



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

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Климат севера ЕТР и его изменения в настоящем
и будущем»

Исполнитель **Груздев Алексей Игоревич**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель **доктор технических наук, профессор**
(ученая степень, ученое звание)

Лобанов Владимир Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

Санкт-Петербург
2024

Содержание

Введение	3
1. Физико-географическое и климатическое описание севера Европейской территории России	5
1.1 Физико-географическое положение ЕТР	5
1.2 Выбранные пункты и продолжительность рядов	9
1.3 Пространственно-временные климатические особенности температуры и осадков	12
2. Современные климатические изменения температуры воздуха на севере ЕТР	21
2.1 Методика и результаты оценки качества информации	21
2.2 Определение расчетных климатических характеристик	30
2.3 Моделирование многолетних рядов	34
2.3.1 Методика моделирования	34
2.3.2 Полученные результаты по нестационарным моделям	37
3. Современные климатические изменения осадков на севере ЕТР	49
3.1 Оценка качества данных	49
3.2 Определение расчетных климатических характеристик	53
3.3 Результаты моделирования многолетних рядов	57
4. Оценка будущих изменений температуры воздуха на севере ЕТР	68
4.1 Методика оценки	68
4.2 Выбор эффективной модели	72
4.3 Полученные результаты	77
5. Оценка будущих изменений осадков на севере ЕТР	84
5.1 Выбор эффективной модели	84
5.2 Результаты оценки будущих изменений	87
Заключение	92
Список используемых источников	94

Введение

В современный период по всему миру изменяется климат, поэтому необходимо изучать и проводить оценку климатического состояния, не только всей климатической системы, но и различных регионов по отдельности. Изучение индивидуально взятых территорий, помогает детальнее рассмотреть особенности происходящих изменений и соединить полученную информацию воедино. Всё большее влияние на климат, с развитием техники и технологий, оказывает человек (антропогенное воздействие). Например, увеличение выбросов в атмосферу большого количества парниковых газов приводит к потеплению всей планеты, т.е. к нарушению баланса климатической системы: состава атмосферы, океана и циркуляции в целом. Данные вопросы об изменении климата остаются важнейшей проблемой, рассматриваемой во всем мире. Поэтому необходимо рассматривать сценарии будущего развития этих изменений [17,24].

Данная работа посвящена оценке влияния современного климата на климатические характеристики (температура воздуха и осадки) севера Европейской территории Российской Федерации (ЕТР) в настоящем и будущем.

Объектом исследования является территория севера ЕТР и ряды многолетних наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеорологических станциях.

Предмет исследования — влияние современных и будущих изменений климата на динамику многолетних колебаний среднемесячных температур воздуха и сумм осадков за средние месяцы каждого сезона – январь, апрель, июль, октябрь.

Целью исследования является оценка современных и будущих изменений температур воздуха и осадков на территории севера ЕТР.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформировать региональные базы данных по температуре воздуха и осадкам. Выполнить оценку качества рядов данных на однородность и стационарность, восстановить пропуски наблюдений и привести непродолжительные ряды к многолетнему периоду с целью получения непрерывных многолетних рядов и качественных данных.
2. Получить значения расчетных климатических характеристик редкой повторяемости для практических целей, таких как проектирование и строительство. Выполнить их пространственное обобщение и установить закономерности.
3. Рассчитать показатели нестационарности для оценки проявления современных изменений климата. Выполнить пространственное обобщение показателей нестационарности по территории и установить их закономерности. Дать количественную оценку современных климатических изменений как путем сравнения с естественной климатической изменчивостью (с СКО – средним квадратическим отклонением), так и на основе сравнения двух средних значений по критерию Стьюдента.
4. Оценить будущие климатические изменения температуры воздуха и осадков на основе выбора наиболее подходящих для ЕТР физико-математических моделей климата и откорректированных будущих значений сценариев.

В 1 главе представлены физико-географические особенности изучаемой территории - севера европейской территории Российской Федерации. Здесь же осуществлен выбор пунктов наблюдений, сформирована база данных, и построены карты пространственных распределений средних многолетних температур воздуха и осадков за январь, апрель, июль и октябрь, рассмотрен внутригодовой ход этих климатических характеристик. Во 2-ой и 3-ей главах диссертации рассматриваются современные изменения температуры воздуха и осадков. Состав глав включает в себя анализ качества сформированной базы данных, определение расчетных климатических характеристик редкой повторяемости

1 раз в 100 и 200 лет, а также оценку современных климатических изменений в многолетних рядах для холодного (январь), теплого (июль) и переходных периодов (апрель, октябрь) года с помощью аппроксимации временных рядов моделями линейного тренда и ступенчатых изменений. Дана количественная оценка современных климатических изменений и рассчитана доля этих изменений по сравнению с естественной климатической изменчивостью. В 4-ой и 5-ой главах получены будущие изменения температур воздуха и осадков, включая выбор подходящих физико-математических моделей проектов CMIP5 и CMIP6 и корректировку сценарных оценок. Для исследования изменений температуры воздуха на Севере ЕТР выбраны 19 метеостанций, равномерно расположенных по территории для ее надежного освещения. В связи с тем, что осадки более изменчивы по территории, чем температура, для их исследования были выбраны 38 станций, также равномерно распределенных по территории.

1. Физико-географическое и климатическое описание севера Европейской территории России

1.1 Физико-географическое положение ЕТР

Север Европейской территории России или Европейский Север – самый большой регион европейской части Российской Федерации, площадь которого 1467 тыс. км². Это почти 10% от всей площади страны. Этот регион находится в северной части Восточно-Европейской равнины, омывается Белым, Баренцевым и Карским морями. Протяженность с запада на восток составляет около 2 тыс. км, а с севера на юг – около 1,5 тыс. км (Рис.1.1).



Рис.1.1. Границы северной части европейской территории Российской Федерации

Республики Коми, Карелия, Архангельская, включая Ненецкий автономный округ, Мурманская и Вологодская области входят в состав субъектов Европейской территории России [27].

Архангельская область входит в первую десятку по площади субъектов Российской Федерации. Ее площадь оставляет 595 тыс. км², расположена близко к арктическим морям, но удалена от теплого течения, части Гольфстрима. Вологодская область расположена на северо-востоке Восточно-Европейской равнины, вдоль реки Сухоны. Республика Карелия омывается Белым морем на востоке, на западе – государственная граница с Финляндией. Самый северный регион, занимающий весь Кольский полуостров и омывающийся Белым и Баренцевым морями – это Мурманская область. Город Мурманск – порт, который работает круглый год, т.к. Баренцево море не замерзает из-за теплого течения. Большая территория области расположена за Северным полярным кругом.

Координаты рассматриваемого района: северная точка: мыс Флигели с координатой 81°50'с.ш., южная (58°53'с.ш.) расположена в Вологодской области, западная точка (28°22' в. д.), восточная (66°10' в. д.) расположена в

Республике Коми [20]. Территория этого региона делится на две части: Кольско-Карельскую и Двино-Печорскую.

В основании первой части лежит Балтийский щит. В прошлом со Скандинавских гор сошел древний ледник, в связи с этим и образовались котловины большого количества озер. Вся территория, кроме крайнего севера, покрыта лесными массивами.

Кристаллический фундамент Двино-Печорской части перекрыт пластами осадочных пород. На востоке расположены Тиманский и Канинский кряжи – остатки древнего хребта, за рекой Печора на западе – Полярный Урал. На севере региона расположилась тундра. Далее опускаясь южнее, леса с многоводными судоходными реками: Онега, Мезень, Печора, Северная Двина.

Кольский полуостров после таяния ледникового покрова около 11 тыс. лет назад, стал относительно быстро подниматься, поэтому в центре расположились горы Хибины, которые имеют высоту до 1100м над уровнем моря. Большая часть топливных ресурсов, запасов соли и руд лёгких металлов, располагается на северо-востоке региона. Кроме того, есть значительные месторождения нефти и газа на побережье, шельфе Баренцева моря. Крупные месторождения фосфор-содержащего сырья, цветных, редко-земельных металлов, железной руды, имеются на северо-западе. По всей территории севера ЕТР расположены торфяные и лесные запасы [27].

Особенность климата севера Европейской территории России – это различная освещённость и нагрев земной поверхности в течение года.

Классификация климатов Бориса Павловича Алисова основана на генетическом принципе, объясняющем происхождение данного типа климата. Для рассматриваемого района, севера ЕТР, это основные климатические зоны — умеренная и арктическая, т.е. области, в которых влияние на климат весь год определяется воздействием воздушных масс только одного типа, умеренного (полярного) и арктического воздуха. Между ними расположена субарктическая зона, характеризующаяся сезонной

сменой преобладающих воздушных масс(ВМ), в которой летом преобладает умеренная ВМ, а зимой арктическая ВМ (Рис. 1.2) [22].



Рис.1.2. Климатические зоны европейской части России

Климаты в умеренных и высоких широтах формируются под влиянием циклонов и антициклонов, возникающих на полярном и арктическом фронтах, которые разделяют тропическую и умеренную, а также умеренную и арктическую ВМ. Север региона располагается за Полярным кругом. В регионе наблюдается полярная ночь. По территории, особенно в северных частях, расположена зона многолетней мерзлоты. Для этой области характерны высокая влажность воздуха, но низкая испаряемость. Большие территории покрыты болотами и различными водными объектами.

I. Арктический пояс. Для арктического пояса характерно преобладание в течение года арктических воздушных масс. Наибольшие различия по территории проявляются в основном из-за недостатка или полного отсутствия солнечной радиации зимой и очень большим притоком радиации летом. Летом температуры невысокие, т.к. большая часть радиации отражается снежно-ледовым покровом, а поглощенная радиация тратится на таяние. Суровость погодных условий в холодный период зависит от скорости ветра. Высота снежного покрова на материке достигает 40 см.

II. Субарктический пояс. Наблюдается сезонная смена арктических и умеренных воздушных масс. Климат формируется под влиянием

циклонической деятельности в течение всего года. Зима холодная, с сильными ветрами с умеренных широт, наблюдаются метели. Летом с северными ветрами распространяется арктический воздух, который задерживает таяние снега весной и приводит к медленному потеплению, возможны заморозки. Наблюдается избыточное увлажнение, вызывающее образование вечной мерзлоты и заболачивание.

III. Умеренный пояс. В умеренном поясе преобладают воздушные массы умеренных широт. Климат формируется под влиянием арктического, атлантического воздуха умеренных широт. Формируется в условиях больших сезонных различий приходящей солнечной радиации. Летом большой радиационный баланс подстилающей поверхности, зимой на материках он отрицательный. Часты вторжения ВМ из полярных и субтропических широт, вызывающие резкие изменения температуры. Континентальный климат умеренных широт характеризуется теплым летом и холодной зимой с устойчивым снежным покровом [6,9,22].

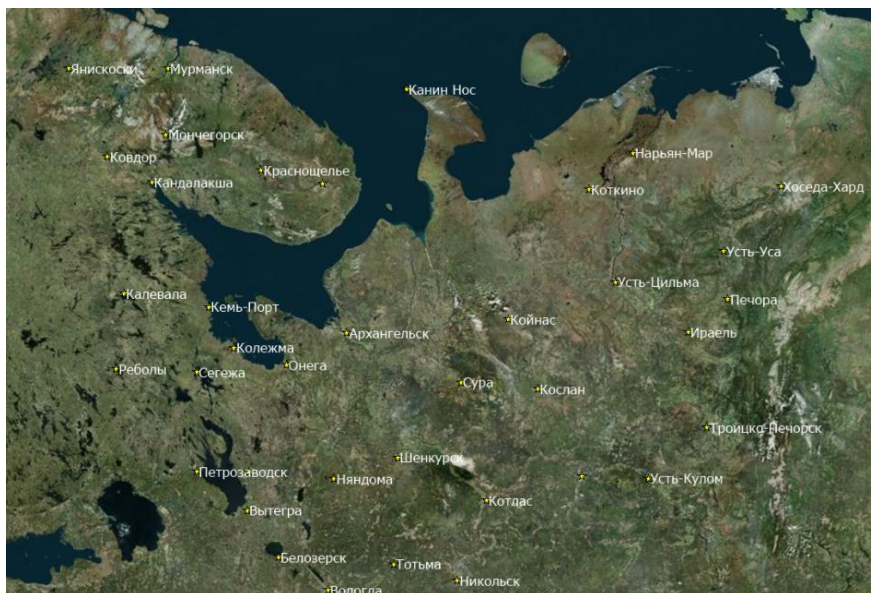
1.2. Выбранные пункты наблюдений и продолжительность рядов

Изучаемыми климатическими характеристиками являются:

- среднемесячная температура воздуха на 19 метеостанциях;
- суммы осадков за каждый месяц на 38 станциях.

При рассмотрении месячных сумм осадков было выбрано большее число метеостанций для лучшей интерполяции и более точного анализа. Метеостанции расположены достаточно равномерно, чтоб хорошо описать весь рассматриваемый регион- север Европейской территории Российской Федерации. Чтобы показать на карте местоположение метеорологических станций, использовалась программа ГИС "MapInfo"[32], в итоге сформирована геоинформационная карта. Расположение метеостанций представлено на Рис.1.3а. Распределение станций по высотам приведено на Рис.1.3б.

A)



Б)

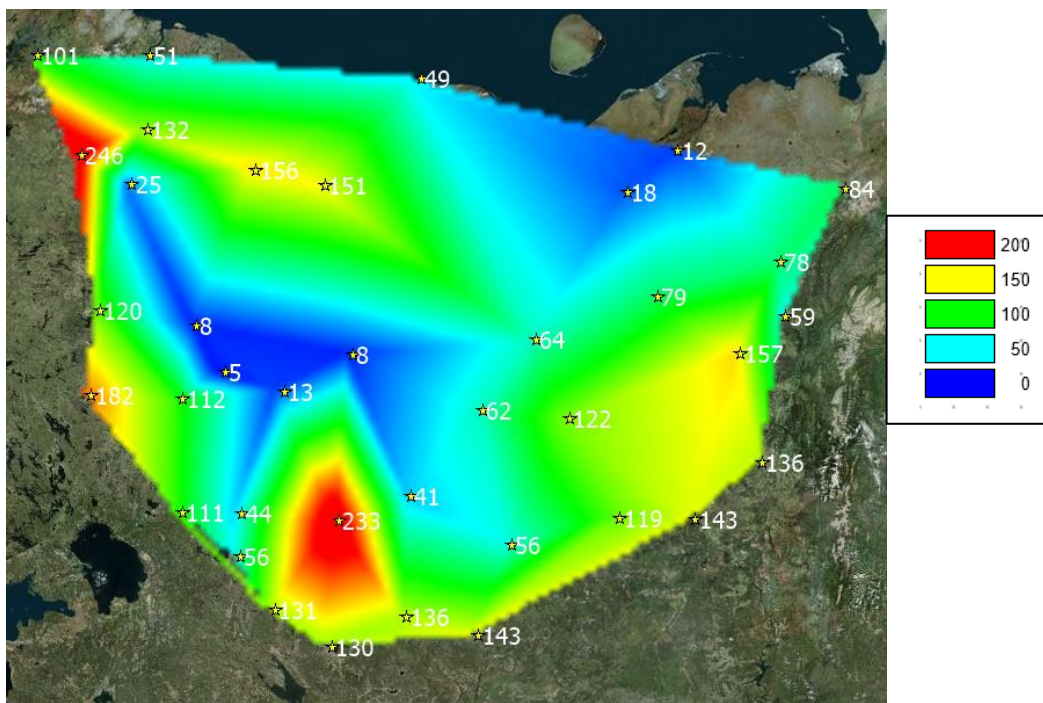


Рис.1.3. Расположение метеостанций (вверху) и их распределение по высотам над уровнем моря, м (внизу)

Из рисунка 1.3б видно, что метеостанции на Кольском полуострове находятся на высотах около 100-150м, максимальная высота у метеостанции Ковдор – 250 метров. Высоты станций у побережья Белого моря минимальны и не превышают 10 метров над уровнем моря. На рис.1.3б выделяется высота 230м на метеостанции Няндомы, находящейся на юге рассматриваемого региона. Станции на юго-востоке также находятся на

высотах 100-150 метров, в центре района высоты 50-70метров.

Многолетние ряды наблюдений за среднемесячной температурой воздуха и осадками получены с сайта "Погода и климат"[25] и с сайта метеорологического института Королевства Нидерландов [26].

В результате были сформированы две региональные базы данных (БД) среднемесячных температур воздуха и суммарного за каждый месяц количества осадков. Основные показатели многолетних рядов наблюдений в сформированных региональных БД, полученные с помощью СУБД "ПК Гидрорасчеты" в Табл.1.1.

Таблица 1.1

Названия метеостанций, координаты и количество лет наблюдений за среднемесячной температурой воздуха и месячными суммами осадков

Код	Наименование	Широта	Долгота	Кол-во лет наблюдений за осадками	Кол-во лет наблюдений за температурой
22101	Янискоски	68,97	28,78	60	
22113	Мурманск	68,97	33,05	88	106
22165	Канин нос	68,65	43,3	105	109
22204	Ковдор	67,57	30,45	64	
22212	Мончегорск	67,93	32,95	83	
22217	Кандалакша	67,15	32,35	111	112
22235	Краснощелье	67,35	37,05	91	
22249	Каневка	67,13	39,67	68	
22408	Калевала	65,22	31,15	83	
22522	Кемь-Порт	64,98	34,8	105	162
22529	Колежма	64,23	35,88	75	
22550	Архангельск	64,5	40,73	152	211
22583	Койнас	64,75	47,65	110	111
22602	Реболы	63,83	30,82	77	110
22621	Сегежа	63,77	34,28	65	
22641	Онега	63,9	38,12	88	137
22676	Сура	63,58	45,63	65	
22695	Кослан	63,45	48,92	60	
22768	Шенкурск	62,1	42,9	132	
22820	Петрозаводск	61,82	34,27	85	208
22831	Пудож	61,8	36,52	85	
22837	Вытегра	61,02	36,45	135	146
22854	Няндом	61,67	40,18	72	
22887	Котлас	61,23	46,72	88	112

22939	Белозерск	60,03	37,78	64	
23205	Нарьян-Мар	67,63	53,03	96	98
23207	Коткино	67,03	51,13	40	
23219	Хоседа-Хард	67,08	59,38	81	86
23405	Усть-Цильма	65,43	52,27	124	135
23412	Усть-Уса	65,97	56,92	88	
23418	Печора	65,12	57,1	80	81
23514	Ираель	64,52	55,4	64	
23711	Троицко-Печорск	62,7	56,2	132	136
23803	Усть-Кулом	61,68	53,68	84	
23804	Сыктывкар	61,72	50,83	132	208
27037	Вологда	59,32	39,92	85	139
27051	Тотьма	59,88	42,75	135	140
27066	Никольск	59,53	45,47	88	
среднее				90	134

Согласно информации, представленной в Табл.1.1, на большем количестве выбранных метеостанций начало наблюдений за осадками относится к началу и середине XX века. Количество лет наблюдений на станциях неодинаково и в среднем составляет 90 лет. Например, на станциях Янискоски, Кослан, Ираель, период ≈ 60 лет, начало наблюдений с 1960 года, или на метеостанции Архангельск период наблюдений 150 лет и начало наблюдений в 1870 году. Период наблюдений за температурой воздуха на выбранных метеостанциях больше и в среднем составляет 134 года и начало наблюдений относится к концу XIX века или началу XX века. Период наблюдений неравномерен, так на станции Печора он составляет 80 лет с началом в 1943 г., а на метеостанции Архангельск - около 210 лет, с началом в 1814 г.

1.3 Пространственно-временные климатические особенности температуры и осадков

На основе выбранных наиболее продолжительных рядов наблюдений были получены надежные средние многолетние значения температур воздуха и осадков за каждый месяц и по каждой метеостанции, характеризующие ее

климат. Построенное пространственное распределение средних многолетних температур воздуха января приведено на рисунке 1.4.

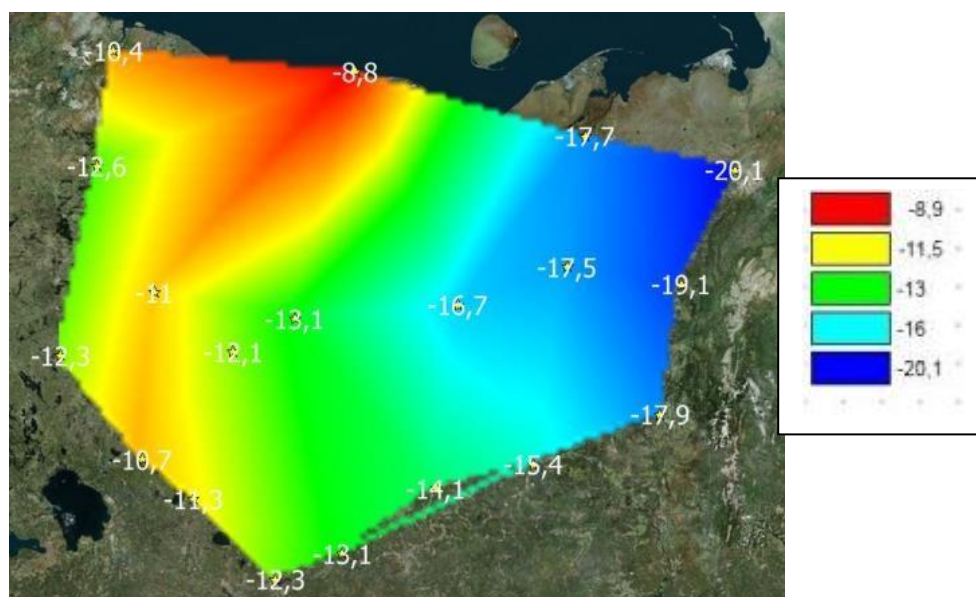


Рис.1.4. Пространственное распределение средних температур января за многолетний период (°C)

Как следует из рис.1.4, на севере ЕТР самые высокие средние температуры наблюдаются на северо-западе региона у побережья Баренцева моря (ст. Канин Нос $-8,8^{\circ}\text{C}$), это связано с влиянием теплого течения Гольфстрим. Самые низкие температуры наблюдаются в восточной части региона на материке на станциях Печора и Хоседа-Хард (температура составляет $-19,1$ и $-20,1^{\circ}\text{C}$). В западной части территории довольно высокие значения температуры $-11...-13^{\circ}\text{C}$. Пространственный градиент составляет 11°C .

Распределение по пространству июльской средней многолетней температуры показано на рисунке 1.5.

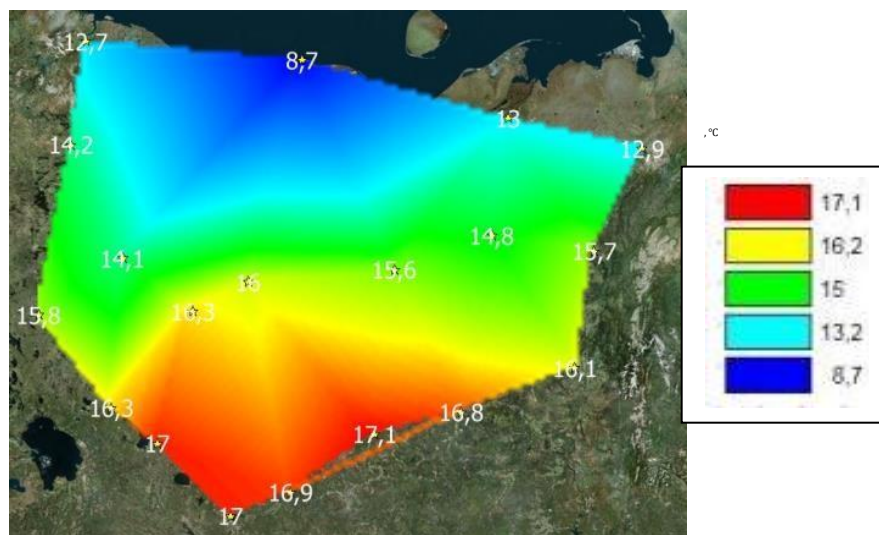


Рис.1.5. Пространственное распределение средних температур июля за многолетний период (°C)

Из Рис.1.5 следует, что имеет место зональное повышение температуры с севера на юг. Самые низкие средние температуры наблюдаются на побережье Северного Ледовитого океана на ст. Канин Нос (+8,7 °C) . Наибольшие температуры наблюдаются в южной части региона, где на ст. Вологда температура составляет +17 °C . По территории амплитуда колебаний составляет примерно 8°C.

На рисунке 1.6 представлено пространственное распределение апрельской средней многолетней температура воздуха.

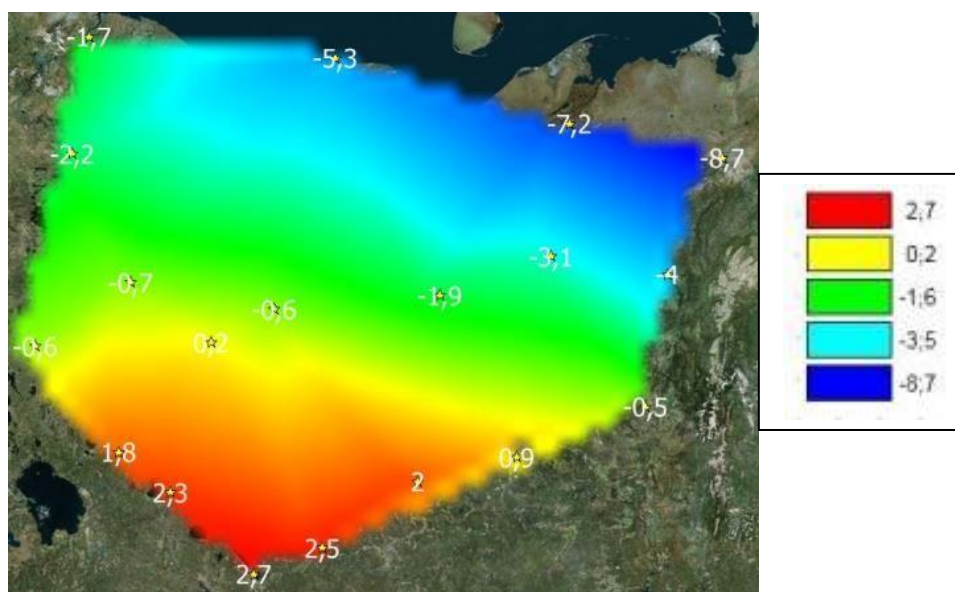


Рис.1.6. Пространственное распределение средних температур апреля за

многолетний период (°C)

Отмечается зональное повышение температуры с севера на юг. Самая низкая средняя температура наблюдается на востоке региона на метеостанции Хоседа-Хард (- 8,7 °C) , а самые высокие температуры наблюдаются в глубине материка на юге, где они достигают +3 °C (ст. Вологда). Изменение значений по территории составляет 10°C.

На рисунке 1.7 представлена октябрьская среднемноголетняя температура воздуха.

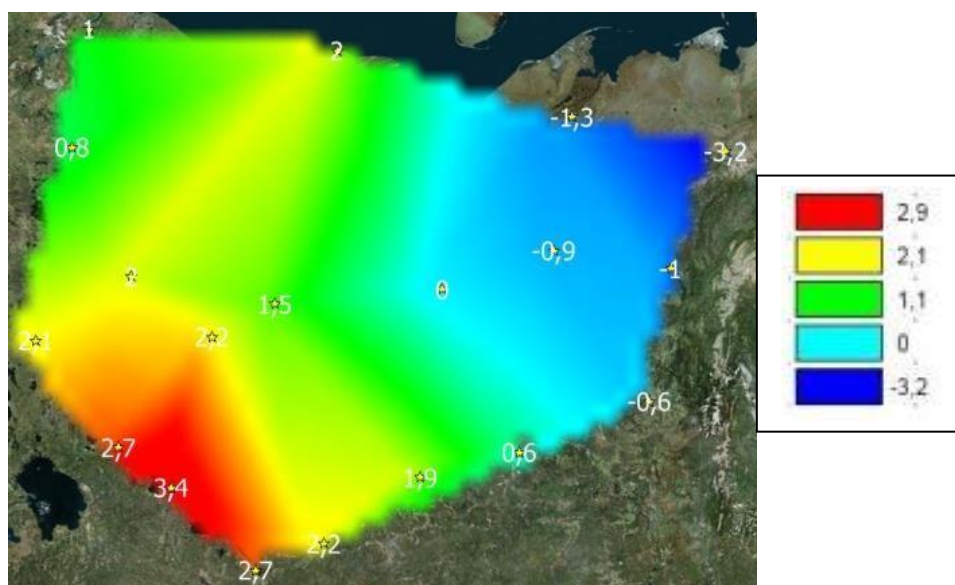


Рис.1.7. Пространственное распределение средних температур октября за многолетний период (°C)

По Рис.1.7 наблюдается понижение температуры с северо-востока на юго-запад. Самые низкие средние температуры октября на метеостанции Хоседа-Хард (-3,2°C), а самые высокие температуры равны +3,4°C на станции Вытегра. Изменение по территории составляет 6°C.

Пространственная интерполяционная модель средних многолетних сумм осадков января представлена на рисунке 1.8.

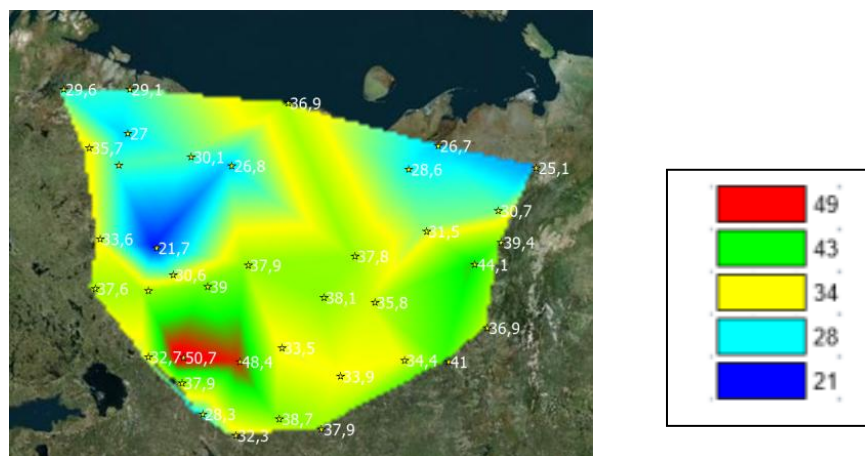


Рис.1.8. Пространственное распределение осадков января
за многолетний период (мм)

Из рисунка 1.8 видно, что осадки распределены неравномерно по региону. Самое большое среднее количество осадков наблюдается на юго-западе на станциях Няндомы (50,7 мм) и Шенкурск (48,4 мм). Наименьшие средние суммы осадков имеют место на побережье Белого моря: метеостанции Кемь-Порт (21,7 мм) и Каневка (26,8 мм), а также на метеостанциях северо-востока: Нарьян-Мар (26,7 мм), Хоседа-Хард (25,1 мм), Коткино (28,6 мм). Количество осадков изменяется по территории на 25–30 мм.

На рисунке 1.9 представлены июльские средние многолетние осадки.

