандартное отклонение это мера величины вариации или дисперсии набора значений.

## **5.1 Интерполяция методом кригинга и методом обратных расстояний**

### **5.1.1 Построение вариограммы**

Вариограмма — это математическая функция, используемая в пространственной статистике, геостатистике и статистическом проектировании, в частности для кригинга. Вариограмма является эффективным инструментом для описания поведения нестационарных пространственных случайных процессов.

Она определяет средний квадрат разности между значениями в точках измерений как функцию расстояния между ними. Если вариограмма меняется от направления, то в этом случае это свидетельствует о наличии анизотропии в поле. Анизотропия - неоднородность свойств или характеристика набор данных по разным направлениям.

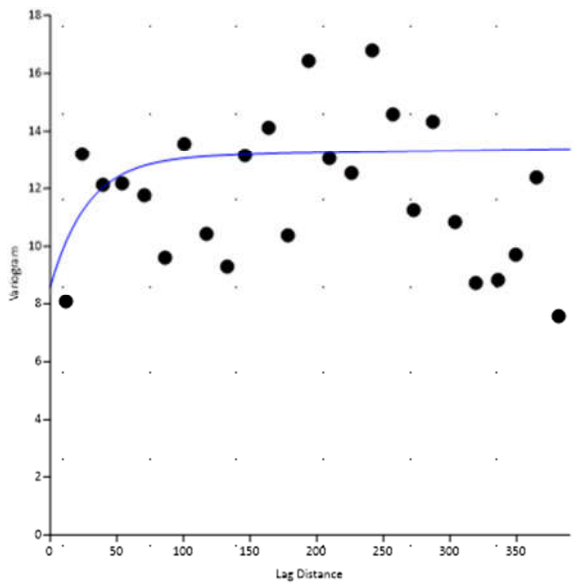
Вариограмма определяется для любой внутренней случайной функции и зависит только от расстояния  $h$ , тогда как ковариационная функция — только для случая стационарной случайной функции 2-го порядка. При этом оценка вариограммы не смещается по среднему, в отличие от ковариации. Изучение структуры по вариограмме состоит в том, чтобы проследить эволюцию «среднеквадратичной вариации» возрастания функции  $Z(x)$  по  $h$  амплитуд, увеличиваясь, где  $h$  — вектор, соединяющий две точки. Таким образом, мы получаем вариограмму в заданном направлении.

Вариограмма характеризует пространственную изменчивость двух переменных. При обработке изображений вариограммы позволяют количественно оценить изменчивость интенсивностей двух пикселей в зависимости от межпиксельного расстояния  $h$ . Для описания моделей вариограмм используются определенные параметры:

Радиус влияния- расстояние, при котором модель начинает выравниваться. Порог(sill) - значения, которое модель вариограммы достигает в точке радиуса влияния или значения, на котором модель вариограммы

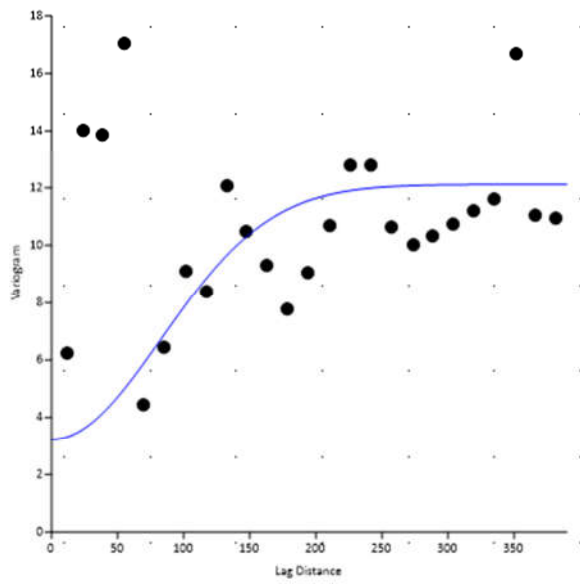
становится горизонтальным. Эффект самородка (Nugget effect) – разница между измерениями при бесконечно малых расстояниях (значение больше нуля). Частичный порог – это разница между порогом и Эффектом самородка, Ранг (range) – расстояние корреляции, на котором данные перестают зависеть друг от друга. это расстояние указывает на окрестность, в пределах которой все значения исследуемой компоненты связаны друг с другом [18].

Используя программы surfer, чтобы построить вариограмм нам надо нажимать на вкладку «Grid», выбрать «Variogram»–«New Variogram», в открывшемся окне выбрать файл «имя файла.blн», содержащий координаты станция и значения температуры воздуха – далее нажать ок. Во вкладке «Experimental или экспериментальная» свойств вариограммы в окне «Direction или направление» задать по одному в этих четырёх основных направлениях: (-45°, 0°, 45°,90°) с сектором (Tolerance) 30° потом нажать кнопку «enter». Но в этой работу использовал разные модельные вариограммы. Пространственный характер данных отражают вариограммы переменных, результаты представленные на рис.5.2. По оси абсцисс отложено расстояние между точками, на оси ординат — значения  $\gamma(h)$ , вычисленные по формуле (3.2), для всех пар точек, разделенных расстоянием  $h$ . Результаты получены представлено на рис.1 и параметры вариограммы для температуры воздуха занести на таблице 5.4.



