



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение  
Высшего Образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра  
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(бакалаврская работа)

На тему «Особенности климатических измерений температуры и осадков на  
территории гренландии»

Исполнитель Бурмистров Егор Валерьевич

Руководитель кандидат технических наук, доцент  
Лебедев Андрей Борисович

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой



---

Подпись

Кандидат физико-математических наук, доцент  
Сероухова Ольга Станиславовна

« 20 » 06 2022г.

Санкт-Петербург  
2022

## Оглавление

Введение:.....	1
Глава 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСТРОВА ГРЕНЛАНДИЯ.....	2
1.1 Географическое положение острова Гренландия.....	2
1.2 Рельеф и геологическое строение острова Гренландия.....	5
1.3 Ледовитость острова Гренландия .....	9
1.4 Синоптические особенности острова Гренландия .....	15
1.5 Климатические особенности острова Гренландия.....	16
Глава 2. Анализ многолетних рядов температуры воздуха и осадков .....	24
2.1 Выбор пунктов наблюдений .....	24
2.2 Методика оценивания однородности и стационарности.....	26
2.3 Оценка однородности и стационарности температур воздуха. ....	32
2.4 Оценка однородности и стационарности количества осадков. ....	36
Глава 3. Оценивание современных климатических изменений температуры воздуха и осадков в Гренландии .....	39
3.1 Статистические методы оценивания современных климатических изменений .....	39
3.2 Оценка климатических изменений температур воздуха .....	43
3.3 Оценка климатических изменений количества осадков.....	47
Заключение.....	51
Список литература.....	53

## Введение:

На острове Гренландия потепление происходит примерно в два раза быстрее, чем в среднем по миру. После индустриальной революции в конце XIX века средняя температура в арктической зоне начала возрастать быстрее чем средняя температура во всём мире. Быстрое изменение средней температуры на острове Гренландия так же повлекло за собой изменение ледовой обстановки острова. Самые интенсивные таяния льда начались в 2000-х годах и продолжаются до сих пор. Таяние льдов обнажает земную поверхность, что не позволяет отражать солнечный свет, а интенсивно поглощать его (эффект альбедо), особенно в зимний период. Этот продолжающийся процесс влечёт к таянию морских льдов и ледниковой шапки острова Гренландия.

Целью настоящей работы является всесторонняя оценка климатических изменений в цепочке среднемесячной температуры воздуха и количества выпавших осадков, зафиксированных на 3 метеостанциях острова Гренландия, а также глубокий анализ полученных данных для выявления изменения климата в этих районах.



и является автономной территорией этой европейской страны. Остров Гренландия имеет морские границы с Канадой на северо-западе, к востоку на расстоянии около 1200 км от нее расположено островное государство Исландия.

На севере остров Гренландия омывается морями Северного Ледовитого океана (море Линкольна, море Ванделя), почти постоянно покрытыми льдами.

На крайнем юге Гренландия омывается водами Атлантического океана, образующими на юго-востоке широкий Датский пролив, отделяющий Гренландию от Исландии.

Вдоль восточного побережья протекает холодное Восточно-Гренландское течение. Большую часть года на этом побережье двигаются льды, приносимые из центральной части Северного Ледовитого океана. Самое доступное с моря юго-западное побережье, где протекает тёплое Западно-Гренландское течение.

Крайние точки Гренландии:

1. Крайняя северная — мыс Моррис-Джесуп —  $83^{\circ}37'$ с.ш. и  $32^{\circ}40'$ з.д.; (открыт Робертом Пири, назван в честь мецената Морриса Кетчума Джесупа, финансировавшего экспедиции Пири;
2. Южная — мыс Фарвель —  $59^{\circ}46'$ с.ш. и  $43^{\circ}55'$ з.д.; в 50 км севернее мыса находится самое южное поселение Гренландии — Нарсак-Куяллек
3. Западная — мыс Александра —  $78^{\circ}11'$ с.ш. и  $73^{\circ}03'$ в.д.; более западный остров Нордвестё  $73^{\circ}10'$ з.д. — самая западная точка Гренландии как территория;
4. Восточная — мыс Норёструннинген -  $81^{\circ}26'$ с.ш. и  $11^{\circ}29'$ з.д. (географически принято считать и крайней точкой Североамериканского континента, политико-экономическая принадлежность Гренландии к региону Страны Северной Европы — данную точку не относит к Северной Америке).



## 1.2 Рельеф и геологическое строение острова Гренландия.

Геологическое развитие Гренландии охватывает период почти 4 млрд лет, от эоархея до четвертичного периода. Гренландия — самый большой остров на Земле общей площадью 2 166 000 км<sup>2</sup>, но только 410 000 км<sup>2</sup> составляют обнаженные коренные породы, остальная часть покрыта крупным ледяным щитом (внутренним льдом), толщина которого превышает 3 км. Соседние морские районы, подстилаемые континентальной корой, имеют площадь 825 000 км<sup>2</sup>.

Единственными более молодыми коренными породами в Западной Гренландии являются плоские меловые и третичные осадочные и вулканические породы, залегающие, в частности, в окрестностях острова Диско и полуострова Нугсуак. К ним относятся конгломераты, песчаники и сланцы как наземных, так и морских фаций мощностью не менее 2 000 метров, которые колеблются от самой верхней части нижнего мела до Е палеоцена или моложе. Туфы залегают в переслаивании с наиболее молодыми меловыми и палеоценовыми отложениями, наблюдается масштабная вулканическая деятельность постнижнепалеоценового возраста. Туфы и пиллоу-лавы сменяются плато-базальтами известной мощности в несколько километров, прорезанными множеством мелких интрузий.

Эти слои позволяют датировать несколько различных периодов разломов в этом регионе. Несогласия и конгломераты в более ранних осадочных слоях показывают, что эпейрогенные движения происходили с интервалами в меловое и палеоценовое время. Блоковые разломы произошли в датское время и в гораздо большем масштабе непосредственно перед формированием базальтового комплекса. Дальнейший период блокового разлома, наклона и складчатости, который может относиться к позднему третичному периоду.

В отличие от Южной и Западной Гренландии северное и восточное побережья окаймлены горными хребтами, состоящими в основном из более

молодых осадочных пород, сложенных и в некоторых местах магматическими породам.

Минералы относятся к породам архейско-раннепротерозойского периода;

месторождения бурого угля связаны с мезозоем;

в восточной зоне каледонид открыты месторождения свинцово-цинковых и урановых руд;

запасы нефти и газа обнаружены также в Гренландии.

Много работы было проделано учеными всего мира. Им удалось нанести на карту рельеф под ледяным покровом острова Гренландия. С помощью новых технологий под многокилометровым льдом удалось обнаружить самый большой каньон на земле

Это гигантское ущелье превосходит по своей длине Гранд-Каньон в США на 300 км, для сравнения, длина Гранд-Каньона в США составляет 446 км, а длина расщелины под толщиной гренландского льда составляет 750 км.

Этой длине способствовала река, опустошившая земли Гренландии более 4 миллионов лет назад, когда Гренландия была свободна ото льда. Сама река протекала через северо-центральные районы Гренландии.

Каньон такой большой длины имеет ширину 10 км, а среднюю глубину от 200 до 800 метров.

Каньон удалось найти совсем не так давно, в ходе четырёхлетней программы NASA (2009-2012 год). Учёные исследовали остров Гренландия с помощью самолёта и радиолокационного оборудования. В ходе этого исследования была составлена подробная карта рельефа острова Гренландия.

Учёным долго не удавалось корректно составить карту из-за вогнутой формы острова. Плоская впадина сформировалась под весом ледников высотой около 3 км которые давят на земную поверхность Гренландии.

Ранее 4 миллиона лет назад, каньон был частью речной системы. Это дало понять, что в Антарктиде в отличии от Гренландии подо льдом не



образуются озёра с талой водой, которые в свою очередь ускоряют процесс таяния и движения ледников.

Геологическая история острова Гренландия очень длинная и охватывает 3,8 миллиарда лет. Его самые старые породы – это комплекс Исуа возрастом 3,8 миллиарда лет, расположенный в западной части острова Гренландия, недалеко от столицы Нуук. Эти породы являются самыми древними, наиболее хорошо сохранившимися осадочными и вулканическими породами Земли, и они содержат частицы углерода, которые, скорее всего, произошли от древнейшей известной жизни на планете. Чтобы понять, насколько стары эти камни, попробуйте представить, что планете всего один год. Он должен был образоваться 1 января, а самая ранняя известная жизнь и эти гренландские породы образовались в марте. Многоклеточная жизнь не развивалась до октября, динозавры за несколько дней до Рождества (вымершие в День подарков), а люди появились всего 15 минут назад, а вся цивилизация возникла за последние 10 секунд.

В то время, когда формировались эти породы, наша планета была совсем другим местом, и континенты все еще формировались, континентальной коры было меньше, чем сейчас. Однако тектоника плит имела место. В широком смысле, когда одна океаническая плита сталкивается с другой, одна вынуждена скользить под другую в процессе, называемом «субдукцией». Минералы в погружающейся плите высыхают, вызывая плавление вышележащей мантии и образование новых типов горных пород, таких как граниты.

Ранние граниты Восточной Гренландии (и все последующие граниты) представляют собой континентальную кору и во всех континентальных столкновениях не подвергаются субдукции из-за своей относительной плавучести. Со временем количество континентальной коры увеличилось, и когда куски континентальной коры столкнулись, они слились вместе, чтобы сформировать один блок, и огромные силы выдвинули горные цепи вверх. Во время этого процесса скалы изгибаются и складываются, а сильный

жар и давление заставляют их превращаться в метаморфические породы, такие как гнейсы.