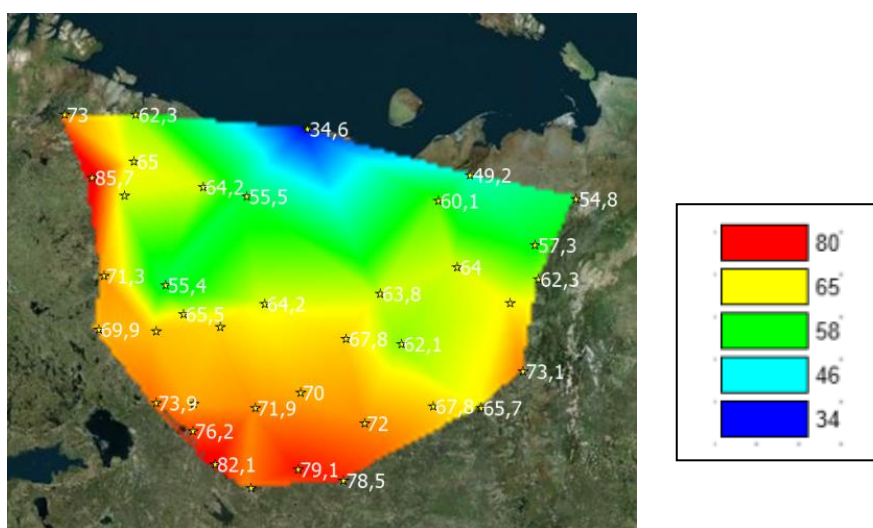


Рис.1.9. Пространственное распределение осадков июля
за многолетний период (мм)

В июле наблюдается рост сумм осадков с севера на юг. Наименьшее среднее количество осадков наблюдаются на северном побережье, ст. Канин Нос, 35мм. Наибольшее количество осадков имеет место на юге, где суммы осадков достигают 75-82мм, например, на станциях Тотьма 79,1 мм, Вытегра 76,2 мм, Никольск 78,5 мм, Вологда 82,1 мм. А также наибольшие осадки наблюдаются на северо-западе на станциях Ковдор, Янискоски, где они достигают 85,7 мм. Количество осадков по территории изменяется на 50 мм.

На рисунке 1.10 представлены апрельские средние многолетние суммы осадков.

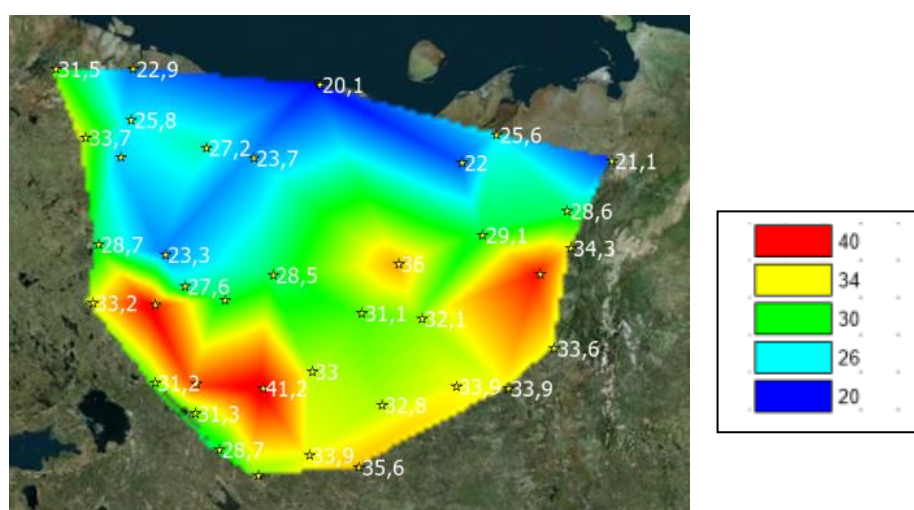


Рис.1.10. Пространственное распределение осадков апреля за многолетний период (мм)

Из Рис.1.10 следует, что наблюдается общая тенденция увеличение количества осадков с севера на юг. Наименьшее количество осадков имеет место на северных метеостанциях Коткино (22,0 мм), Мурманск (22,9 мм), Канин Нос (20,1 мм). Наибольшее количество осадков наблюдается на юго-западе на метеостанциях Койнас (35,6 мм) и Сыктывкар (41,2 мм) и на юго-востоке на метеостанциях Печора (34,3 мм), Израель (35,8 мм) и Троицко-Печорск (33,6 мм). Изменение по территории составляет 15–20 мм.

На рисунке 1.11 представлены октябрьские средние многолетние осадки.

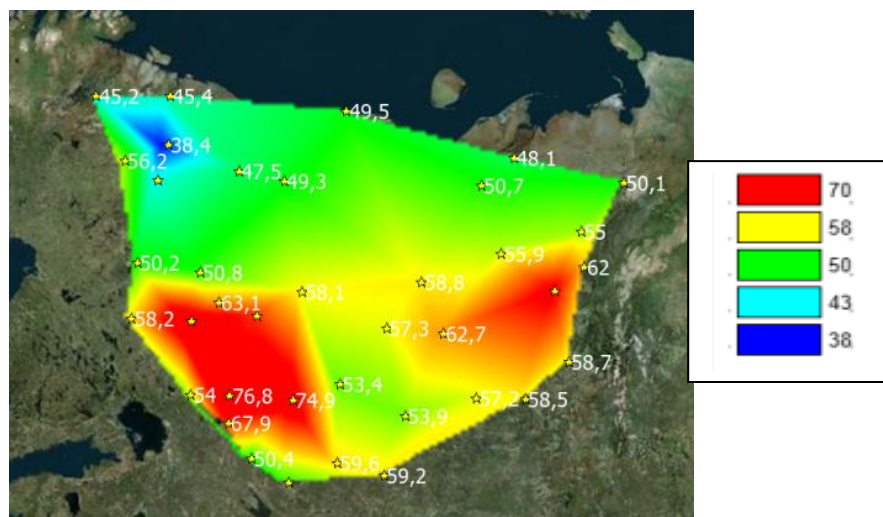


Рис.1.11. Пространственное распределение осадков октября
за многолетний период (мм)

Пространственное распределение осадков октября несколько похоже на аналогичное распределение осадков апреля. Отличие состоит в том, что область наименьших осадков находится только на северо-западе и осадки составляют 45,4 мм в Мурманске, 43,3 мм в Кандалакше, 38,4 мм в Мончегорске и 45,2 мм в Янискоски. Наибольшее количество осадков, также как и в апреле, наблюдается на юго-западе (метеостанции: Вытегра (58,2 мм), Сегежа (63,1 мм), Пудож (76,8 мм), Няндомы (74,9 мм)) и на юго-востоке (метеостанции Ираель (65,0 мм), Печора (62,0 мм) и Кослан (62,7 мм)). Суммы осадков изменяются по территории на 35-40мм.

В связи с тем, что на рис.1.4 – 1.11 наблюдается достаточно хорошо выраженная закономерность изменений температур и осадков по широте и долготе, были построены эмпирические региональные зависимости многолетних значений этих характеристик от широты (ϕ), долготы (λ) и высоты (H) метеостанций. Полученные эффективные зависимости со статистически значимыми коэффициентами уравнений регрессии приведены в табл.1.2, где R – коэффициент парной или множественной корреляции уравнений.

Таблица 1.2

Региональные зависимости средних месячных многолетних температур
воздуха и осадков от координат и высот метеостанций

Месяц	Уравнение	R
Температура воздуха		
Январь	$-0,319\lambda - 0,0819$	0,88
Апрель	$-0,893\varphi - 1,590\lambda + 62,98$	0,94
Июль	$-0,629\varphi + 55,400$	0,86
Октябрь	$-0,264\varphi - 0,143\lambda + 24,19$	0,91
Осадки		
Январь	$-1,616\varphi + 160,4$	0,5
Апрель	$-1,053\varphi + 0,000495\varphi H + 95,23$	0,7
Июль	$-3,252\varphi - 0,00505\varphi\lambda + 0,0149\varphi H - 0,914H + 285,9$	0,82

Как следует из результатов табл.1.2, в январе имеет место надежная региональная зависимость температуры только от долготы с $R=0,88$, в апреле добавляется влияние широты и уравнение даже более эффективно с $R=0,94$ и с вкладами факторов в уравнение: 76,8% для широты и 23,2% для долготы. Летом (июль) имеет место только зональное распределение температуры и в уравнение входит только широта при $R=0,86$. В октябре снова имеет место зависимость от широты и долготы с $R=0,91$ и с вкладами факторов в уравнение: 76,3% для долготы и 23,7% для широты.

Для осадков получены менее эффективные региональные зависимости с $R=0,5$ для января и с одним фактором – широтой. Для осадков апреля и июля получены более эффективные зависимости с включением совместного влияния координат и высоты метеостанции. Так для осадков апреля региональное уравнение включает широту (вклад 72,9%) и произведение (совместное влияние) широты на высоту (вклад в уравнение 27,1%). Для осадков июля уравнение включает уже 4 фактора, два из которых являются произведениями, и имеет коэффициент корреляции $R=0,82$. Вклады факторов в уравнение составляют: φ – 52,2%, $\varphi\lambda$ – 25,3%, φH – 15,2% и H – 7,3%. Для осадков октября регионального уравнения со статистически значимыми коэффициентами не получено.

Также были построены климатические функции внутригодовых изменений среднемесячных температур и осадков на всех станциях. На рисунке 1.12 представлены примеры внутригодового изменения температур воздуха и осадков на двух характерных для разных частей севера ЕТР метеостанциях: Мурманск и Троицко-Печорск.

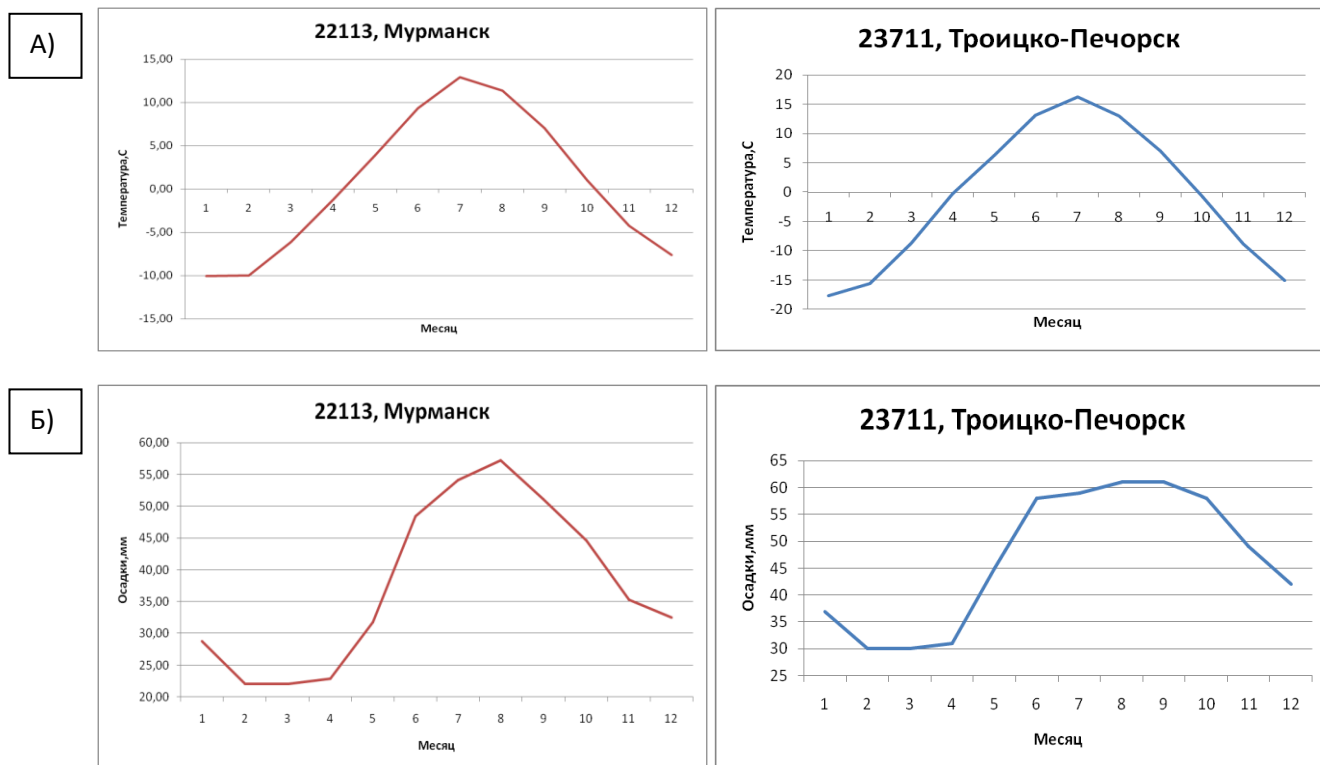


Рис.1.12. Функции внутригодовых изменений среднемесячных температур (А) и осадков (Б) на метеостанциях Мурманск(22113) и Троицко-Печорск(23711)

Из графиков внутригодовых изменений на рис.1.12 видно, что имеет место внутригодовой ход температуры с максимумом в июле для температуры воздуха и в августе – сентябре для осадков. Минимум температуры имеет место в январе – феврале, а для осадков в феврале – марте.

2. Современные климатические изменения температуры воздуха на севере ЕТР

2.1 Методика и результаты оценки качества информации

Многолетние ряды наблюдений за суммами осадков за каждый месяц и среднемесячной температурой воздуха, могут содержать неоднородные экстремумы или нестационарные средние и дисперсии отдельных частей ряда.

Однородность многолетнего ряда оценивается на основе генетического и статистического анализа исходных данных наблюдений. Генетический анализ заключается в выявлении физических причин, вызывающих неоднородность данных. Для оценки статистической значимости однородности эмпирического распределения используются критерии резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении: критерии Диксона и Смирнова-Граббса [11,13].

Существуют три главные причины неоднородности:

1. Резко отклоняющееся значение метеорологической величины имеет особые условия формирования, например, сформировались благодаря воздействию ураганов, сильных циклонов и штормов;
2. Экстремальное событие имеет более редкую вероятность появления, чем вероятность, определяемая эмпирической формулой для короткого ряда наблюдений, когда экстремум включен в общий рассматриваемый ряд;
3. Резко отклоняющаяся величина обусловлена значительной ошибкой измерения [3,5].

Критерии оценки однородности разработаны для условий нормального симметричного закона распределения совокупности и отсутствия автокорреляции.

Критерий Диксона рассчитывается на основе эмпирических данных по следующим формулам для максимального члена Y_n , ранжированного в порядке возрастания выборки:

$$D1_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_1), \quad (2.1)$$

$$D2_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_2), \quad (2.2)$$

$$D3_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_2), \quad (2.3)$$

$$D4_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_3), \quad (2.4)$$

$$D5_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_1), \quad (2.5)$$

где $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_n$; n - объем выборки.

Аналогичные формулы имеют место и для минимального члена Y_1 , ранжированной в порядке возрастания выборки.

Статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена ранжированной последовательности Y_n и для минимального Y_1 рассчитывается по формулам:

$$G_n = \frac{(Y_n - Y_{cp})}{\sigma_y}, \quad (2.6)$$

$$G_1 = \frac{(Y_{cp} - Y_1)}{\sigma_y}, \quad (2.7)$$

где Y_n - максимальный член ранжированной последовательности,

Y_1 - минимальный член ранжированной последовательности,

Y_{cp} - среднее значение анализируемой выборки,

σ_y - среднее квадратическое отклонение анализируемой выборки.

Однородность оценивается по этим критериям путем сравнения расчетного значения статистики критерия, полученного по эмпирическим данным, с критическим значением из таблиц. Кроме того, принимаемый уровень значимости $\alpha=5\%$, что соответствует принятию нулевой гипотезы об однородности с вероятностью 95%, при объеме выборки n . Гипотеза об однородности может быть принята, если рассчитанное значение статистики

меньше критического.

Стационарность средних значений и дисперсий для двух последовательных частей ряда проверяется с помощью критериев Стьюдента и Фишера. Данный анализ проводят после оценки отсутствия резко отклоняющихся экстремальных значений, которые сильно влияют на средние значения и дисперсию.

Для оценки стационарности дисперсий и средних значений, временной ряд разбивается на две части одинаковой или разной длины, причем границы разбиения желательно связать с датами предполагаемого нарушения стационарности. Для каждой части выборки считаются значения среднего Y_{cpj} и дисперсии σ_j^2 , которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера:

$$F = \sigma_j^2 / \sigma_{j+1}^2, \quad (2.8)$$

при $\sigma_j^2 > \sigma_{j+1}^2$, где σ_j^2 , σ_{j+1}^2 - соответственно дисперсии двух последовательных подвыборок (j и $j+1$) размером n_1 и n_2 .

Для того чтобы оценить стационарность двух средних значений последовательных подвыборок, значение статистики критерия Стьюдента рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{Y_{cp1} - Y_{cp2}}{\sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (2.9)$$

где Y_{cp1}, Y_{cp2} , σ_1^2, σ_2^2 среднее значение и дисперсия двух последовательных выборок; n_1, n_2 - объемы выборок.

Еще одним способом повышения надежности информации является восстановление пропусков и увеличение продолжительности рядов. Восстановление пропущенных наблюдений и приведение рядов к многолетнему периоду основано на построении регрессионных уравнений с одним или несколькими выбранными аналогами, имеющими как более длительный период наблюдений, так и данные наблюдений в те годы, в

которых были пропуски на рассматриваемой станции [12].

Уравнение множественной линейной регрессии для восстановления выглядит следующим образом:

$$Y = k_0 + k_1 Y_1 + k_2 Y_2 + \dots + k_j Y_j + \dots + k_l Y_l, \quad (2.10)$$

где Y - значения метеорологической характеристики в рассматриваемом пункте наблюдений;

Y_j - значения метеорологической характеристики на метеостанциях-аналогах;

k_0 – свободный член уравнения регрессии;

k_j - коэффициенты уравнения регрессии при $j = 1, 2, \dots, l$; l - количество аналогов.

Для более эффективной связи данных одной метеостанции с аналогами были заданы условия: $n' \geq 10$, n' - количество совместных лет наблюдений на рассматриваемом посту и постах-аналогах. Максимальное число одновременно используемых в уравнении (2.10) задается равным трем, $R \geq R_{кр}$ и $k/\sigma_k \geq B_{кр}$, где R - коэффициент парной или множественной корреляции уравнения (2.10); $R_{кр}$ – заданное критическое значение коэффициента R ($R_{кр}=0,9$ для температуры воздуха и $R_{кр}=0,8$ для осадков); k - коэффициент уравнения регрессии; σ_k - средняя квадратичная ошибка коэффициента уравнения регрессии, $B_{кр}$ - критическое значение отношения k/σ_k , равное $\geq 2,0$ [14].

Для оценки однородности минимальных и максимальных экстремумов многолетнего ряда среднемесячной температуры воздуха были вычислены значения статистических критериев Диксона и Смирнова-Граббса, критические значения которых были взяты из таблиц при известном объеме ряда наблюдений при уровне значимости 5%.

Для оценки стационарности дисперсий и средних значений

многолетний ряд наблюдений сначала был разделен на две равные подвыборки. Затем для каждой части посчитаны средние значения и дисперсии и проведена оценка статистик Фишера и Стьюдента.

Результаты оценки однородности и стационарности рядов среднемесячной температуры января представлены в Табл.2.1, где красным цветом выделены случаи неоднородности, и в скобках приведен год неоднородного экстремума.

В таблице знак «+» означает принятие гипотезы об однородности и стационарности, обозначение «-» говорит об отклонении гипотезы. Исследование однородности и стационарности, используя эти критерии, позволяет оценить, есть ли статистически значимые изменения в рядах при формальном делении на две равные части.

Таблица 2.1

Результат оценки однородности эмпирических распределений и стационарности параметров временных рядов январской температуры воздуха

Название	Кр. Диксона		Кр. Смирнова-Граббс		Кр. Фишера	Кр. Стьюдента
	Max	Min	Max	Min		
Мурманск	+	-(1985)	+	-(1985)	+	+
Кандалакша	+	-(1985)	+	-(1985)	+	+
Реболы	+	+	+	-(1985)	+	+
Онега	+	+	+	-(1985)	+	+
Вытегра	+	-(1985)	+	-(1985)	+	+
Вологда	+	-(1940)	+	-(1985)	+	+

Из таблицы следует, что максимальные экстремумы однородны для всех рядов по обоим критериям. По критерию Диксона неоднородны минимальные экстремумы для метеостанций Мурманск, Кандалакша, Вытегра и Вологда, при этом общим годом проявления неоднородности является 1985. По критерию Смирнова-Граббса также установлены минимальные неоднородные экстремумы на этих 4 метеостанциях, а также

на метеостанциях Ребола и Онега в этом же 1985 году. Анализ данных на всех метеостанциях показал, что в 1985 году на многих метеостанциях на севере ЕТР наблюдались низкие температуры ниже -20°C , поэтому данные экстремумы не являются ошибкой наблюдения, а просто имеют более редкую повторяемость, и, следовательно, данный экстремум включается в дальнейший анализ. Средние и дисперсии всех рядов стационарны.

Графики неоднородных рядов наблюдений за температурой воздуха января изображены на Рис. 2.1.

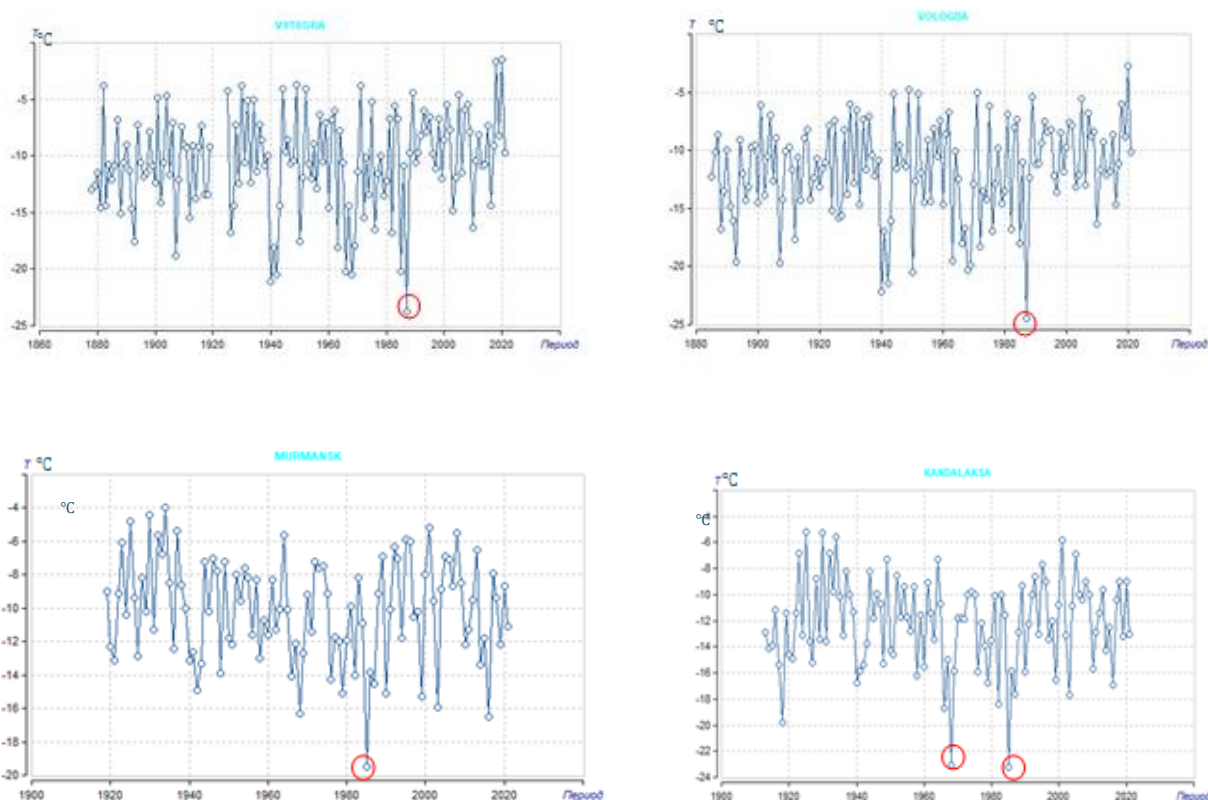


Рис.2.1. Неоднородные минимумы в рядах наблюдений за январской температурой воздуха($^{\circ}\text{C}$)

Результаты анализа однородности и стационарности рядов июльской, апрельской и октябрьской температуры представлены в Табл.2.2, где приведены только сведения о полученной неоднородности и нестационарности.

Таблица 2.2

Результаты оценки однородности резко отклоняющихся экстремумов и стационарности средних и дисперсий рядов температуры воздуха трех месяцев

Название	Кр. Диксона	Кр. Смирнова-Грабсс	Кр. Фишера	Кр. Стьюдента
ИЮЛЬ				
Канин Нос	+	+	+	-
Онега	+	+	+	-
Усть-Цильма	+	+	+	-
Сыктывкар	+	+	+	-
АПРЕЛЬ				
Мурманск	-(1929)	-(1956)	+	-
Кандалакша	+	+	+	-
Архангельск	+	-(1929)	+	-
Ребопы	+	+	+	-
Вытегра	-(1929)	-	+	+
ОКТАБРЬ				
Кандалакша	-1992	-1992	+	+
Нарьян-Мар	+	-1992	+	+
Печора	-1977	-1977	+	-

По критерию Стьюдента были выявлены нестационарные ряды наблюдений за июльской температурой на метеостанциях Сыктывкар, Усть-Цильма, Канин Нос и Онега.

В рядах наблюдений за апрельской температурой на метеостанциях Вытегра, Архангельск, Мурманск были установлены неоднородные минимальные экстремумы. Годом проявления неоднородности является 1929. В апреле 1929г. минимальный неоднородный экстремум $t \approx -8^\circ\text{C}$ отмечался на всех этих метеостанциях. Следовательно, неоднородный минимум не является ошибкой наблюдений, и эти значения включены в дальнейший анализ. Ряды на метеостанциях Ребопы, Кандалакша, Мурманск, Архангельск являются нестационарными по критерию Стьюдента.

В рядах октябрьских температур на метеостанциях Печора, Кандалакша, Нарьян-Мар минимальные экстремумы неоднородны по обоим

критериям (Диксона и Смирнова-Грабба). Год, когда наблюдалась неоднородность для двух станций 1992, причем на обеих метеостанциях наблюдались выбросы отрицательной температуры в -5 и -10°C . Поэтому сделан вывод, что это событие имеет более редкую повторяемость, и данные значения оставлены для дальнейшего анализа. На метеостанции Печора минимальный экстремум наблюдался в 1977 г. По критерию Стьюдента ряд станции Печора является нестационарным.

Нестационарные и неоднородные ряды апрельской температуры воздуха показаны на рис.2.2.

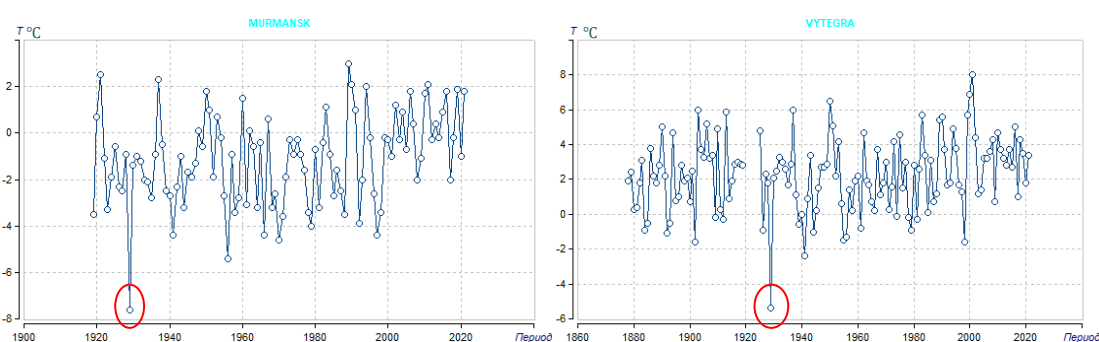


Рис.2.2.Нестационарные и неоднородные ряды наблюдений за апрельской температурой воздуха ($^{\circ}\text{C}$)

По описанной выше методике были восстановлены пропуски и краткосрочные ряды наблюдений за температурой воздуха приведены к многолетнему периоду с минимальным коэффициентом корреляции $R = 0,9$. Эффективность восстановления рядов января представлена в Табл.2.3.

Таблица 2.3

Эффективность восстановления рядов январских среднемесячных температур воздуха

Код	Название	Кол-во исх.	Кол-во после восст.	Средняя квадратическая погрешность $\sigma T(^{\circ}\text{C})$	Коэф. корреляции .	Кол-во аналога в
22113	Мурманск	106	112	0,97	0,95-0,96	3
22217	Кандалакша	112	200	1,25	0,91-0,96	3
22522	Кемь-Порт	135	206	0,94	0,94-0,99	3
22550	Архангельск	206	208	1,69	0,93	2

22583	Койнас	111	208	1,12	0,94-0,99	3
22602	Реболы	100	202	1,06	0,92-0,99	3
22641	Онега	137	208	0,56	0,98-0,99	2
22820	Петрозавдоск	122	188	0,57	0,95-0,99	3
22837	Вытегра	142	202	1,06	0,98-0,99	3
22887	Котлас	95	207	0,77	0,91-0,99	3
23205	Нарьян-Мар	98	130	1,84	0,91	3
23219	Хоседа-Хард	88	135	1,54	0,90-0,98	3
23405	Усть-Цильма	127	181	1,77	0,93-0,97	3
23418	Печора	81	161	1,35	0,92-0,99	3
23711	Троицко-Печорск	135	185	1,13	0,92-0,99	3
23804	Сыктывкар	185	190	1,43	0,93	3
27037	Вологда	139	182	1,06	0,93-0,99	3
27051	Тотьма	140	202	1,25	0,92-0,95	3

После успешной процедуры восстановления на 18 метеостанциях средний период наблюдений был увеличен с 120 до 180 лет. Средняя погрешность восстановленных значений $\sigma T = 1,2^{\circ}\text{C}$. Минимальная ошибка равна $\sigma T = 0,6^{\circ}\text{C}$ и получилась на метеопостах Онега, Петрозаводск. Наибольшие погрешности σT составляют $1,8^{\circ}\text{C}$ на метеостанциях Усть-Цильма и Нарьян-Мар. Эффективность восстановления составила около 40%.

Эффективность восстановления рядов других месяцев представлена в Табл.2.4.

Таблица 2.4

Эффективность восстановления среднемесячных температур воздуха
января, апреля, июля, октября

Месяц	Кол-во рядов	Кол-во исх.	Кол-во после восст.	Ср. квадратич. погр. σT	Кэф. корреляции.	%, восстанов.
Январь	18	125	183	1,2	0,91-0,99	40
Апрель	18	120	136	0,78		13
Июль	16	120	172	0,62		30
Октябрь	17	115	141	0,56		18

Восстановление рядов июльской температуры имело место на 16 станциях, притом средний период наблюдений увеличен с 120 лет до 172 лет.

Минимальные коэффициенты корреляции $R=0,91$. Средняя погрешность восстановленных значений $\sigma T=0,6^{\circ}\text{C}$. Минимальная ошибка, $\sigma T=0,4^{\circ}\text{C}$, получилась на метеостанции Онега. Большие ошибки, $\sigma T=0,8^{\circ}\text{C}$ получены в пунктах наблюдений на востоке территории Усть-Цильма, Хоседа-Хард, а также на метеостанции Мурманск. Общая эффективность восстановления около 30%.

Восстановление рядов температур апреля имеет место на 18 станциях. Средний период наблюдений увеличен с 120 до 136 лет. Ряды наблюдений удлинены в среднем на 20 лет. Минимальные коэффициенты корреляции $R=0,91$. Средняя ошибка восстановленных значений составляет $\sigma T=0,8^{\circ}\text{C}$. Минимальная ошибка $\sigma T=0,4^{\circ}\text{C}$ получилась на метеостанции Онега, самые большие ошибки равны $\sigma T \geq 1,3^{\circ}\text{C}$ и получены на метеостанциях в восточной части региона: Нарьян-Мар ($1,6^{\circ}\text{C}$), Хоседа-Хард ($1,3^{\circ}\text{C}$).