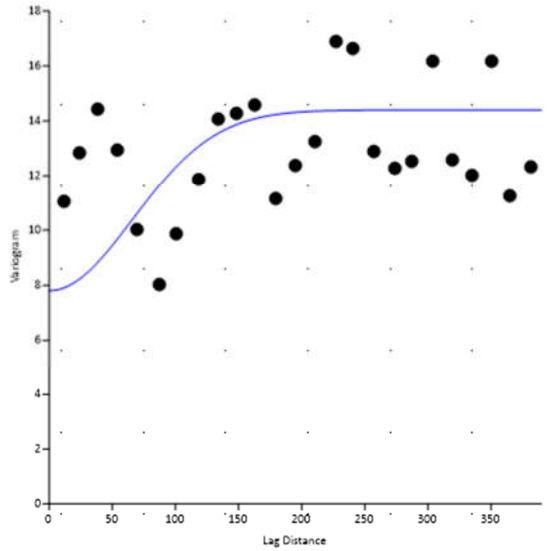
Экспоненциальная Модель:  $90^\circ$

Сектор:  $30^\circ$



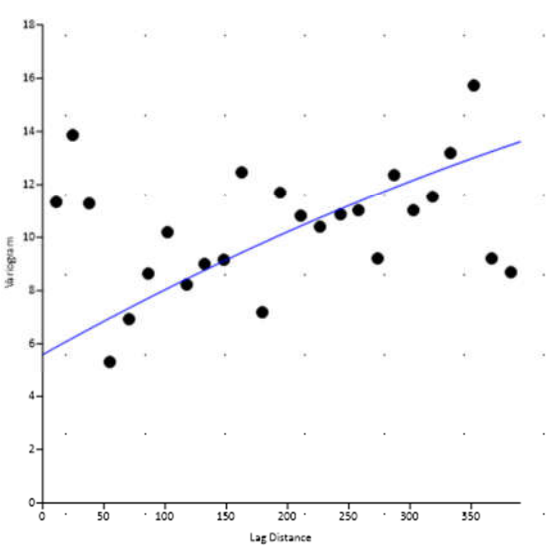
Модель Гаусса:  $0^\circ$

Сектор:  $30^\circ$



Модель Гаусса:  $-45^\circ$

Сектор:  $30^\circ$



Сферическая Модель:  $45^\circ$

Сектор:  $30^\circ$

Рис.5.2. Экспериментальные и модельные вариограммы зависимости значений температуры в различных направлениях по территории восточноафриканского сообщества.



Параметры вариограмм температуры воздуха в четырех направлениях помещены в табл.2. расстояние, при котором модель начинает выравниваться, называется радиусом влияния. Порог (Sill) - значение дисперсии, на котором кривая вариограммы становится горизонтальной. Самородок или Наггет-эффект (Nugget-effect) – уровень различия на нулевом расстоянии или разница между измерениями при бесконечно малых расстояниях.

Таблице 5.4

Параметры вариограммы для температуры воздух

Направления	Самородок (Наггет), $(^{\circ}\text{C}/\text{км})^2$	Плато (Порог), $(^{\circ}\text{C}/\text{км})^2$	Радиус влияние, км
0°	3.5	11.8	250
45°	5.8	-	$\infty$
90°	8.8	13.1	120
-45°	7.9	14.2	200

На рис.5.2 видно, что поведение вариограммы действительно различно при разных направлениях (- 45°, 0°, 45°,90°) с сектором (Tolerance) 30°. Для выполнения интерполяции методом кригинга экспериментальные точки были аппроксимированы математическими моделями, которые представлены синими кривыми на рис. 5.2.

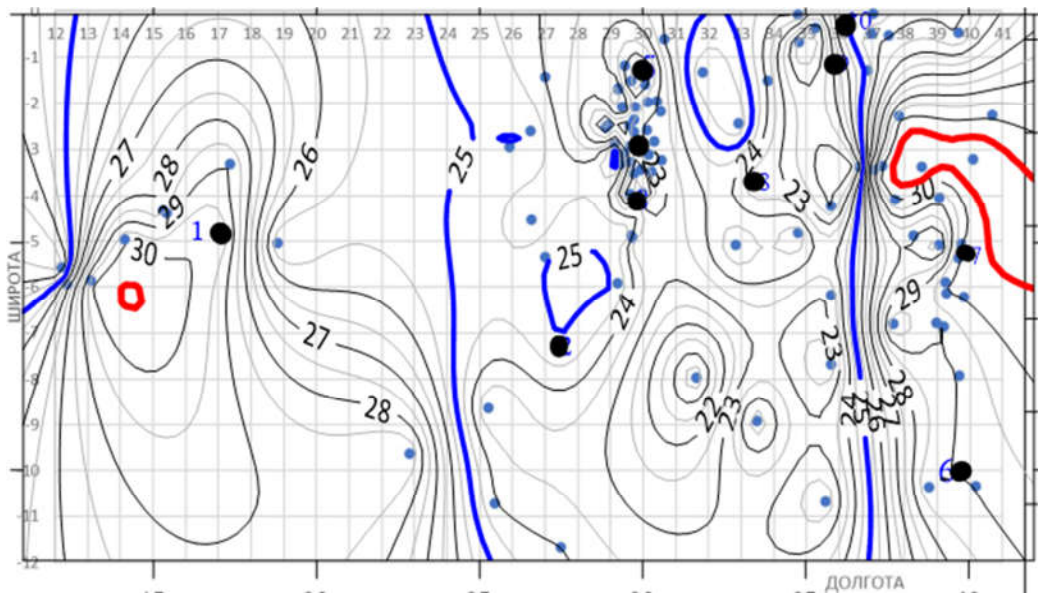
Дискретная экспериментальная вариограмма, построенная по значениям температуры в направлении 90°, может быть аппроксимирована экспонентой. Расстояние, на котором значения экспериментальной вариограммы приближаются к значению дисперсии, определяет окрестность, в пределах которой все значения переменной статистически связаны друг с другом. За пределами этой зоны влияния значение вариограммы больше не будет расти, значит, корреляции между измерениями нет. Наличие плато у вариограммы означает, что процесс удовлетворяет стационарности второго порядка.

В направлении  $45^\circ$  вариограмма температуры не достигает порога, а продолжает возрастать с увеличением расстояния, что указывает на наличие сильного тренда в массиве данных.