Так же из-за горного рельефа в Гренландии присутствует такое явление как феный ветер. Во время движения воздушная масса сталкивается с горной местностью и что бы преодолеть её, воздух начинает подниматься вверх по склону из-за этого происходит нагревание или охлаждения, по итогу охлаждение происходит не столь быстро и сильно, что позволяет образоваться осадкам из за высокой конвекции. При опускании воздушная масса постепенно нагревается, при спуске она набирает скорость и создаёт сильные порывы ветра. Поток воздуха, нагретый вследствие выпадения осадков при подъеме и последующем опускании, называется фёном. Фён обычно возникает весной, когда резко возрастает интенсивность общей циркуляции воздушных масс.

### 1.3 Ледовитость острова Гренландия

Ледяной щит Гренландии начал своё формирование очень давно примерно 5 миллиона лет назад. Снег, выпадая зимой не успевал таять летом и из года в год такого процесса множество слоёв снега давило друг на друга и сжимало более старые слои.

Ледяные щиты постоянно находятся в движении, медленно стекая вниз под собственной тяжестью. У побережья большая часть льда выходит через относительно быстро движущиеся выходы, называемые ледяными потоками, ледниками и шельфовыми ледниками. Пока ледяной щит накапливает столько же снега, сколько теряет в море, он остается стабильным.

Ледники общей площадью 1802,6 тысяч км<sup>2</sup>, включая гренландский ледяной щит (1726,4 тыс. км<sup>2</sup>), покрывают большую часть острова Гренландия. Ледяной щит занимает центральную часть острова и разделяет прибрежные районы; его высота постепенно увеличивается от берега к середине острова. Самая высокая часть щита имеет форму пологой арки, вытянутой с севера на юг и разделенной 66°–67°30' с.ш. поперечным углублением на два обширных купола. Высота северного купола – 3231 м., южного – 2850 м. Ледораздел проходит по 37° з.д., располагаясь ближе к востоку. С годами вес всего этого льда превратил внутреннюю часть острова в вогнутую чашеобразную впадину, которая в некоторых местах опустилась ниже уровня моря. Белую гладь этой обширной ледяной шапки разбавляют лишь выступающие в небо редкие горные вершины (нунатаки – по-гренландски). Ледники из этой огромной массы льда тянутся по горным долинам и оврагам, достигая во многих местах прибрежных фьордов. На концах этих впадин ежегодно образуются тысячи айсбергов.

В центре острова расположена обширная подледниковая равнина высотой 0–100 м (местами 250 м ниже уровня моря), окаймленная поясом горных хребтов, наиболее высоких в восточной части (более 2000 м), а на запад не более 600 м. Средняя толщина ледяного покрова 1790 м.,

максимальная 3416 м. Объем льда составляет около 2,365 млн км<sup>3</sup> (12 % всего материкового льда). Поверхность покрыта слоем снега, переплетенного ветром, образуя заструги; в краевых частях ниже 1800–2000 м слабо расчленен водными потоками, возникающими при летнем таянии снега и льда, на высоте 1000–1500 м изрезан трещинами глубиной до 40 м, нередко нунатаки. Верхние слои льда перемещаются от центра на запад и на восток к краям ледникового щита со средней скоростью около 150 м в год. По краям скорость увеличивается, на отдельных участках приходит в движение вся толща льда и образуются выводные ледники, движущиеся со скоростью до 5–7 км в год и выше (Якобсхавн, Ринка, Караджак), образующие многочисленные айсберги (до 13-15 тыс. ежегодно, общим объемом около 200 км<sup>3</sup>), уносимые в северную часть Атлантического океана и представляющие опасность для судоходства. Ледниковый фьорд Илулисат включен в Список всемирного наследия как один из самых активных выводных ледников мира (скорость льда до 19 м/год), формирующий до 10 % объема всех айсбергов. Поток льда на краю Гренландского ледяного щита, вызванный летним таянием и образованием айсбергов, не компенсируется накоплением льда в Гренландии, и щит медленно сокращается. В прибрежных районах вне ледникового покрова располагаются отд. ледяные купола, в том числе большой купол на северо-востоке оконечности Христианской земли Кронпринц, а также долинный, цирковой, висячий и др. ледники. Области распространения чистого оледенения приурочены к горам Кронпринс-Фредерик, побережью Блоссвилля.

Вдоль побережья Гренландии тянутся свободные ото льда участки суши, местами достигающие ширины 200–250 км. На юго-западе это плато высотой 400–600 м, чередующиеся с глыбовыми хребтами высотой до 1700–2000 м; на севере распространены приподнятые пластовые равнины (Земля Пири, Земля наследного принца Христиана). Восточные берега образуют глыбовые хребты высотой до 3700 м, покрытые горными ледниками (гора Гунбьёрн, высшая точка Гренландии и Арктики). На западе проходит

широкая прерывистая полоса глыбовых нагорий вдоль побережья Баффина моря. Базальтовые плато расположены на восточном побережье (Земля Джемсона) и фрагментарно на западном побережье (район озера Диско). Свободные ото льда участки (около 19 % территории Гренландии) расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Берега Гренландии повсеместно изрезаны глубокими и длинными фьордами (Готхобфьорд, Сёндре Стрём фьорд). Ледник Гумбольдта, спускаясь непосредственно к океану, образует величественный ледяной берег в заливе Пибоди высотой до 100 м.

Масса льда на Гренландском ледяном щите начала уменьшаться. С 1979 по 2006 год летнее таяние ледяного покрова увеличилось на 30 процентов, достигнув нового рекорда в 2007 году. На возвышенностях увеличение зимнего накопления снега частично компенсировало таяние. Тем не менее, снижение продолжает опережать накопление, потому что более высокие температуры привели к усилению таяния и более быстрому движению ледников по краям острова.

Вода не держится наверху. Она льется сквозь трещины во льду, в некоторых местах преодолевая глубину более чем 1,5 Км на каменистую землю внизу. В исследовании, опубликованном на этой неделе в *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Кристофферсен и его коллеги показали, что ледяной щит Гренландии тает снизу.

Подобно воде, протекающей через плотину гидроэлектростанции, падающая талая вода несет огромное количество кинетической энергии. Эта энергия заставляет воду нагреваться, когда она скапливается под ледяным покровом. Это, в свою очередь, вызывает базальное таяние. «Скорость таяния на самом деле поразительна», — сказал Кристофферсен. Он оценил пиковые базальные скорости таяния на ледяном щите Гренландии в 100 раз выше, чем предыдущие оценки, которые не включали этот источник тепла.

Вода, зажата между землей и ледяным щитом, также действует как смазка, позволяя ледяному щиту легче скользить к океану. Но поскольку эта

вода скрыта от глаз, у исследователей есть лишь нечеткая картина того, что происходит. «На самом деле мы мало что знаем об этих системах, — сказал Кристофферсен. «Это большие реки или мириады маленьких ручьев или даже крошечные пленки?»»

Исследователи подсчитали, что эти факторы увеличат общую скорость таяния Гренландии на 8 процентов. Это означает, что в ближайшие годы вклад Гренландии в повышение уровня моря во всем мире может быть больше, чем предполагалось ранее.

Согласно спутниковым данным, в 2019 году ледяной щит Гренландии потерял рекордное количество льда, эквивалентное миллиону тонн в минуту в течение года[2].

Климатический кризис нагревает Арктику в два раза быстрее, чем в более низких широтах, а ледяная шапка вносит наибольший вклад в повышение уровня моря, которое уже подвергает опасности побережья по всему миру. В 2019 году ледяной щит сократился на 532 миллиарда тонн, так как его поверхность таяла, а ледники падали в океан и заполняли семь бассейнов олимпийского размера в секунду.

Спутниковые данные собираются с 2003 года. Потери в 2019 году вдвое превысили среднегодовой показатель в 255 млрд тонн. Почти такая сумма была потеряна только за июль 2019 года .

Ученые знали, что потеря льда в Гренландии в последние десятилетия быстро увеличивалась и что в 2019 году наблюдались высокие темпы таяния. Но спутниковые данные учитывают новые снегопады и позволяют рассчитать чистые потери. Исследователи заявили, что масштаб потерь в 2019 году шокирует и, вероятно, станет самым большим за столетия или даже тысячелетия.

Если весь ледяной щит Гренландии растает, уровень моря поднимется на шесть метров. Но исследователи заявили, что нет уверенности в том, что лист прошел точку невозврата и что сокращение выбросов углерода замедлит таяние, для завершения которого потребуются столетия.

Ученые объяснили экстремальную потерю льда в 2019 году «блокировкой» погоды, которая дольше удерживала теплый воздух над Гренландией. Они становятся все более частыми по мере того, как мир нагревается. Почти 96% ледяного щита подверглись таянию в какой-то момент в 2019 году по сравнению со средним показателем в 64% в период с 1981 по 2010 год.

Снега в Гренландии в 2019 году было мало, в том числе из-за схемы блокировки, что означает, что нового льда было добавлено относительно мало.

Данные о погоде и компьютерные модели позволяют рассчитать потери вплоть до 1948 года. Если посмотреть на рекордные годы таяния, первая пятерка пришлась на последние 10 лет, и это вызывает беспокойство. Но мы знаем, что с этим делать: сократить выбросы CO<sub>2</sub>.