Для температуры октября восстановление имеет место на 17 метеостанциях, при этом средний период наблюдений увеличен с 115 до 140 лет. Средняя ошибка восстановленных значений равна $\sigma T=0,6^{\circ}\text{C}$. Минимальная ошибка, $\sigma T=0,29^{\circ}\text{C}$, наблюдается на метеопосту Онега, большие ошибки $\sigma T \approx 0,8^{\circ}\text{C}$ получены на метеостанциях Усть-Цильма и Хоседа-Хард.

2.2 Определение расчетных климатических характеристик

Надежные результаты по оценке температуры воздуха, осадков редкой повторяемости раз в 100 и 200 лет, могут быть получены только на основе продолжительных рядов.

Определение параметров и квантилей распределения при наличии достаточно продолжительных рядов наблюдений осуществляется с помощью аналитических функций распределения годовых вероятностей превышения (кривых вероятности).

Эмпирическая годовая вероятность превышения P_m метеорологических характеристик определяется по формуле:

$$P_m = \frac{m}{n+1} * 100\% , \quad (2.11)$$

m - порядковый номер членов ряда метеорологических характеристик, расположенных в порядке убывания; n - общее количество членов ряда.

Эмпирические кривые распределения годовых вероятностей превышения строятся по клетчаткам вероятностей. Вид клетчаток вероятностей выбирается в соответствии с принятой аналитической функцией распределения вероятностей и полученным отношением коэффициента асимметрии C_S и коэффициентом вариации C_v .

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения годовых вероятностей превышения используются трехпараметрические распределения: Крицкого-Менкеля (гамма-распределение) при любом соотношении C_S/C_v и распределение Пирсона III типа (биномиальная кривая) при $C_S / C_v > 2$ [2].

Итогами расчета будут расчетные климатические характеристики редкой повторяемости: 1 раз в 100 лет и 1 раз в 200 лет, которые важны для строительной климатологии, т.е. такие данные применяют при проектировании зданий и сооружений, систем отопления, вентиляции, кондиционирования, водоснабжения, при планировке и застройке городских и сельских поселений территории Российской Федерации [28].

Для строительной климатологии важна информация о температуре воздуха, притом исследуются условия засухи, когда для июля выбирается обеспеченность 1% и 0.5%, а для января при оценке ожидаемого потепления климата анализируются самые низкие температуры (вероятность 99% и 99.5%).

На рисунке 2.3 показано пространственное распределение низких январских температур редкой повторяемости.

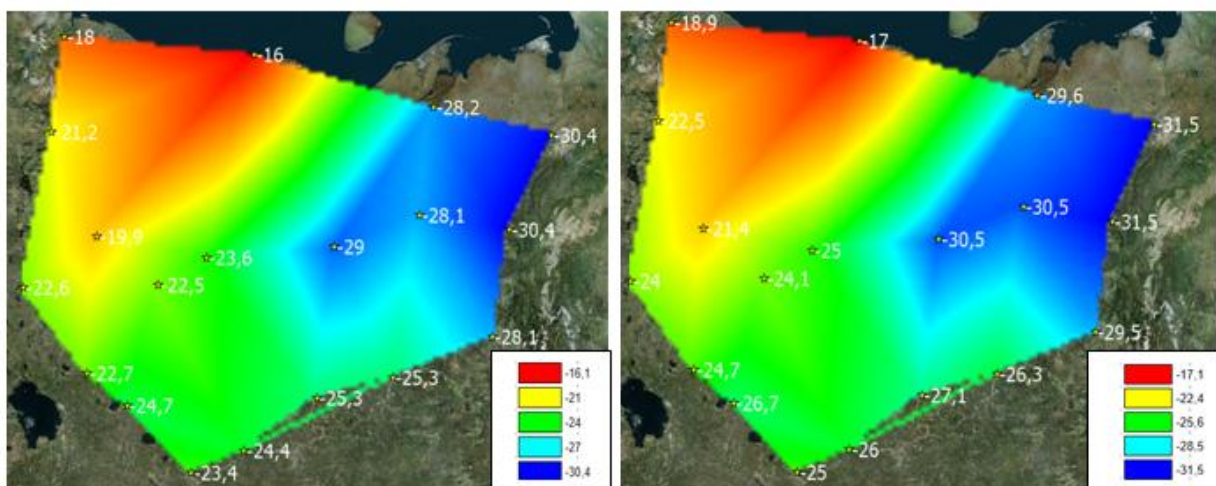


Рис.2.3. Пространственное распределение низких температур января 1 раз в 100 лет(слева) и 1 раз в 200 лет(справа) (°C)

Из рисунка 2.3 можно сделать следующие выводы. Наблюдается понижение температуры с северо-запада на восток. Самые высокие температуры января наблюдаются на побережье Северного Ледовитого океана. На метеостанции Канин Нос температура составляет, соответственно, -16°C и -17°C . Самые низкие температуры получены в восточных частях региона, где температура равна $-30,4^{\circ}\text{C}$ и $-31,5^{\circ}\text{C}$. На западе района средние значения составляют для первого расчета: $-21,2...-24,7^{\circ}\text{C}$, а для второго: $-22,5...-26,7^{\circ}\text{C}$. Градиент изменения значений по площади $\approx |15|^{\circ}\text{C}$ в обоих случаях.

Пространственная интерполяционная модель высоких температур июля редкой повторяемости раз в 100 и 200 лет представлена на Рис. 2.4.

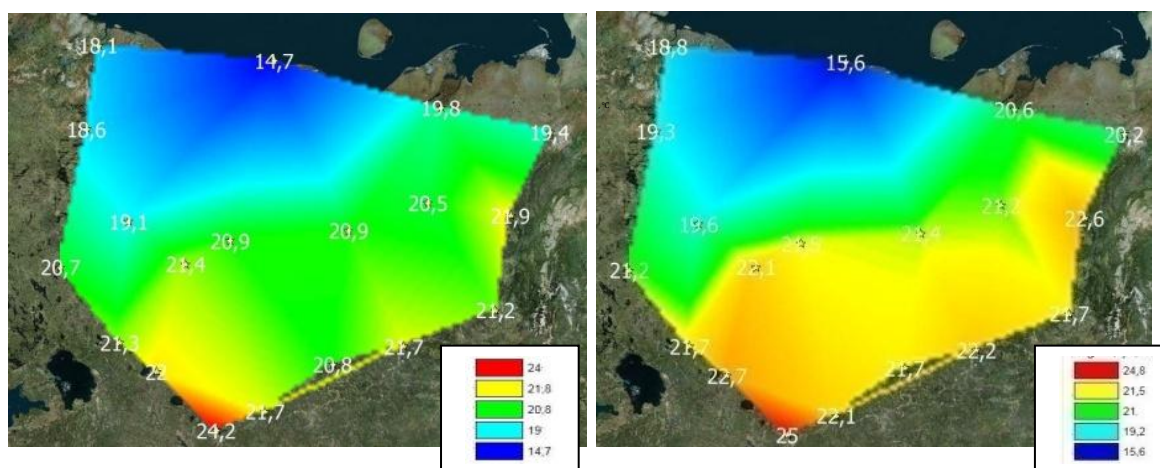


Рис.2.4. Пространственное распределение высоких июльских температур

1 раз в 100 лет(слева) и 1 раз в 200 лет (справа) (°C)

Из рис.2.4 следует, что имеет место зональное распределение температуры. Самые низкие температуры наблюдаются в северной и северо-западных частях региона, например, на метеостанции Канин Нос, 14,7°C и 16 °C, соответственно. Самые высокие значения на юге региона (24°C и 25°C, соответственно). Изменение значений по площади равно 10°C, а разница со средним многолетним значением 5-10°C в обоих случаях.

Пространственное распределение низких апрельских температур редкой повторяемости раз в 100 и 200 лет показано на Рис.2.5.

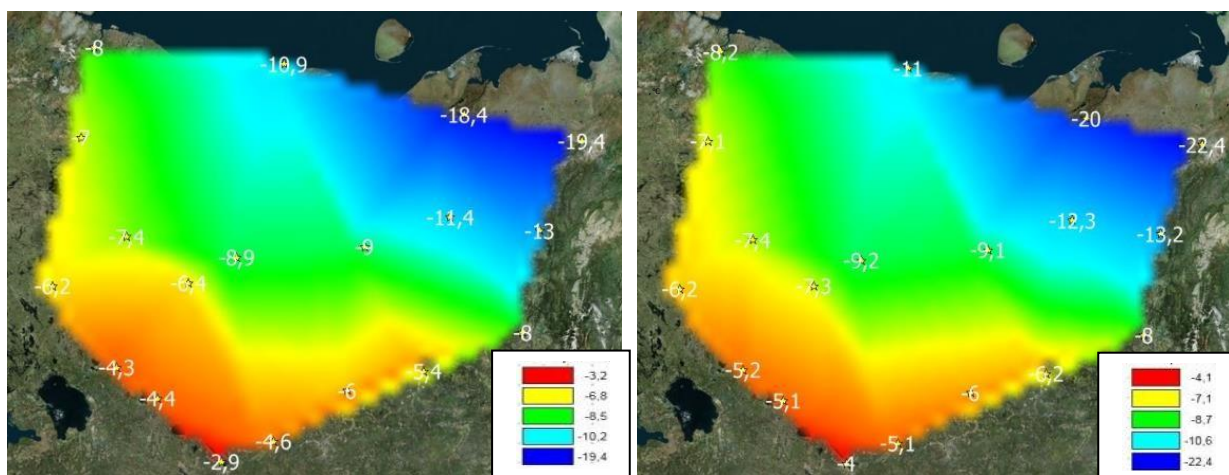


Рис.2.5. Пространственное распределение низких апрельских температур 1 раз в 100 лет (слева) и 1 раз в 200 лет(справа) (°C)

Из Рис.2.5 видно снижение температуры с юга на северо-восток, с минимумами на метеостанции Хоседа-Хард (–19,4°C и – 22,4°C). Самые высокие температуры отмечаются в глубине материка на юге на станции Вологда, где температура равна -2,9°C и – 4°C. По территории температура изменяется на 16-18°C в обоих случаях. Отклонение от средней многолетней температуры равно 4-6°C, а на севере даже до 10°C для температур раз в 100 лет, и в среднем на 6-8°C, на севере до 12°C для температур раз в 200 лет.

Результаты расчетов в стационарных условиях для октября: низкие температуры редкой повторяемости раз в 100 и 200 лет (Рис.2.6).

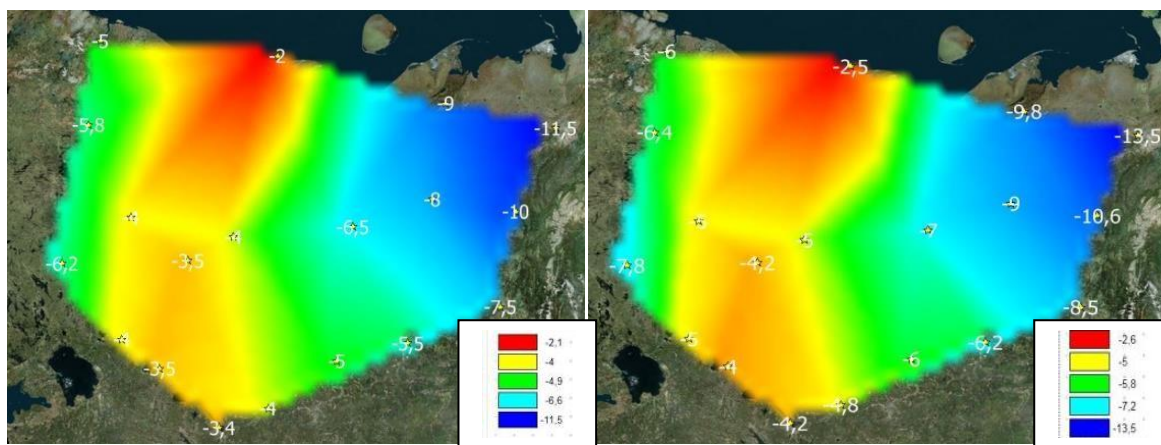


Рис.2.6. Пространственное распределение низких октябрьских температур 1 раз в 100 лет(слева) и 1 раз в 200 лет (справа) (°C)

При анализе рисунка 2.6 можно сделать следующие выводы. Самые низкие температуры получены в восточной части, где температура равна до $-11,5^{\circ}\text{C}$ и $-13,5^{\circ}\text{C}$, соответственно. Самые высокие температуры отмечены на побережье Северного Ледовитого океана, где температура составляет $-2... -3^{\circ}\text{C}$ в обоих случаях. Температура изменяется по территории примерно на 10°C в обоих случаях. Отклонение от средней многолетней температуры составляет $6-8^{\circ}\text{C}$ и $8-10^{\circ}\text{C}$, соответственно.

2.3 Моделирование многолетних рядов

2.3.1 Методика моделирования

Временной ряд можно представить двумя основными типами моделей: стационарной и нестационарной. В стационарной модели главные характеристики ряда, такие как среднее значение и дисперсия стационарны во времени. Но эти основные параметры временного ряда могут быть и не стационарны, что обусловлено современным изменением климата.

Существует три основных моделей нестационарного среднего:

- монотонные изменения в виде линейного тренда;
- циклические колебания;
- ступенчатые переходы из одного стационарного состояния в другое.

Все происходящие изменения в природе носят циклический характер, а тенденция является частью достаточно большого цикла процесса, который проявляется как ветвь подъема или спада в пределах ограниченного временного интервала [2,8].

Если нестационарные составляющие являются ответом климатической системы на внешние воздействия, то показатели этих воздействий могут быть двух основных типов: монотонные (тренд) или ступенчатые изменения.

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

$$Y(t)=b_1t+b_0, \quad (2.12)$$

где b_1 , b_0 - коэффициенты уравнения регрессии, полученные методом наименьших квадратов:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}, \quad (2.13)$$

$$b_0 = Y_{cp} - b_1 t_{cp}, \quad (2.14)$$

где Y_{cp} , t_{cp} - средние значения климатической характеристики и временного ряда.

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента b_1 или коэффициента корреляции R, рассчитываемого по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}} \quad (2.15)$$

Модель ступенчатых изменений похожа на две или более стационарных модели для двух или более частей временного ряда, которая характеризуется постоянным во времени средним значением для каждой части ряда:

$$Sr1 = \text{const1}, Sr2 = \text{const2} \quad (2.16)$$

где Sr_1 , Sr_2 , - средние значения первой и второй частей ряда; n - объем ряда.

Стандартное отклонение остатков ступенчатой модели для двух стационарных частей ряда ($\sigma_{cmyн}$) определяется по формуле:

$$\sigma_{cmyн} = \sqrt{\frac{\sigma_1 * n_1 - \sigma_2 * n_2}{n_1 + n_2 - 1}}, \quad (2.17)$$

где: σ_1 , σ_2 - стандартные отклонения двух стационарных частей временного ряда; n_1 , n_2 - объемы стационарных сегментов.

Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_y * \sqrt{1 - R^2}, \quad (2.18)$$

σ_y - стандартное или среднее квадратическое отклонение (СКО) исходного ряда (модель стационарного среднего); σ_{ε} - стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда; R - коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

Для количественной оценки различий между моделью тренда, моделью ступенчатых изменений и моделью стационарного среднего относительные разности рассчитываются по формулам:

$$dst = \frac{\sigma_y - \sigma_{cmyн}}{\sigma_y} * 100\%, \quad (2.19)$$

$$dtr = \frac{\sigma_y - \sigma_{\varepsilon}}{\sigma_y} * 100\%, \quad (2.20)$$

где dtr , dst - относительные отклонения (в %) модели тренда, ступенчатого изменения от модели стационарной выборки;

σ_y , σ_{ε} , $\sigma_{cmyн}$ - стандартные отклонения остатков моделей случайной выборки, линейного тренда и ступенчатых изменений.

Алгоритм оценки эффективности и устойчивости параметров нестационарных моделей состоит в следующем:

- Моделью нестационарного среднего аппроксимируют временной ряд за весь период наблюдения и предварительно оценивают ее эффективность, и находят год перехода от одних стационарных условий к другим.
- Год начала наблюдений постепенно смещают из прошлого в настоящее и оценивают стабильность показателей эффективности нестационарных моделей (R_{tr} , d_{tr} и d_{st}) и года перехода (Год) при различных начальных годах временного ряда.
- Если показатели модели нестационарного среднего эффективны, то решают, какая модель лучше: линейный тренд или модель «ступенек», т.е. сравнивают d_{tr} и d_{st} .
- Выбирают наиболее повторяющийся год перехода от одного стационарного состояния к другому (Год), временной ряд делят на две части по этому году и оценивают статистическую значимость коэффициента корреляции R_{tr} для каждой из двух частей ряда с целью определить вид модели (стационарная или нестационарная) для каждой части ряда.
- Для количественной оценки влияния изменения климата рассчитывается разность (Δ) между средними значениями за две части ряда, полученные по году перехода (Год), а также находится отношение $\Delta/СКО$, характеризующее долю изменений по отношению к естественной климатической изменчивости [10,16]. Для оценки статистической значимости различий двух средних значений помимо сравнения с СКО применяется также оценка стационарности средних по критерию Стьюдента.

2.3.2 Полученные результаты по нестационарным моделям

Используя описанную выше методику, получены необходимые характеристики стационарной и нестационарной моделей для многолетней среднемесячной температуры января, июля, апреля и октября на 19 метеостанциях Севера ЕТР.

При аппроксимации многолетних рядов температуры января получено, что относительные отличия от стационарной модели невелики: dtr и dst , как правило, менее 10%. Вместе с тем коэффициенты корреляции модели тренда или корреляции температуры со временем статистически значимы для 15 рядов из 19, т.е. почти в 80% случаев. При смещении начального года наблюдений с 1900 до 1960 г. и на некоторых станциях даже до 1980 года, показатели нестационарности (dtr и dst) увеличиваются, и это означает, что в последний период наиболее вероятен переход от одного стационарного состояния к другому. Установленные годы наиболее вероятного перехода от одного стационарного режима к другому имеют хорошо выраженные пространственные закономерности, как показано на рис.2.7.

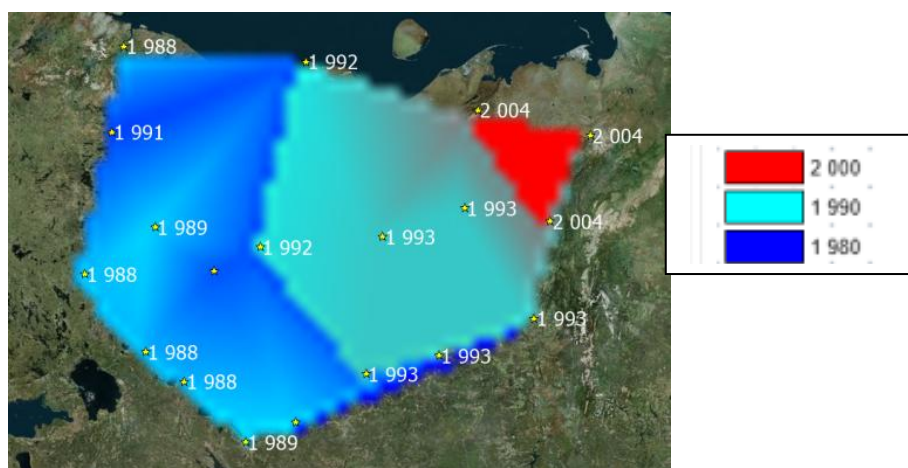


Рис.2.7. Пространственное распределение лет перехода от одних однородных условий к другим для рядов температур января

Из рисунка 2.7 следует, что год перехода смещается с запада на восток от конца 1980х на западе до начала 2000х на востоке, что связано с постепенным усилением зонального переноса (зимнего индекса Северо-Атлантического колебания (САК)) с конца 1980х и его распространением с запада на восток.

По году наиболее вероятного перехода от одного квазистационарного режима к другому ряд был разделен на 2 части, определены средние значения для каждой подвыборки и их разность (dT) в °C между средними значениями

второй и первой частями ряда. Причем начало первой части ряда было задано 1960 годом, чтобы продолжительности подвыборок были примерно одинаковыми. Во всех случаях разности между средними были положительными, что свидетельствует о имеющем место потеплении.

На Рис.2.8 показано пространственное распределение январского потепления (dT) в $^{\circ}C$ и в долях СКО, т.е. в долях естественной климатической изменчивости.

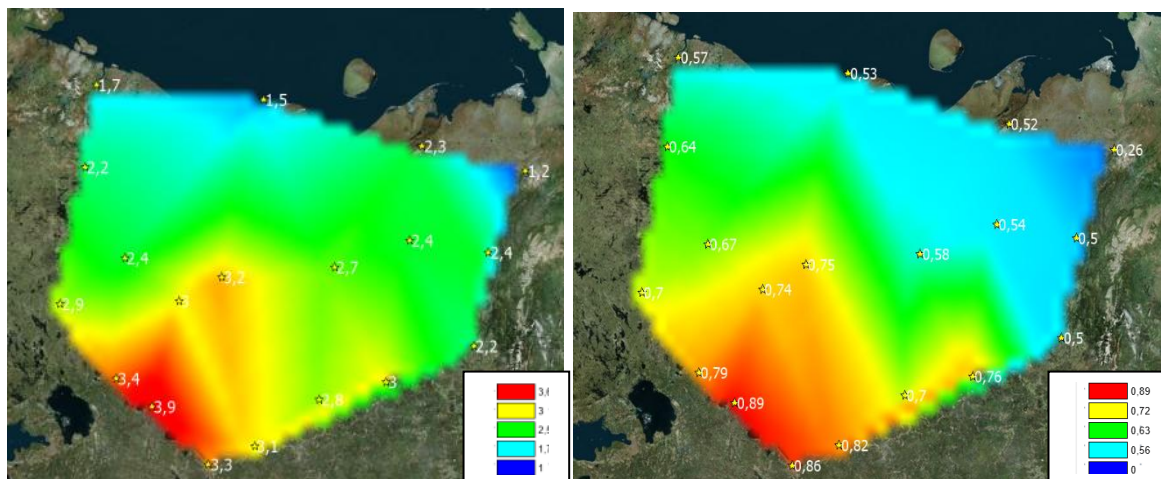


Рис.2.8. Пространственные распределения роста январских температур в $dT, ^{\circ}C$ и в долях СКО

Из Рис.2.8 следует, что разница температур двух периодов увеличивается с севера на юг, т.е. наблюдается зональный рост. На северо-востоке на метеостанции Хоседа-Хард потепление минимальное и равно $1,2^{\circ}C$. Максимальный рост равный $3,9^{\circ}C$ наблюдается на юге района на станции Вытегра. Но отношение $dT/СКО$ не превышает единицы, максимумы более 0,8 наблюдаются на юге и юго-западе на метеостанциях Вологда ($dT/СКО=0,86$), Вытегра ($dT/СКО=0,89$), Петрозаводск ($dT/СКО=0,79$).

Пример результатов оценки эффективности нестационарных моделей рядов июльской среднемесячной температуры воздуха и устойчивости показателей нестационарности с выбором года наиболее вероятного перехода от одних однородных условий к другим приведен в табл.2.5 для 5 многолетних рядов. Жирным шрифтом и красным цветом выделены случаи

нестационарных моделей при dtr и $dst > 10\%$, а также статистически значимые коэффициенты корреляции модели линейного тренда Rtr и наиболее вероятный (повторяющийся) год перехода от одной однородной части ряда к другой. Также в таблице введены следующие обозначения: «код» - код станции, «год» - год перехода от одной однородной части ряда к другой, Rtr - коэффициент корреляции модели линейного тренда.

Таблица 2.5

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей
многолетних рядов июльских среднемесячных температур и устойчивости их
показателей нестационарности

Код		Весь период	До 1960	1900	1920	1940	1960	1980	1990	До года перехода	После года перехода
22113	d tr	3,0	1,8	2,4	0,6	3,6	1,3	6,6	7,6		
	d st	3,8	4,4	3,6	3,0	4,8	3,7	8,7	9,6		
	Год	2000		2000	2000	2000	2000	2000	2000		
	R tr	0,24	0,19	0,22	0,11	0,27	0,16	0,36	0,38	-0,18	0,06
22165	d tr	4,1	0,1	5,6	5,1	4,3	0,9	7,8	6,8		
	d st	6,1	2,5	6,6	6,4	6,0	5,0	11,6	11,7		
	Год	2000		2000	2000	2000	2000	2000	2000		
	R tr	0,28	-0,05	0,33	0,31	0,29	0,13	0,39	0,36	-0,3	0,03
22217	d tr	4,7	0,1	5,1	3,6	6,4	3,2	7,7	8,1		
	d st	6,7	1,3	6,8	6,5	7,9	6,4	11,9	10,2		
	Год	1997		1997	1997	1997	1997	1997	2000		
	R tr	0,30	0,04	0,32	0,27	0,35	0,25	0,39	0,40	-0,15	0,08
22522	d tr	0,6	0,5	3,7	2,0	5,2	4,5	7,8	6,6		
	d st	4,4	2,6	6,9	6,5	9,4	10,0	13,7	11,8		
	Год	1999		1999	1999	1999	1999	1999	2000		
	R tr	0,11	-0,10	0,27	0,20	0,32	0,30	0,39	0,36	-0,29	-0,09
22550	d tr	0,6	0,0	3,0	2,3	4,2	2,2	7,3	5,0		
	d st	3,3	1,3	5,7	5,8	7,8	8,0	15,8	11,9		
	Год	1998		1998	1998	1998	1998	1998	2000	-0,29	-0,15
	R tr	0,11	-0,02	0,24	0,21	0,29	0,21	0,37	0,31		

Из результатов табл.2.5 следует, что для 5 представленных рядов год перехода от одних однородных условий к другим достаточно стабилен и относится к концу 20 века (1997-2000 гг.). Кроме того, показатели нестационарности (dtr , dst , Rtr) увеличиваются при сдвиге начального года ряда ко 2ой половине 20 века. Также, модели временных рядов до 1960 года относятся к моделям стационарного среднего. Поэтому все изменения

июльских температур произошли во второй половине 21 века и даже ближе к его окончанию.

По всем рядам наблюдений с началом в 1960 г. получено, что коэффициенты корреляции R_{tr} статистически значимы для всех 19 рядов. Эффективные модели ступенчатых изменений имеют место на метеостанциях 22165 (Канин Нос) $dst=11,7\%$; 22117 (Кандалакша), $dst=11,9\%$; 22522 (Кемь-порт), $dst=13,8\%$; 22550 (Архангельск), $dst=15\%$; 22641(Онега), $dst=11,3\%$; 22837 (Вытегра), $dst=10,9\%$ и 27051 (Тотьма), $dst=10\%$. Показатели нестационарности модели тренда dtr не превышают 10% на всех метеостанциях. Показатели нестационарности модели ступенчатых изменений dst выше, чем модели линейного тренда во всех случаях, что свидетельствует о большей эффективности модели ступенчатых изменений.

На Рис.2.9 показано пространственное распределение наиболее вероятных лет перехода от одного стационарного состояния к другому для рядов температур июля.

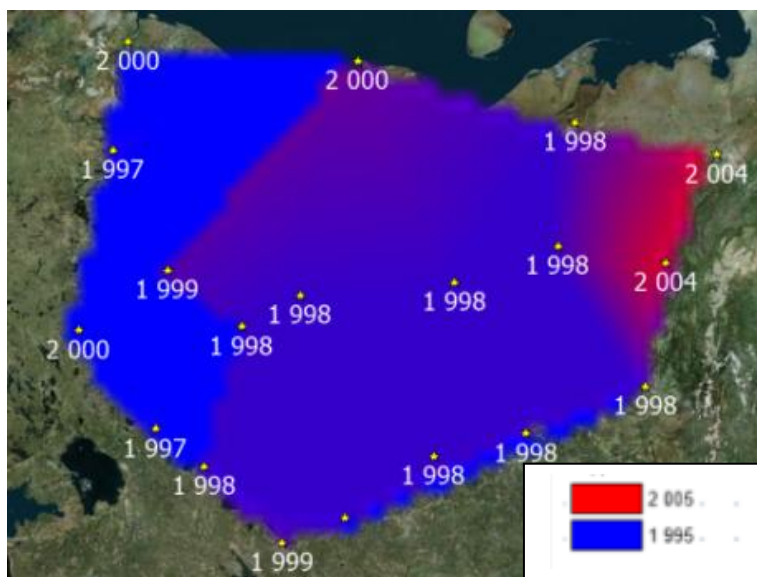


Рис.2.9. Пространственное распределение лет перехода от одних однородных условий к другим для рядов температур июля

Из рисунка 2.9 видно, что на всей территории годы перехода соответствуют концу 90-х XX века (1997-2000 годы), кроме северо-

восточной части, где год перехода 2004.

На Рис.2.10 представлены пространственные распределения показателей эффективности нестационарных моделей ($dtr(\%)$, $dst(\%)$, Rtr) с началом ряда наблюдений в 1980 году.

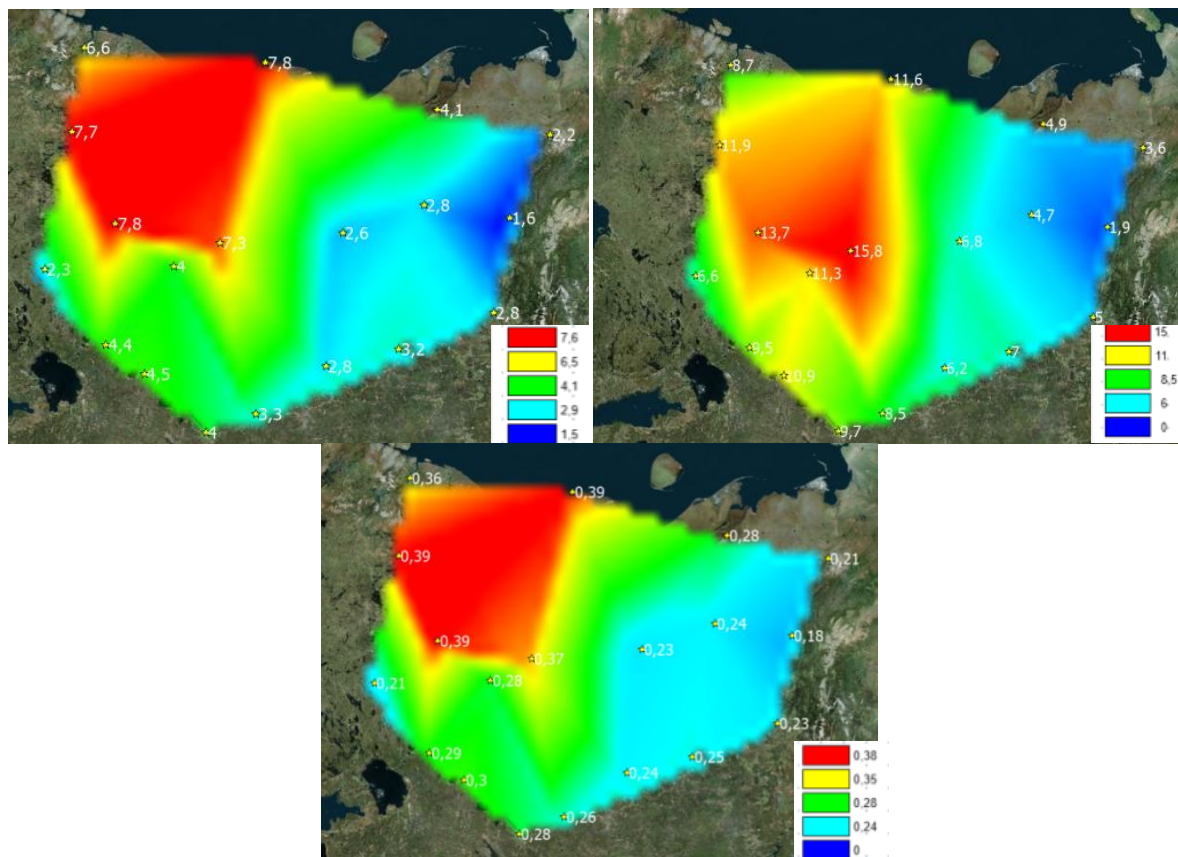


Рис.2.10. Пространственные распределения показателей эффективности нестационарных моделей многолетних рядов температур июля с началом в 1980 г., где сверху вниз и слева направо $dtr(\%)$, $dst(\%)$ и Rtr

Пространственные распределения двух показателей эффективности в целом аналогично друг другу, с минимумом на востоке и максимумом в северо-западной части региона, к которому относится побережье Белого, Баренцево моря и метеостанции Архангельск, Кемь, Реболы, Мурманск, Канин Нос, где показатели модели ступенчатых изменений превышают $dst > 10\%$, и наблюдаются максимумы модели тренда $dtr \geq 7\%$. Но значение показателя эффективности для модели ступенчатых изменений dst в 1,5-2 раза выше, чем показатель модели тренда dtr . Статистически значимые

коэффициенты корреляции имеют место на метеостанциях западной и центральной частях территории ($R_{tr} > 0,28$), а статистически незначимые R_{tr} по большей мере имеют место на метеостанциях восточные части территории.