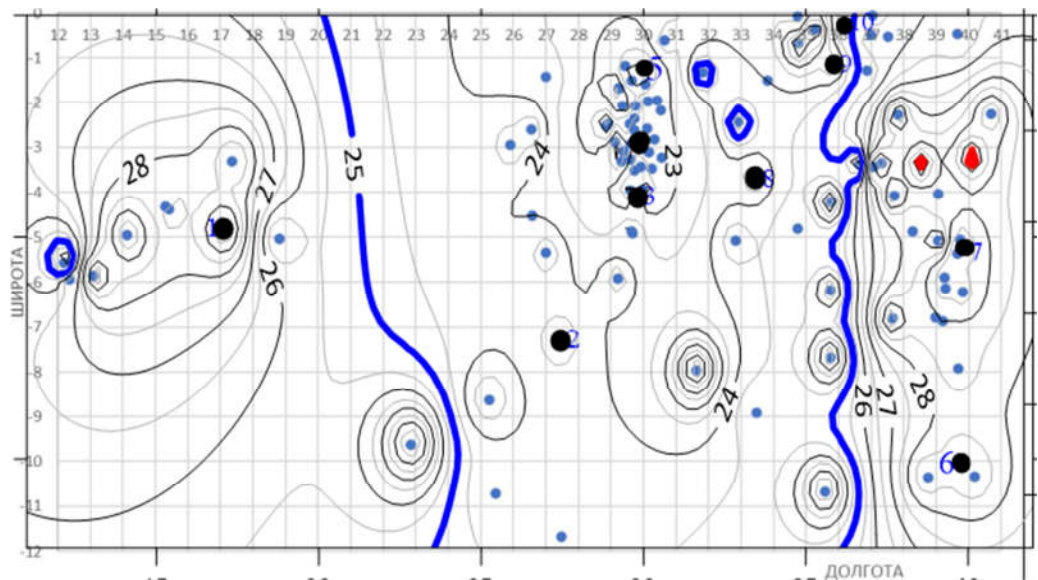
В направлениях  $-45^\circ$  и  $0^\circ$  вариограмма температуры начинает возрастать с увеличением расстояния до достижения ограничивающего порога, после этого значения не будут расти, т.е. не зависят от расстояния и имеет горизонтальную форму, означает что не имеют пространственной автокорреляции между измерениями.

#### 5.1.2 Построение поля распределения температуры методом кригинга и методом обратных расстояний

С помощью распространенных программных пакета Surfer 23: нам нужны нажать на «Grid», выбрать «Data». В открывшемся окне выбрать файл, сохранены. В открывшемся окне проверить, чтобы в строке «Gridding Method» был выбран «Kriging или inverse distance». После этого, нажать ОК. После этого в папке появится файл с тем же названием, но с расширением «. grd». После этого, построение карт изолиний реализовано на вкладку «Map», потом «Contour Map» или «контурный слой» (при выборе «New» или «новая») или «Contour Layer» (при выборе «Add» или «добавить»). Вначале появляется диалоговое окно, предлагающее выбрать файл формата GRD с растровой моделью, после чего в окне типа Plot выводится карта изолиний, которую можно настроить в диалоговом окне «Property manager – Map: Contours» или «Свойствах менеджер-карта контуры». В конце, наложил карту изолиний на схему размещения станций (рис. 1.3) и совместил координаты карты изолиний с координатами карты расположения станций. В результате построены 2 интерполяционных пространственных полей температуры воздух, фрагменты которых представлены на рис.5.3



А. Метод кригинг.



Б. Метод обратное расстояние.

По одним и тем же данным были получены разные поля. Для эффективного сравнения на каждом поле выделена площадь под синней изолинией 25°C, а под красной изолинией показана станция, на которой наблюдалась максимальная температура воздуха 31°C. Визуально заметны

существенные различия как в форме, так и в размерах полученных участков (области).

## 5.2 Точность интерполяции

Результаты двух процедур интерполяции были проверены с использованием метода перекрестной проверки (cross-validation), который заключается в следующем:

- из исходного массива данных о температуре воздуха на десяти станциях случайным образом удаляем одну точку и оцениваем ее по всем остальным точкам;
- сравниваем полученное значение в изъятой точке с известным истинным значением в этой точке и фиксируем ошибку интерполяции (невязку);
- затем возвращаем изъятую (удаленную) точку в число данных, убираем (изымаем) еще другую и фиксируем ошибку интерполяции уже в этой второй точке. Выполняя данную процедуру по очереди для всех точек данных, получаем количество (число) невязок, равное количеству точек.

После этого алгоритма, вычисляем абсолютной и относительной ошибки интерполяция температура воздух наблюдались в 2021год на территории восточноафриканского сообщества с помощью формулы 3.5 и 3.6, результаты ошибки интерполяции по каждому методу представлены в таблице 5.5.

Таблице 5.5

$t_{\text{факт.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Метод Кригинг			Метод обратных расстояний		
	$t_{\text{интерп.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$	$\delta t, \%$	$t_{\text{интерп.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$	$\delta t, \%$
30	28,2	1,8	6,0	27,2	2,8	9,3
25	23,8	1,2	4,8	23,9	1,1	4,4
24	21,7	2,3	9,6	21,9	2,1	8,8
23	21,9	1,1	4,8	22,3	0,7	3,0
21	22	-1	4,8	22,5	-1,5	7,1
29	29,0	0	0,0	28,5	0,5	1,7

$t_{\text{факт.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Метод Кригинг			Метод обратных расстояний		
	$t_{\text{интерп.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$	$\delta t, \%$	$t_{\text{интерп.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$	$\delta t, \%$
30	30,2	-0,2	0,7	29,7	0,3	1,0
23	24,8	-1,8	7,8	24,4	-1,4	6,1
23	22,8	0,2	0,9	24,5	-1,5	6,5
25	23,6	1,4	5,6	24,4	0,6	2,4
	Средняя $\delta t$		4,5			5,0

Ошибки интерполяции по каждому методу представлен в таблице 5.5. После вычисления ошибки интерполяция температура воздух наблюдались в 2021 год, построим гистограмму для средней относительной ошибки интерполяция температура воздух на рис.5.4