По новым спутниковым данным, собранным Полярным порталом(откроется в новой вкладке), объединение четырех датских государственных исследовательских институтов, Гренландия потеряла более 5 100 миллиардов тонн (4 700 миллиардов метрических тонн) льда за последние 20 лет — или примерно достаточно, чтобы затопить все Соединенные Штаты на 0,5 метра воды.

Эта обширная потеря льда привела к повышению глобального уровня моря на 1,2 сантиметра всего за два десятилетия

Данная группа спутников Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) охватывает 20 лет наблюдений с апреля 2002 года по август 2021 года. Эти спутники измеряют изменения гравитации по всему миру, которые отражают, как масса распределяется вокруг планеты с течением времени. По словам команды Polar Portal, это особенно полезно для оценки изменений массы льда. Данные GRACE показывают, что потеря льда в Гренландии наиболее сильна вокруг побережья, где лед быстро истончается и опрокидывается в океан. По данным НАСА, потеря льда особенно заметна на

побережье Западной Гренландии, где считается, что нагревание подземных вод усиливает таяние ледников.

По данным НАСА, таяние льда в Гренландии является одним из основных факторов, вызывающих повышение уровня моря в ответ на изменение климата. Согласно исследованию 2019 года, опубликованному в журнале Nature, Гренландия в настоящее время находится на пути к повышению глобального уровня моря на 7 -13 см к 2100 году, что может иметь разрушительные последствия.

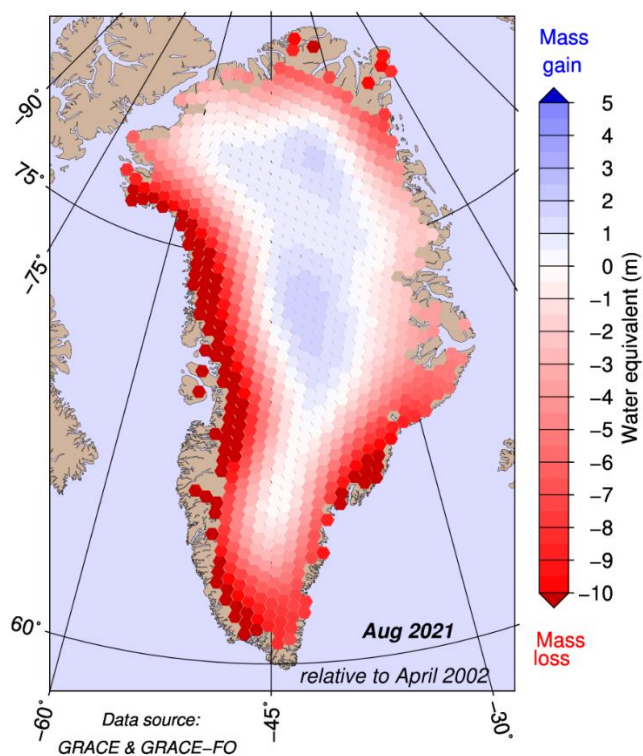


Рисунок 1.3.1 Спутниковая карта с регионами, где видны большие потери льда (тёмно-красный цвет) в метрах [3]



#### 1.4 Синоптические особенности острова Гренландия

Анализ синоптической климатологии и характера осадков в регионе Северной Атлантики позволяет лучше понять влияние атмосферы на баланс массы Гренландского ледяного щита. Метод самоорганизующейся карты (МСК) был применен к 40-летнему Европейскому центру среднесрочных прогнозов погоды (ЕРА-40)[1] суточным данным давления на уровне моря (СЛП) за 40 лет с 1961 по 1999 год для объективного определения синоптических моделей СЛП над районом Северной Атлантики. Всего было выявлено 35 различных моделей СЛП. Модели, характерные для зимнего сезона, характеризуются глубокими системами низкого давления, которые приближаются к Гренландии через активный путь шторма в Северной Атлантике, тогда как модели, наиболее характерные для летних месяцев, обычно слабее и приближаются к ледяному щиту с запада через залив Баффина. Блокирование, разделение,

Анализ осадков ЕРА-40, связанных с каждой схемой СЛП, показал, что самые сильные осадки были связаны с проходящими циклонами, которые создавали береговой поток, позволяя воздуху орографически подниматься крутыми краями ледяного щита. Среднегодовое количество осадков ЕРА-40 над Гренландией с 1961 по 1999 г. составило 35,8 см/год. Гренландия была разделена на пять субрегионов, и предпочтительные синоптические модели получения осадков в каждом регионе включают циклоны, расположенные так, чтобы обеспечить динамический и орографический подъем в каждом регионе. Годовой вклад в осадки от каждой модели СЛП был выделен, чтобы показать, что половина среднегодового количества осадков над Гренландией приходится только на 11 из 35 идентифицированных синоптических моделей (31,4%), что подчеркивает важность изучения осадков в Гренландии на индивидуальной основе. в суточной шкале времени.

### 1.5 Климатические особенности острова Гренландия

В Гренландии, автономной территории Королевства Дания, климат **арктический** вдоль северо-центрального побережья (зона 1 на рис.3), где температуры самых теплых месяцев около нуля 0 °С и **субарктический** на южно-центральной побережье (зона 2 на рис.3), где средние температуры в летние месяцы выше нуля, но все же ниже 10°С. Само собой разумеется, что самые крупные населенные пункты расположены в этой местности с относительно более мягким климатом. Наконец, есть обширная внутренняя территория (зона 3 на рис.3), где температура остается около или ниже нуля даже в летние месяцы.



Рисунок 1.5.1 климатические зоны

В центре и на севере самый холодный месяц обычно февраль, а иногда даже март; Март обычно такой же холодный, как январь или даже холоднее. Это происходит потому, что на этих широтах зимой солнце никогда не восходит, и даже когда оно поднимается над горизонтом в марте, оно вначале остается очень низким и не успевает прогреть почву, в том числе и потому, что последняя покрыта снегом и потому больше всего отражает свет. солнечных лучей. Само собой разумеется, что в апреле в центре и на севере температуры еще очень низкие, то есть на много градусов ниже нуля.

Гренландия — ветреный остров. Ветры, спускающиеся с многолетней ледяной шапки и достигающие затем фьордов и моря, называются стоковыми. Кроме того, есть холодные ветры, которые приходят прямо с Северного полюса. Сильные ветры, дующие при очень низких температурах, опасны для человека, если он не экипирован должным образом, и может привести к обморожению. Имеются также южные и западные ветры, которые дуют особенно вдоль южного побережья и обусловлены столкновением полярных и умеренных воздушных масс, последние переносятся вдоль Атлантического океана Гольфстримом. Однако есть и защищенные бухты и фьорды, где ветер дует реже.

Осадков Гренландии обычно немногочисленна, но довольно часта, в основном встречается в виде легкого снега в центральных и северных районах, в то время как более обильна вдоль побережий, расположенных южнее полярного круга, а также на больших высотах на льдине ледяного покрова, где он всегда встречается в виде снега. Осадков больше всего на побережье крайнего юго-востока, где их количество даже превышает 2000 миллиметров (80 дюймов) в год.

Количество солнечного света не очень хорошее, по крайней мере, на побережье, но весной и летом солнце может выглянуть, в том числе из-за длинных дней, поэтому может быть полезно взять с собой

солнцезащитный крем, бальзам для губ и солнцезащитные очки. заснеженные участки. В течение долгой зимы ночи могут быть освещены захватывающим северным сиянием ( северное сияние ).

Вдоль побережий, по крайней мере в центре и на юге, зимние температуры не такие низкие. Однако лето на побережьях очень прохладное, если не сказать холодное. На самом деле море остается холодным как из-за широты, так и из-за того, что оно постоянно получает лед изнутри. Основные города расположены на западном побережье, потому что на восточном побережье холодное течение уносит плавающие льды по морю, по крайней мере зимой, и в довольно низкие широты. Города часто расположены в защищенных бухтах, но достаточно выйти в море, чтобы найти холодный ветер и температуру на несколько градусов выше нуля даже летом. Теперь давайте посмотрим на климат некоторых прибрежных городов и поселков.

На удаленной исследовательской станции **Норд**, расположенный на 81 градусе северной широты, на северо-восточном побережье, средняя температура колеблется от  $-30^{\circ}\text{C}$  в марте до  $3,5^{\circ}\text{C}$  в июле. Зимой температура может опускаться до  $-50^{\circ}\text{C}$ , а летом она достигает не более  $13-14^{\circ}\text{C}$ . Средняя дневная температура превышает замерзание только в июле и августе, а в июне она составляет около  $0^{\circ}\text{C}$ . Мы находимся в арктическом климатическом регионе, где даже летом может идти снег.

В Каанааке(Туле), второй самый северный город в мире, расположенный на северо-западном побережье, на расстоянии всего 1300 км от Северного полюса, средняя температура колеблется от  $-25^{\circ}\text{C}$  в феврале до  $5^{\circ}\text{C}$  в июле; самый холодный рекорд  $-43^{\circ}\text{C}$ , а самый высокий -  $20^{\circ}\text{C}$ . Зато район, в котором расположен этот город, не очень ветренный. Количество осадков составляет всего 120 миллиметров в год. Иногда температура может опускаться ниже нуля

даже летом. Здесь полярная ночь длинная и длится с конца октября до середины февраля, хотя в течение нескольких недель, в октябре и феврале, когда солнце еще не заходит за горизонт, около полудня пробивается рассвет; с другой стороны, солнце никогда не заходит очень долго, с конца апреля до конца августа.