На Рис.2.11 показаны пространственные распределения роста температуры июля (dT) в $^{\circ}\text{C}$, полученные по разности средних двух подвыборок по году перехода на Рис.2.9, и в долях СКО.

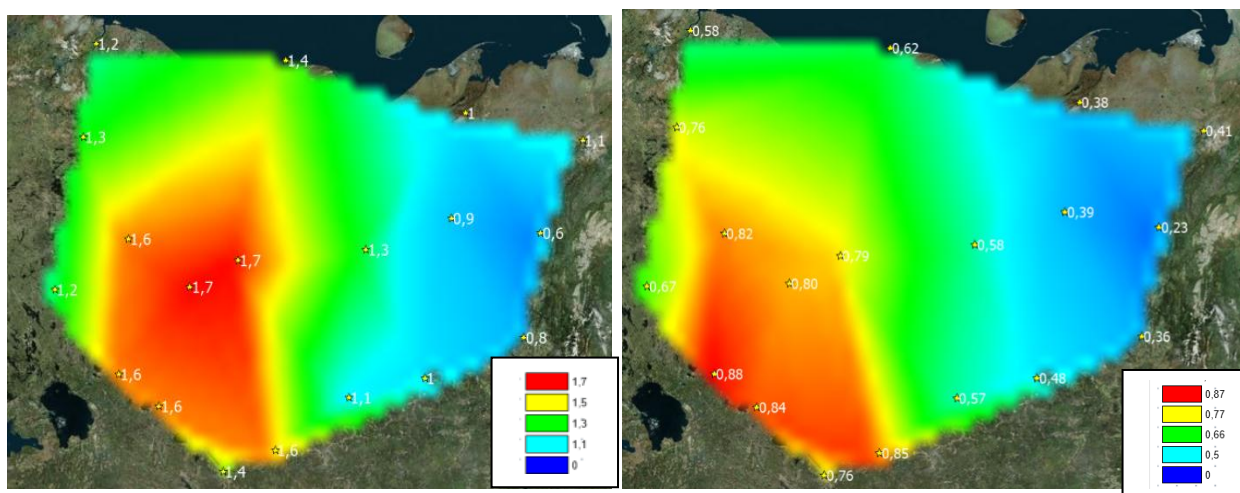


Рис.2.11. Пространственные распределения роста июльских температур в $dT, ^{\circ}\text{C}$ и в долях СКО

Как видно из рис.2.11. на всех метеостанциях наблюдается потепление от 0,6 до 2,0 $^{\circ}\text{C}$. Наибольший рост средней температуры июля наблюдается в южной и центральной части территории 1,6-1,7 $^{\circ}\text{C}$ на метеостанциях Тотьма, Вытегра, на метеостанциях южного побережья Белого моря: Архангельск, Кемь, Онега, Петрозаводск. Наименьшее потепление имеет место в восточной части региона. Однако отношение $dT/\text{СКО}$ не превышает единицы, с максимумами более 0,8 на метеостанциях Тотьма (0,84), Вытегра (0,88) и на южном побережье Белого моря на станциях Кемь (0,82), Онега (0,8). На рисунке 2.12 представлены хронологические графики рядов температур июля на двух метеостанциях с эффективной моделью ступенчатых изменений.

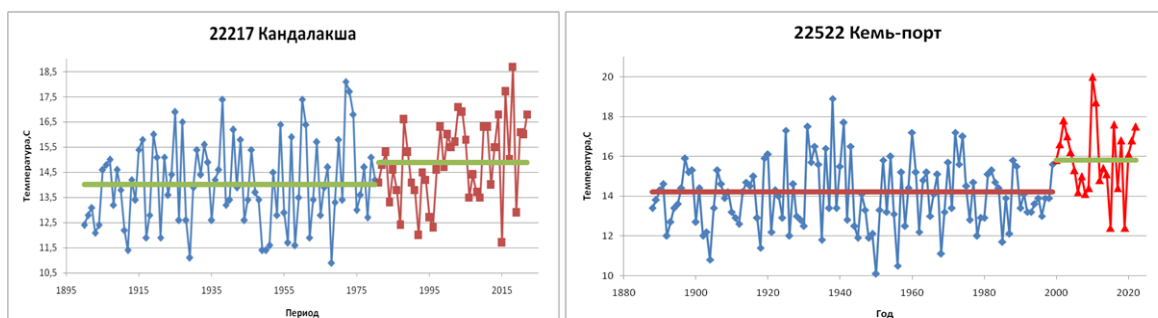


Рис.2.12. Нестационарные ряды наблюдений за июльскими среднемесячными температурами с разными годами ступенчатых изменений

Для многолетних рядов температур апреля эффективная модель тренда ($dtr > 10\%$) имела место на 4х метеостанциях: Канин Нос (22165), Кандалакша (22217), Кемь-Порт (22522), Нарьян-Мар (23205). Эффективная модель ступенчатых изменений ($dst > 10\%$) наблюдалась для 7 рядов на метеостанциях Канин Нос (22165), Кандалакша (22217), Кемь-Порт (22522), Реболы (22602), Нарьян-Мар (23205), Усть-Цильма (23405), Печора (23418). Коэффициенты корреляции со временем (Rtr) были статистически значимы для 18 рядов.

При анализе ряда на метеостанции Канин Нос с начальными годами 1960, 1980, 1990 значение dst было всегда больше 10% с максимумом 15,4% (1980г.). При сдвиге начала наблюдений на 1980 г., показатель модели линейного тренда dtr равен 13,8%. При анализе рядов на метеостанциях Кандалакша и Реболы с начальными годами 1940, 1960, 1980, а для второй метеостанции и 1990, 2000гг., показатель dst модели ступенчатых изменений больше 10%. При смещении начального года на 1940, 1960, 1990г. показатель модели нестационарного линейного тренда dtr превышает 10% с максимумом 11,2% в 1990г. Для метеостанций Печора и Усть-Цильма при начальном годе 2010, показатель dst равен 11,3 и 14,2%, соответственно. Для метеостанции Нарьян-Мар при начале наблюдений в 1980 году, показатели модели тренда и ступенчатых изменений равны 12%, а при рассмотрении ряда с 2000 года только dst равен 15,6%.

Для рядов остальных метеостанций при смещении начального года наблюдений с 1900 на 1960 и далее на 1980гг. показатели нестационарности моделей увеличиваются, следовательно, в последний период изменения средних значений более ярко выражены. Но в целом, показатели модели ступенчатых изменений выше, чем для модели тренда. На Рис.2.13 показан вероятный год перехода от одного стационарного состояния к другому для рядов апрельской температуры.

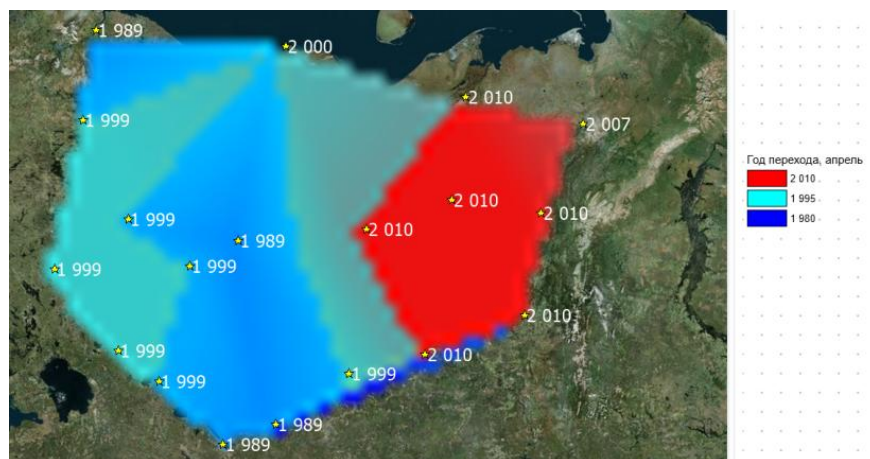


Рис.2.13. Пространственное распределение лет перехода от одних однородных условий к другим для рядов температур апреля

Год перехода от одних однородных условий к другим, также, как и для температур января, смещается с запада на восток. На юге и северо-западе год перехода самый ранний и соответствует концу 80-х годов XX века (1989г.). В центре и на большей половине территории в 1999 произошел переход от одного стационарного периода к другому, в восточной части год перехода – самый поздний 2010г. На Рис.2.14 показаны пространственные распределения апрельского потепления (dT) в $^{\circ}C$ и в долях СКО. Был взят период наблюдений за температурой воздуха, и разделен на две части по годам перехода, представленным на рисунке выше.

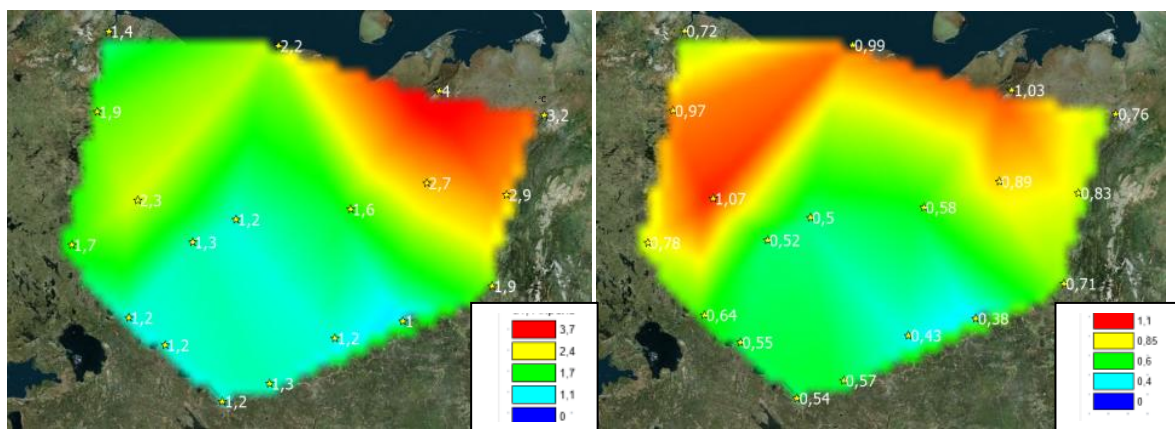


Рис.2.14. Пространственные распределения роста апрельских температур в $dT, ^\circ\text{C}$ и в долях СКО

На всех метеостанциях наблюдается потепление в пределах $1-4^\circ\text{C}$, разница температур между двумя периодами увеличивается с юга-запада на северо-восток. На северо-востоке на метеостанции Нарьян-Мар потепление максимально и равно 4°C . Минимальный рост равный $1,2^\circ\text{C}$ наблюдается на юге-западе на станциях Сыктывкар, Тотьма, Вологда. Отношение $dT/\text{СКО}$ превышает единицу или приближается к единице (более 0,85) на всей северной части региона, с максимумом $dT/\text{СКО}=1,07$ на метеостанции Кемь-Порт. Минимумы менее 0,5 наблюдаются на юге и в центре, в районах метеостанций Сыктывкар (0,43), Усть-Кулом (0,38).

Для многолетних рядов температур октября коэффициенты корреляции со временем (R_{tr}) были статистически значимы для 15 из 18 рядов. Модель ступенчатых изменений эффективна для ряда на метеостанции Печора (23418), где $dst=10,8\%$. На юге-западе и северо-востоке год перехода от одних однородных условий к другим самый ранний и соответствует 1980 году. На большей половине территории переход от одного стационарного периода к другому произошел в 1994 году, в северо-западной части год перехода самый поздний - 1999г.

На Рис.2.15 показаны пространственные распределения октябрьского потепления (dT) в $^\circ\text{C}$ и в долях СКО.

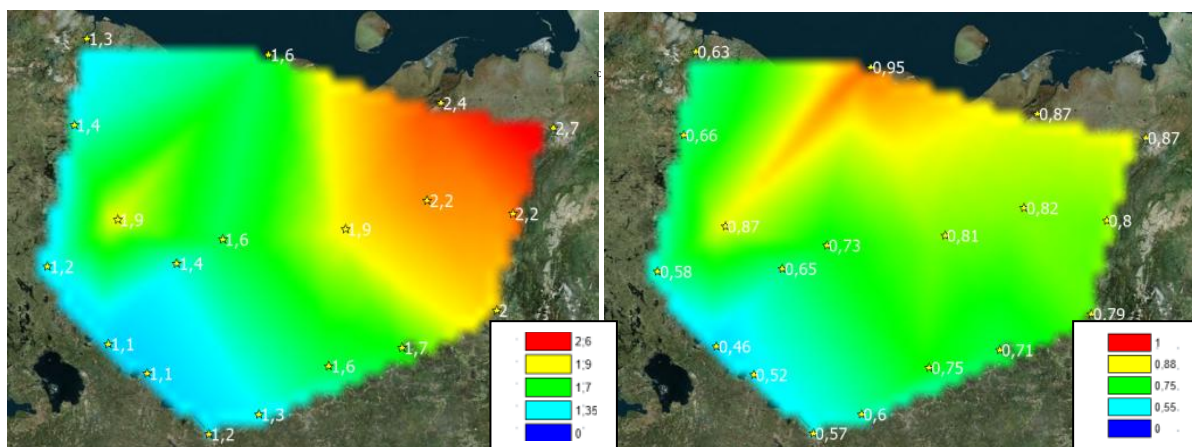


Рис.2.15. Пространственные распределения роста октябрьских температур в $dT, ^\circ\text{C}$ и в долях СКО

На всех метеостанциях наблюдается потепление в пределах $1-3^\circ\text{C}$. На севере-востоке на метеостанции Нарьян-Мар потепление максимально и равно $2,7^\circ\text{C}$. Минимальный рост, равный $1,1^\circ\text{C}$, наблюдается на всем западе района, например, на метеостанциях Вытегра, Вологда. Отношение $dT/\text{СКО}$ приближается к единице (более $0,8$) в северной, северо-восточной части региона, с максимумом $dT/\text{СКО}=0,95$ на ст. Канин Нос. Минимумы менее $0,5$ наблюдаются на юге в районах метеостанций Вытегра ($0,52$), Петрозаводск ($0,46$).

В таблице 2.6 приведены результаты сравнения средних значений двух частей ряда, полученных по году наиболее вероятного перехода от одних однородных условий к другим для среднемесячных температур воздуха каждого исследуемого месяца по критерию Стьюдента. В таблице курсивом с розовой заливкой обозначаются статистически значимые расчетные значения критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha=5\%$, жирным начертанием с синей заливкой - при $\alpha=1\%$.

Таблица 2.6

Результаты сравнения средних значений двух частей ряда
среднемесячных температур воздуха по критерию Стьюдента для всех
исследуемых месяцев

	Критерий Стьюдента
--	--------------------

Месяц		Январь	Апрель	Июль	Октябрь
Код	Название				
22113	Мурманск	2,39	3,06	1,99	2,32
22217	Кандалакша	2,02	3,11	2,11	2,86
22165	Канин Нос	2,55	3,24	2,5	2,07
22522	Кемь-Порт	2,94	2,42	3,07	1,8
22550	Архангельск	2,93	2,91	2,76	2,65
22583	Койнас	2,44	1,77	2,11	2,97
22602	Реболы	2,86	3,25	2,36	2,13
22641	Онега	3,01	2,38	2,76	2,69
22820	Петрозавдоск	3,6	2,68	3,12	2,66
22837	Вытегра	3,68	2,52	3,02	2,54
22887	Котлас	2,95	1,78	1,92	2,79
23205	Нарьян-Мар	1,66	2,28	1,53	2,89
23219	Хоседа-Хард	0,82	1,99	1,51	3,81
23405	Усть-Цильма	2,29	2,04	1,44	3,09
23418	Печора	1,62	1,84	0,94	3,23
23711	Троицко-Печорск	2,35	1,66	1,45	3,11
23804	Сыктывкар	3,21	1,02	2,06	2,9
27037	Вологда	3,74	3,1	2,77	2,42
27051	Тотьма	3,57	2,4	3,05	2,66

Сравнение средних значений двух частей ряда по критерию Стьюдента показало, что они практически во всех случаях статистически различаются при уровне значимости $\alpha=5\%$, и на многих станциях и при уровне значимости $\alpha=1\%$. Кроме того, отмечается, что коэффициенты корреляции модели тренда при разбиении ряда на две части: с 1960г. до года перехода и после года перехода до 2023г., статистически незначимы практически для всех случаев. Значит, можно принять, что год перехода был определен правильно, и средние значения в эти два рассматриваемых периода

стационарны, значит современные изменения рассчитаны верно.

На рисунке 2.16 представлены хронологические графики рядов температур воздуха апреля и октября со статистически значимыми расхождениями двух средних по критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha=1\%$.

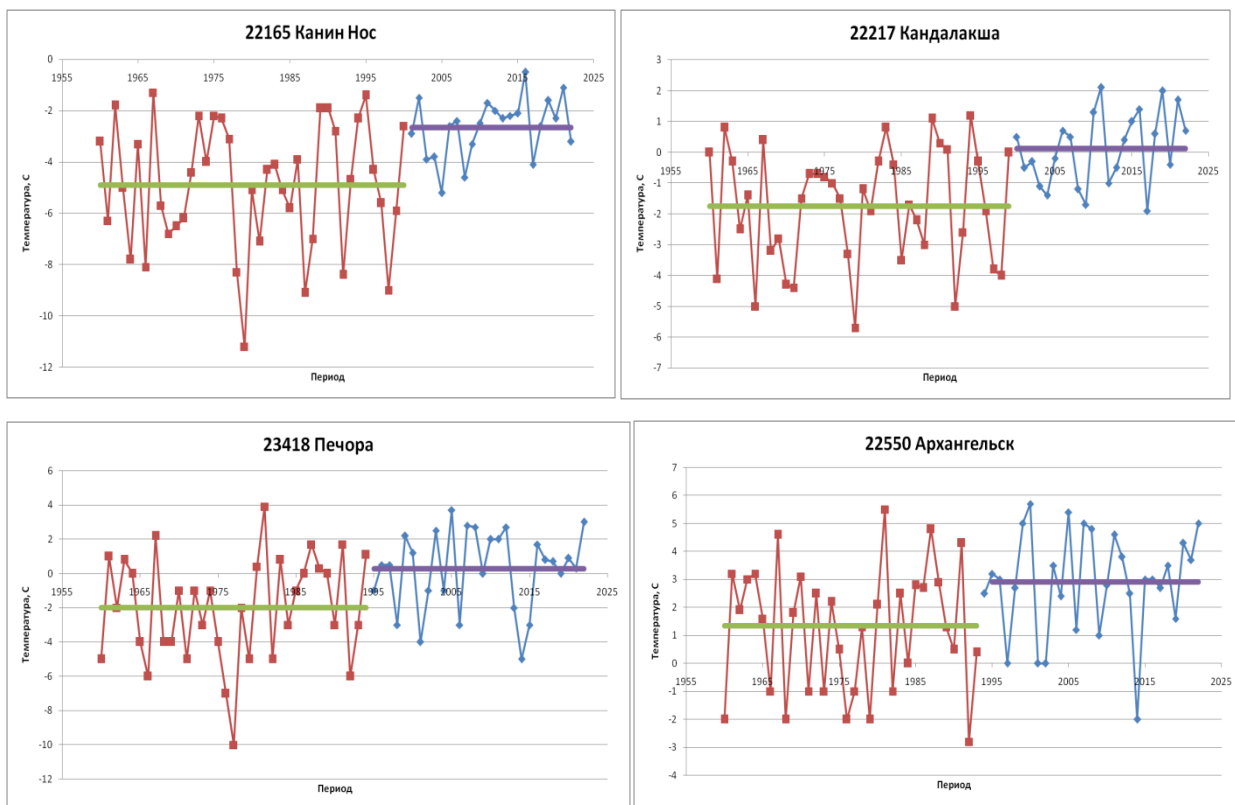


Рис.2.16. Нестационарные ряды наблюдений за апрельскими(сверху) и октябрьскими(снизу) среднемесячными температурами воздуха с разными годами ступенчатых изменений

3.Современные климатические изменения осадков на севере ЕТР

3.1 Оценка качества данных

Для оценки однородности минимальных и максимальных экстремумов многолетнего ряда осадков были вычислены значения статистических критериев Диксона и Смирнова-Граббса, критические значения которых были взяты из таблиц при известном объеме ряда наблюдений при уровне значимости 5%.

Для оценки стационарности дисперсий и средних значений многолетний ряд наблюдений сначала был разделен на две равные подвыборки. Затем для каждой части посчитаны средние значения и дисперсии и проведена оценка статистик Фишера и Стьюдента.

Результат оценки однородности и стационарности 38 рядов наблюдений за осадками для характерных месяцев представлены в Табл.3.1, где приведено количество случаев неоднородности за каждый исследуемый месяц. Также приведено количество стационарных рядов в %, при этом сначала показано количество случаев стационарных средних и через «/» количество случаев стационарных дисперсий.

Таблица 3.1

Результат оценки однородности эмпирических распределений и стационарности параметров временных рядов сумм осадков за каждый месяц

Месяц	Неоднородность Критерий Диксона и Критерий Смирнова-Граббса	Стационарность Критерий Стьюдента/ Критерий Фишера
Январь	0	71,1%/86,8%
Апрель	2	92,1%/94,7%
Июль	0	94,7% / 97,4%
Октябрь	1	92,1% / 86,8%

Из таблицы 3.1 следует, что максимальные и минимальные экстремумы рядов январских и июльских осадков однородны.

Для рядов апрельских осадков выявлено, что минимальные экстремумы однородны в рядах всех метеостанций. Максимальный экстремум неоднороден для метеостанции Котлас(105мм) и Шенкурск. Для метеостанции Котлас годом проявления неоднородности является 1993. Анализ данных на ближайших метеостанциях показал, что в 1993 также наблюдались большое количество осадков за апрель, например, на станции Тотма 85мм. Следовательно, данный экстремум не является ошибкой измерения, но имеет более редкую повторяемость, и данный экстремум включается в дальнейший анализ.

Для рядов наблюдений за октябрьскими осадками получено, что максимальный экстремум неоднороден на метеостанции Кандалакша (125мм). Годом проявления неоднородности является 1995. В этом году на ближайших метеостанциях наблюдались большие суммы осадков за октябрь: Мурманск (120мм), Кемь-порт (85мм), что говорит о том, что этот экстремум не ошибка измерения, а имеет более редкую повторяемость и включен в дальнейший анализ.

Средние значения рядов январских осадков нестационарны по критерию Стьюдента на 11 метеостанциях: Кандалакша, Кемь, Реболы, Архангельск, Вытегра, Котлас, Петрозаводск, Усть-Цильма, Усть-Кулом, Троицко-Печорск, Тотьма, Сыктывкар, Сегежа, Пудож, Никольск, Няндама. Нестационарные дисперсии обнаружены в рядах пяти станций.

Ряды июльских осадков станций Кандалакша и Сегежа являются нестационарными по критерию Стьюдента. По критерию Фишера нестационарным является ряд станции Сегежа.

Средние значения апрельских осадков нестационарны на станциях Кемь-порт, Вытегра, Троицко-Печорск. Дисперсии нестационарны в рядах двух станций: Мончегорск, Коткино.

При рассмотрении рядов октябрьских осадков по критерию Стьюдента нестационарными являются средние значения рядов станций Сегежа, Кандалакша, Вытегра. При рассмотрении рядов октябрьских осадков по критерию Фишера нестационарными являются ряды пяти станций: Мурманск, Котлас, Усть-Цильма, Янискоски, Колежма.

В целом, дисперсия и средние значения временных рядов статистически стационарны более чем в 80% рядов при разбиении ряда пополам.

Пример нестационарных и неоднородных рядов осадков показан на Рис.3.1.

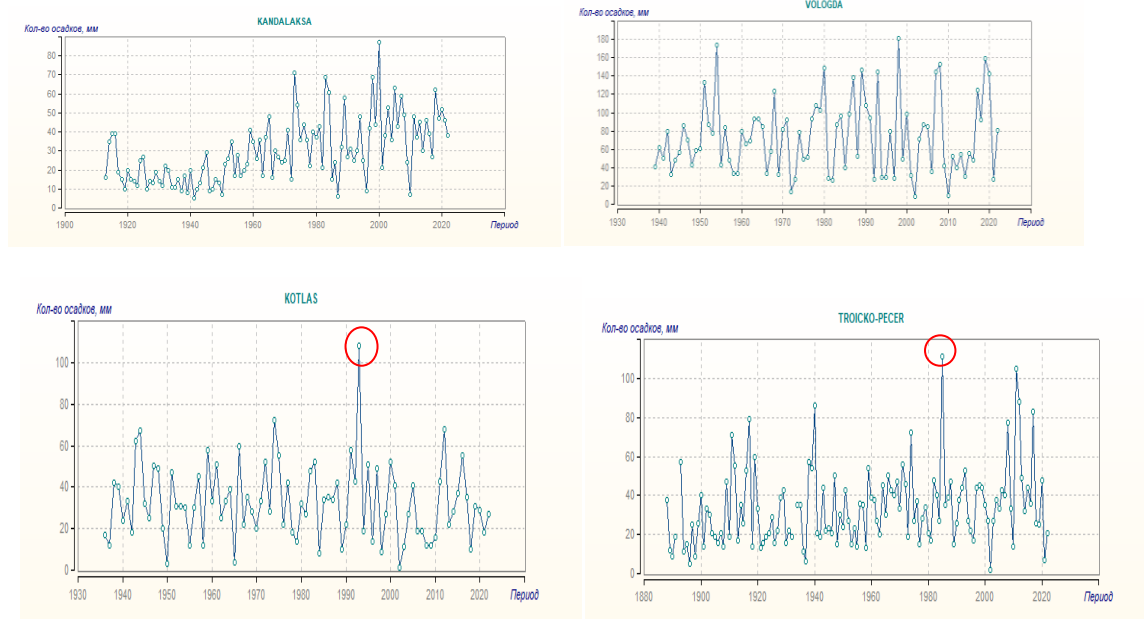


Рис.3.1. Нестационарные и неоднородные ряды наблюдений за осадками

По описанной ранее методике были восстановлены пропуски и краткосрочные ряды наблюдений за осадками приведены к многолетнему периоду с минимальным коэффициентом корреляции $R = 0,8$. Результаты восстановления представлены в Табл.3.2.

Таблица 3.2.

Эффективность восстановления многолетних рядов сумм осадков

Месяц	Кол-во станций	Среднее кол-во восст. лет	Средняя квадратич. погр. $\sigma_{Ос.}$, мм	Средний коэф.. корреляции.
Январь	3	6	7,5	0,85
Апрель	2	4	7	0,90
Октябрь	2	7	12	0,85

Восстановление январских рядов наблюдений за осадками имеет место на трех метеостанциях с минимальным коэффициентом корреляции между рядами $R=0,81$, и максимальным у станции Колежма $R= 0,88$. Период наблюдений увеличен на небольшое количество лет (≈ 5 лет). Средняя погрешность восстановленных значений равна $\sigma_{Ос} = 7,5$ мм.

Для апрельских рядов период наблюдений увеличен на 3-5 лет. Минимальные коэффициенты корреляции между рядами составляют 0,89. Средняя ошибка восстановленных значений $\sigma_{Ос} = 7$ мм.

Период наблюдений на метеостанциях за октябрьскими осадками увеличен на 4 и 13 лет. Минимальные коэффициенты корреляции между рядами составляют $R=0,81$, максимальные $R=0,91$. Средняя погрешность восстановленных значений $\sigma_{Ос} = 12$ мм.

Хронологические ряды осадков с восстановленными значениями показаны на Рис.3.2

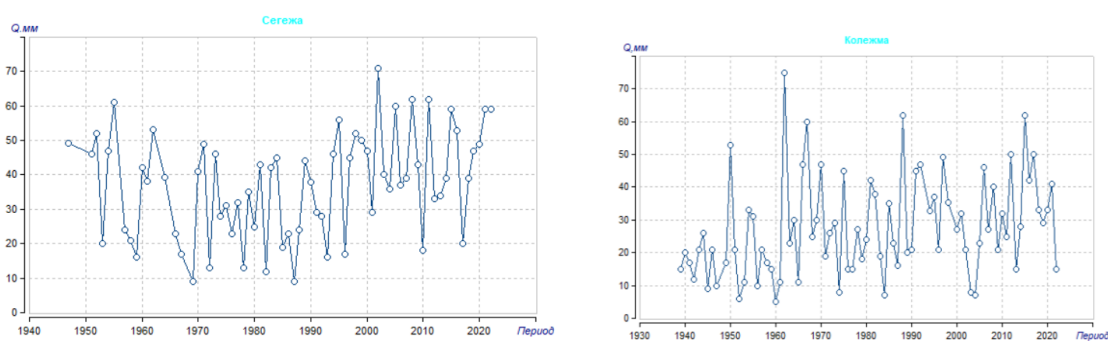


Рис.3.2. Ряды наблюдений за осадками с восстановленными значениями

3.2 Определение расчетных климатических характеристик

В строительной климатологии, для проектирования и эксплуатации объектов на территории РФ представляют интерес наибольшие суммы твердых осадков января, жидких осадков апреля, октября и июля. Наибольшим значениям осадков повторяемостью 1 раз в 100 лет соответствует квантиль распределения обеспеченностью 1%, а повторяемостью 1 раз в 200 лет – квантиль обеспеченностью 0,5%, т.е. значения в верхней части кривой распределения.

На Рис.3.3 показано пространственное распределение наибольших январских сумм осадков редкой повторяемости 1 раз в 100 лет (слева) и 1 раз в 200 лет (справа).