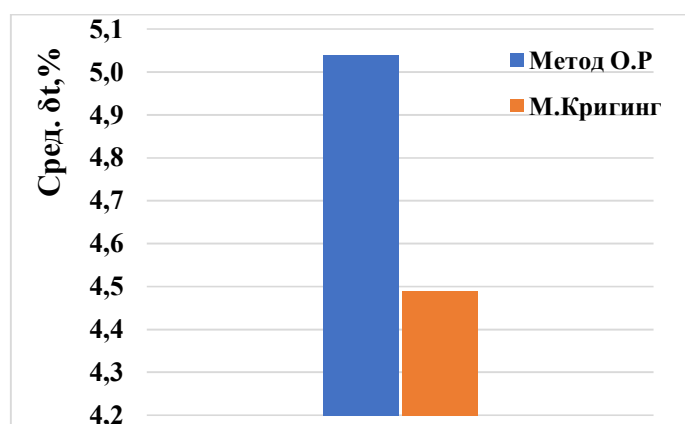
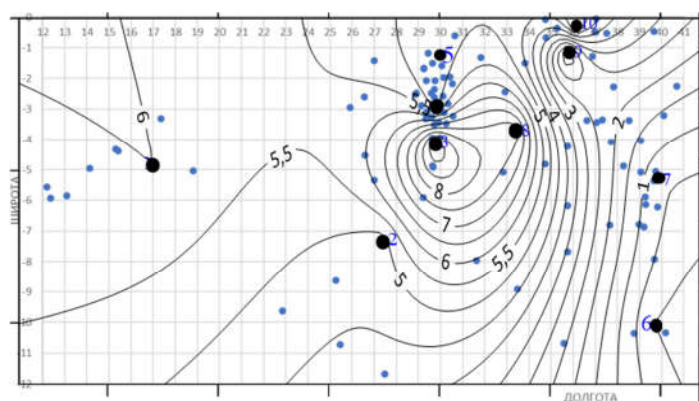


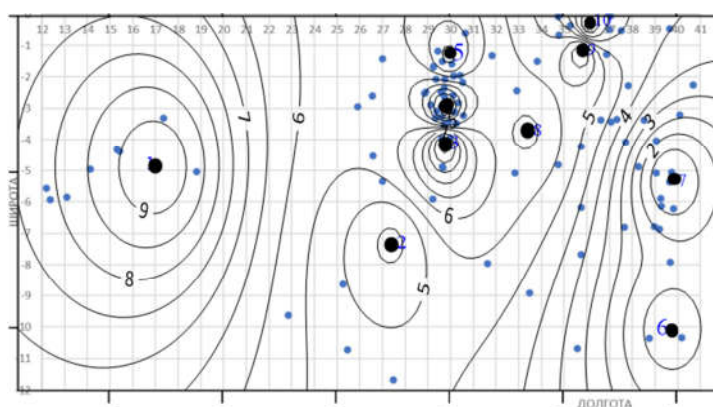
Рис. 5.4 Ошибки методов интерполяции: метод обратных расстояний (О.Р) и метод кригинг.

Из графики видно, что наивысшая точность оказалась у метода кригинги который составляет минимальной значения средняя относительной интерполяция температура воздух, чем метод обратных расстояний.

На рис. 5.5 представлено пространственное распределение значений ошибок интерполяции температура воздух.



А



Б

Рис.5.5 Пространственное распределение значений ошибок интерполяции по методам: кригинг(А) и обратных расстояний (Б).

Из таблицы 5.5, пространственное распределение значений ошибок интерполяции температура воздух, очевидно, что наибольшие ошибки располагаются на северной часть графики (первая графика), т.е. на 3-ом посте (9,6%) у метода кригинг и на западном второй графике (вторая графика), т.е. на 1-ом посте (9,3%) у метода обратных расстояний. Из двух графики (рис.5.5), наименьше ошибки располагаются в восточной графике что характеризуют качество и точечные приборы для метеорологических станций расположены по территории восточноафриканского сообщества. Короче, наименьшая ошибка интерполяции температуры воздуха получилась у метода кригинги и составила в среднем 4.5%. Наименее точным среди двух методов оказался метод обратных расстояний, его ошибка в среднем 5%.

## Заключение

В результате выполнения этой работы сделаны следующие выводы:

Выполнена оценка неравномерности размещения 101 метеорологических станций наблюдения по территории восточноафриканского сообщества с помощью следующих алгоритмов:

- гистограмма расстояний между станциями;
- метод квадратов;
- диаграмма площадей полигонов Вороного;
- диаграмма Моришита.

Результаты применения этих методов (метод квадратов, расстояний ближайшего соседа, диаграмма площадей полигонов Вороного и диаграмма Моришита) к оценке сети метеорологических станции наблюдения по территории восточно-Африканского сообщества (ВАС) свидетельствуют (указывают) о наличии кластерных структур в сети станций контроля.

Построены карты пространственного распределения полей температуры воздуха для территории восточно-Африканского сообщества с использованием двух методов интерполяции, входящих в широко используемый, программа Surfer:

- метод кригинг;
- метод обратных расстояний.

Для построения использовались суточные температуры воздуха на 101 посте метеорологического контроля на территории восточно-Африканского сообщества. Показано существенные различия как в виде результатов пространственной интерполяции в зависимости от выбранного алгоритма.

Оценка результатов интерполяции проведена (выполнена) методом кросс-валидации. наименьшая ошибка интерполяции температуры воздуха получилась у метода кригинги и составила в среднем 4.5%. Наименее точным среди двух методов оказался метод обратных расстояний, ее ошибка в среднем 5%.

На основе построенных экспериментальных и модельных вариограмм зависимости значений температуры в различных направлениях по территории восточноафриканского сообщества выявлена существенная анизотропия температуры. В северо-восточном направлении обнаружен заметный тренд. В других направлениях распределение температуры удовлетворяет стационарности второго порядка. Разрыв вариограммы в начальной точке, указывающий на отсутствие корреляции при нулевом расстоянии между измеряемыми температурами, составил 3,5-8,8 (°C/км)<sup>2</sup>. Самородок может указывать на ошибки измерений, содержащиеся в данных. Радиус влияния составил от 120 до 250 км. На основании параметров вариограммы определяется веса при использовании метода интерполяции кригингом. Неизвестные значения рассчитываются как взвешенное среднее значений, попадающих в область, ограниченную радиусом корреляции.

Увеличение количества метеорологических станций на территории восточно-Африканского сообщества является актуальной задачей, решение которой повлияет на повышение точности прогнозирования результатов изменений климата и их явления в окружающей среды и будет способствовать снижению воздействия по населению и сельскому хозяйству или экономику в целом.