Южнее, в **Упернавике**, городе с тысячей жителей, расположенном на западном побережье и на 72 градусе северной широты, средняя температура колеблется от -20°C в марте до 5°C в июле и августе. Количество осадков составляет 230 мм в год.

### **Илулиссат**

Дальше на юг, в Илулиссате (или Якобсхавне по-датски), все еще на западном побережье и в 300 километрах к северу от Полярного круга, день длится 24 часа в июне, почти 24 часа в мае и июле, и 20 часов в среднем в августе. Наоборот, в декабре и январе царит тьма; солнце снова начинает всходить в середине января. К апрелю дни становятся длинными, хотя температура все еще ниже нуля. Здесь средняя температура колеблется от -14°C в феврале до 8,5°C в июле. Оттепель происходит в мае месяце, а температура возвращается ниже нуля в конце сентября или начале октября.

**Таблица 1.5.1**

Средние температуры Илулиссата

Месяц	Мин. (°C)	Макс. (°C)	Среднее (°C)
Январь	-17	-10	-13.5
Февраль	-18	-10	-14
Март	-17	-9	-13
Апреля	-13	-4	-8.5
Май	-3	4	0.5
Июнь	3	9	6
Июль	5	12	8.5

Август	4	10	7
Сентябрь	-1	5	2
Октябрь	-6	0	-3
Ноябрь	-11	-4	-7.5
Декабрь	-14	-8	-11
Год	-7.3	-0.4	-3.8

Осадков мало, около 255 мм в год, а это означает, что снегопады в долгую зиму обычно легкие, может быть, продолжительные, но не обильные. Вот среднее количество осадков.

Таблица 1.5.2		
Среднее количество осадков и продолжительность в Илулиссате		
Месяц	Миллиметры	Дней
Январь	15	4
Февраль	15	4
Март	15	4
Апреля	20	5
Май	15	4
Июнь	25	5
Июль	30	5
Август	30	5
Сентябрь	35	7
Октябрь	25	5
Ноябрь	25	6
Декабрь	15	5
Год	255	59

Зимой в Илулиссате очень мало солнечного света, в том числе из-за короткой продолжительности дня, а летом в целом прилично, в том числе из-за длины дня. В июне солнце светит в среднем 10 часов в день из доступных

24 часов солнечного света. Солнце в Илулиссате никогда не заходит примерно с 21 мая по 23 июля.

Таблица 1.5.3

Среднее и общее количество световых часов в месяц

Месяц	Средний	Общий
Январь	0	0
Февраль	1	30
Маршировать	3	95
Апреля	6	180
Май	9	280
Июнь	10	300
Июль	9	280
Август	7	215
Сентябрь	4	120
Октябрь	2	60
Ноябрь	1	30
Декабрь	0	0
Год	4.4	1590

Море возле Илулиссата всегда очень холодное; зимой он иногда промерзает полностью, а иногда частично очищается ото льда, как это обычно бывает летом. На самом деле Илулиссат славится постоянным присутствием вдоль побережья айсбергов, которые приходят из близлежащего фьорда, и делают его туристической достопримечательностью.

Таблица 1.5.4

Средняя температура моря возле Илулиссата

Месяц	Цельсия (°C)
январь	-1
февраль	-1
Маршировать	-1
апреля	-1
Май	0
Июнь	1
Июль	2
<b>Август</b>	<b>3</b>

<b>Сентябрь</b>	2
<b>Октябрь</b>	1
<b>ноябрь</b>	1
<b>Декабрь</b>	0
<b>Год</b>	0.5

На севере Гренландии очень мало снега. Гренландия покрыта льдом площадью 1,8 миллиона квадратных километров, что составляет более 80% ее суши, но земля в ее самой северной точке фактически свободна ото льда. Этот район представляет собой полуостров под названием Земля Пири, и здесь нет ледяного щита, потому что сухой воздух означает, что снегопадов слишком мало, чтобы поддерживать его. Она считается полярной пустыней, и даже во время последнего ледникового периода она не была покрыта ледниками.

Недостаток влаги в воздухе может сделать холодную погоду теплее. Есть и другие преимущества низкой влажности в Гренландии: вы сможете более четко видеть далекие пейзажи. А качество воздуха считается одним из лучших в мире. Так что поездка в Гренландию может буквально стать глотком свежего воздуха.

Летом в Гренландии светит 24 часа солнечного света, это явление известно как полярное солнце. Напротив, в зимние месяцы в некоторых районах по несколько дней вообще не бывает солнечного света. Летние месяцы с длинными днями под полярным солнцем лучше всего подходят для таких занятий, как походы и парусный спорт; это также оптимальное время для наблюдения за китами. Зима лучше всего подходит для тех, кто хочет принять участие в снежных мероприятиях, таких как катание на собачьих упряжках. Если вы хотите отправиться на поиски северного сияния, вам нужно посетить его в период с сентября по март.

Самая низкая температура, когда-либо наблюдавшаяся в Гренландии, составляла минус 66 °С в 1950-х годах. Гренландии недавно удалось установить рекорд самой холодной температуры июля: в 2017 году было



зафиксировано  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако более южные поселения недавно достигли головокружительных высот летом, а в Нууке в июне 2016 года температура достигла  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Изменение климата открыло новый остров у побережья Гренландии. Ледяной щит у побережья Гренландии отступил, показывая, что то, что ранее считалось полуостровом, соединенным с материком, на самом деле является островом. Этот участок земли теперь известен как «Остров потепления» или Уунарток Кекерток на инуитском языке и был обнаружен в 2005 году. Геологическая служба США предположила, что по мере дальнейшего таяния ледяного щита потенциально может открыться больше островов.

Климат Гренландии определенно холодный; в определенных местах и в определенное время года это может быть исключительно так. Тем не менее, климат Гренландии также может быть относительно комфортным — иногда бывает тёплая погода.

## Глава 2. Анализ многолетних рядов температуры воздуха и осадков

### 2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для анализа климатических изменений температуры воздуха и среднемесячных осадков на территории Гренландии было выбрано 3 метеостанции расположение которых показано на (рис 2.1.1).

Пункт наблюдения Нуук, расположение 64.17 северной широты -51.75 западной долготы.

Пункт наблюдения Ангмагнссалик, расположен 65.60 северной широты -37.63 западной долготы

Пункт наблюдения Упернавик, расположен 72.78 северной широты - 56.17 западной долготы



Рисунок 2.1.1 Расположение пунктов наблюдения на острове Гренландия

Таблица 2.1.1

Продолжительность и период наблюдений за среднемесячной температурой воздуха и осадков за месяц на 3 метеостанциях на территории острова Гренландии

Код поста	Наименование	Продолжительность наблюдений	Кол-во лет	Широта, град	долгота, град
4250	Нуук	1866-2019	153	64.17 с.ш.	-51.75 з.д.
4360	Ангмагнссалик	1895-2019	124	65.60 с.ш.	-37.63 з.д.
4210	Упернавик	1873-1987	114	72.78 с.ш.	-56.17 з.д.

## 2.2 Методика оценивания однородности и стационарности

В данной главе я буду анализировать метеорологические ряды многолетних наблюдений для определения расчётных климатических характеристик в пунктах наблюдений на основе построения эмпирических распределений и их аппроксимации аналитическими кривыми.

Основные требования для оценки адекватности временных рядов:

- в однородности выборки, т.е. требуется, чтобы все случайные величины выборки были из одного и того же распределения «генеральной совокупности»;
- в стационарности во времени основных выборочных параметров: среднего значения и дисперсии.

Прежде, чем применять климатическую информацию для обработки и моделирования необходимо оценить ее качество и однородность. При этом будем понимать, что нарушение однородности данных в большей степени обусловлено не естественными, а инструментальными или методическими причинами, такими как: изменение типа регистрирующих приборов, места и времени регистрации и другими подобными причинами. Еще одним из наиболее распространенных видов проявления неоднородности является наличие неоднородных экстремумов, которые для температуры могут быть обусловлены двумя основными причинами: большими погрешностями измеряемой характеристики и малой продолжительностью ряда наблюдений. Второй случай является наиболее распространенным и связан с наличием в ряду наблюдений редкого события, вероятность появления которого много меньше, чем та, которую можно установить по ряду наблюдений такой продолжительности.

При оценке качества данных среднемесячных температур воздуха был осуществлен анализ однородности резко отклоняющихся от эмпирического распределения экстремумов, которые в основном могут быть обусловлены наличием редких событий в коротком ряду наблюдений. Регистрирующие

приборы на протяжении последних 150 лет практически не изменялись, а изменение сроков наблюдений (трехсрочные до 1936 г., четырехсрочные до 1966 г. и восьмисрочные в настоящее время) могло в худшем случае повлиять на расчет среднесуточной температуры, причем, как показывают исследования, незначительно. Также был осуществлен анализ стационарности дисперсий и средних значений двух частей временного ряда по критериям Фишера и Стьюдента.

Для оценки однородности резко отклоняющихся экстремумов применялись критерии Диксона и Смирнова-Граббса, обобщенные на такие 25 особенности гидрометеорологической информации как автокорреляция и асимметрия.