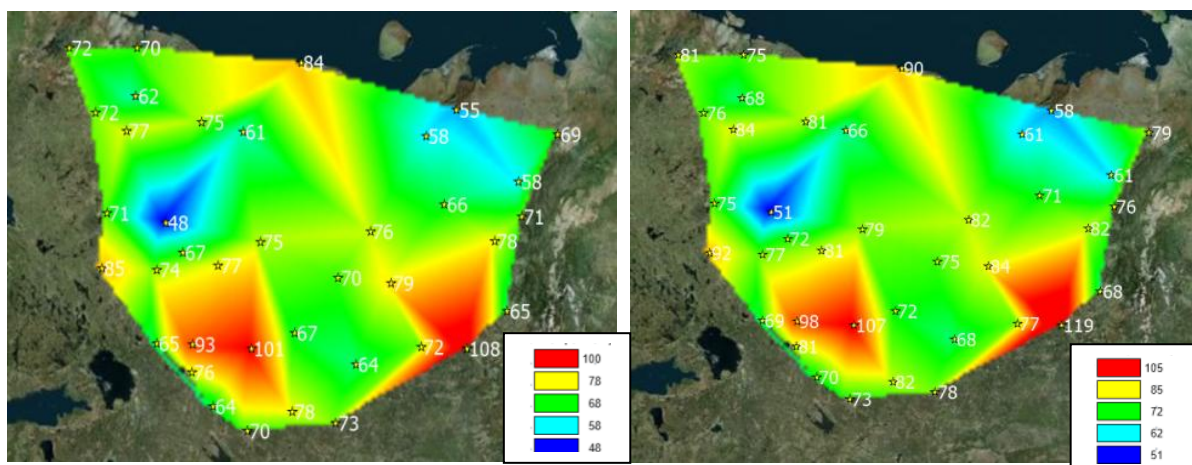


Рис.3.3. Наибольшие январские суммы осадков повторяемостью 1 раз в 100 лет (слева) и 1 раз в 200 лет (справа) (мм)

Из рис.3.3 следует, что имеет место неравномерное по территории распределение сумм осадков повторяемостью 1 раз в 100 лет, и аналогичное его распределение 1 раз в 200 лет. Самые большие январские суммы осадков наблюдаются на северном побережье на метеостанции Канин Нос (84мм и 90 мм, соответственно), на юго-западе региона на станциях Шенкурск (101мм, 107мм), Няндомы (93мм, 98мм), на юго-востоке района на метеостанции Усть-Кулом (108мм, 119мм). Минимум осадков отмечен на северо-востоке рассматриваемого региона на станциях Коткино (58мм, 61 мм), Нарьян-Мар (55мм, 58мм), и на побережье Белого моря на станциях Кемь-Порт (48мм, 51мм), Каневка (61мм).

Пространственная интерполяционная модель июльских наибольших сумм осадков редкой повторяемости 1 раз в 100 и 200 лет представлена на Рис.3.4.

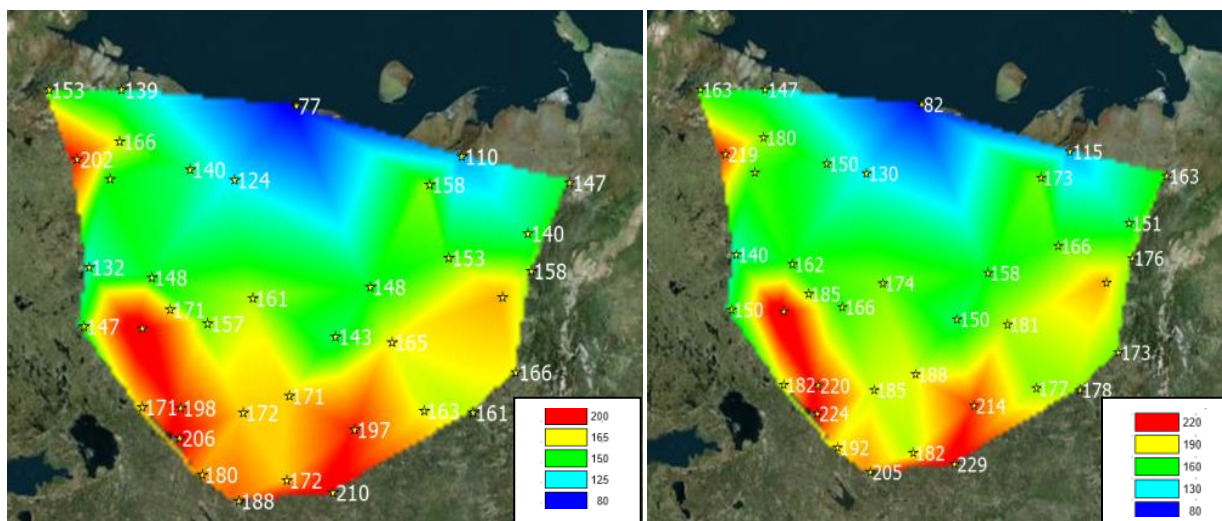


Рис.3.4. Июльские наибольшие суммы осадков повторяемостью 1 раз в 100 лет (слева) и 1 раз в 200 лет (справа) (мм)

Из рис.3.4 следует, что на севере ЕТР имеет место зональное распределение с минимумом на севере и основным максимумом на юге. Наименьшее количество осадков наблюдается в северной части региона на метеостанции Канин Нос 77 мм и 82 мм соответственно. Самые высокие значения располагаются по всей южной части рассматриваемой территории на метеостанциях Вытегра (206мм, 224мм), Вологда (188мм, 205мм), Никольск (198мм, 220мм), Котлас (197мм, 214мм), Пудож (180мм), на северо-западе региона на метеостанции Ковдор (200мм, 219мм).

Пространственная интерполяционная модель наибольших апрельских сумм осадков редкой повторяемости 1 раз в 100 и 200 лет показана на Рис.3.5.

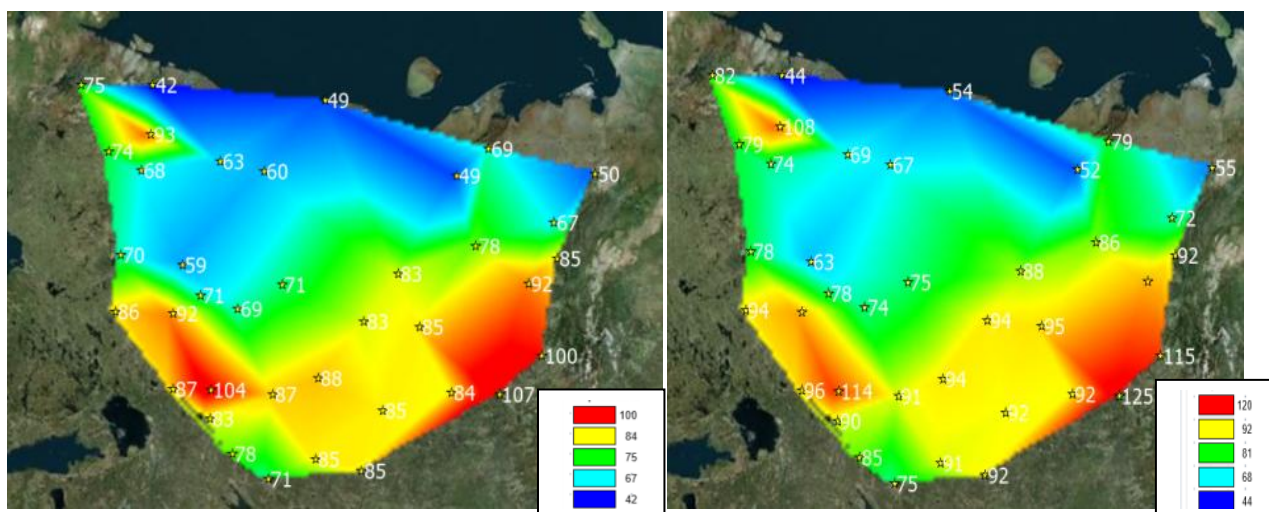


Рис.3.5. Апрельские наибольшие суммы осадков редкой повторяемости 1 раз за 100 лет (слева) и 1 раз в 200 лет(справа)(мм)

Из рис.3.5 следует, что на севере ЕТР имеет место рост количества осадков с севера-запада на юго-восток. Наименьшие суммы осадков наблюдаются на севере региона на станциях Мурманск (42мм, 44мм, соответственно), Канин Нос (49мм, 54 мм), Коткино (49мм, 52мм). Наибольшие суммы осадков имеют место на станциях юго-восточной части региона Троицко-Печорск (100мм, 115мм), Усть-Кулом (107мм, 125мм) и станциях юго-запада: Няндома (104мм,114мм), Пудож (92мм,96мм), Петрозаводск (87мм, 94мм), и северо-западе на метеостанции Ковдор (93мм и 108 мм, соответственно).

Пространственные распределения октябрьских наибольших сумм осадков редкой повторяемости 1 раз в 100 и 200 лет показаны на Рис.3.6.

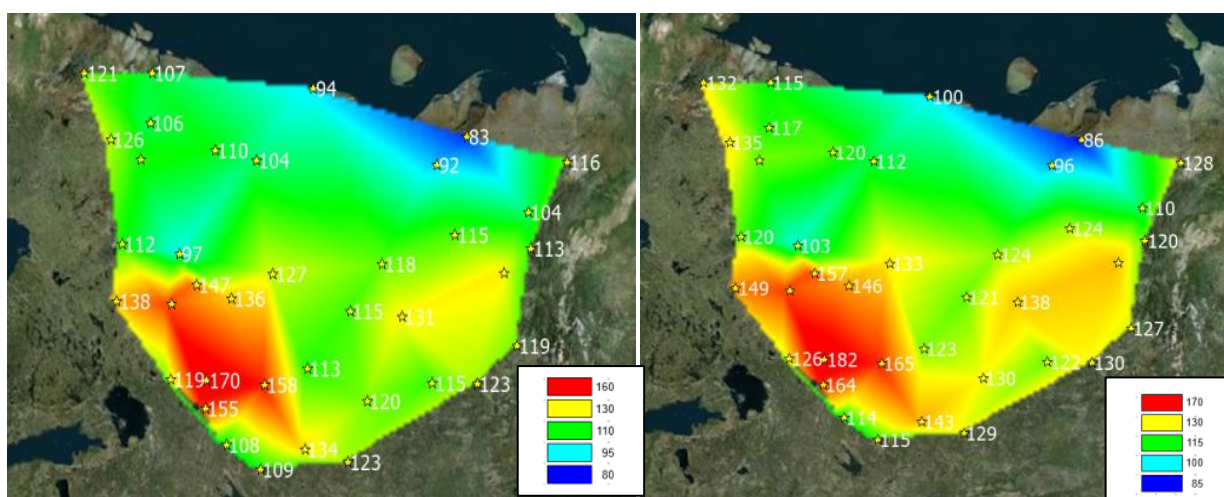


Рис.3.6. Октябрьские наибольшие суммы осадков редкой повторяемости 1 раз в 100 лет (слева), 1 раз в 200 лет (справа)(мм)

Из рис.3.6 следует, что наименьшие суммы осадков имеют место на северо-востоке на метеостанциях Нарьян-Мар (83мм,86мм), Канин Нос (94мм,100мм), Коткино (92мм,96мм). Наибольшие суммы осадков получены в юго-западной части региона, на станциях Вытегра (155мм,164мм), Няндомы (170мм, 182мм), Пудож (138мм,157мм).

3.3 Результаты моделирования многолетних рядов

Используя методику, описанную выше, были получены необходимые характеристики нестационарных моделей для рядов многолетних сумм осадков января, июля, апреля и октября на 38 метеорологических станциях, расположенных на севере европейской территории Российской Федерации.

При аппроксимации многолетних рядов осадков января получено, что для 8 рядов эффективна модель ступенчатых изменений ($dst > 10\%$): 22113 (Мурманск), 22165 (Канин Нос), 22408 (Калевала) 22529 (Колежма), 22939 (Белозерск), 23207 (Коткино), 23803 (Усть-Кулом), 23804 (Сыктывкар), а для 4 рядов эффективна модель тренда: 22529 (Колежма), 22939 (Белозерск), 23219 (Хоседа-Хард), 22113 (Мурманск). Статистически значимые коэффициенты корреляции получены для 29 рядов, что составляет около 80% от общего числа рядов. Для большинства станций при смещении начального года наблюдений с 1960 до 1990 показатели нестационарности увеличиваются, а это значит, что в последний период переход от одного стационарного состояния к другому более вероятен. Для большинства станций показатели нестационарности модели ступенчатых изменений dst выше, чем модели линейного тренда, т.е. модель ступенчатых изменений более эффективна. Были установлены годы наиболее вероятного перехода от одного стационарного режима к другому.

На большей части территории годы перехода от одного квазиоднородного состояния временного ряда к другому соответствуют концу 90-х XX века или началу XXI века (1997-2007 гг.), кроме северо-восточной части, где годом перехода является 1990, и кроме побережья Белого моря, где год перехода наступает позже, в 2010-х.

При анализе ряда на метеостанции Мурманск с начальными годами 1980,1990 значение dst было всегда больше 10% с максимумом 12,8% (1990г.). При сдвиге начала наблюдений на 2000 г., показатель модели линейного тренда dtr равен 14%. При анализе рядов на метеостанциях Колежма, Усть-Кулом и Белозерск с начальными годами 1960,1980, а для второй метеостанции и 1990г., показатель dst модели ступенчатых изменений больше 10%. Для метеостанций Колежма и Белозерск при смещении начального года на 1960, 1980г. показатель модели нестационарного линейного тренда dtr превышает 10% с максимумом 14,2% в 1980г, и 11% соответственно. Для метеостанций Коткино и Сыктывкар при начальном годе 1960, показатель dst равен 10,3 и 12,2%, соответственно. Для метеостанции Канин Нос при начале наблюдений в 1990 году, показатель модели ступенчатых изменений равен 16,4%, а при рассмотрении ряда станции Калевала с 1980 года только dst равен 10,7%. Для метеостанции Хоседа-Хард при рассмотрении ряда с 2000 года эффективна модель тренда ($dtr=10,6\%$).

По году наиболее вероятного перехода от одного квазистационарного режима к другому ряд был разделен на 2 части, определены средние значения для каждой подвыборки и их относительная разность (dOc) в % между средними значениями второй и первой частями ряда. Причем начало первой части ряда было задано 1960 годом, чтобы продолжительности подвыборок были одинаковыми. Так, на Рис.3.7 показано пространственное распределение январского изменения осадков (в %) и в долях СКО.

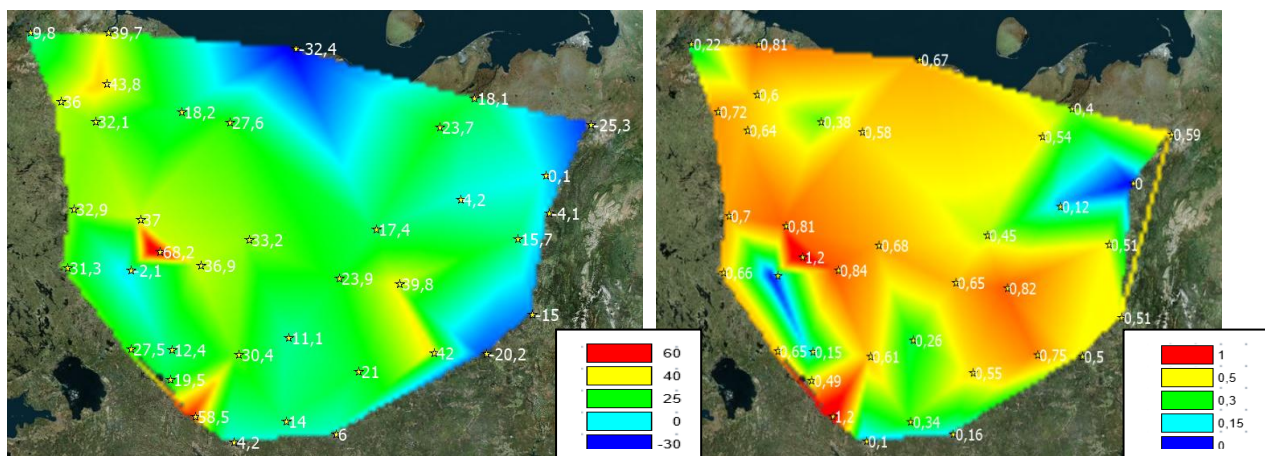


Рис.3.7. Пространственное распределение изменения январских осадков
dOс в % и в долях СКО

Из рис.3.7 следует, что на западных и центральных метеостанциях севера европейской территории России имеет место увеличение январского количества осадков. Наибольший рост отмечается в районах побережья Белого моря и Кольского полуострова с максимумами на станциях Колежда (68,2%, 17мм), Онега (36,9%, 13мм), Мончегорск (43,6%, 10,8мм) и на юго-западе региона на станции Белозерск (58,5%, 14,2мм). Наибольшее уменьшение осадков имеет место на побережье Северного Ледовитого океана на станции Канин Нос (32%, 14,2мм) и на востоке рассматриваемого региона на станциях Хоседа-Хард (25,3%, 7,7мм) и Усть-Кулом (20,2%, 9,6мм). Отношение изменения январских осадков к СКО ($dOс/СКО$) близко к единице только вблизи побережья Белого моря и в центральной части рассматриваемого региона с максимумом на станции Колежда ($dOс/СКО=1,2$), Кемь-Порт ($dOс/СКО=0,81$).

На рисунке 3.8 представлены хронологические графики нестационарных рядов наблюдений за январскими осадками.

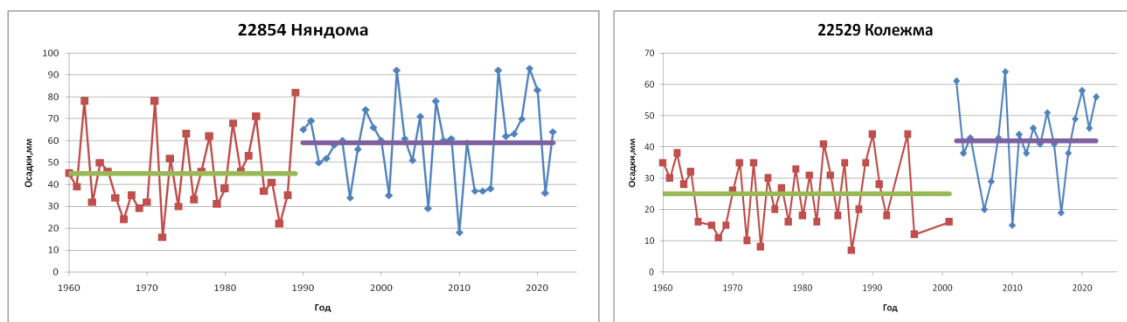


Рис.3.8. Нестационарные ряды наблюдений за январскими осадками с разными годами ступенчатых изменений

Для многолетних рядов осадков апреля эффективная модель тренда имела место для трех рядов станций Мурманск, Пудож и Белозерск, эффективная модель ступенчатых изменений имела место для двух рядов станций Мурманск, Пудож. Статистически значимые коэффициенты корреляции осадков со временем получены для 12 рядов.

Для большинства станций при смещении начального года наблюдений с 1960 к 2000 показатели нестационарности увеличиваются, а это значит, что в последний период переход от одного стационарного состояния к другому выражен более значительно. Для большинства станций показатели нестационарности модели ступенчатых изменений dst выше, чем модели линейного тренда. При анализе ряда на метеостанции Мурманск с начальными годами 1940, 1960, 1980 значение dst было всегда больше 10% с максимумом 13% (1960г.). При сдвиге начала наблюдений на 1990г., показатель модели линейного тренда dtr равен 10,5%.

На большей части территории годы перехода от одного стационарного состояния к другому соответствуют концу 90-х или началу XXI века (1996-2006 года), кроме северо-восточной части, где год перехода получился 1990, и побережье Белого моря, где год перехода наступает позже в 2010-х годах.

На Рис.3.9 показано пространственное распределение относительного изменения осадков апреля dO_c (в %) и в долях СКО.

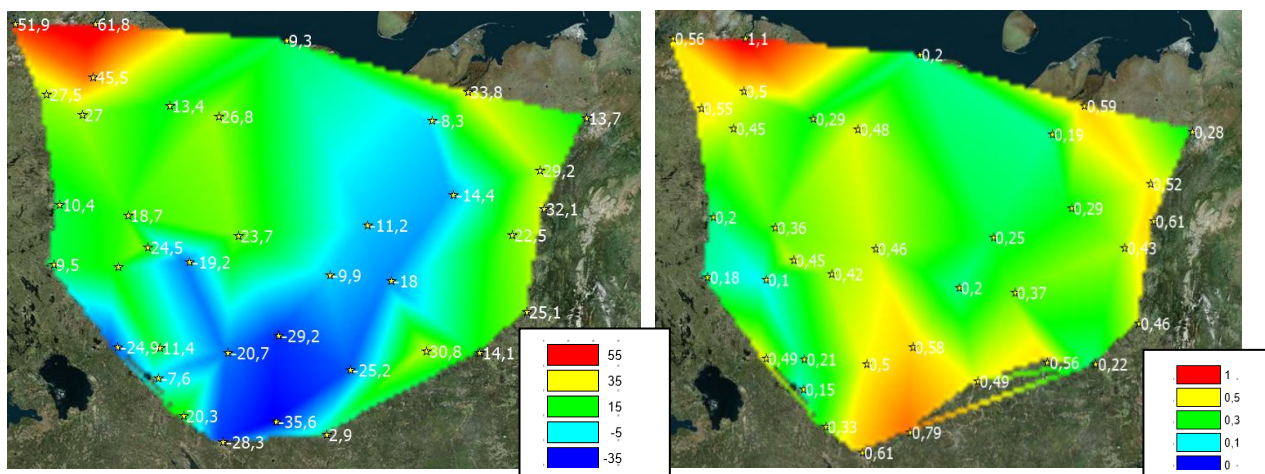


Рис.3.9. Пространственное распределение изменения апрельских осадков
dOc в % и в долях СКО

Наибольший рост апрельских осадков имеет место на северо-западе рассматриваемой территории на метеостанциях Мурманск (61,8%, 12,1мм), Яникоски (51,9%, 13,6мм). Наибольшее уменьшение сумм осадков отмечается на юге данного региона на станциях Вологда (28,3%, 10,4мм) и Тотьма (35,6%, 15,2 мм). Однако отношение dOc/СКО превышает единицу только в северных районах на Кольском полуострове на станции Мурманск ($dOc/СКО = 1,1$) и на юге региона на станции Тотьма ($dOc/СКО = 0,79$).

На рисунке 3.10 представлены хронологические графики нестационарных рядов наблюдений за апрельскими осадками.

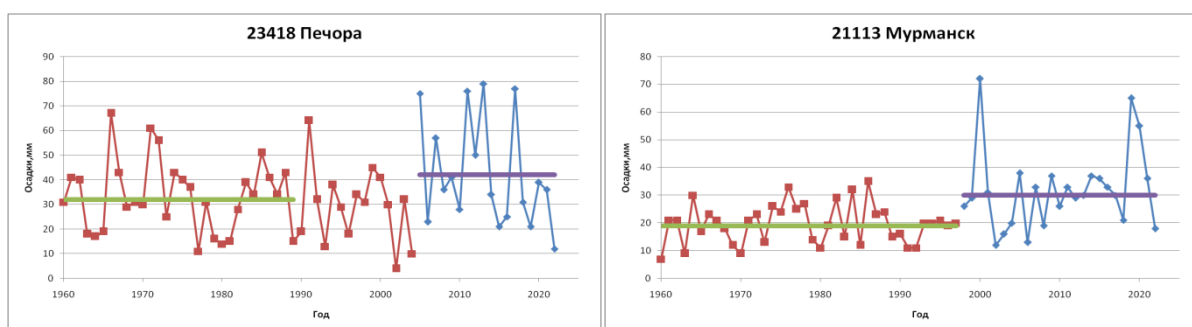


Рис.3.10. Нестационарные ряды наблюдений за суммами осадков апреля

Для многолетних рядов июльских осадков эффективная модель тренда имела место для ряда на станции Никольск ($dtr=16.7\%$), эффективная модель ступенчатых изменений ($dst \geq 10\%$) имела место для двух рядов на станциях Мурманск, Никольск. Статистически значимые коэффициенты корреляции

со временем получены для 7 рядов. Для большинства станций при смещении начального года наблюдений с 1940 к 1980 показатели нестационарности увеличиваются, а это значит, что в последний период переход от одного стационарного состояния к другому выражен более значительно. Для большинства станций показатели нестационарности модели ступенчатых изменений dst выше, чем модели линейного тренда.

На Рис.3.11 показано пространственное распределение относительного изменения июльских осадков $dOс$ (в %) и в долях СКО.

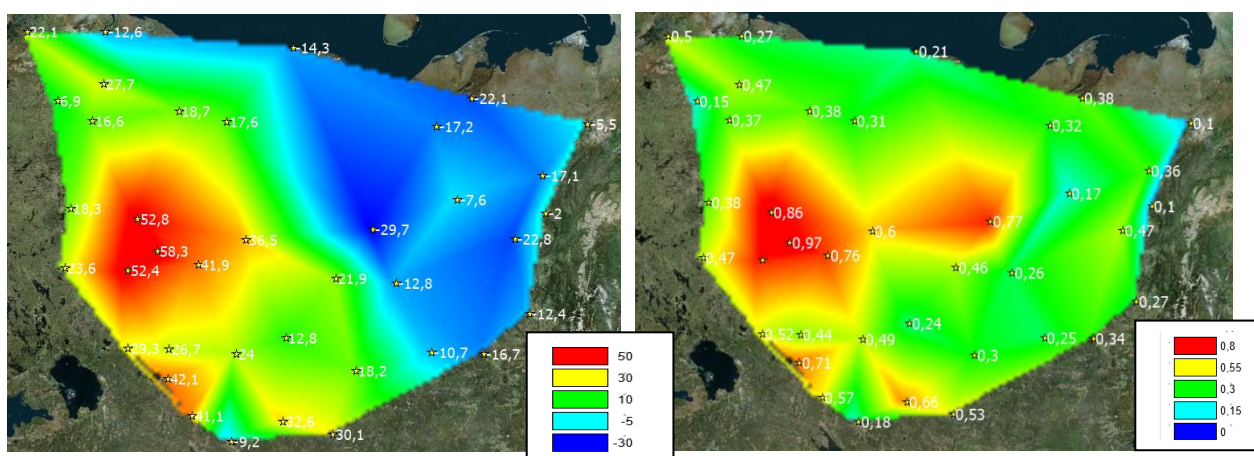


Рис.3.11. Пространственное распределение изменения июльских осадков $dOс$ в % и в долях СКО

На севере ЕТР имеет место меридиональное изменение июльских осадков с запада, где наибольший рост более 50% отмечен на метеостанциях Колежма (58,3% 35,1мм), Кемь-порт (52,8%, 27,8мм), Сегежа(52,4%,30,8мм), на восток, где имеет место уменьшение количества осадков. Наибольшее уменьшение отмечается на метеостанциях Койнас (29,7%, 22,7мм), Усть-Уса(17,1%, 10,6мм). Отношение $dOс/СКО$ близко к единице на побережье Белого моря на станциях Колежма($dOс/СКО = 0,97$), Кемь($dOс/СКО = 0,86$) и в центре региона на станции Койнас ($dOс/СКО = 0,77$).

На рисунке 3.12 представлены хронологические графики нестационарных рядов наблюдений за июльскими осадками.

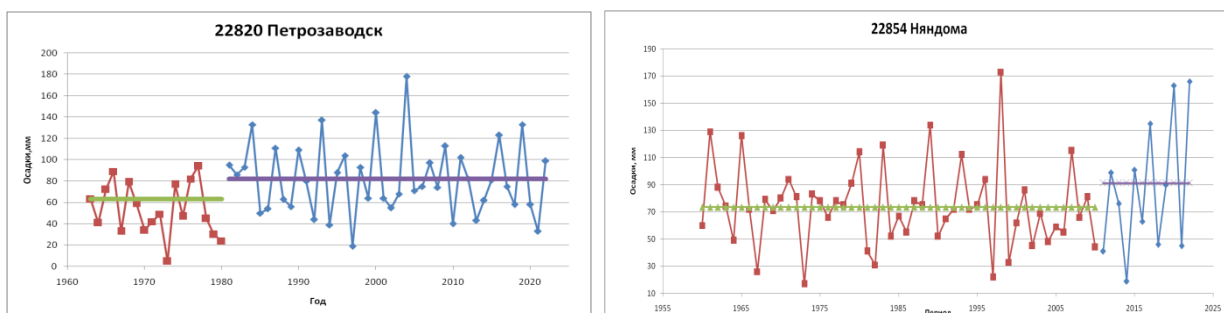


Рис.3.12. Нестационарные ряды наблюдений за июльскими суммами осадков

Для многолетних рядов октябрьских осадков эффективная модель тренда имела место для ряда на станции Коткино ($dtr=10.3\%$), эффективная модель ступенчатых изменений имела место для ряда на станции Белозерск ($dst=10,5\%$). Данные эффективные модели имеют место при рассмотрении рядов с начальным годом 1990г. Статистически значимые коэффициенты корреляции осадков со временем получены для 12 рядов. Для большинства метеостанций при смещении начального года наблюдений с 1940 к 2000 показатели нестационарности увеличиваются, а это значит, что в последний период переход от одного стационарного среднего к другому выражен более значительно. Для большинства метеостанций показатели нестационарности модели ступенчатых изменений dst выше, чем модели линейного тренда.

На Рис.3.13 показано пространственное распределение изменения осадков октября dOc (в %) и в долях СКО.

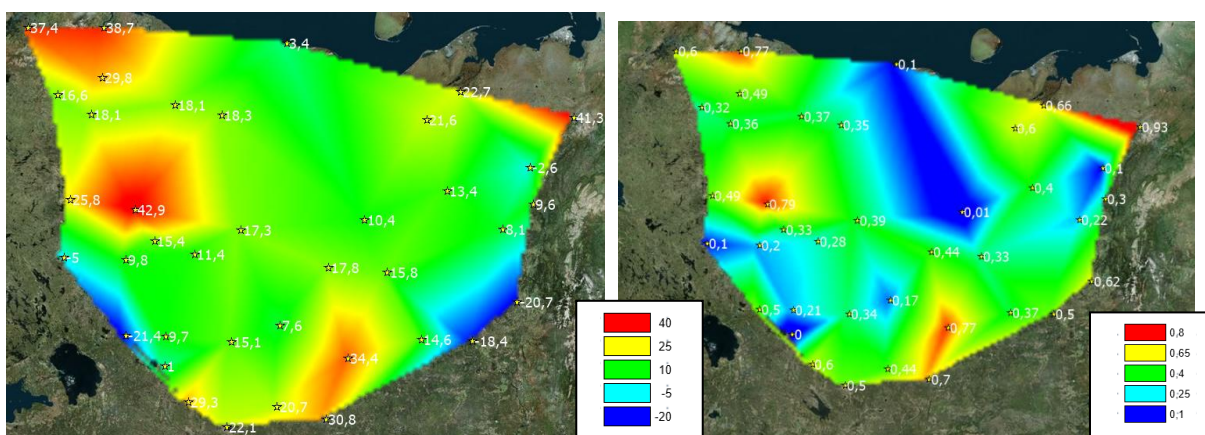


Рис.3.13. Пространственное распределение изменения октябрьских осадков dOc в % и в долях СКО

Из рис.3.13 следует, что на большинстве метеостанций имеет место рост октябрьских осадков с максимумом до 40% на северо-западе рассматриваемого региона и на побережье Белого моря: на метеостанциях Кемь (42,9%, 20,6мм), Мурманск (38,7%, 16,4мм) и Янискоски (37,4%, 14,4мм), а также в северо-восточной части на станции Хоседа-Хард (41,3 мм, 18,6мм). Уменьшение осадков до 20% отмечается на юго-востоке территории на станциях Троицко-Печорск (20,7%, 14,2мм) и Усть-Кулом (18,4%, 12,6мм) и на станции Петрозаводск (21,4%) на юго-западе. Отношение dОс/СКО, близкое к единице, имеет место на метеостанциях Хоседа-Хард (0,93), Кемь (0,79), Котлас (0,77).

На рисунке 3.14 представлены хронологические графики нестационарных рядов наблюдений за октябрьскими осадками.