## Список литературы

1. В.В. Демьянов, Е.А. Савельева: Госстатистика: теория и практика, 2010-С16-17
2. Advanced Mapping of Environmental Data: Geostatistics, Machine Learning and Bayesian Maximum Entropy / Ed. M. Kanevski; ISTE Ltd. — [S. l.], 2008: [https://studwood.ru/1728934/informatika/analiz\\_prostranstvennogo\\_ra\\_spredeleniya\\_obektov](https://studwood.ru/1728934/informatika/analiz_prostranstvennogo_ra_spredeleniya_obektov)
3. учебник по тропической метеорологии Г.Г.Тараканов С.8-9 и С 9-12
4. Суржко О.А., Подгурская В.П., Чеботникова Е. А.: Климатология и метеорология: Методические указания к лабораторным работам / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т(НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. – 48с.
5. Торопов П. А., Терентьев Б. А.; Гидрометеорологический мониторинг в экосистемах ООПТ Алтае-Саянского экорегиона. Методическое пособие /– М., 2011-С7-9
6. Регионы Африки. Восточная Африка. Автор: Адашова Т. А., 2016: <https://karatu.ru/vostochnaya-afrika/#i>
7. Физическая география материков и океанов: учебное пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / Т.В. Власова, М.А. Аршинова, Т.А. Ковалева. — М.: Издательский центр «Академия», 2007
8. Зубащенко Е. М. Региональная физическая география. Климаты Земли: учебно-методическое пособие. Часть 2. / Е. М. Зубащенко, А. Я. Немыкин, О. В. Спесивый. – Воронеж: ВГПУ, 2008.
9. Un réseau d'observation climatique intelligente couvrant toute l'Afrique. John Selker , Nick van de Giesen et Frank Ohene Annor, 2018
10. Демьянов, В.В. Геостатистика: теория и практика / В.В. Демьянов, Е.А. Савельева. – М.: Наука, 2010. – 322-327 с.

11. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика / под ред. Р. В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. - М.: Наука, 2010. 31-36 с
12. Детерминистические методы пространственной интерполяции Е.А. Савельева, В.В. Демьянов, С.Ю. Чернов.
13. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие / К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова. – Казань: Казанский университет, 2014. – 27 и 57 с.
14. Разновидности детерминистских методов интерполяции: учеб.-метод. пособие / Т. А. Хлебникова, С. Р. Горобцов, 2018.
15. Сравнение различных видов кросс-валидации: A.W. Moore, M.S. Lee. Efficient Algorithms for Minimizing Cross Validation Error. Advances in Neural Information Processing Systems, 7 Morgan Kaufmann, 2015 – 7с.
16. Advanced Mapping of Environmental Data: Geostatistics, Machine Learning and Bayesian Maximum Entropy / Ed. M. Kanevski; ISTE Ltd. 2008
17. « Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques OMM-N° 8, chapitre ANNEXE 1.B Classification de sites pour les stations terrestres d'observation » (version du 1 décembre 2017 sur l'Internet Archive), sur library.wmo.int, 2014.
18. Кузякова И.Ф.; Романенков В.А.; Кузяков Я.В. Применение метода геостатистики при обработке результатов почвенных и агрохимических исследований // Почвоведение, 2015; С31.

## Приложение

### Программа расчета индекса Моришита

```
package com. company;

import java.io.*;
import java.util.*;

import java.lang.Math.*;
import static java. lang.Math.round;

public class Main {

    public static Map<String, Double> max_min(double[][] points){

        double maxx = points[0][0], //Самая правая координата
            minx = points[0][0], //Самая левая координата
            maxy = points[0][0], //Самая верхняя координата
            miny = points[0][0]; //Самая нижняя координата

        for (int i = 0; i < points.length; i++) {
            if (maxx > points[i][0]) maxx = points[i][0];
            else if (minx < points[i][0]) minx = points[i][0];
            if (maxy > points[i][1]) maxy = points[i][1];
            else if (miny < points[i][1]) miny = points[i][1];
        }
        return Map.of("maxx", maxx, "minx", minx, "maxy", maxy, "miny", miny);
    }

    public static int[][] count_stations(double[][] points, Map<String, Double>
max_min, double number_of_cells){
```

```

int N[][] = new int[(int)number_of_cells][(int)number_of_cells];
for (int i = 0; i < points.length; i++) { //заполняем массив данными
координатами
    double xf = 0, yf = 0;
    if (points[i][0] == max_min.get("maxx"))
        xf = number_of_cells - 1;
    else
        xf = (points[i][0] - max_min.get("minx")) /
            ((max_min.get("maxx") - max_min.get("minx")) / number_of_cells);
    if (points[i][1] == max_min.get("maxy"))
        yf = number_of_cells - 1;
    else
        yf = (points[i][1] - max_min.get("miny")) /
            ((max_min.get("maxy") - max_min.get("miny")) / number_of_cells);

    N[(int) xf][(int) yf]++;
}
return N;
}

public static void main(String[] args) throws IOException {
    PrintStream datafile = new PrintStream(new FileOutputStream("data.txt"));
    double points[][] = { //массив координат
        {80.4,328.4},
        {84.7,313.0},
        {107.2,315.8},
        {137.2,360.7},
        {276.4,355.1},
        {225.0,364.9},
    }
}

```

{177.9,387.4},  
{173.6,390.2},  
{234.4,440.4},  
{397.4,129.6},  
{475.4,73.7},  
{535.2,27.3},  
{469.4,177.6},  
{777.8,76.9},  
{872.9,92.9},  
{914.3, 94.4},  
{900.9, 110.4},  
{714.4, 164.8},  
{659.5, 211.1},  
{533.9, 244.7},  
{898.5, 211.1},  
{781.4, 227.1},  
{586.4, 311.8},  
{520.6, 338.9},  
{508.4, 382.1},  
{488.9, 458.8},  
{508.4, 474.8},  
{520.6, 535.6},  
{600.8, 360.7},  
{695.2, 354.5},  
{782.3, 298.5},  
{751.5, 365.8},  
{781.8, 395.3},  
{713.1, 420.9},