Статистики критериев Диксона рассчитываются на основании эмпирических данных по следующим формулам:

- 1) для максимального члена ранжированной в возрастающем порядке выборки ( $Y_n$ ):

$$D_{1n} = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_1), \quad (2.1)$$

$$D_{2n} = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_2), \quad (2.2)$$

$$D_{3n} = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_2), \quad (2.3)$$

$$D_{4n} = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_3), \quad (2.4)$$

$$D_{5n} = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_1), \quad (2.5)$$

- 2) для минимального члена ранжированной в возрастающем порядке выборки ( $Y_1$ ):

$$D_{11} = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_n), \quad (2.6)$$

$$D_{21} = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_{n-1}), \quad (2.7)$$

$$D_{31} = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-1}), \quad (2.8)$$

$$D_{41} = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-2}), \quad (2.9)$$

$$D_{51} = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_n), \quad (2.10)$$

Где  $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_n$ ;  $n$  – объём выборки.

Статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена ранжированной последовательности ( $Y_n$ ) рассчитывается по формуле:

$$G_1 = (Y_n - Y_{cp}) / \sigma_Y \quad (2.11)$$

И для минимального ( $Y_1$ ):

$$G_1 = (Y_{cp} - Y_1) / \sigma_Y \quad (2.12)$$

где:  $Y_{cp}$ ,  $\sigma_y$  – среднее значение и среднее квадратическое отклонение анализируемой выборки.

Полученные по формулам (2.1) – (2.12) расчетные значения статистик критериев сравниваются с их критическими значениями при уровне значимости  $\alpha = 5\%$  и если расчетное значение больше критического, то гипотеза об однородности отклоняется. В связи с тем, что в некоторых случаях расчетные значения статистик могут быть больше критических, но ненамного, дополнительно определяется уровень значимости, который соответствует расчетному значению. В результате область между уровнями значимости  $\alpha = 5\%$  и  $\alpha = 1\%$  можно разделить на две части: от  $\alpha = 3\%$  до  $\alpha = 5\%$  и от  $\alpha = 1\%$  до  $\alpha = 3\%$ . В первом случае различие между расчетным и критическим значением небольшое и гипотеза однородности может быть принята условно. Во втором случае гипотеза также условно отклоняется. В случае если уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики  $\geq 5\%$  – гипотеза однородности достоверно принимается, а при  $\leq 1\%$  – достоверно отклоняется.

Для оценки однородности или стационарности (однородности во времени) дисперсий и средних значений, соответственно по критериям Фишера и Стьюдента, временной ряд разбивается на две подвыборки одинаковой или разной длины, причем границы разбиения связывались с датами предполагаемого нарушения стационарности. Затем по каждой подвыборке вычисляются значения средних ( $Y_{cpj}$ ) и дисперсий ( $\sigma_j^2$ ), которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера:

$$F = \sigma_j^2 / \sigma_{j+1}^2 \quad (2.13)$$

при  $\sigma^2_j > \sigma^2_{j+1}$ , где  $\sigma^2_j$ ,  $\sigma^2_{j+1}$  – соответственно дисперсии двух следующих друг за другом подвыборок ( $j$  и  $j+1$ ) объемом  $n_1$  и  $n_2$ .

Гипотеза о стационарности дисперсий принимается при заданном уровне значимости  $\alpha$  (%), если расчетное значение статистики критерия меньше критического ( $F < F^*$ ) при заданных степенях свободы, соответствующих объемам выборок ( $n_1$  и  $n_2$ ).

При объемах выборок  $n_1$  и  $n_2$  больше или равных 25 членам ряда можно использовать классическое F-распределение для нормально распределенных независимых случайных величин с новыми степенями свободы, которые зависят от автокорреляции и асимметрии и определяются по формулам:

$$n_{1F} = \frac{n_1 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[ 1 - \frac{1-r^2 n_1}{n_1(1-r^2)} \right]} \quad 2.14$$

$$n_{2F} = \frac{n_2 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[ 1 - \frac{1-r^2 n_2}{n_2(1-r^2)} \right]} \quad 2.15$$

где:  $g$  – коэффициент, учитывающий влияние асимметрии исходной совокупности,  $r$  – коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда.

Расчетное значение статистики критерия Стьюдента для оценки стационарности двух средних значений последовательных подвыборок определяется по формуле:

$$t = \frac{Y_{\text{срI}} - Y_{\text{срII}}}{\sqrt{n_1 \sigma_I^2 + n_2 \sigma_{II}^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

где:  $Y_{срI}$  ,  $Y_{срII}$  ,  $\sigma^2_I$  ,  $\sigma^2_{II}$  – средние значения и дисперсии двух последовательных выборок,  $n_1$  и  $n_2$  – объемы выборок.

Критические значения статистики Стьюдента определяются по Рекомендациям при равных объемах выборок или рассчитываются по уравнению:

$$t'_\alpha = C_t * t_\alpha \quad 2.17$$

где:  $t'_\alpha$  – критическое значение статистики Стьюдента при наличии автокорреляции,

$t_\alpha$  – критическое значение статистики Стьюдента для случайной совокупности притом же числе степеней свободы  $k = n_1 + n_2 - 2$ ;

$C_t$  – переходный коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента автокорреляции.

Оценка стационарности по критерию Стьюдента осуществляется также путем сравнения расчетных и критических значений статистик. Если расчетное значение меньше критического при заданном уровне значимости, гипотеза об однородности (стационарности) не отклоняется.

Анализ однородности эмпирических распределений среднемесячных температур воздуха осуществлялся по статистическим критериям Диксона и Смирнова-Граббса для проверки однородности как максимальных, так и минимальных экстремумов. Обобщенные результаты оценки однородности максимальных (Макс.) и минимальных (Мин.) экстремумов по критериям Диксона и Смирнова-Граббса приведены в таблице 2.2. В этой таблице знак «+» обозначает, что гипотеза однородности принимается. Знак «-» – отклоняется, а если расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости  $\alpha$  от 3% до 5%, то гипотеза принимается условно и в таблице ставится «(+)», а рядом численное значение уровня значимости, соответствующее расчетному значению статистики, если же расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости  $\alpha$  от 1% до 3%, то гипотеза однородности условно отклоняется и



в таблице ставится «(-)», а рядом - численное значение уровня значимости. .  
Стоит еще отметить, что принятые или отклоненные значения в скобках, выбирались по наименьшему из критериев. Кроме того, если экстремумы неоднородны, то приводится год, соответствующий этому неоднородному экстремуму.

### 2.3 Оценка однородности и стационарности температур воздуха.

Анализ однородности эмпирических распределений среднемесячных температур воздуха был проведен по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для всех рядов наблюдений продолжительностью более 20 лет, а анализ стационарности был осуществлен для рядов продолжительностью 40 лет и более. Ограничения по продолжительности связаны с тем, что для коротких рядов наблюдений велика вероятность естественной неоднородности, связанной с наличием экстремумов более редкой повторяемости, чем та, которая вычисляется по короткому ряду и с естественной цикличностью, связанной с чередованием периодов повышенной и пониженной температуры воздуха и осадков, которые могут составлять от одного до 2-3 десятилетий.

Обобщенные результаты оценки однородности максимальных (Макс.) и минимальных (Мин.) экстремумов среднемесячных температур по критериям Диксона (Д) и Смирнова-Граббса (СГ) приведены в табл. 2.3.1 для станций на острове Гренландия. В этой таблице знак «+» обозначает, что гипотеза однородности принимается, знак «-» - отклоняется, а если расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости  $\alpha$  от 3% до 5%, то гипотеза принимается условно и в таблице ставится «(+)», а рядом численное значение уровня значимости, соответствующее расчетному значению статистики. Если же расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости  $\alpha$  от 1% до 3%, то гипотеза однородности условно отклоняется и в таблице ставится знак «(-)», а рядом - численное значение уровня значимости.

Таблица 2.3.1

Однородности и неоднородности временных рядов среднемесячной температуры воздуха на метеостанциях острова Гренландия

Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
		Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
		Январь				Июль			
4250	Нуук	+	+	-	-	+	+	+	+
4360	Ангмассалик	+	+	+	+	+	+	+	+
4210	Уперनावик	+	+	+	+	+	+	+	+
		апрель				октябрь			
4250	Нуук	+	+	+	+	+	+	-	(-)3,5
4360	Ангмассалик	+	+	+	+	+	+	+	+
4210	Уперनावик	+	+	+	+	+	+	+	+

Из результатов табл.2.3.1 следует, что число для среднемесячных температур воздуха не столь велико. Для анализа было проведено 48 теста по 3 станциям и двум критериям (Диксона и Смирнова-Граббса) из общего числа тестов выводов о неоднородности в табл.2.3.1 – 4 или всего 8.33%. Гарантированные выводы неоднородных минимальных экстремумов в свою очередь составляют 6.35% от общего числа тестов всего 3 вывода. Число выводов с минимальным условно неоднородным экстремумом всего 1 что составляет 2.08%.