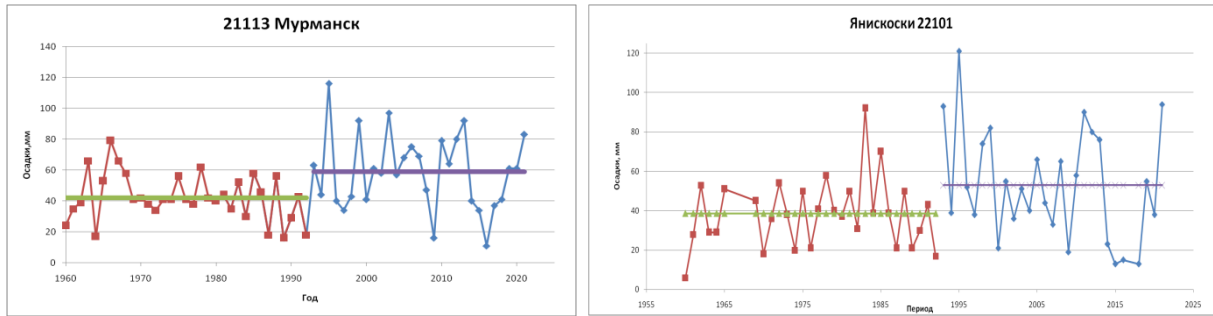


Рис.3.14. Нестационарные ряды наблюдений за суммами осадков октября

В таблице 3.3 приведены результаты сравнения средних значений двух частей ряда наблюдений, полученных по году наиболее вероятного перехода от одних однородных условий к другим, для осадков за характерные месяцы года по критерию Стьюдента. В таблице курсивом с розовой заливкой обозначаются статистические значимые расчетные значения критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha=5\%$, жирным начертанием с синей заливкой - при $\alpha=1\%$.

Таблица 3.3

Результаты сравнения средних значений двух частей ряда наблюдений за осадками за каждый исследуемый месяц по критерию Стьюдента

		Критерий Стьюдента
--	--	--------------------

Код	Наименование/Месяц	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
22101	Янискоски	0,1	2,02	1,27	2,26
22113	Мурманск	2,03	3,7	0,84	2,9
22165	Канин нос	1,82	0,63	0,61	0,39
22204	Ковдор	2,66	1,99	0,44	1,6
22212	Мончегорск	1,39	1,75	1,25	0,89
22217	Кандалакша	2,27	1,71	1,23	1,3
22235	Краснощелье	1,34	1,02	0,78	1,45
22249	Каневка	1,37	1,44	1,23	0,97
22408	Калевала	2,43	0,6	1,37	1,21
22522	Кемь-Порт	1,8	0,9	2,23	2,01
22529	Колежда	3,81	1,26	2,06	1,11
22550	Архангельск	2,71	0,44	1,71	1,61
22583	Койнас	1,55	0,6	3,64	1,48
22602	Реболы	2	0,5	2,21	0,58
22621	Сегежа	0,1	0,75	2,05	0,62
22641	Онега	3,1	1,4	1,56	0,79
22676	Сура	2,37	0,62	1,4	1,1
22695	Кослан	2,44	1,1	0,89	0,76
22768	Шенкурск	1,1	2,06	0,85	0,85
22820	Петрозаводск	2,11	1,66	1,99	1,2
22831	Пудож	0,33	0,5	1,23	1,07
22837	Вытегра	1,32	0,69	2,5	0,22
22854	Няндом	3,04	1,6	1,15	0,87
22887	Котлас	2,02	1,1	1,04	1,72
22939	Белозерск	3,47	1,02	2,09	1,56
23205	Нарьян-Мар	2,15	2,22	1,57	2,43
23207	Коткино	1,33	2,01	0,67	1,4
23219	Хоседа-Хард	1,37	1,75	0,77	3,26
23405	Усть-Цильма	0,75	1,15	0,69	0,86
23412	Усть-Уса	0,4	2,07	0,9	0,15
23418	Печора	0,42	1,72	0,56	1,1
23514	Ираель	1,91	1,27	1,02	0,66
23711	Троицко-Печорск	1,84	1,18	0,61	1,82
23803	Усть-Кулом	1,2	0,99	0,67	1,81
23804	Сыктывкар	3,77	1,64	0,91	0,87
27037	Вологда	0,5	2,2	0,62	1,23
27051	Тотьма	1,92	2,48	1,84	1,07
27066	Никольск	0,7	2,15	1,14	1,7

Для наглядности результатов построены пространственные распределения расчетных статистик критерия Стьюдента для исследуемых месяцев: январь, апрель, июль, октябрь.

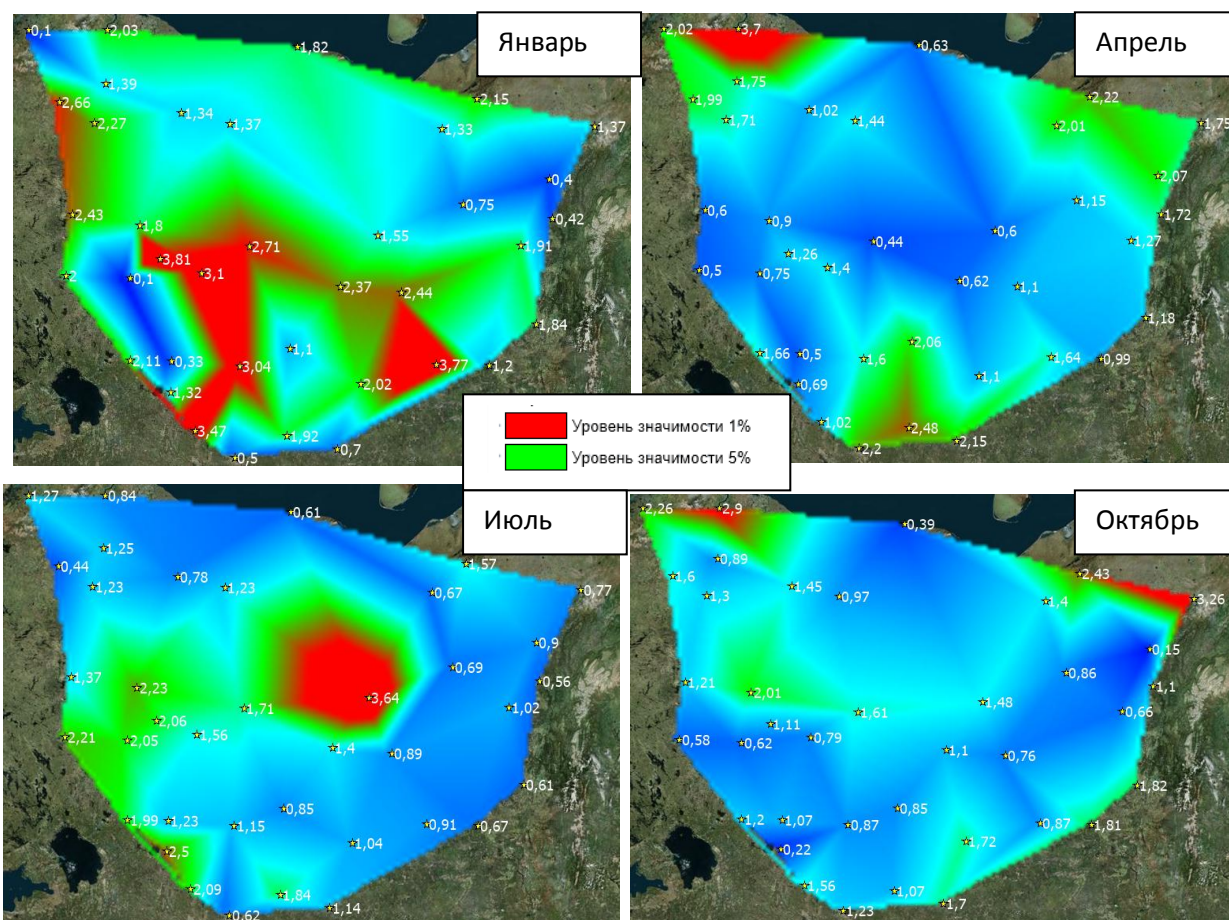


Рис.3.15. Пространственные распределения расчетных значений статистики критерия Стьюдента при сравнении двух средних значений осадков

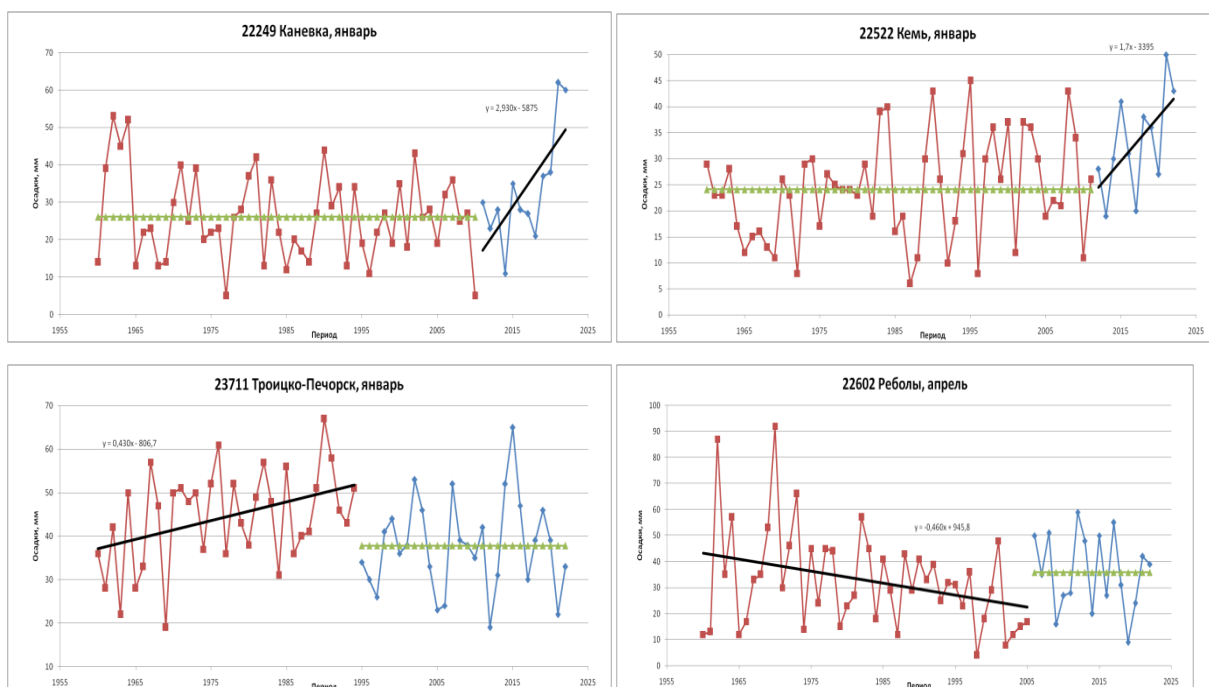
Сравнение средних значений двух частей ряда январских осадков по критерию Стьюдента показало, что они примерно в половине случаев (42%) статистически различаются при уровне значимости $\alpha=5\%$. Во многих рядах на метеостанциях центральной части региона средние значения двух частей статистически различаются и при уровне значимости $\alpha=1\%$.

При анализе рядов апреля выявлено, что средние значения двух частей статистически различаются в 26% случаев. При этом при уровне значимости $\alpha=5\%$ средние статистически различаются в рядах метеостанций северо-востока и юга территории, а в рядах станций на северо-западе на Кольском полуострове и при уровне значимости $\alpha=1\%$.

Для рядов осадков июля статистически значимое различие средних в рядах получено для центральной и юго-западной части рассматриваемого

региона при уровне значимости $\alpha=5\%$, что составляет 21% случаев. Для рядов октябрьских осадков имеет место статистически значимое различие между средними значениями двух частей ряда при уровне значимости $\alpha=1\%$ на северо-западе и северо-востоке рассматриваемого региона.

Кроме того, можно отметить, что коэффициенты корреляции модели тренда при разбиении ряда на две части: с 1960г. до года перехода и после года перехода по 2022г., статистически незначимы для большинства случаев (92%). Значит, в целом, можно принять, что год перехода был определен правильно, и средние значения в двух рассматриваемых частях ряда стационарны. На рис.3.16 показаны случаи рядов наблюдений за осадками со значимым коэффициентом корреляции модели тренда для одной из частей ряда. При этом значимые коэффициенты корреляции для второй части ряда получены для станций Каневка ($R=0,71$ при $R_{\text{крит.}}=0,53$), Кемь ($R=0,59$ при $R_{\text{крит.}}=0,55$), Нарьян-Мар ($R=|0,52|$ при $R_{\text{крит.}}=0,32$), а для первой части ряда на станциях Троицко-Печорск ($R=0,4$ при $R_{\text{крит.}}=0,32$), Реболы ($R=|0,32|$ при $R_{\text{крит.}}=0,28$), Кослан ($R=0,42$ при $R_{\text{крит.}}=0,33$).



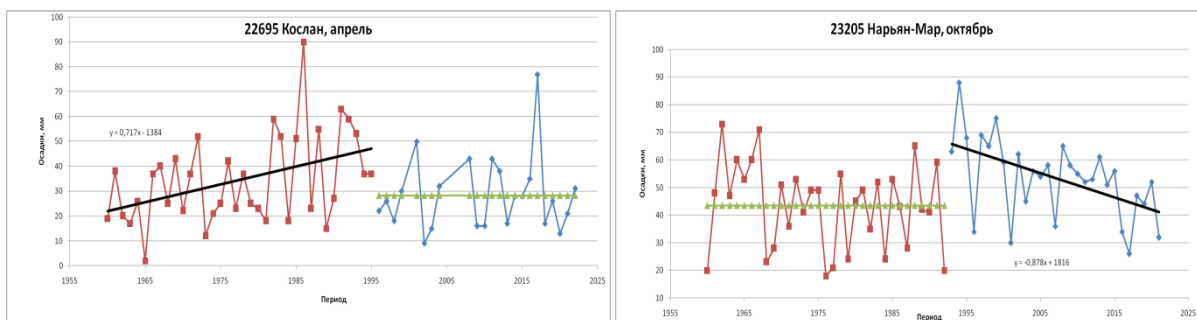


Рис.3.16. Ряды наблюдений за осадками со значимыми коэффициентами корреляции модели тренда для одной из частей ряда при разделении его по году перехода

4. Оценка будущих изменений температуры воздуха на севере ЕТР

4.1 Методика оценки

Важнейшая проблема, возникающая перед человечеством в 21 веке - это проблема оценки изменения будущего климата, которое вызвано антропогенной деятельностью. В качестве воздействий рассматривается сжигание углеродного топлива, приводящее к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере, вырубка лесов, урбанизация, уничтожение растительного покрова, различные виды загрязнения и др.[33].

Такое исследование осуществляется на основе физико-математических моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) с учетом биологических, химических и других факторов. Так, в 1990 г. был запущен международный проект AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), в котором проводится сравнение глобальных моделей общей циркуляции атмосферы (Global Atmospheric General Circulation Models - AGCMs), разработанных различными группами исследователей в разных странах мира, между собой и с данными наблюдений [29,31].

Эксперименты по моделям:

*исторический эксперимент при воспроизведении современного климата

*эксперимент по оценке будущего климата на основе сценариев СДСВ (Специальный доклад о сценариях выбросов) или SRES (Special Report on Emission Scenarios) в проекте CMIP3 или на основе проекций РТК (репрезентативная траектория концентрации) или RCP (Representative Concentration Pathway) в проекте CMIP5 или общие социально-экономические пути (SSP) в проекте CMIP6 [21,23].

Проект CMIP5/6 включает в себя два вида экспериментов по климатическому моделированию: долгосрочное (столетний масштаб) и на ближайшую перспективу (10-30 лет).

Средний сценарий RCP4,5 включает долгосрочные, глобальные выбросы парниковых газов, эмиссию короткоживущих примесей, землепользование и изменение почвенного покрова в глобальном масштабе. По самому благоприятному сценарию RCP2,6 концентрация CO₂ будет такой, что даст добавку радиационного отклика в 2,6 Вт/м² к 2100 году по отношению к доиндустриальным условиям. По самому неблагоприятному сценарию RCP8,5 добавка радиационного отклика к 2100 году будет составлять 8,5 Вт/м² [30].

В настоящее время разработано более 50 физико-математических моделей климата. Расчеты по разным моделям и разным сценариям будущего климата приводят к большому разбросу результатов и неопределенности оценок, диапазон которой становится тем больше, чем дальше продвигаемся в будущее [7,34].

Модели климата плохо воспроизводят локальные особенности климата, обусловленные азональными факторами, т.е. при больших отклонениях от среднеширотных значений.

Поэтому результаты физико-математического моделирования необходимо корректировать с учетом локальных особенностей климата. Аналогичные корректировки необходимо выполнять и для будущих сценарных оценок климата. Для этого производят сравнение тенденций изменения климатических характеристик в настоящем и будущем. Если

принять, что в будущем до конца 21 века имеют место 3 периода по 30 лет, то и в многолетних рядах наблюдений также следует выбрать, по крайней мере, 2 периода такой же продолжительности. В этом случае будут учтены, как результаты оценки изменения современного климата, полученные по статистическим моделям временных рядов, так и результаты физико-математического моделирования в виде будущих сценариев и проекций [4,15].

Выделяются 2 периода времени в прошлом: 1951– 1980 гг. и 1981–2010 гг. и 3 периода времени в будущем: 2011–2040 гг., 2041–2070 гг. и 2071–2100 гг. Производится расчет поправок к результатам физико-математического моделирования метеовеличины как в прошлом, так и в будущем на основе следующих формул. Прежде всего, определяются скорости роста температуры (градиенты) между последовательными средними значениями за периоды в 30 лет по следующим формулам:

$$\Delta 1 = T_{\text{ср2наб}} - T_{\text{ср1наб}}, \quad (4.1)$$

$$\Delta 2 = T_{\text{ср2буд}} - T_{\text{ср1буд}}, \quad (4.2)$$

$$\Delta 3 = T_{\text{ср3буд}} - T_{\text{ср2буд}}, \quad (4.3)$$

$$\Delta \text{ср1} = 1/2(\Delta 3 + \Delta 2), \quad (4.4)$$

$$\Delta \text{ср2} = 1/2(\Delta 1 + \Delta \text{ср1}), \quad (4.5)$$

где $T_{\text{ср1наб}}$, $T_{\text{ср2наб}}$ – средние температуры за два периода наблюдений: 1951–1980 и 1981–2010;

$T_{\text{ср1буд}}$, $T_{\text{ср2буд}}$, $T_{\text{ср3буд}}$ - средние температуры за три периода будущего по моделированию: 2011–2040, 2041– 2070, 2071-2100;

$\Delta \text{ср1}$, $\Delta \text{ср2}$ – средний градиент за будущий сценарный период 2011–2100 гг. и средний градиент по данным наблюдений и сценариям.

Выбирается одна или несколько наиболее подходящих для рассматриваемого региона физико-математических моделей климата на основе сравнения данных наблюдений и результатов исторического эксперимента по моделям климата. Критерием является минимальная средняя по абсолютной величине разность по всем метеостанциям в районе ($\Delta_{\text{ср}}$) между наблюдаемыми и смоделированными средними за выбранные интервалы времени. Несмотря на то, что для выбранной модели климата $\Delta_{\text{ср}}$ является минимальным отклонением, но оно получено в среднем для всех пунктов наблюдений по территории и характеризует средние локальные особенности. В пунктах наблюдений или в отдельных частях района эти отклонения могут быть намного больше и иметь разные знаки. Поэтому необходимо строить пространственное распределение отклонений для всех пунктов наблюдений и оценивать их пространственные закономерности [1].

Корректировка средних сценарных температур за 3 будущих периода 21 столетия осуществляется по формулам:

$$T_{\text{ср корректив(2011-2040)}} = T_{\text{ср2наб}} + \Delta_{\text{ср2}}, \quad (4.6)$$

$$T_{\text{ср корректив(2041-2070)}} = T_{\text{ср корректив(2011-2040)}} + \Delta 2, \quad (4.7)$$

$$T_{\text{ср корректив(2071-2100)}} = T_{\text{ср корректив(2041-2070)}} + \Delta 3, \quad (4.8)$$

где $T_{\text{ср корректив(2011-2040)}}$, $T_{\text{ср корректив(2041-2070)}}$, $T_{\text{ср корректив(2071-2100)}}$ - откорректированные значения будущих сценарных средних температур соответственно за соответствующие периоды.

В результате должны быть получены откорректированные будущие значения климатических характеристик.

Последний этап методики включает в себя построение пространственных распределений будущих климатических характеристик за выбранные отрезки времени до конца 21 столетия по разным сценариям. Полученные пространственные распределения будущих климатических характеристик сравниваются с существующим распределением в

фактических единицах измерения для температуры воздуха (°C) и в % для осадков.

4.2 Выбор эффективной модели

В соответствии с приведенной методикой по результатам исторического эксперимента получены значения отклонений средних многолетних наблюдаемых и смоделированных температур (в °C) для каждой метеостанции, и среднего по модулю отклонения для всего региона по каждой из 15 физико-математических моделей проекта CMIP5 и по каждой из 20 моделей климата проекта CMIP6.

В качестве примера в таблице 4.1. приведены систематические погрешности для 4 моделей (с минимальными, максимальными и средними отклонениями) проектов CMIP5 и CMIP 6 для среднемесячной январской температуры воздуха.

Таблица 4.1

Систематические погрешности моделей проектов CMIP5 и CMIP 6 для
среднемесячной январской температуры воздуха (в °C)

Код	CMIP6				CMIP5			
	CMCC-CM2	BCC-ESM1	CSIRO-ESM1-5	IPSL-CM6A	FIO-ESM	MIROC5	MPI-ESM-MR	INM-CM4
22113	4,4	-15,3	1,2	3,2	-3,7	0,3	2,8	3,2
22165	5,5	-17,5	1,2	0,9	-8,7	-7,6	-0,4	-0,5
22217	-0,9	-12,7	-2,3	-6	-5	-4,2	-2,4	-4,3
22522	1,3	-13,7	-3,2	-5,8	-8,9	-7,5	-4,3	-5,3
22550	-0,6	-10,6	-0,8	-4,3	-6,7	-6,7	-3,7	-5,6
22583	-0,3	-9	0,8	-4,6	-5,5	-6	-1,5	-3,9
22602	0,2	-11,1	-0,4	-5,5	-5,6	-3,7	-2,5	-4,8
22641	1,2	-11,7	-1,4	-4,3	-7	-6,5	-3,7	-6
22820	-1	-11	-0,7	-6,7	-6,3	-4	-3,5	-5,7
22837	-0,3	-9,9	-0,5	-6,5	-5,9	-4,4	-3	-6
22887	-0,6	-8,2	0,7	-5,2	-5,4	-4,9	-2,3	-4,8
23205	1,6	-9,8	3,2	0,2	-5,6	-6,2	-1	-4,5
23219	-0,5	-7,7	-0,2	-3,8	-5,8	-6,9	-1,8	-4,9
23405	-1,6	-8,6	0,9	-5,3	-6,5	-6,5	-2,1	-4,2
23418	-0,5	-7,2	0,4	-3,7	-6	-5,5	-2	-3,9
23711	-1,4	-7	0,7	-5	-6,1	-4,9	-1,6	-4,6
23804	-1,8	-8,1	0,5	-6,4	-6,7	-5,7	-2,9	-5,4
27037	1,1	-7,8	1,1	-5,1	-4,1	-3,7	-2,1	-4,9
27051	0,5	-8,3	0,5	-5,6	-4,5	-4,2	-2,6	-5,4

Ср. по модулю	1,3	10,3	1,1	4,6	6,0	5,2	2,4	4,6
---------------	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

В таблице 4.1 представлены следующие 4 модели проекта CMIP6: CMCC-CM2 – итальянская модель; BCC-ESM – модель пекинского климатического центра, Китай; CSIRO-ESM – модель центра атмосферных исследований Австралии; IPSL-CM6A – французская модель и проекта CMIP5: FIO-ESM – модель института атмосферной физики, Китай; MIROC5 – японская модель; MPI-ESM-MR – модель института Макса Планка, Германия; INM-CM4 – модель института вычислительной математики РАН, Россия.

Для дальнейшего анализа выбрана наиболее эффективная модель CSIRO-ESM1-5, которая имеет наименьшую среднюю систематическую погрешность 1,1° и модель MPI-ESM со средней ошибкой, равной 2,4° (Рис. 4.1).

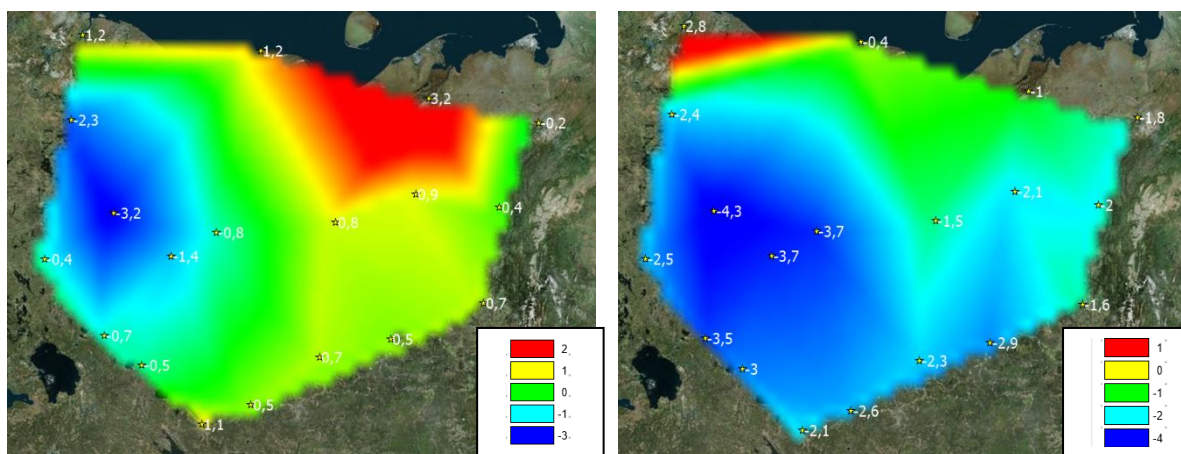


Рис.4.1. Пространственные распределения систематических погрешностей наиболее подходящих моделей климата CSIRO-ESM1-5(слева) и MPI-ESM(справа) для среднемесячной температуры воздуха января

Из Рис.4.1 следует, что австралийская модель CSIRO завышает значения температуры воздуха на 1...3° на северо-востоке региона, с максимумом погрешности, равной 3,2° на станции Нарьян-Мар, но занижает значения на западе региона также на 1...3°, с минимумом на станции Кемь-порт, равным -3,2°. Немецкая модель MPI занижает значения температуры воздуха на всей территории района, за исключением одного пункта на Кольском полуострове. Максимальная погрешность по модулю

наблюдается на метеостанциях побережья Белого моря в 4 □. На метеостанции Мурманск модель завышает значения на 3□.

В таблице 4.2 представлены результаты корректировки будущей январской температуры воздуха по трем сценариям RCP2,6, RCP4,5, RCP8,5 модели CSIRO проекта CMIP6 для 7 метеостанций севера ЕТР, где «Модель» - оценка по модели, «Поправка» - значение поправки, «Корр.зн.» - откорректированное значение.

Таблица 4.2

Результаты корректировки будущей январской температуры воздуха по трем сценариям RCP модели CSIRO-ESM1-5 проекта CMIP6

Код станции		RCP=2,6			RCP=4,5			RCP=8,5		
		2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
22113	Модель	-6,7	-6,7	-5,3	-6,1	-4,7	-3,9	-5,8	-4,8	-1,4
	Поправка	-2,8			-3,2			-2,9		
	Корр.зн.	-9,5	-9,5	-8,1	-9,3	-7,9	-7,1	-8,7	-7,7	-4,3
22165	Модель	-2,8	-2,3	-0,8	-2,3	-0,6	0,2	-2	-0,3	2,1
	Поправка	-4,9			-5,2			-5,1		
	Корр. зн.	-7,7	-7,2	-5,7	-7,5	-5,8	-5	-7,1	-5,4	-3
22217	Модель	-12,4	-11,9	-10,3	-11,4	-9,2	-8	-11,1	-9,4	-4,8
	Поправка	0,9			0,3			0,7		
	Корр. зн.	-11,5	-11	-9,4	-11,2	-9	-7,8	-10,4	-8,7	-4,1
22522	Модель	-11	-10,8	-9	-10,1	-8	-7,1	-10,2	-8,1	-3,7
	Поправка	1,6			1			1,9		
	Корр. зн.	-9,4	-9,2	-7,4	-9,2	-7,1	-6,1	-8,3	-6,2	-1,8
22550	Модель	-10,6	-10,5	-8,9	-9,7	-7,8	-7,4	-10,1	-8	-3,9
	Поправка	-1,3			-2,1			-0,7		
	Корр. зн.	-11,9	-11,8	-10,2	-11,8	-9,9	-9,5	-10,8	-8,7	-4,6
22583	Модель	-12,5	-12,4	-11,1	-11,8	-9,7	-9,4	-11,7	-10,1	-5,9
	Поправка	-3,3			-3,8			-3		
	Корр. зн.	-15,8	-15,7	-14,4	-15,6	-13,5	-13,2	-14,7	-13,1	-8,9
22602	Модель	-9,5	-9,1	-7,3	-8,6	-6,6	-5,8	-8,7	-6,6	-2,3
	Поправка	-0,6			-1,3			-0,3		
	Корр. зн.	-10,1	-9,7	-7,9	-9,9	-7,9	-7,1	-9	-6,9	-2,6
22641	Модель	-10,1	-10	-8,3	-9,2	-7,3	-6,6	-9,5	-7,3	-3,3
	Поправка	-0,45			-1,2			0,05		
	Корр. зн.	-10,6	-10,5	-8,8	-10,4	-8,5	-7,8	-9,5	-7,3	-3,3

На Рис.4.2 представлена графическая интерпретация корректировки сценарных оценок температуры воздуха для метеостанции Котлас по трем сценариям RCP2,6/4,5/8,5 Вт/м² для модели CSIRO проекта CMIP6.