{605.4, 400.0},  
{599.8, 408.8},  
{610.5, 410.1},  
{839.7, 266.9},  
{884.8, 263.1},  
{878.3, 268.5},  
{902.0, 296.5},  
{885.9, 301.2},  
{887.2, 313.6},  
{897.6, 338.9},  
{903.7, 345.8},  
{901.2, 353.8},  
{881.0, 353.3},  
{858.3, 362.8},  
{841.3, 402.6},  
{881.8, 403.7},  
{865.4, 437.1},  
{912.3, 446.0},  
{809.2, 437.9},  
{821.6, 435.5},  
{828.9, 439.6},  
{929.0, 493.5},  
{898.8, 581.8},  
{843.1, 491.9},  
{696.7, 485.9},  
{725.8, 530.0},  
{666.5, 539.2},  
{629.3, 575.7},

{815.2, 540.7},  
{785.0, 549.8},  
{753.6, 572.7},  
{767.6, 586.4},  
{751.3, 600.1},  
{793.1, 589.4},  
{818.7, 580.3},  
{836.1, 577.2},  
{822.2, 601.6},  
{594.7, 544.9},  
{609.0, 541.6},  
{587.9, 521.0},  
{598.7, 530.0},  
{613.0, 526.1},  
{591.8, 501.6},  
{603.6, 502.2},  
{614.0, 506.8},  
{624.8, 506.8},  
{626.8, 497.1},  
{626.6, 443.3},  
{615.9, 449.7},  
{621.7, 463.8},  
{618.3, 432.1},  
{601.9, 429.3},  
{609.8, 434.1},  
{599.7, 441.8},  
{590.2, 438.9},  
{592.3, 449.7},

```
{606.7, 459.8},  
{597.5, 459.4},  
{582.8, 461.8},  
{614.0, 476.2},  
{602.7, 473.8},  
{596.3, 480.6},  
{603.3, 486.6},  
{576.2, 477.8},  
{579.0, 482.8},  
{816.7, 341.5}};
```

```
ArrayList<List<Double>> graf = new ArrayList<>();  
for (double k = 2; k < 130; k+=2){  
    double number_of_cells = k;  
    Map<String, Double> max_min = max_min(points);  
  
    double matrix_width = max_min.get("maxx") - max_min.get("minx");  
    //ширина всей матрицы  
    double matrix_height = max_min.get("maxy") - max_min.get("miny");  
    //высота всей матрицы  
  
    double cell_width = matrix_width / number_of_cells; //ширина ячейки  
    double cell_height = matrix_height / number_of_cells; //высота ячейки  
  
    //массив нулей, в который будут считаться станции по зонам  
    int N[][] = count_stations(points, max_min, number_of_cells);  
  
    double magnus_sum = 0;
```



```

for (int i = 0; i < number_of_cells; i++)
    for (int j = 0; j < number_of_cells; j++)
        magnus_sum += N[i][j] * (N[i][j] - 1);
double result = 100 * number_of_cells * number_of_cells * magnus_sum /
(points.length * (points.length - 1));

graf.add(List.of(number_of_cells, (double)round(result*1000)/1000));

}
for (int q = 0; q < graf.size(); q++) { // выводим получившийся массив на
экран
    for (int p = 0; p < graf.get(q).size(); p++)
        System.out.print(graf.get(q).get(p).toString().replace(".", ",") + "\t");
        System.out.println();
    }
}
}
}
}

```

**Адреса расположения станций (постов) наблюдения и значения  
температура на территории восточно-Африканского сообщества**

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	Н над урavnя моря в м.	t, °C
пост 1	Бубанза	-3,08	29,38	1067	25
пост 2	Бужумбура	-3,32	29,32	782	25
пост3	Бурури	-3,95	29,62	1859	21
пост 4	Гитега	-3,43	29,93	1689	21
пост 5	Каянза	-2,92	29,62	1910	21

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	Н над урavnя морья в м.	t, °С
пост 6	Чанкузо	-3,22	30,55	1616	23
пост 7	Чибитоке	-2,88	29,12	936	25
пост 8	Карузи	-3,11	30,17	1614	23
пост 9	Кирундо	-2,58	30,11	1413	23
пост 10	Макамба	-4,13	29,81	1481	21
пост 11	Мваро	-3,52	29,71	1944	22
пост 12	Муйинга	-2,83	30,33	1755	23
пост 13	Мурамвия	-3,27	29,62	1968	22
пост 14	Нгози	-2,92	29,82	1831	23
пост 15	Руйиги	-3,48	30,25	1592	23
пост 16	Рутана	-3,93	29,98	1771	21
пост 17	Аруша аэроп.	-3,37	36,63	1387	22
пост 18	Дар-эс-Салам	-6,87	39,21	55	29
пост 19	Додома аэр	-6,18	35,75	1121	23
пост 20	Занз. Кисауни	-6,22	39,81	15	30
пост 21	Занз.Мкокотон	-5,88	39,25	14	30
пост 22	Занз.Коани	-6,13	39,28	50	30
пост 23	Иринга аэр.	-7,67	35,75	1426	22
пост 24	Букоба аэр	-1,32	31,82	1145	25
пост 25	Кигома	-4,88	29,63	882	23
пост 26	Уджиджи	-4,92	29,67	791	23
пост 27	Килиманджаро	-3,43	37,07	898	30
пост 28	Моши	-3,35	37,33	854	30
пост 29	Саме	-4,08	37,72	872	30
пост 30	Линди	-10,01	39,72	10	29