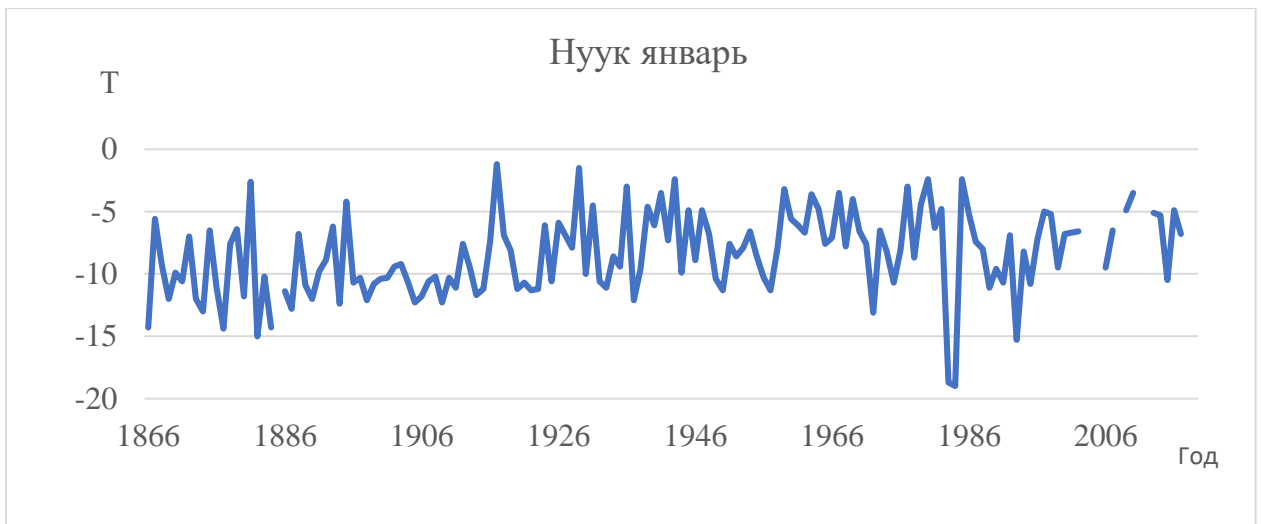


График 2.3.1. Пример неоднородного экстремума в ряде среднемесячной температуры Нуук январь



График 2.3.2. Пример неоднородного экстремума в ряде среднемесячной температуры Нуук октябрь

Результаты оценки стационарности на тех же 3 станциях по критериям Фишера (Ф) и Стьюдента (Ст) приведены в табл.2.3.2 для выявленных случаев не стационарности

Таблица 2.3.2

Стационарность и не стационарность временных рядов среднемесячной температуры воздуха на метеостанциях острова Гренландия

Код	Название	Ф	Ст	Ф	Ст
-----	----------	---	----	---	----

	метеостанции				
		Январь		Июль	
4250	Нуук	+	(-)6,6	+	+
4360	Ангмассалик	+	+	+	-
4210	Уперनावик	+	-	+	+
		Апрель		Октябрь	
4250	Нуук	+	+	+	-
4360	Ангмассалик	-	+	+	+
4210	Уперनावик	+	-	+	+

Анализ стационарности дисперсий и средних значений двух частей временного ряда по критериям Фишера и Стьюдента показал, что самым не стационарным месяцам является апрель (1 станции по критерию Фишера и 1 по критерию Стьюдента). В январе наблюдаются не стационарности 2 временных рядов на станциях Нуук и Уперनावик. Июль не стационарен только на станции Ангмассалик по критерию Стьюдента.

## 2.4 Оценка однородности и стационарности количества осадков.

Анализ однородности эмпирических распределений среднемесячных осадков был проведен по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для всех рядов наблюдений продолжительностью более 80 лет, а анализ стационарности был осуществлен для рядов продолжительностью 100 лет и более. Ограничения по продолжительности связаны с тем, что для коротких рядов наблюдений велика вероятность естественной неоднородности, связанной с наличием экстремумов более редкой повторяемости, чем та, которая вычисляется по короткому ряду и с естественной цикличностью, связанной с чередованием периодов повышенной и пониженной температуры воздуха и осадков, которые могут составлять от одного до 2-3 десятилетий.

Обобщенные результаты оценки однородности максимальных (Макс.) и минимальных (Мин.) экстремумов среднемесячных температур по критериям Диксона (Д) и Смирнова-Граббса (СГ) приведены в табл. 2.4.1 для станций на острове Гренландия. В этой таблице знак «+» обозначает, что гипотеза однородности принимается, знак «-» - отклоняется, а если расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости  $\alpha$  от 3% до 5%, то гипотеза принимается условно и в таблице ставится «(+)», а рядом численное значение уровня значимости, соответствующее расчетному значению статистики. Если же расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости  $\alpha$  от 1% до 3%, то гипотеза однородности условно отклоняется и в таблице ставится знак «(-)», а рядом - численное значение уровня значимости.

Таблица 2.4.1

Однородности и неоднородности временных рядов сумм осадков на метеостанциях острова Гренландия

Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
		Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
		Январь				Июль			
4250	Нуук	+	+	+	+	+	+	+	+
4360	Ангмассалик	+	+	+	+	+	+	+	+
4210	Уперनावик	+	+	+	+	+	+	+	+
		апрель				октябрь			
4250	Нуук	+	+	+	+	+	+	+	+
4360	Ангмассалик	+	+	+	+	+	+	+	+
4210	Уперनावик	+	+	+	+	+	+	+	+

Анализ из 48 тестов по 3 станциям не показал неоднородности по методикам расчёта Диксона и Смирнова-Граббса. Результат теста показывает, что на однородность временных рядов, по средним осадкам за месяц, не повлияло отсутствие данных в ряде.

Результаты оценки стационарности на тех же 3 станциях по критериям Фишера (Ф) и Стьюдента (Ст) приведены в табл.2.4.2 для выявленных случаев нестационарности.

Таблица 2.4.2

Стационарность и не стационарность временных рядов сумм осадков на метеостанциях острова Гренландия

Код	Название метеостанции	Ф	Ст	Ф	Ст
		Январь		Июль	
4250	Нуук	+	-	+	+
4360	Ангмассалик	+	+	+	+
4210	Уперनावик	+	+	+	+
		Апрель		Октябрь	
4250	Нуук	+	+	+	+
4360	Ангмассалик	+	+	-	-
4210	Уперनावик	+	+	-	+

Анализ стационарности дисперсий и средних значений двух частей временного ряда по критериям Фишера и Стьюдента показал, что самым не стационарным месяцам является октябрь (2 станции по критерию Фишера и 1 по критерию Стьюдента). В январе на станции Нуук не стационарность наблюдается только по методу Стьюдента. Все остальные значения, их 20, имеют стационарность.



## Глава 3. Оценивание современных климатических изменений температуры воздуха и осадков в Гренландии

### 3.1 Статистические методы оценивания современных климатических изменений

Климатическая система Земли, включающая атмосферу, гидросферу, криосферу, биосферу и литосферу, нестабильна и постоянно меняется. Его изменчивость оценивается на основе набора показателей, к которым относятся атмосферные характеристики (температура, осадки, давление и др.), а также показатели других природных зон (мировой уровень моря, речной сток, площадь морского льда, выброс органического углерода и др.), а также внешние факторы (например, колебания солнечной постоянной, параметры орбиты Земли, геофизические характеристики). При этом масштаб или период колебаний компонентов климатической системы существенно варьируется: от нескольких секунд атмосферных микровихрений до сотен тысяч лет параметров орбиты Земли, которые формируют сложный спектр колебаний климатических характеристик на любом заданном временном интервале, структура временных рядов может быть представлена двумя основными типами моделей: стационарными и нестационарными. В стационарной модели основные параметры временного ряда, такие как среднее значение и дисперсия, либо постоянны, либо стационарны во времени. Для этого случая можно рассчитать среднее значение многолетнего периода наблюдений, которое является климатической нормой. Даже в условиях современного изменения климата считается, что колебания климатических характеристик квазистабильны для некоторых небольших отрезков временного ряда, например для 30 лет.

Однако помимо случайных отклонений во временных рядах климатических характеристик могут существовать и нестационарные компоненты с большими временными масштабами, обусловленными

факторами климатической системы. В общем, существует три основных типа нестационарных моделей:

- монотонные изменения в виде линейного тренда;
- циклические колебания;
- ступенчатые переходы от одного стационарного состояния к другому.

На самом деле все нестационарные изменения в природе цикличны, и тренд является частью цикла процесса достаточно большого масштаба, который проявляется как цикл подъема или падения в пределах рассматриваемого ограниченного временного интервала.

Если предположить, что нестационарные компоненты являются реакцией климатической системы на внешние воздействия, то показатели этих воздействий могут быть двух основных типов: монотонные (трендовые или циклические колебания) и ступенчатые изменения. Механизм монотонного изменения происходит в уравновешенной системе, которая почти сразу реагирует на внешние воздействия ориентации. Механизм или пусковой механизм ступенчатого изменения характеризует несбалансированную систему, способную нейтрализовать внешние воздействия ориентации или противостоять им в течение определенного периода времени до тех пор, пока их суммарный эффект не поднимет систему на новый уровень, поэтому стационарные временные ряды могут быть частным случаем сбалансированных и несбалансированных систем, существующих одновременно. В первом случае это проявление случайных внешних воздействий, во втором-период устойчивого существования, когда система еще достаточно инерционна, чтобы противостоять внешним воздействиям.

Модель линейного тренда характеризуется зависимостью рассматриваемой климатической характеристики ( $Y$ ) от времени ( $t$ ):

$$Y(t)=b_1t+b_0 \quad (18)$$

где  $b_1, b_0$  – коэффициенты уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов (МНК):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2} \quad (19)$$

$$b_0 = Y_{cp} - b_1 t_{cp} \quad (20)$$

где  $Y_{cp}, t_{cp}$  – средние значения для рядов климатической характеристики и времени.