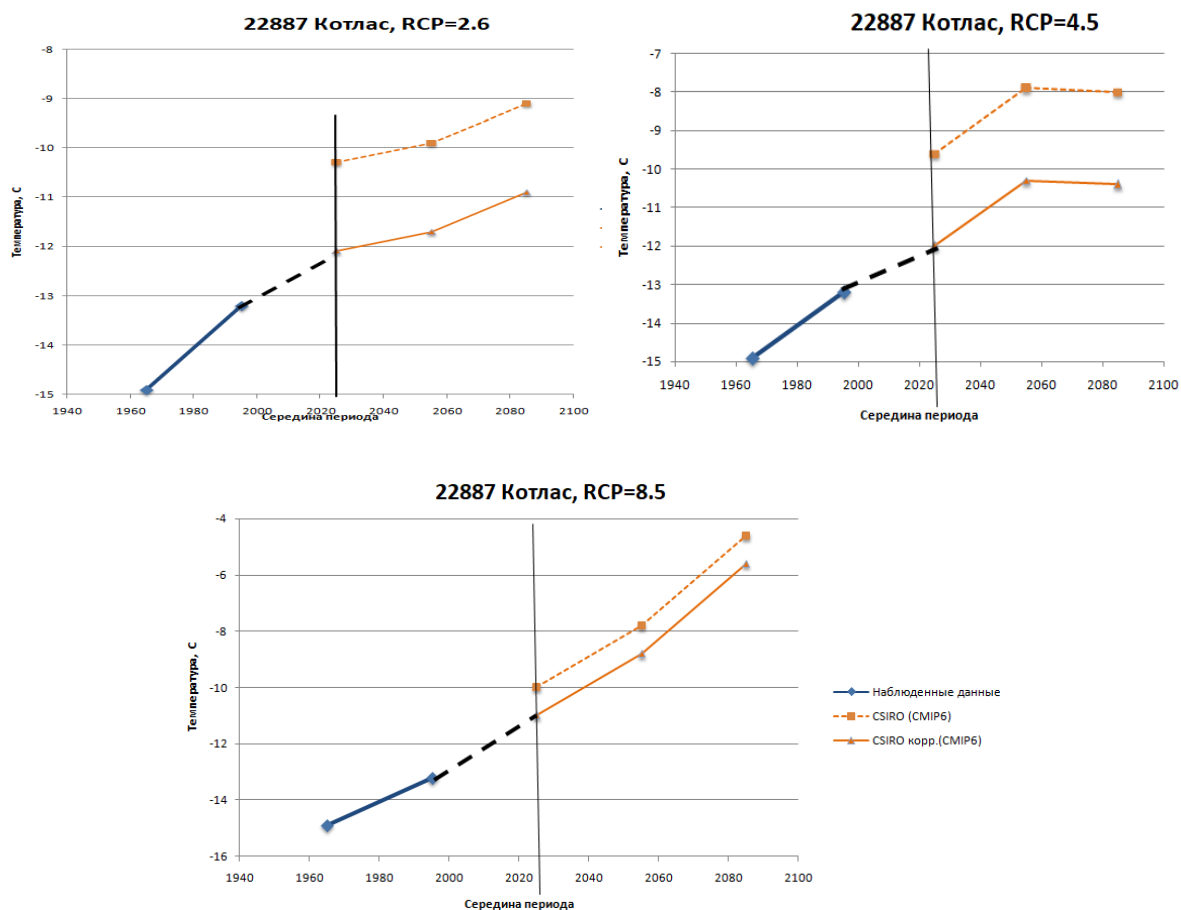


Рис.4.2. Пример корректировки сценарных будущих оценок средней январской температуры воздуха для метеостанции Котлас

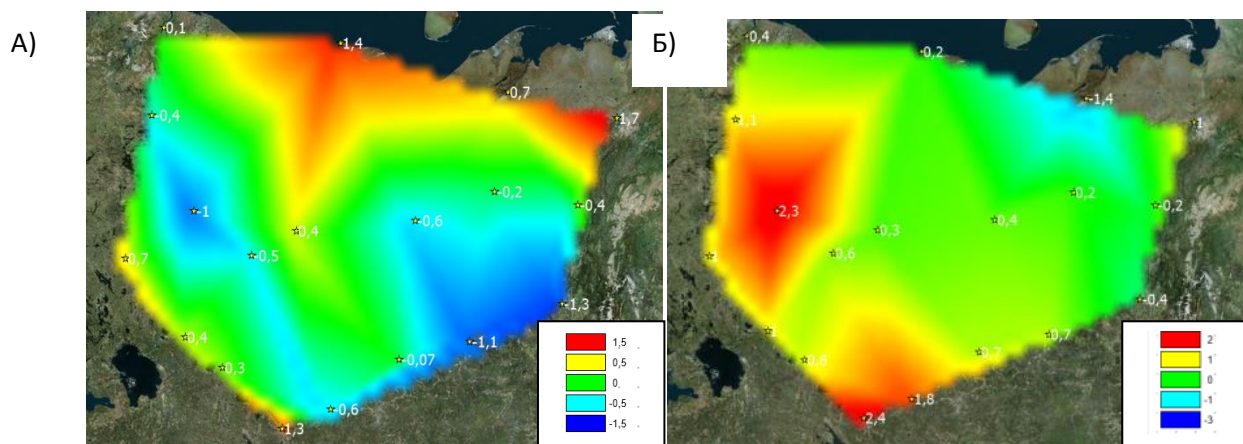
Был осуществлен выбор наиболее подходящих моделей проектов CMIP5 и CMIP6 для среднемесячных температур воздуха апреля, июля и октября на основе результатов исторического эксперимента для этих месяцев. Принцип выбора – наименьшая средняя по модулю погрешность по территории, полученная путем сравнения модельных значений и данных наблюдений. Результаты выбора наиболее подходящих моделей обоих проектов представлены в Табл.4.3., где наилучшие модели обозначены красным цветом.

Таблица 4.3

Систематические погрешности физико-математических моделей климата проектов CMIP5 и CMIP6 для среднемесячной температуры воздуха апреля, июля, октября (°C)

	Месяц	Апрель		Июль		Октябрь	
Код	Название	CSIRO CMIP6	MPI CMIP5	MIROC6 CMIP6	MPI CMIP5	MIROC6 CMIP6	MPI CMIP5
22113	Мурманск	0,3	0,1	0,4	-3,4	-0,2	0,7
22165	Канин Нос	1,2	1,4	0,2	-1,6	0,9	-1,3
22217	Кандалакша	0,7	-0,4	1,1	-1,5	-0,5	-1,4
22522	Кемь-Порт	1,1	-1	2,3	-1,2	-0,6	-1,1
22550	Архангельск	1,5	0,4	0,3	-0,8	-0,4	-0,7
22583	Койнас	0,5	-0,6	0,4	-1,2	-0,8	-1,1
22602	Реболы	0,9	0,7	1	-1	-0,3	-1,5
22641	Онега	0,6	-0,5	0,6	-1,1	-0,5	-1,4
22820	Петрозаводск	0,4	0,4	1	-1,1	-0,2	-1
22837	Вытегра	0,2	0,3	0,8	-0,9	0,3	-0,9
22887	Котлас	-0,08	-0,07	0,7	-1,1	-0,5	0,2
23205	Нарьян-Мар	2,3	0,7	-1,4	-3,5	0,1	-0,04
23219	Хоседа-Хард	3,2	1,7	1	-1,5	-1,1	-0,6
23405	Усть-Цильма	1,4	-0,2	0,2	-0,7	-0,8	-1
23418	Печора	1,2	-0,4	-0,2	-1,8	-1,7	-0,7
23711	Троицко-Печорск	-0,09	-1,3	-0,4	-1,7	-1	-0,8
23804	Сыктывкар	-0,2	-1,1	0,7	-1,5	-0,5	-0,06
27037	Вологда	0,8	1,3	2,4	-0,4	1	-0,5
27051	Тотьма	0,2	-0,6	1,8	-0,9	0,5	0,82
	Среднее	0,89	0,69	0,89	1,42	0,63	0,54

Из Табл.4.3 следует, что осредненные по пространству систематические погрешности моделей двух проектов близки друг к другу в апреле и октябре, и разница между моделями не превышает 0,2°C. На Рис.4.3 представлены пространственные распределения систематических погрешностей выбранных наиболее подходящих моделей. Для температур апреля наиболее подходящей является немецкая модель MPI проекта CMIP5, для температур июля и октября - японская модель проекта CMIP6.



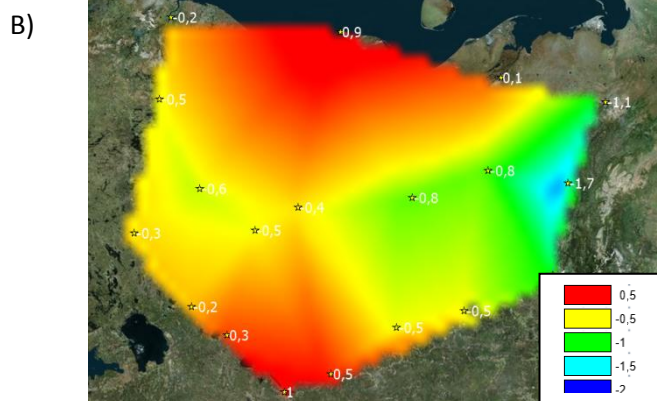


Рис.4.3. Пространственные распределения систематических погрешностей выбранных наиболее подходящих моделей А)MPI(апрель), Б)MIROC6(июль) и В)MIROC6(октябрь) для среднемесячной температуры воздуха в °С.

Из Рис.4.3 следует, что для апреля немецкая модель MPI завышает значения температуры на севере региона, с максимумом $1,7^{\circ}\text{C}$ на станции Хоседа-Хард. Но занижает значения на юго-востоке региона на метеостанциях Усть-Кулом, Троицко-Печорск на $1,3^{\circ}\text{C}$ и на побережье Белого моря на станции Кемь на $1,4^{\circ}\text{C}$. Для июля японская модель MIROC6 занижает значения температуры на северо-востоке региона на станции Нарьян-Мар (на $1,4^{\circ}\text{C}$) и завышает значения на $2,3^{\circ}\text{C}$ на побережье Белого моря и на юге на станции Вологда (на $2,4^{\circ}\text{C}$). Для октября японская модель MIROC6 занижает наблюдаемые значения на востоке региона на $1,7^{\circ}\text{C}$ на станции Печора. На остальной территории систематическая погрешность не превышает $0,8^{\circ}\text{C}$ по модулю.

4.3 Полученные результаты

Результаты оценки будущей среднемесячной температуры воздуха каждого исследуемого месяца получены для каждой из 19 метеостанций для выполнения надежной пространственной интерполяции. На рисунке 4.4 приведены карты пространственных распределений сценарных

среднемесячных январских температур воздуха по 30-летним периодам для модели CSIRO и трем сценариям RCP2,6/4,5/8,5 Вт/м².

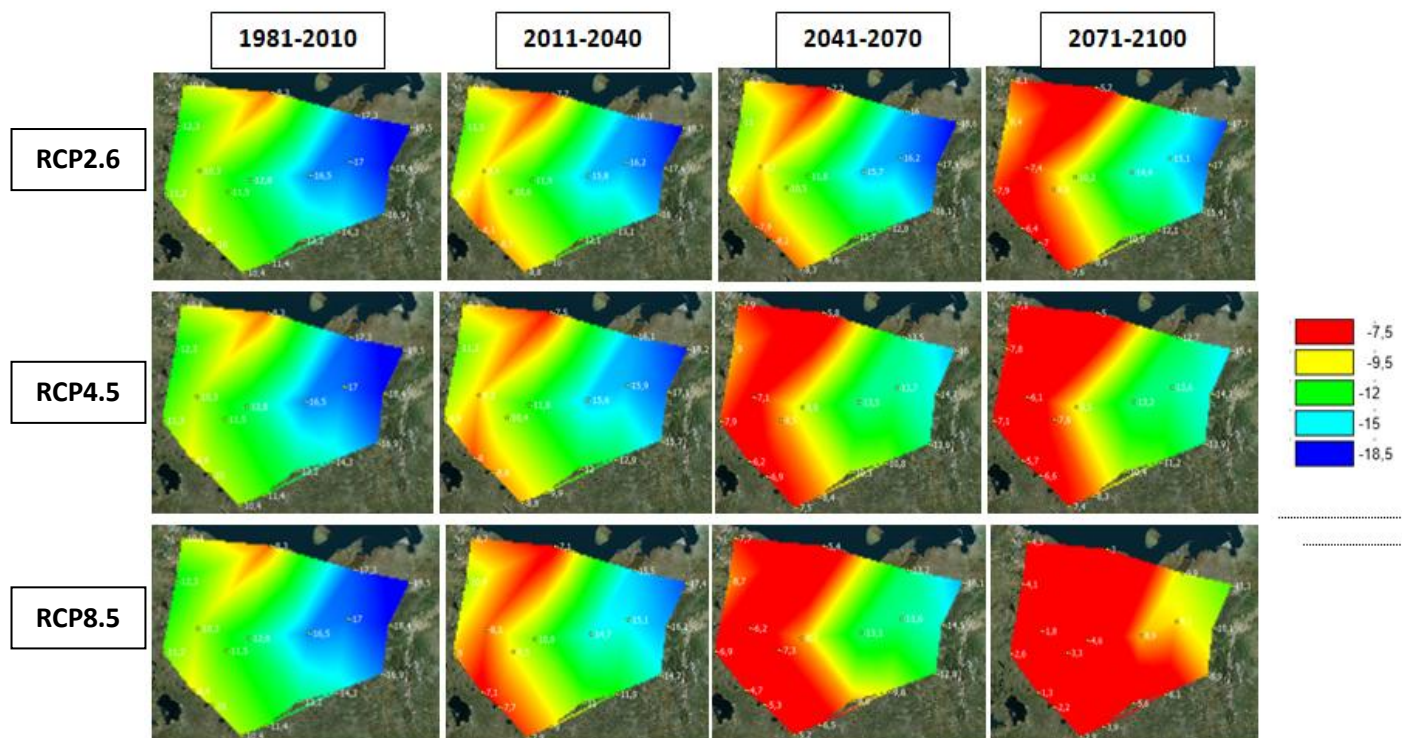


Рис.4.4. Пространственные распределения современных и сценарных температур воздуха января для севера ЕТР по модели CSIRO и сценариям RCP2,6/4,5/8,5 Вт/м²

Как видно из Рис.4.4, в настоящее время наибольшие температуры воздуха имеют место на побережье Северного Ледовитого океана на метеостанции Канин Нос и равны -8,3°C. Минимальные температуры воздуха наблюдаются на восточных станциях региона, таких как Печора и Хоседа-Хард и составляют -18,4°C и -19,5°C. В современный период (1991-2020гг.) средняя по территории многолетняя температура января составляет -12,4°C.

По благоприятному сценарию RCP2,6 область, на которой имеет место самая высокая современная среднемесячная январская температура (-8,5°C), будет постепенно расширяться от современной в северо-западной части региона на юг, и к концу 21 столетия эта область будет занимать всю западную часть севера ЕТР. По сравнению с современной температурой воздуха рост составит 1,5-3°C по территории. Например, наибольшие

современные температуры воздуха на севере рассматриваемого района на станции Канин Нос вырастут с современных $-8,3^{\circ}\text{C}$ до -6°C в последней трети 21 века.

По среднему сценарию RCP4,5 область с температурой выше $-8,5^{\circ}\text{C}$ будет постепенно расширяться от современной на севере к югу, аналогично пространственному распределению по сценарию RCP 2,6, и уже к середине 21 столетия эта область будет занимать такую же площадь, как в последний период (2071-2100гг.) в благоприятном сценарии RCP 2,6. К концу 21 века данная зона будет занимать около половины севера ЕТР. Рост по территории по сравнению с современными значениями составит $3-5^{\circ}\text{C}$.

По неблагоприятному сценарию RCP8,5 уже к середине этого столетия на более чем половине севера ЕТР температура превысит $-8,5^{\circ}\text{C}$ с максимумами около -5°C на юге на станциях Вологда, Вытегра, а в последний 30-летний период 21 столетия небольшая область со среднемесячной многолетней температурой, равной $-11,1^{\circ}\text{C}$ останется только на востоке региона на станциях Хоседа-Хард, Печора, на всей остальной территории температуры будут в пределах $-1,5 \dots -6,5^{\circ}\text{C}$. Рост по территории по сравнению с современными значениями составит $5-8^{\circ}\text{C}$.

После проведенной корректировки сценарных оценок апрельской температуры воздуха были построены их пространственные распределения по 30-летним периодам для модели MPI и по трем сценариям RCP2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м², которые представлены на рисунке 4.5.

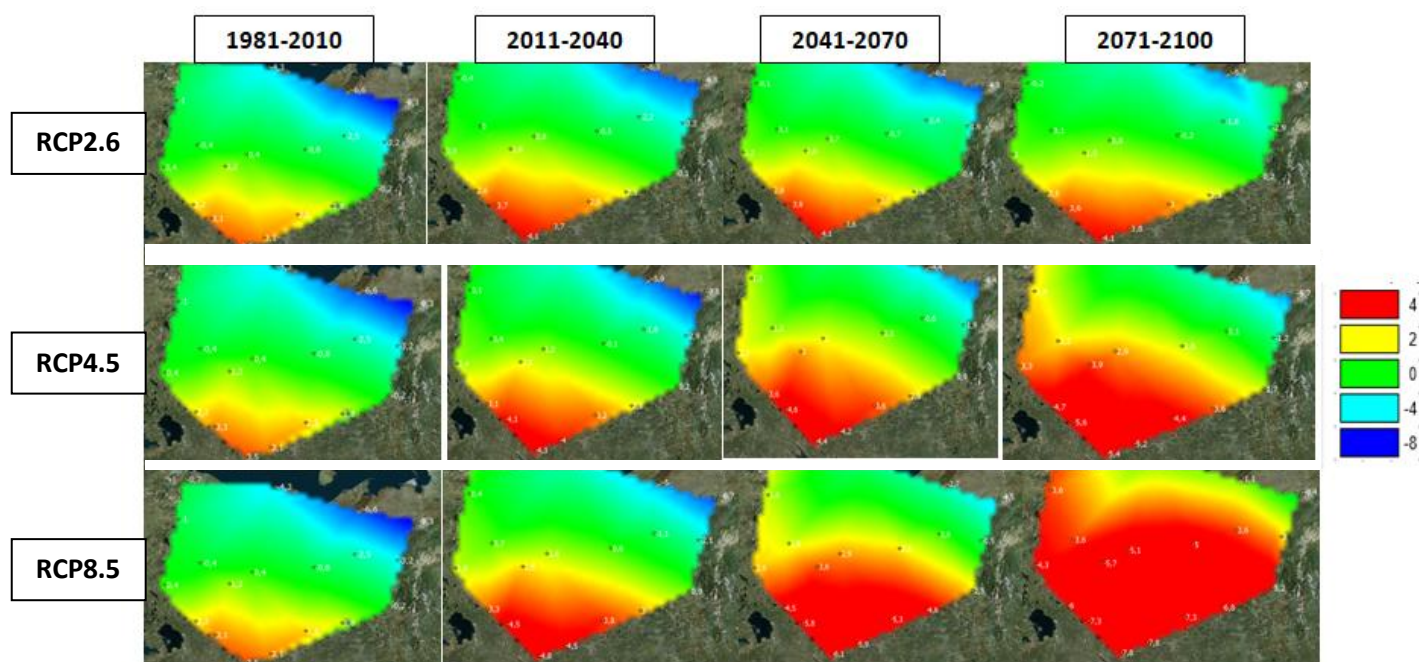


Рис.4.5. Пространственные распределения современных и сценарных температур воздуха апреля на севере ЕТР по модели МРІ и трем сценариям RCP

Как видно из Рис.4.5, в настоящее время имеет место зональное распределение среднемесячной апрельской температуры с максимумом на юге на станции Вологда ($3,5^{\circ}\text{C}$) и с минимумами на северо-востоке: станции Нарьян-Мар ($-6,6^{\circ}\text{C}$), Хоседа-Хард ($-7,3^{\circ}\text{C}$) при пространственном градиенте $10,8^{\circ}\text{C}$.

Согласно сценарию (траектории) RCP2,6 область с температурой выше $+3,5^{\circ}\text{C}$, которая в настоящий момент наблюдается только на одной метеостанции в южной части, будет постепенно расширяться на север и к концу 21 столетия будет занимать уже 20% всей территории, а температур ниже $-5,8^{\circ}\text{C}$ уже не будет наблюдаться. Предельные температуры по северу ЕТР к концу 21 столетия составят: минимум $-5,8^{\circ}\text{C}$ (Хоседа-Хард) и максимум $+5,8^{\circ}\text{C}$ (Вологда), что дает практически такой же пространственный градиент равный $11,6^{\circ}\text{C}$ и увеличение температуры за 21 столетие от $0,8^{\circ}\text{C}$ до $3,0^{\circ}\text{C}$.

При среднем сценарии RCP4,5 область с температурой выше $+3,5^{\circ}\text{C}$ к концу 21 века будет занимать уже всю южную половину территории, а на севере территории самые низкие температуры будут равны $-4,2^{\circ}\text{C}$ (Хоседа-Хард). При этом максимум температур по территории составит $+6,7^{\circ}\text{C}$ (Вологда) и пространственный градиент температур составит $10,9^{\circ}\text{C}$. Повышение температур апреля к концу 21 века по сравнению с современными температурами составит от $1,8^{\circ}\text{C}$ до $3,5^{\circ}\text{C}$.

При наиболее неблагоприятном сценарии RCP8,5 область с температурой выше $+3,5^{\circ}\text{C}$ к концу 21 века будет занимать практически всю территорию и минимальные температуры на северо-востоке составят $-1,3^{\circ}\text{C}$ (Хоседа-Хард), а максимальные на юге - $+9,6^{\circ}\text{C}$ (Вологда). Пространственный градиент температур будет практически таким же, как и в других сценариях и равный $10,9^{\circ}\text{C}$, а рост температур за 21 столетие составит от $4,3^{\circ}\text{C}$ (Усть-Цильма) до $6,3^{\circ}\text{C}$ (Вытегра).

На рисунке 4.6 показаны пространственные распределения сценарных среднемесячных июльских температур воздуха по 30-летним периодам для модели MIROC6 и трем траекториям RCP.

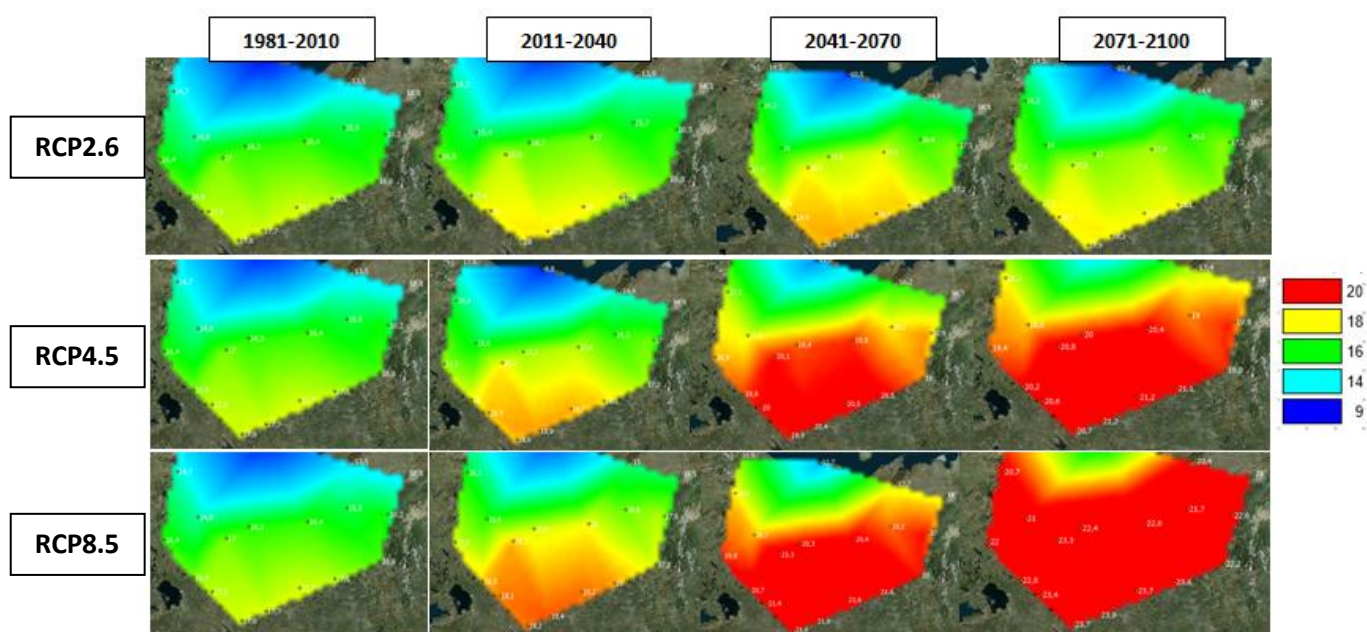


Рис.4.6. Пространственные распределения современных и сценарных температур воздуха июля на севере ЕТР по модели MIROC6 и трем траекториям RCP

В современный период (1991-2020гг.) средняя по площади многолетняя температура июля составляет 16°C , с максимумами на юге региона, равными $17,6^{\circ}\text{C}$.

Как видно из Рис.4.6, согласно траектории RCP2,6 область с температурой выше $17,5^{\circ}\text{C}$ на юге будет незначительно расширяться на север и к концу 21 века рост температуры будет составлять $1-2^{\circ}\text{C}$ по всей территории.

При среднем сценарии RCP4,5 область с температурой выше $17,5^{\circ}\text{C}$ будет постепенно расширяться от современной на юге к центральной и уже к середине 21 века будет занимать половину площади севера европейской территории России. К концу столетия эта область будет занимать более половины территории и рост температуры по всей территории составит $2-4^{\circ}\text{C}$.

По траектории RCP8,5 уже к середине этого столетия на более чем половине севера ЕТР температура превысит $17,5^{\circ}\text{C}$ с максимумами $21,9^{\circ}\text{C}$ на юге. В последней трети столетия останется только область на побережье Баренцева моря с температурой, равной $14,7^{\circ}\text{C}$, а на всей остальной территории температуры будут в пределах $20...23^{\circ}\text{C}$. Рост по сравнению с современными температурами составит по территории $5...8^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 4.7. показаны пространственные распределения сценарных среднемесячных октябрьских температур воздуха по 30-летним периодам для модели MIROC6 и трем траекториям RCP2,6, RCP4,5 и RCP8,5 Вт/м².

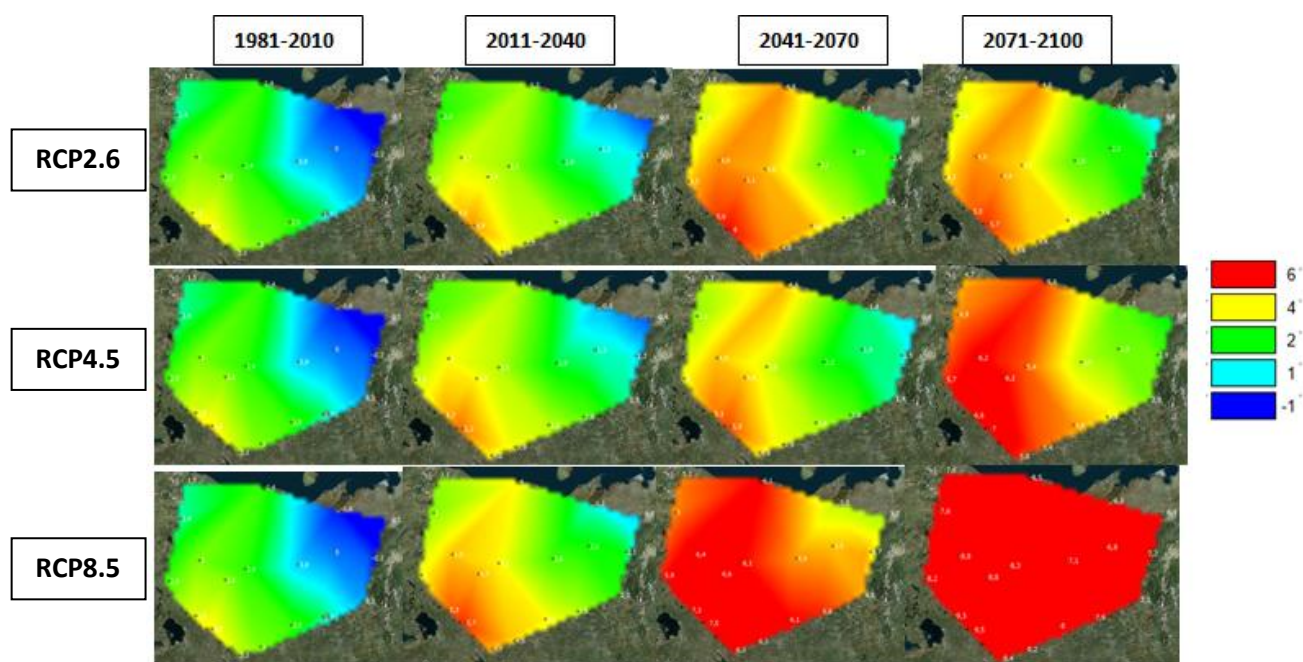


Рис.4.7. Пространственные распределения современных и сценарных температур воздуха октября для севера ЕТР по модели MIROC6 и трем траекториям RCP

Как видно из Рис.4.7, согласно траектории RCP2,6 область, на которой имеет место самая высокая современная температура октября (около $+4^{\circ}\text{C}$) на юго-западе, будет расширяться на север и к концу 21 века рост температуры воздуха по сравнению с современным периодом будет составлять $1-2^{\circ}\text{C}$ по территории, а область с температурой выше $+4^{\circ}\text{C}$ будет занимать чуть меньше половины севера ЕТР.

При средней траектории RCP4,5 область с температурой выше $+4^{\circ}\text{C}$ будет постепенно расширяться от современной на юго-западе к центральной и северной частям рассматриваемого региона. К концу 21 столетия данная область будет занимать более половины территории, рост по сравнению с современными значениями составит по территории $3-6^{\circ}\text{C}$.

По траектории RCP8,5 уже к середине этого столетия на более чем половине территории Севера ЕТР температура превысит $+4^{\circ}\text{C}$ с максимумами $7,5^{\circ}\text{C}$ на юге. В последней трети 21 столетия на всей

рассматриваемой территории температуры составят +6... 10°C. Рост по сравнению с современными значениями составит по территории 5-9°C.

5. Оценка будущих изменений осадков на севере ЕТР

5.1 Выбор эффективной модели

В соответствии с приведенной методикой получены относительные разности смоделированных и наблюдаемых средних многолетних значений осадков (в %) для каждой из 38 метеостанций и в среднем по региону по каждой из 10 физико-математическим моделям проекта СМIP5 и по каждой 17 моделям климата проекта СМIP6. Для каждого исследуемого месяца выбраны наиболее подходящие модели с наименьшей средней систематической погрешностью (в %). Полученные результаты для сумм осадков за характерные месяцы сезонов года приведены в таблице 5.1 для наиболее подходящих моделей проектов СМIP5 и СМIP6.