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	Н над урavnя моря в м.	t, °C
пост 31	Начингва	-10,35	38,75	463	29
пост 32	Маньяре	-4,22	35,75	1349	22
пост 33	Мусома	-1,51	33,81	1147	24
пост 34	Мбея	-8,92	33,47	1714	20
пост 35	Мванза	-2,43	32,92	1151	26
пост 36	Морогоро	-6,81	37,65	515	30
пост 37	Мтвара	-10,33	40,17	118	29
пост 38	Кибаха	-6,78	38,98	134	29
пост 39	Килиндони	-7,92	39,67	21	29
пост 40	Пемба (Вета)	-5,05	39,73	54	30
пост 41	Мкоани	-5,37	39,65	34	30
пост 42	пемба (Каруме)	-5,25	39,82	25	30
пост 43	Сонгея	-10,68	35,58	1067	22
пост 44	Сумбаванга	-7,95	31,62	1820	20
пост 45	Сингида	-4,82	34,75	1507	25
пост 46	Табора	-5,08	32,83	1181	25
пост 47	Момбо	-4,88	38,28	511	28
пост 48	Танга	-5,08	39,07	39	27
пост 49	Шиньянга	-3,67	33,42	1131	23
пост 50	Кибунго	-2,17	30,53	1622	23
пост 51	Рвамагана	-1,95	30,43	1545	23
пост 52	Кигали	-1,98	30,13	1491	23
пост 53	Гисени	-1,67	29,25	1556	21
пост 54	Кибуре	-2,07	29,35	1476	24
пост 55	Чьянгугу	-2,47	28,92	1591	21

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	Н над урavnя моря в м.	t, °С
пост 56	Бьюмба	-1,58	30,07	2179	22
пост 57	Рухенгери	-1,51	29,63	1878	21
пост 58	Бутаре	-2,61	29,73	1779	23
пост 59	Гитарамa	-2,08	29,75	1868	22
пост 60	Нзeга	-2,48	29,57	1848	21
пост 61	Няматаре	-2,35	29,73	1747	23
пост 62	Макинда	-2,28	37,83	1000	30
пост 63	Эмбу	-0,53	37,51	1274	26
пост 64	Истли	-1,28	36,86	1626	25
пост 65	Кисуму	-0,08	34,73	1157	24
пост 66	Кисии	-0,67	34,78	1771	21
пост 67	Бои	-3,37	38,53	612	31
пост 68	Ламу	-2,25	40,69	6	30
пост 69	Малинди	-3,21	40,09	23	31
пост 70	Момбаса	-4,04	39,07	61	29
пост 71	Керичо	-0,37	35,27	1954	21
пост 72	Накуру	-0,29	36,16	1909	25
пост 73	Нарок	-1,13	35,83	1890	23
пост 74	Гарисс	-0,47	39,65	145	31
пост 75	Наньюки	-0,06	37,04	1905	25
пост 76	Нъери	-0,48	36,97	1759	26
пост 77	Кабале	-1,25	29,98	1867	21
пост 78	Мбарара	-0,61	30,65	1412	24
пост 79	Бандунду	-3,31	17,35	324	29
пост 80	Кенге	-4,83	17,07	563	30

Пост контроля	Адреса станции	Широта в °	Долгота в °	Н над урavnя моря в м.	t, °С
пост 81	Киквит	-5,03	18,81	518	25
пост 82	Кабинда	-5,57	12,19	33	23
пост 83	Калемие	-5,91	29,21	771	25
пост 84	Калвези	-10,72	25,45	1405	24
пост 85	Конголо	-5,35	27,01	561	25
пост 86	Луано	-11,67	27,48	1276	24
пост 87	Манono	-7,28	27,43	614	25
пост 88	Сандоа	-9,63	22,85	921	29
пост 89	Гома	-1,68	29,23	1552	24
пост 90	Рутшура	-1,18	29,45	1275	22
пост 91	Бома	-5,85	13,09	22	30
пост 92	Букаву	-2,51	28,85	1612	21
пост 93	Валикале	-1,42	27,01	800	24
пост 94	Калима	-2,59	26,55	545	25
пост 95	Касонго	-4,52	26,58	544	23
пост 96	Кинду	-2,95	25,92	497	24
пост 97	Киншаса	-4,38	15,43	309	29
пост 98	Маонда	-5,93	12,36	27	27
пост 99	Луоза	-4,95	14,13	236	30
пост 100	Ндоло	-4,32	15,32	282	28
пост 101	Камина	-8,63	25,25	1088	23

### Вычисление расстояния до ближайшего соседа.

№ постов	Ш, °	Д, °	Ближайший. сосед	РБС (Z), км
пост 1	-5,57	12,19	пост 2	44,2
пост 2	-5,93	12,36	пост 3	81,5
пост 3	-5,85	13,09	пост 3	81,5
пост 4	-4,95	14,13	пост 6	149,5
пост 5	-4,38	15,43	пост 6	13,9
пост 6	-4,32	15,32	пост 5	13,9
пост 7	-4,83	17,07	пост 9	194,4
пост 8	-3,31	17,35	пост 9	171,6
пост 9	-5,03	18,81	пост 7	194,4
пост 10	-9,63	22,85	пост 11	288,6
пост 11	-8,63	25,25	пост 12	233,0
пост 12	-10,72	25,45	пост 13	248,8
пост 13	-11,67	27,48	пост 12	248,8
пост 14	-7,28	27,43	пост 11	284,6
пост 15	-5,35	27,01	пост 16	103,8
пост 16	-4,52	26,58	пост 15	103,8
пост 17	-2,95	25,92	пост 18	80,5
пост 18	-2,59	26,55	пост 19	139,5
пост 19	-1,42	27,01	пост 18	139,5
пост 20	-1,18	29,45	пост 21	59,3
пост 21	-1,25	29,98	пост 22	48,4
пост 22	-1,51	29,63	пост 23	49,5
пост 23	-1,58	30,07	пост 24	91,6
пост 24	-1,67	29,25	пост 28	2,5
пост 25	-0,61	30,65	пост 21	102,8