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента  $b_1$  или коэффициента корреляции  $R$  зависимости (1), который рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}} \quad (21)$$

Модель ступенчатых изменений аналогична двум (или нескольким) стационарным моделям для двух (или нескольких) частей временного ряда, что характеризуется неизменностью во времени среднего значения и среднего квадратического отклонения для каждой части ряда:

$$\begin{aligned} Sr_1(t_1) &= \text{const}_1, & \sigma_1(t_1) &= \text{const}_1, \\ (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sr_2(t_2) &= \text{const}_2, & \sigma_2(t_2) &= \text{const}_2, \\ (23) \end{aligned}$$

где  $Sr_1, \sigma_1$  – среднее значение и среднее квадратическое отклонение первой части ряда при изменении  $t_1$  от 1 до  $t_n$ ;  $Sr_2, \sigma_2$  – среднее значение и среднее квадратическое отклонение второй части ряда при изменении  $t_2$  от  $t_n + 1$  до  $n$ ,  $n$  – объем ряда.

Время изменения шага ( $t_n$ ) определяется визуально или на основании дополнительной информации о факторе и дате нарушения плавности

(например, изменения индекса атмосферной циркуляции, даты изменения регистрирующего устройства), а также может быть определено итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2(n_1-1)+\sigma_2^2(n_2-1)=\min, \quad (24)$$

где  $n_1, n_2$  – объемы каждой из двух частей временного ряда.

### 3.2 Оценка климатических изменений температур воздуха

Таблица 3.2.1.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов температур января

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	F <sub>тр</sub>	F <sub>ст</sub>	T <sub>ст</sub>	T <sub>нач</sub>	T <sub>к</sub>	n	R
4210	0,24	<b>16,86</b>	0,5	0,6	1926	1873	2002	130	0,07
4250	0,009	<b>16,99</b>	1,54	1,86	1956	1874	2002	129	0,01
4360	7,5	<b>31,7</b>	<b>3,05</b>	<b>4,13</b>	1998	1895	2019	125	0,38

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , нам известно, что в январе при  $\Delta > 10\%$  являются все ряды наблюдений среднемесячной температуры за месяц следуя из модели ступенчатых изменений. Модели статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5%, имеют модели тренда и ступенчатая, на станции Ангмагссалик(4360). Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении  $R > 0,26$ , являются 1 ряд. Примеры графиков временных рядов нестационарных моделей приведены на рисунке 3.2.1.

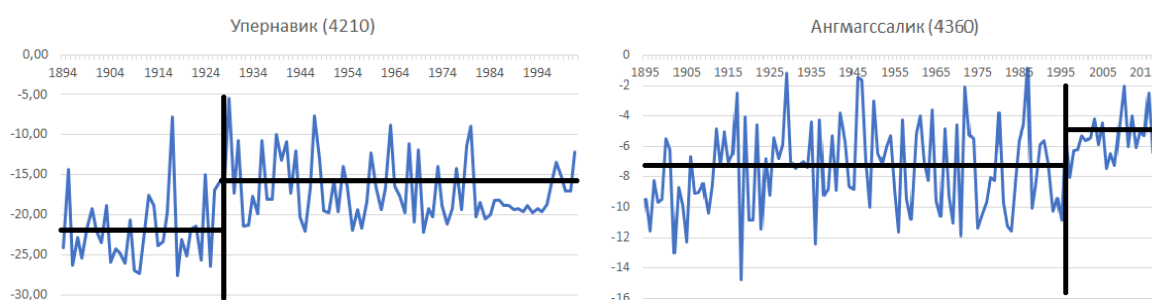


Рис 3.2.1. Графики временных рядов нестационарных моделей температур Января

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов температур апрель

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	F <sub>тр</sub>	F <sub>ст</sub>	T <sub>ст</sub>	T <sub>ст2</sub>	T <sub>нач</sub>	T <sub>к</sub>	n	R
4210	6,10	5,24	<b>2,7</b>	<b>2,69</b>	1945	-	1875	2002	128	0,34
4250	<b>20,81</b>	<b>25,44</b>	<b>1,80</b>	1,13	1919	1964	1873	2002	130	0,61
4360	2,05	<b>37,52</b>	<b>2,11</b>	<b>3,31</b>	1920	-	1895	2019	125	0,20

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , видно, что в апреле при  $\Delta > 10\%$  являются два ряда наблюдений среднемесячной температуры за месяц, следуя из модели ступенчатых изменений и 1 ряд по трендовой модели на пункте наблюдения Нуук(4250). Моделями статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5% являются F<sub>тр</sub> во всех трёх станциях, а F<sub>ст</sub> в двух станциях, Упернавик(4210) и Ангмагссалик(4360). Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении  $R > 0,26$ , являются 2 ряда. Примеры графиков временных рядов нестационарных моделей приведены на рисунке 3.2.2.

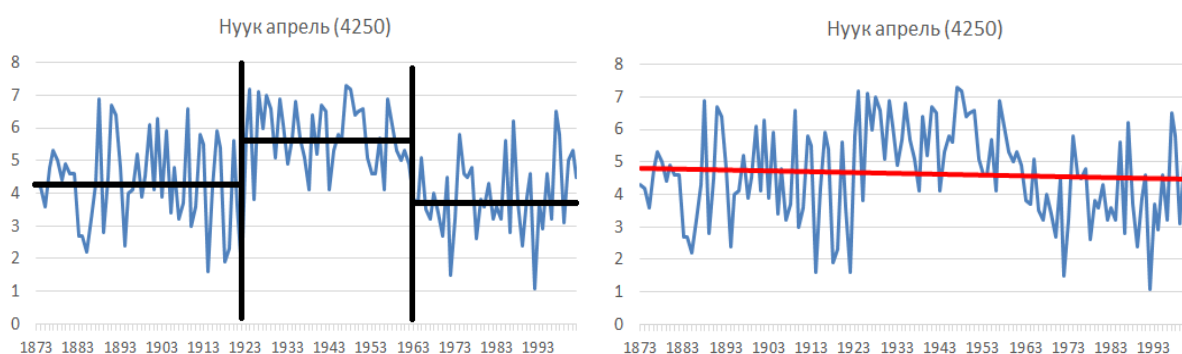


Рис 3.2.2. Графики временных рядов нестационарных моделей температур Апрель

Таблица 3.2.3.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов температур июль

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	F <sub>тр</sub>	F <sub>ст</sub>	T <sub>ст</sub>	T <sub>нач</sub>	T <sub>к</sub>	n	R
4210	<b>11,48</b>	<b>14,90</b>	0,23	0,24	1950	1873	2002	130	0,46
4250	<b>11,55</b>	<b>13,73</b>	1,15	1,18	1919	1866	2019	154	0,46
4360	7,38	1,54	1,06	1,00	1947	1895	2019	125	0,37

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , видно, что в июле при  $\Delta > 10\%$  являются два ряда наблюдений среднемесячной температуры за месяц, следуя из модели ступенчатых изменений и модели тренда. Моделями статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5% нет. Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении  $R > 0,26$ , являются 3 ряда.

Таблица 3.2.4.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов температур октябрь

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	F <sub>тр</sub>	F <sub>ст</sub>	T <sub>ст</sub>	T <sub>нач</sub>	T <sub>к</sub>	n	R
4210	<b>28,41</b>	1,47	1,08	0,78	1945	1873	2002	130	0,69
4250	<b>36,04</b>	<b>10,74</b>	2,25	1,61	1945	1866	2019	154	0,76
4360	8,38	4,26	1,72	1,51	1964	1895	2019	125	0,40

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , видно, что в октябре при  $\Delta > 10\%$  являются два ряда наблюдений среднемесячной температуры за месяц, следуя модели тренда и 1 ряд наблюдений следуя ступенчатой модели на пункте наблюдения Нуук(4250). Моделями статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5% имеет F<sub>тр</sub> на станции Нуук. Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении

$R > 0,26$ , являются 3 ряда. Пример графиков временных рядов нестационарных моделей приведены на рисунке 3.2.3

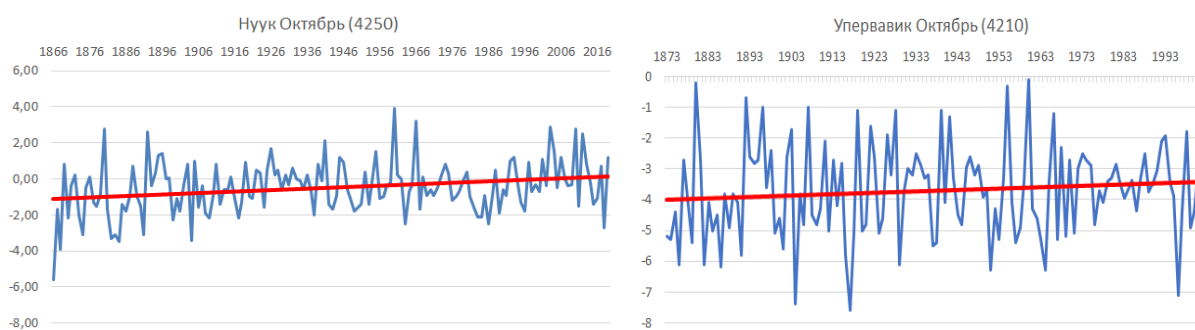


Рис 3.2.3. Графики временных рядов нестационарных моделей температур Октябрь



### 3.3 Оценка климатических изменений количества осадков

Таблица 3.3.1.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов осадков за январь

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	$F_{тр}$	$F_{ст}$	$T_{ст}$	$T_{ст2}$	$T_{нач}$	$T_{к}$	n	R
4210	<b>1,38</b>	12,62	11,3	9,96	1938	-	1874	1987	114	0,16
4250	<b>10,23</b>	<b>0,36</b>	40,29	36,04	1902	1947	1875	1990	116	0,44
4360	0,12	4,74	60,96	63,92	1957	-	1897	2005	109	-0,05

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , нам известно, что в январе при  $\Delta > 10\%$  являются 2 ряда наблюдений по осадкам за месяц, 1 ряд наблюдений по трендовой модели и 1 ряд по ступенчатой. Модели статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5%, имеют все ряды всех станций. Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении  $R > 0,26$ , являются 1 ряд. Примеры графиков временных рядов нестационарных моделей приведены на рисунке 3.2.1.