Таблица 5.1

Систематические относительные погрешности выбранных наиболее подходящие модели проектов СМIP5, СМIP6 для осадков января, апреля, июля и октября (в %)

Исследуемый месяц		Январь		Апрель		Июль		Октябрь	
Проект		СМIP5	СМIP6	СМIP5	СМIP6	СМIP5	СМIP6	СМIP5	СМIP6
Код	Наилучшая модель /Название	CanESM	MIROC6	CanESM	MIROC6	CanESM	MIROC6	CanESM	MIROC6
22101	Янискоски	3,1	22,4	3,4	34,7	-0,2	-1,7	21,5	29,3
22113	Мурманск	7,4	23,2	41,7	76,2	-26,2	-16,4	12,1	22,7
22165	Канин нос	-26,4	-10,7	54	67,7	-12,1	8,2	19,3	24,3
22204	Ковдор	-10,5	4,2	-8,7	27,5	4,1	-23,5	2,5	11
22212	Мончегорск	21,8	34,6	19,2	63,2	-12,7	-16,1	41,5	55
22217	Кандалакша	26	2,1	39,2	60,3	17,7	-16,8	34,4	27
22235	Краснощелье	4,5	-1,5	11,6	29,7	-18	-26,8	16,1	15,1
22249	Каневка	19,9	24,7	28,5	48,8	-23,5	-20,2	20,4	22,8
22408	Калевала	44,5	14,4	25,8	49,5	13	-12,7	32,5	28,7
22522	Кемь-Порт	75,2	59,7	58	67,6	72,3	-3,6	31,4	31,9
22529	Колежда	73,7	34,3	31,4	50,7	27,3	-6,1	7,2	1,6
22550	Архангельск	13,1	-6,1	19,3	29,5	-7,8	-18	12,9	-1,7
22583	Койнас	-2,5	-19,3	-15,4	13,9	-22,7	-8,3	13	2,4
22602	Реболы	36,3	7,1	13,6	33,6	8,8	-7,3	20,5	13,4

22621	Сегежа	7,7	-13,2	-16	0,6	28,6	-6,4	-12,3	-11,7
22641	Онега	8,8	-4,6	7,9	35,6	2,6	-15,5	0,6	-5
22676	Сура	18,2	0,7	-0,09	37,2	-18,1	-8,9	23,9	14,3
22695	Кослан	18,6	3	-1,3	46,7	-2,1	12,5	10,3	7,8
22768	Шенкурск	30,4	6,6	4	26,6	-11,8	0,9	23,1	21
22820	Петрозаводск	71,6	19,7	20,2	38,3	-9,3	-26,8	42,4	18,4
22831	Пудож	-2,8	-22,3	-14,7	14,1	-10,8	-15,9	-6,4	-14,7
22837	Вытегра	31,9	-2,9	19,1	23,6	-19,5	-25,9	4,1	-11
22854	Няндом	-5,5	-12,6	-19	11,4	-17,2	-0,2	-3,6	-8,4
22887	Котлас	40,3	13,5	1,7	44	-23,4	-0,5	32,2	25
22939	Белозерск	98,5	63,2	27,3	75,5	-26	-10,9	56,3	36,4
23205	Нарьян-Мар	-1,7	-4,5	3,1	27,5	-31,1	-11,2	5,8	3,5
23207	Коткино	2,8	-0,8	16,2	63,9	-31,5	-10	10,2	3
23219	Хоседа-Хард	-5	-1,2	33,9	75,9	-11,8	11,1	3,5	5,1
23405	Усть-Цильма	1,7	-10,7	8	36,2	-10	-1,9	6	4,7
23412	Усть-Уса	-9,6	-10,8	8,3	42,4	-4,1	8,2	2	3,7
23418	Печора	-22,9	-25	-3	25,8	-1,1	5,1	-1	0,7
23514	Ираель	-26,6	-25	-23,6	6,4	-10,1	-8,2	-9,7	-12,3
23711	Троицко-Печорск	-3,6	-15,8	10,6	31,5	-22,7	5,3	5,6	12,5
23803	Усть-Кулом	-8,9	-18,6	2,3	52	-25	14,6	8	15,7
23804	Сыктывкар	21,2	4,3	4,4	50,4	-28	1,2	8,7	18,6
27037	Вологда	55,9	23,4	11,4	38,7	-23,7	-5,8	34,1	24,5
27051	Тотьма	24	-1,7	6,5	28,1	-34,2	-4,6	14,7	9,7
27066	Никольск	29,5	8,3	3	35	-35,1	-6,2	18,6	16,6
Сред. модуль		25	15.2	16.7	40	18.5	10.6	16.5	15.6

В Табл.5.1. представлены выбранные модели: японская модель MIROC6 проекта CMIP6 и канадская модель CanESM2 проекта CMIP5 (модель канадского центра моделирования и анализа климата). Из таблицы 5.1 следует, что средняя систематическая погрешность моделирования в среднем по всем месяцам равна 18%. Японская модель проекта CMIP6 имеет меньшую погрешность, по сравнению с канадской моделью проекта CMIP5 для всех месяцев, кроме апреля, где её средняя систематическая погрешность получилась больше в 2 раза. Для октября модели имеют одинаковую среднюю погрешность, равную 16%. В июле японская модель имеет среднюю ошибку в 1,5 раза меньше. В результате для осадков января, июля и октября была выбрана японская модель, а для осадков апреля – канадская модель.

На Рис.5.1 представлены пространственные распределения систематических погрешностей выбранных физико-математических моделей.

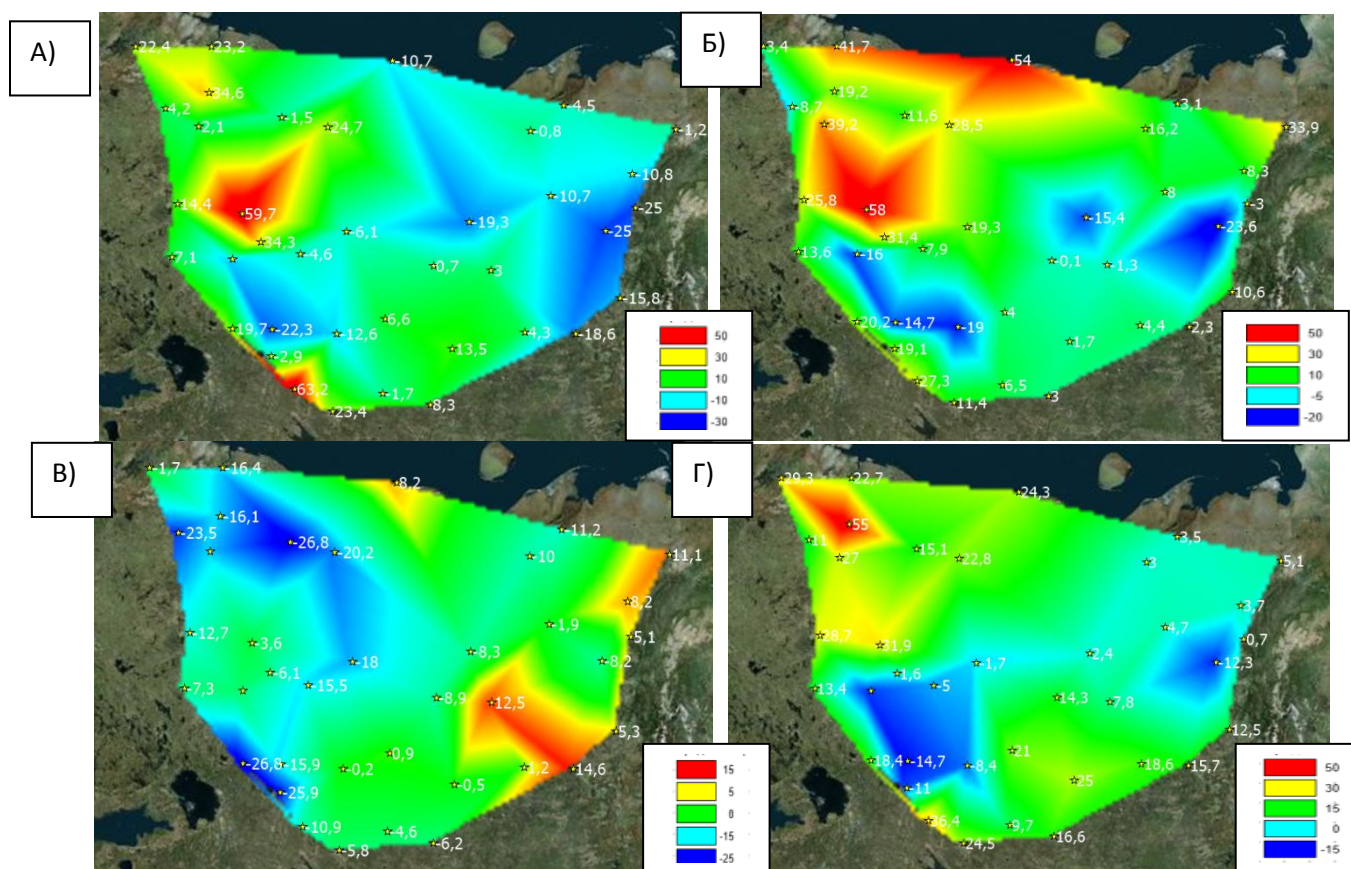


Рис.5.1 Пространственные распределения систематических погрешностей модели MIROC6 для осадков января(А), июля(В), октября(Г) и модели CanESM для осадков апреля (Б)

Из Рис.5.1 следует, что для января японская модель MIROC завышает значения сумм осадков до 60% на побережье Белого моря на метеостанции Кемь-порт (на 59%) и на юге-западе района на станции Белозерск (на 63,2%), но занижает значения на востоке региона с наибольшим отклонением на станциях Печора, Ираэль, равным -25%.

Для апреля канадская модель завышает значения сумм осадков до 55% на всем побережье Белого и Баренцева моря, на станциях Канин Нос (54%), Кемь (58%), но занижает значения осадков на юго-востоке региона на станциях Ираэль (-20,6%), Койнас (-15,8%). Также модель занижает значения

на юго-западе территории на станциях Петрозаводск (-14,7%), Сегежа (-19,8%).

Для июля имеет место меридиональное распределение систематической ошибки. На западе японская модель MIROC занижает значения сумм осадков до -25% с минимумами на Кольском полуострове на метеостанциях Мончегорск (-23,5%), Краснощелье (-26,8%) и на юго-западе на станции Петрозаводск (-26,8%). На востоке модель завышает осадки до +15% с максимумами на станциях Усть-Кулом (+14,6%), Кослан (+12,5%).

Для октября японская модель MIROC завышает значения осадков на севере региона до 55% на станции Мончегорск и занижает значения сумм осадков до -15% на юго-западе с наибольшим занижением на станции Петрозаводск (-14,7%).

5.2 Результаты оценки будущих изменений

После проведения корректировки сценарных оценок осадков получены их пространственные распределения в % от современных (1991-2020 гг.) по выбранным наиболее подходящим моделям двух проектов CMIP5/6 и сценариям RCP2,6, RCP4,5 и RCP8,5 Вт/м². Результаты оценки будущих осадков получены для каждой из 38 метеостанций для выполнения надежной пространственной интерполяции.

На Рис.5.2 приведены карты пространственных распределений будущих апрельских сумм осадков по 30-летним периодам для модели CanESM и трех траекторий RCP2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м².

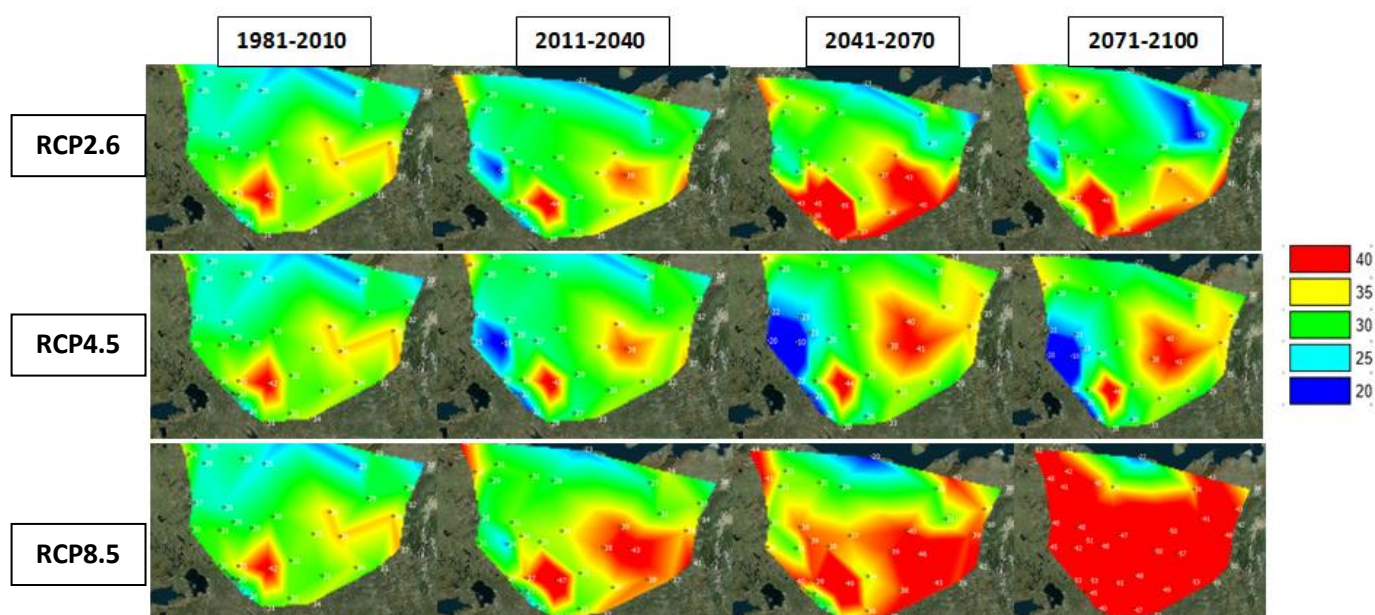


Рис. 5.2. Пространственные распределения современных и сценарных апрельских сумм осадков на севере ЕТР для модели CanESM и траекториям RCP2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м² в мм

На Рис.5.3 приведены карты пространственных распределений сценарных апрельских осадков в % от современных (1991-2020гг.) по 30-летним периодам для модели CanESM и трех сценариев RCP 2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м².

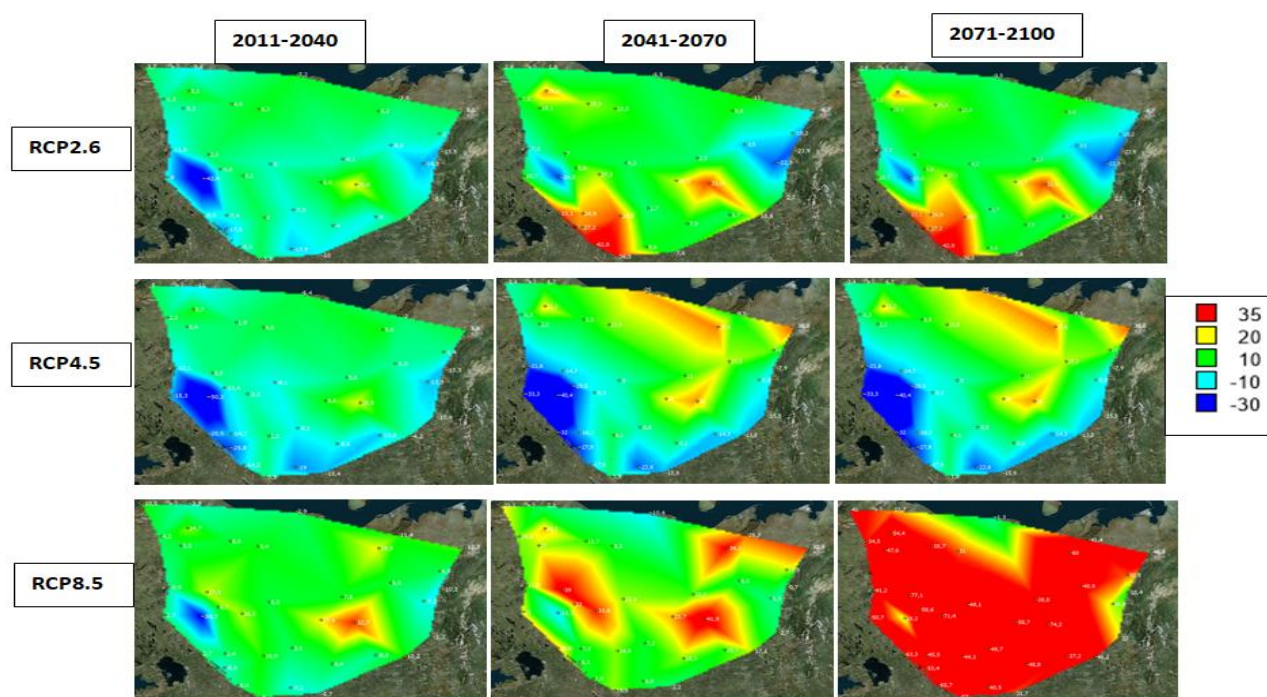


Рис.5.3. Пространственные распределения сценарных апрельских осадков в % от современных (1991-2020гг.) по 30-летним периодам для модели CanESM и трех сценариев RCP 2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м²

Как следует из рис.5.2 по сценарию RCP 2.6, локальная область обильных осадков более 35 мм на юге территории (максимум 42 мм на метеостанции Няндомы) будет увеличиваться и достигнет своего максимума (до 20% от всей территории) во 2-ой трети 21 века и затем несколько уменьшится. По сценарию RCP4.5 область осадков более 35 мм будет распространяться на восток, занимая до 25% всей площади, а по сценарию RCP8.5 к концу 21 века займет практически всю территорию с максимумами осадков 50-55 мм. Минимальные значения осадков апреля, которые в настоящее время составляют 22,5 мм по территории (метеостанции Хоседа-Хард и Канин Нос) в будущем будут меньше по сценарию RCP 4.5 (15 мм) и больше по сценарию RCP8.5 с минимумом 23 мм только на одной метеостанции. Поэтому есть вероятность, что в будущем максимумы осадков апреля будут увеличиваться, а минимумы останутся практически без изменений.

Из рис.5.3 видно, что изменения осадков по сравнению с современными составляют до 30-40% как в случае роста, так и уменьшения осадков. Если считать, что изменения осадков менее 15-20% не являются статистически значимыми в виду их большой естественной изменчивости, то можно сделать вывод, что значимый рост осадков к концу 21 века имеет место только для сценария RCP 8.5 практически для всей территории и частично для сценария RCP4.5, где рост наблюдается на северо-востоке. Существенное уменьшение осадков в локальной области на юго-западе до 20-30% наблюдается только по сценарию RCP4.5.

На Рис.5.4 приведены карты пространственных распределений сценарных июльских осадков в % от современных (1991-2020 гг.) (А) и пространственные распределения современных и сценарных июльских сумм

осадков (Б) для севера ЕТР по 30-летним периодам для модели MIROC6 и трех сценариев RCP 2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м².

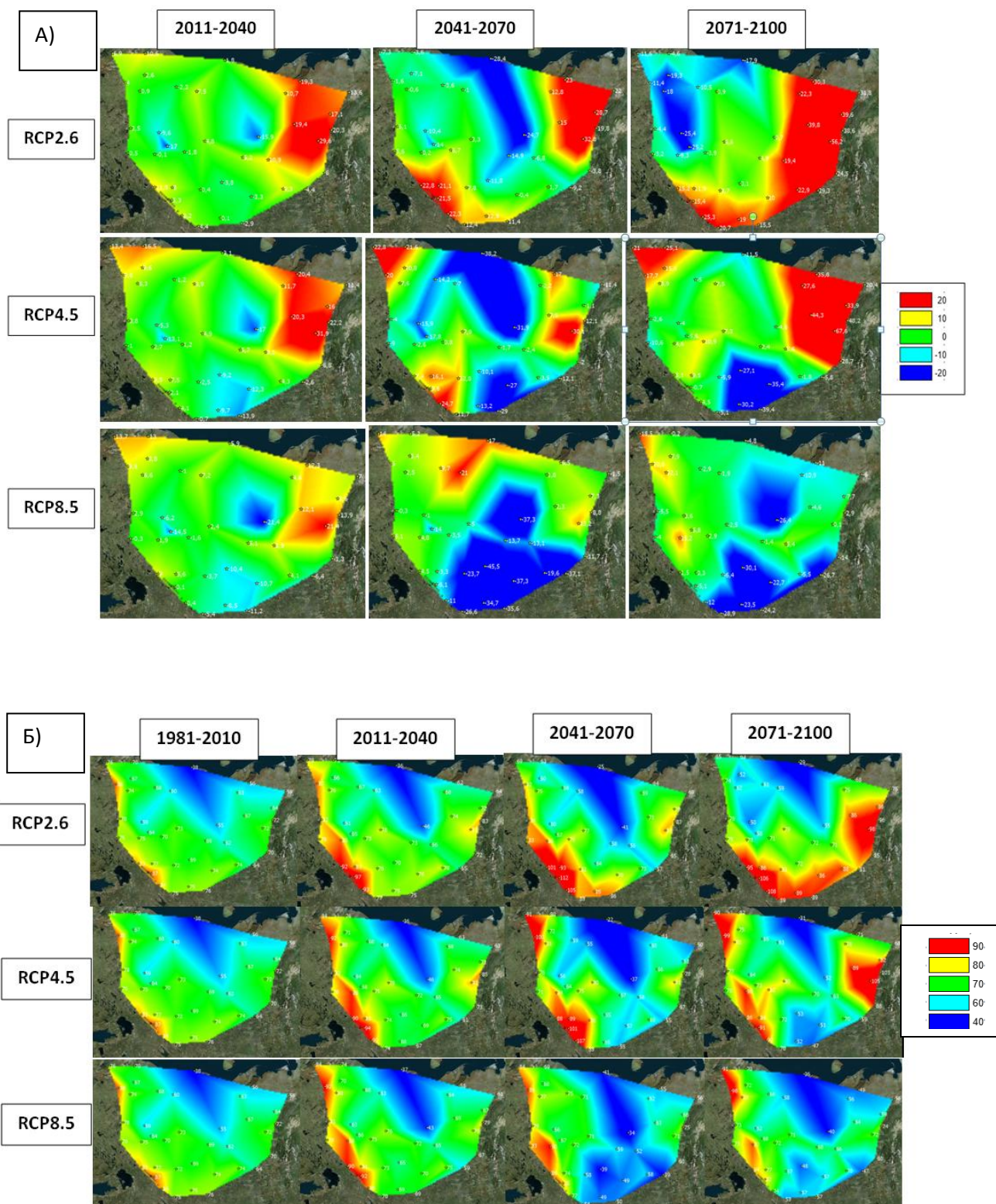


Рис.5.4. Пространственные распределения сценарных осадков июля в % от современного периода (1991-2020 гг.) (А) и пространственные распределения

современных и сценарных июльских сумм осадков (Б) для севера ЕТР по модели MIROC6 и по сценариям RCP2,6, RCP4,5 и RCP8,5 Вт/м²

Из Рис.5.4. следует, что по среднему сценарию RCP4,5 к концу 21 века в восточной части отмечается увеличение июльских осадков по сравнению с современными значениями (1991-2020гг.) на +20-50%, что составляет 10-30 мм, в восточной части севера ЕТР и на +20% (до 10 мм) на северо-западе Кольского полуострова. На юге имеет место уменьшение количества осадков в среднем на -25% (10-20 мм). Зона с наименьшими современными апрельскими суммами осадков менее 40 мм к концу 21 века будет иметь место на юге и севере региона, а с наибольшими суммами более 90 мм - в северо-западной, восточной и юго-западной частях севера ЕТР.

По сценарию RCP2,6 к концу 21 столетия на юге и востоке севера ЕТР имеет место рост количества осадков на +15-40% (до 25 мм) с максимумами на северо-восточных станциях Усть-Цильма (+39,8%) и Печора (+39,6%). На северо-западе района отмечается уменьшение осадков, в среднем, на -15-20% (на 10-25 мм), с максимумом на побережье Белого моря на станции Кемь и Колежма (25%). Область с наименьшими апрельскими суммами осадков менее 40 мм к концу 21 века будет иметь место севере региона, а с наибольшими суммами осадков – на всем юге и востоке рассматриваемой территории.

По сценарию RCP8,5 к 2100 году в южной и восточной части рассматриваемой территории имеет место уменьшение осадков, в среднем, на -20-30% (до 20 мм). Область с наименьшими современными апрельскими суммами осадков менее 40 мм к концу 21 века будет иметь место во всей восточной половине региона, а с наибольшими суммами осадков – на северо-западе рассматриваемой территории.

Заключение

Таким образом, проведен анализ и оценка современных и будущих климатических изменений температуры воздуха и осадков на территории европейского севера Российской Федерации. Ниже представлены краткие выводы, сделанные в результате данного изучения.

- 1) Созданы региональные базы многолетних рядов наблюдений за температурой воздуха по 19 метеостанциям с периодом наблюдений с конца XIX века по 2023 г., и за осадками по 38 метеостанциям с периодом наблюдений с середины XX века по 2022г. Метеостанции расположены по территории достаточно равномерно, что позволяет осуществлять надежную пространственную интерполяцию результатов.
- 2) Получены пространственные закономерности средних многолетних температур воздуха и сумм осадков в разные сезоны года в виде карт и аналитических зависимостей от координат метеостанций. Закономерные изменения температуры воздуха по широте имеют место весной и летом, а по долготе осенью и зимой. Полученная закономерность изменения осадков от широты имеет место только в январе, а в апреле и июле пространственные распределения осадков дополнительно зависят еще от долготы и высоты метеостанции.
- 3) На севере ЕТР имеет место внутригодовой ход температуры с максимумом в июле и минимумом в январе – феврале, а для осадков годовой максимум наблюдается в августе – сентябре, а минимум - в феврале – марте.
- 4) Проведен анализ однородности информации, и ряды наблюдений за температурой воздуха за счет более продолжительных рядов-аналогов увеличены в среднем на 30%, а ряды наблюдений за осадками увеличены в среднем на 8%.
- 5) Получены пространственные распределения расчетных температур воздуха и сумм осадков редкой повторяемостью 1 раз в 100 и 200 лет.
- 6) Установлено, что основные изменения средних значений многолетних

рядов температур воздуха произошли в конце 20-го века, и в январе имеет место зональное повышение температур от 1°C на севере-востоке до 3,9°C на юго-западе. В апреле наоборот наибольший рост температуры (до 4°C) имеет место на северо-востоке и наименьший (1,2°C) на юго-западе. В июле температура увеличилась от 0,6°C на востоке до 1,7°C на западе. В октябре наибольший рост температуры на северо-востоке (до 2,7°C). Эти изменения средних приближаются и превышают СКО весной и осенью и составляют 0,88СКО зимой и летом.

7) Установлено, что основные изменения средних значений многолетних рядов осадков произошли в начале 21-го века. Для января на большей части территории имеет место увеличение количества осадков с максимумами в районах побережья Белого моря (станции Колежма (68,2%, 17мм), Онега (36,9%, 13мм)), за исключением северной и восточной части региона, где отмечается падение с максимумом -14 мм (-20...-30%). В апреле имеет место зональное изменение сумм осадков, наибольший рост отмечен на севере (+12 мм, 50-60%), а наибольшее понижение на юге (-15 мм, около -30%). На севере ЕТР имеет место меридиональное изменение июльского количества осадков с запада (рост до 30 мм, на 50-58%), на восток (понижение на 20 мм, на 20-30%). В октябре имеет место рост количества осадков с максимумом до 20 мм (до 43%) на побережье Белого моря и в крайней северо-восточной части района. Уменьшение осадков до 20% отмечается на юго-востоке территории. Эти изменения средних приближаются и превышают СКО во все сезоны, кроме осени, когда составляют 0,8СКО.

8) Наиболее подходящими моделями для температуры воздуха на севере ЕТР оказались австралийская модель CSIRO для января и апреля и японская модель MIROC6 для октября и июля из проекта CMIP6 и немецкая модель MPI из проекта CMIP5 для всех месяцев года. По среднему сценарию RCP4,5 увеличение температуры по сравнению с современным периодом (1991-2020 гг.) составит от 2 до 4°C, по наиболее благоприятному сценарию RCP2,6 увеличение температуры составит 1-2°C и по наиболее

неблагоприятному RCP8,5 увеличение температуры будет составлять 5-8 °C.

9) Установлено, что наиболее подходящими моделями для осадков на севере ЕТР являются японская модель MIROC6 проекта CMIP6 для января, июля и октября и канадская модель CanESM проекта CMIP5 для апреля. Для апреля по среднему сценарию RCP4,5 к концу 21 столетия отмечается уменьшение осадков, по сравнению к современным значениям, на западе на -30-40% (до 15 мм) и на юге, в среднем, на -15% (на 5-8 мм), а рост имеет место в центральной и северо-восточной частях на +25% (на 6-10 мм). Для июля по среднему сценарию RCP4,5 к концу 21 века в восточной части отмечается увеличение июльских осадков по сравнению с современными значениями (1991-2020гг.) на +20-50%, что составляет 10-30 мм, в восточной части севера ЕТР и на +20% (до 10 мм) на северо-западе Кольского полуострова. На юге имеет место уменьшение количества осадков в среднем на -25% (10-20 мм).

Список используемых источников

1. Анисимов О.А., В.А. Лобанов, С.А.Ренева Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века. Метеорология и гидрология, №11, 2007. – с.90-101
2. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А., Лобанов В.А. Современные изменения климата в области высоких широт Северного полушария - Метеорология и гидрология. - 2003. - N 1. - С.18-30.
3. Бардин М.Ю. Изменчивость температуры воздуха над западными территориями России и сопредельными странами в XX веке - Метеорология и гидрология, 2002. № 8. С. 5-23.
4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН Физика атмосферы и океана. 2003. – Т. 39. N 2. – с. 166-187.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД, 2012.-194с

6. Дроздов О.А, Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П. Климатология.- Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 568с.
7. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений. – М.: Наука, 2006. – 173 с.
8. Кобышева Н.В., Акентьева Е.М., Галюк Л.П. Климатические риски и адаптации к изменениям и изменчивости климата в технической сфере – Санкт-Петербург, 2015. – 216 с.
9. Под ред. Н. В. Кобышевой Климат России. - СПб. : Гидрометеиздат, 2001. - 654с
10. Лобанов В.А., Методические указания «Оценка современных региональных изменений климатических характеристик». – СПб.: Изд. РГГМУ, 2018. – 91 с.
11. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.. Практикум по климатологии. Часть I. Учебное пособие. - СПб.: РГГМУ, 2011. - 145 с.
12. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии. Часть 2. Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2012 – 180 с
13. Лобанов В. А. Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн.1. СПб.: изд-во РГГМУ, 2016. 332 с.
14. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 2 Динамика климата. Книга 2 в двух книгах: учебник. – СПб: РГГМУ, 2018 – 377 с.
15. Лобанов В.А. Многомерный статистический анализ для исследования динамики климата. Учебное пособие. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2022. – 284 с.
16. Монин А.С, Сонечкин Д.М. Колебания климата Издательство: Наука. ISBN 5- 02-33748-X; 2005. – 192 с.
17. Рубинштейн Е.С., Полозова Л.Г. Современное изменение климата.- Л.: Гидрометеиздат, 1966. -200 с.
18. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации - Москва.: ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2018 - 1400с
19. Груздев А.И. Климатические изменения температуры воздуха на Севере ЕТР, 2022, -60с.
20. Интернет-энциклопедия "Википедия" [Электронный ресурс]

21. МГЭИК 2007: Изменение климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Пачаури Р.К., Райзингер А. и основная группа авторов (ред.)). МГЭИК, Женева, Швейцария, 104 с
22. Национальный атлас России : в 4 т. / Сост. и подгот. к изданию ПКО «Картография» под общ. рук. М-ва транспорта Российской Федерации и Роскартографии; отв. ред. Г. Ф. Кравченко; предс. редколл. А. В. Бородко. — Калининград : ОАО Янтарный сказ, 2007. — Т. 2 : Природа. Экология, 496 с.
23. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет - Москва.: ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2008 - 1400с
24. Первый оценочный доклад «Изменение климата на территории Российской Федерации», М.: 2008. – 1020 с.
25. Российский сайт «Погода и климат» <http://www.pogodaiklimat.ru> [Электронный ресурс]
26. Сайт Королевского метеорологического института Нидерландов <http://climexp.knmi.nl> [Электронный ресурс]
27. Сайт по географии <http://geography-ege.ru/> [Электронный ресурс]
28. Свод правил, строительная климатология СП 131.13330.2020
29. «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», IPCC.— Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013 – 1535 с.
30. CMIP-WGCM-WGSIP Decadal Climate Prediction Panel, 2011: Data and bias correction for decadal climate predictions. WCRP Rep., ICPO Publ. Series 150, 3 pp. [Available online at www.wcrp-climate.org/decadal/references/DCPP_Bias_Correction.pdf.]
31. IPCC Standard Output from Coupled Ocean-Atmosphere GCMs: http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/standard_output.html#Experiments
32. MapInfo Professional. Руководство пользователя (полное). – MapInfo Corporation, Troy, New York, 2003. – 726 с.
33. Taylor K.E., J R. Stouffer, G.A. Meehl, 2012. An overview of CMIP5 and experiment design. Bull. American Meteorological Society. April 2012, p.485-498.

34. WMO Global Annual to Decadal Climate Update Источник:
https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/WMO_GADCU_2022-2026.pdf
[Электронный ресурс]