№ постов	Ш, °	Д, °	Ближайший. сосед	РБС (Z), км
пост 26	-1,32	31,82	пост 25	151,9
пост 27	-1,98	30,13	пост 28	33,5
пост 28	-1,95	30,43	пост 27	33,5
пост 29	-1,68	29,23	пост 24	2,5
пост 30	-2,17	30,53	пост 31	87,2
пост 31	-2,08	29,75	пост 32	44,4
пост 32	-2,07	29,35	пост 33	52,4
пост 33	-2,35	29,73	пост 34	22,9
пост 34	-2,48	29,57	пост 35	22,9
пост 35	-2,61	29,73	пост 36	91,2
пост 36	-2,47	28,92	пост 37	8,9
пост 37	-2,51	28,85	пост 38	50,8
пост 38	-2,88	29,12	пост 39	55,7
пост 39	-2,92	29,62	пост 40	22,2
пост 40	-2,92	29,82	пост 41	57,5
пост 41	-2,83	30,33	пост 41	37,0
пост 42	-2,58	30,11	пост 43	98,2
пост 43	-3,08	29,38	пост 44	27,5
пост 44	-3,32	29,32	пост 45	33,8
пост 45	-3,27	29,62	пост 46	29,5
пост 46	-3,52	29,71	пост 47	26,4
пост 47	-3,43	29,93	пост 48	36,0
пост 48	-3,48	30,25	пост 49	44,1
пост 49	-3,22	30,55	пост 50	43,9
пост 50	-3,11	30,17	пост 42	59,2
пост 51	-3,95	29,62	пост 52	40,0

№ постов	Ш, °	Д, °	Ближайший. сосед	РБС (Z), км
пост 52	-3,93	29,98	пост 53	29,1
пост 53	-4,13	29,81	пост 54	85,6
пост 54	-4,88	29,63	пост 53	85,6
пост 55	-4,92	29,67	пост 53	89,1
пост 56	-5,91	29,21	пост 56	121,2
пост 57	-7,95	31,62	пост 58	231,9
пост 58	-8,92	33,47	пост 57	231,9
пост 59	-10,68	35,58	пост 60	353,8
пост 60	-10,35	38,75	пост 62	114,1
пост 61	-10,33	40,17	пост 62	61,3
пост 62	-10,01	39,72	пост 61	61,3
пост 63	-7,92	39,67	пост 65	127,2
пост 64	-7,67	35,75	пост 68	165,4
пост 65	-6,87	39,21	пост 66	27,4
пост 66	-6,78	38,98	пост 65	27,4
пост 67	-6,81	37,65	пост 66	147,7
пост 68	-6,18	35,75	пост 64	165,4
пост 69	-5,08	32,83	пост 70	215,1
пост 70	-4,82	34,75	пост 74	129,4
пост 71	-6,22	39,81	пост 72	59,7
пост 72	-6,13	39,28	пост 73	27,9
пост 73	-5,88	39,25	пост 71	72,7
пост 74	-4,22	35,75	пост 70	129,4
пост 75	-5,37	39,65	пост 76	23,1
пост 76	-5,25	39,82	пост 77	24,3
пост 77	-5,05	39,73	пост 78	73,3



№ постов	Ш, °	Д, °	Ближайший. сосед	РБС (Z), км
пост 78	-5,08	39,07	пост 79	90,5
пост 79	-4,88	38,28	пост 80	108,4
пост 80	-4,08	37,72	пост 81	149,9
пост 81	-4,04	39,07	пост 82	95,5
пост 82	-3,37	38,53	пост 84	133,2
пост 83	-3,21	40,09	пост 88	125,7
пост 84	-3,35	37,33	пост 85	30,2
пост 85	-3,43	37,07	пост 86	49,3
пост 86	-3,37	36,63	пост 84	77,7
пост 87	-3,67	33,42	пост 90	148,4
пост 88	-2,25	40,69	пост 83	125,7
пост 89	-2,28	37,83	пост 85	153,0
пост 90	-2,43	32,92	пост 87	148,4
пост 91	-1,28	36,86	пост 100	114,3
пост 92	-1,51	33,81	пост 93	142,4
пост 93	-0,67	34,78	пост 94	63,8
пост 94	-0,37	35,27	пост 95	68,0
пост 95	-0,08	34,73	пост 94	68,0
пост 96	-0,29	36,16	пост 97	92,4
пост 97	-0,48	36,97	пост 98	60,2
пост 98	-0,53	37,51	пост 99	73,8
пост 99	-0,06	37,04	пост 98	73,8
пост 100	-0,47	39,65	пост 98	237,6
пост 101	-1,28	35,83	пост 91	114,3

**Метод квадратов**

№ квадратов	Q	E (Среднее значение)	$(Q-E)^2/E$
1	2	1,507	0,16
2	1	1,507	0,17
3	1	1,507	0,17
4	2	1,507	0,16
5	1	1,507	0,17
6	1	1,507	0,17
7	1	1,507	0,17
8	1	1,507	0,17
9	1	1,507	0,17
10	1	1,507	0,17
11	1	1,507	0,17
12	1	1,507	0,17
13	1	1,507	0,17
14	1	1,507	0,17
15	1	1,507	0,17
16	1	1,507	0,17
17	1	1,507	0,17
18	1	1,507	0,17
19	1	1,507	0,17
20	1	1,507	0,17
21	1	1,507	0,17
22	1	1,507	0,17
23	1	1,507	0,17

№ квадратов	Q	E (Среднее значение)	$(Q-E)^2/E$
24	1	1,507	0,17
25	1	1,507	0,17
26	1	1,507	0,17
27	1	1,507	0,17
28	1	1,507	0,17
29	1	1,507	0,17
30	2	1,507	0,16
31	1	1,507	0,17
32	1	1,507	0,17
33	1	1,507	0,17
34	1	1,507	0,17
35	1	1,507	0,17
36	2	1,507	0,16
37	1	1,507	0,17
38	1	1,507	0,17
39	1	1,507	0,17
40	1	1,507	0,17
41	1	1,507	0,17
42	1	1,507	0,17
43	1	1,507	0,17
44	1	1,507	0,17
45	4	1,507	4,12
46	1	1,507	0,17
47	1	1,507	0,17

№ квадратов	Q	E (Среднее значение)	$(Q-E)^2/E$
48	1	1,507	0,17
49	1	1,507	0,17
50	1	1,507	0,17
51	2	1,507	0,16
52	1	1,507	0,17
53	1	1,507	0,17
54	1	1,507	0,17
55	1	1,507	0,17
56	2	1,507	0,16
57	1	1,507	0,17
58	1	1,507	0,17
59	1	1,507	0,17
60	4	1,507	4,12
61	4	1,507	4,12
62	2	1,507	0,16
63	3	1,507	1,48
64	8	1,507	27,96
65	4	1,507	4,12
66	6	1,507	13,39
67	2	1,507	0,16