Рис 3.2.1. Графики временных рядов нестационарных моделей сумм осадков за январь

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов осадков за апрель

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	$F_{тр}$	$F_{ст}$	$T_{ст}$	$T_{ст2}$	$T_{нач}$	$T_{к}$	n	R
4210	<b>0,73</b>	8,48	12,3	11,3	1939	-	1873	1987	114	0,12
4250	<b>4,91</b>	<b>22,58</b>	94,58	116,17	1955	-	1875	1990	116	0,30
4360	1,12	6,87	39,69	42,14	1948	-	1897	2005	109	-0,05

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , видно, что в апреле при  $\Delta > 10\%$  являются 1 ряд наблюдений по сумме осадков за месяц, 1 ряд наблюдений по ступенчатой модели. Модели статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5%, имеют все ряды всех станций. Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении  $R > 0,26$ , являются 1 ряд. Примеры графиков временных рядов нестационарных моделей приведены на рисунке 3.3.2.

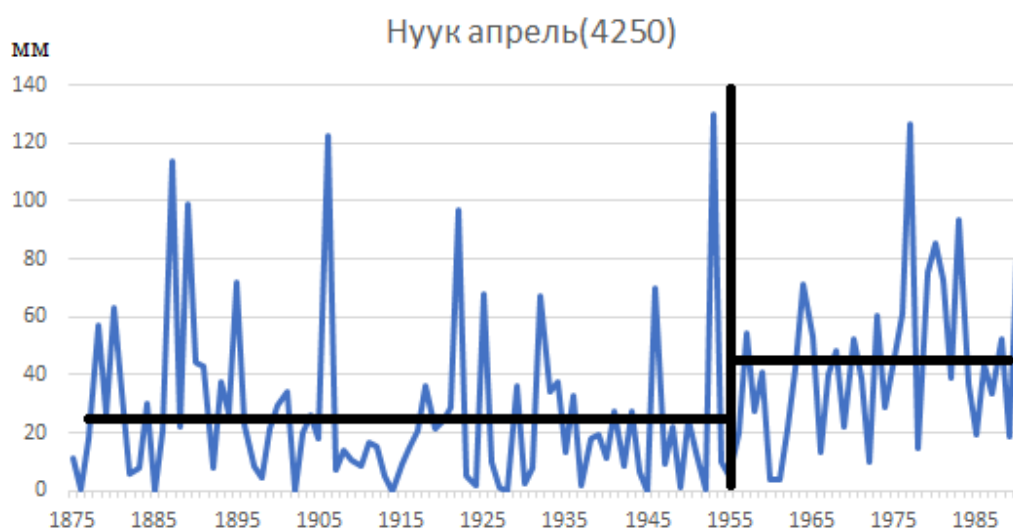


Рис 3.2.2. Графики временных рядов нестационарных моделей сумм осадков за месяц

Таблица 3.3.3.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов осадков за июль

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	F <sub>тр</sub>	F <sub>ст</sub>	T <sub>ст</sub>	T <sub>ст2</sub>	T <sub>нач</sub>	T <sub>к</sub>	n	R
4210	<b>1,92</b>	<b>21,86</b>	<b>17,70</b>	<b>22,21</b>	1912	-	1873	1987	114	0,19
4250	12,77	3,23	<b>53,89</b>	<b>48,58</b>	1934	-	1875	1990	116	0,48
4360	<b>10,99</b>	1,66	<b>41,04</b>	<b>37,14</b>	1948	-	1897	2004	108	0,45

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , видно, что в июле при  $\Delta > 10\%$  являются 3 ряда наблюдений по осадкам за месяц, 1 ряд наблюдений по ступенчатой модели и 2 ряда по модели тренда. Модели статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5%, имеют все ряды всех станций. Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении  $R > 0,26$ , являются 2 ряда.

Таблица 3.3.4.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов осадков за октябрь

Код	$\Delta_{тр},\%$	$\Delta_{ст},\%$	F <sub>тр</sub>	F <sub>ст</sub>	T <sub>ст</sub>	T <sub>ст2</sub>	T <sub>нач</sub>	T <sub>к</sub>	n	R
4210	1,89	<b>11,79</b>	<b>19,46</b>	<b>17,08</b>	1932	-	1873	1987	115	0,19
4250	<b>10,56</b>	0,45	<b>50,70</b>	<b>45,55</b>	1914	1950	1875	1990	116	0,44
4360	1,05	6,21	<b>66,38</b>	<b>61,84</b>	1923	-	1897	2005	109	0,14

После получения результатов расчёта  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ , видно, что в октябре при  $\Delta > 10\%$  являются 2 ряда наблюдений по осадкам за месяц, 1 ряд наблюдений по ступенчатой модели и 1 ряда по модели тренда. Модели статически более значимые по критериям Фишера, при уровне значимости 5%, имеют все ряды всех станций. Статистически значимыми коэффициентами корреляции, при значении  $R > 0,26$ , являются 2 ряда.

Вывод к 3 главе:

Оценка климатических изменений температуры воздуха с помощью ступенчатой модели показала более точный результат при выборе года, где явно видно климатическое изменение по средней температуре за месяц. При линейной модели можно определить только общий тренд изменения климата, что говорит нам о менее точном определении года климатического перехода.

## Заключение:

По итогам проведенной бакалаврской работы можно выделить несколько основных выводов:

1. Составлена база многолетних рядов среднемесячных температур воздуха и сумм осадков на 3 пунктах наблюдения метеорологических величин в Гренландии. Это позволяет оценить климатические изменения в Гренландии в южной, восточной и западной части.
2. Для полученной информации из пунктов наблюдения была проделана оценка однородности и стационарности многолетних рядов наблюдения.
3. Для многолетних рядов наблюдения среднемесячной температуры воздуха была проведена оценка климатических изменений, исходя из оценки климатических изменений лучшим способом является модель ступенчатого изменения.

В январе средний ход температуры увеличился на  $6^{\circ}\text{C}$  близ пункта начиная с 1998 года Ангмагссалик(4360) и в среднем увеличилась вблизи пунктах наблюдения Нуук(4250) и Упернавик(4210) на  $4^{\circ}\text{C}$ .

В апреле ход температуры в пункте наблюдения Ангмагссалик(4360) в среднем увеличился на  $1,5^{\circ}\text{C}$  начиная с 1919 года об этом говорит рассчитанное значение критерия Фишера  $F_{ст} = 3,31$  для модели ступенчатого изменения, что является больше критического значения. Так же среднемесячный ход температуры близ пункта Нуук(4250) изменялся в течении двух временных периодов начиная 1919 года среднемесячная температура ряда увеличилась на  $1^{\circ}\text{C}$ , а начиная с 1964 года с среднемесячная температура ряда уменьшилась на  $2^{\circ}\text{C}$ .

В июле климатические изменения близ пунктов наблюдения не столь велики.

В октябре в свою очередь данные очень данные по среднемесячной температуре очень сильно разнятся из года в год, что не даёт сделать точное определение климатического изменения ступенчатым методом.

4. После оценки климатических изменений многолетних рядов сумм осадков за месяц можно сделать вывод, что количество осадков увеличилось за январь на станции Уперनावик(4210) увеличилось в среднем на 1мм. В пункте наблюдения Нуук(4250) было 2 временных периода когда сумма осадков за месяц изменялась достаточно сильно, что бы заметить это на графике начиная с 1902 года в среднем сумма осадков за январь уменьшилась на 30 мм, начиная с 1947 года средняя сумма осадков за январь увеличилась на 30 мм что говорит о возвращении климатического режима до 1902 года. На станции Ангмагссалик(4360) начиная с 1957 года и до конца 2005 года средняя сумма осадков за январь увеличилась на 40 мм.

Сумма осадков за апрель месяц временного ряда на станции Нуук(4250) с 1955 года и до 1990 увеличилась по сравнению с другим периодом на 20 мм

В пункте наблюдения Уперनावик(4210) сумма осадков за апрель на всём ряде наблюдения не понесло весомых климатических изменений начиная с 1939 года.

В пункте наблюдения Ангмагссалик(4360) с 1949 года климатические изменения сумм осадков за апрель не столь велики.

Во всех остальных месяцах климатические изменения сумм осадков за месяц не столько велики по сравнению с январём.

## Список литература

1. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/10/1/2008jhm1014\\_1.xml#i1525-7541-10-1-60-Chen1](https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/10/1/2008jhm1014_1.xml#i1525-7541-10-1-60-Chen1)
2. <https://www.theguardian.com/environment/2020/aug/20/greenland-ice-sheet-lost-a-record-1m-tonnes-of-ice-per-minute-in-2019>
3. <https://www.livescience.com/greenland-ice-loss-cover-united-states>
4. <https://collections.dartmouth.edu/arctica-beta/html/EA01-16.html>
5. В.А. Лобанов, И.А. Смирнов, А.Е. Шадурский Практикум по климатологии. Часть 1. – СПб.: РГГМУ, 2011. – С. 7-24
6. В.А. Лобанов, И.А. Смирнов, А.Е. Шадурский Практикум по климатологии. Часть 2. – СПб.: РГГМУ, 2012. – С. 9-48.