

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Наук о Земле

Белокопытова Мария Александровна

Выпускная квалификационная работа

"Оценка перспектив использования данных ре-анализа и МОЦАиО для  
исследования термического режима"

Уровень: бакалавриат  
Направление подготовки 05.03.04 «Гидрометеорология»  
Профиль «Метеорология и климатология»

Научный руководитель: доцент, к.г.н.,

Лемешко Н.А.

Рецензент: доцент, к.ф.-м.н.

Евстигнеев В.П.

Санкт-Петербург

2021

## Оглавление.

Введение .....	3
1. Актуальность исследования .....	5
2. Используемые данные.....	6
2.2 Модели общей циркуляции атмосферы .....	7
2.3 Ре-анализы.....	13
2.4 Пространственные границы сравнения МОЦАиО и ре-анализов с данными наблюдений на сети метеорологических станций.....	16
3. Методический подход .....	18
4. Результаты .....	22
4.1 Климатическая зона Dfc.....	22
4.2. Климатическая зона Dfb.....	25
4.3. Климатическая зона Dfa.....	27
4.4. Климатическая зона Cfa.....	30
4.5. Климатическая зона Bsk.....	32
4.6. Обсуждение результатов.....	35
Заключение.....	39
Список литературы.....	41

## Введение

Изменения климата являются частью глобальных изменений природной среды и проявляются на различных уровнях, от глобального до регионального (ландшафтные зоны, бассейны рек, страны и регионы). Эти изменения подтверждаются эмпирическими наблюдениями специалистов - климатологов всего мира. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) опубликовала данные о том, что средняя годовая глобальная температура воздуха выросла на  $0,7^{\circ}\text{C}$  по сравнению с концом XIX века, а XX век был вероятно самым теплым за последнюю тысячу лет. С середины 1990-х годов современное потепление климата стало наиболее заметным. Наблюдаемые изменения требуют наиболее качественного изучения и отслеживания, и очень важно знать и понимать, насколько достоверны используемые данные.

Данная выпускная квалификационная работа включает в себе исследование, в котором сравнивается температурный режим, смоделированный моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАиО) и ре-анализами, с температурой, наблюдаемой на метеорологических станциях. Воспроизводство термического режима моделями и ре-анализами изучалось для Европейской территории России с 1981 по 2010 год.

В данной работе термический режим состоит из следующих метеорологических характеристик:

- Средняя температура воздуха на высоте 2 метра
- Максимальная температура воздуха на высоте 2 метра
- Минимальная температура воздуха на высоте 2 метра
- Температура поверхности почвы

Цели и задачи работы.

Цели работы:

1. Исследование достоверности воспроизводства МОЦАиО температурного режима на Европейской территории России с 1981 по 2010 год с использованием классификации климатов Кеппена.

2. Изучение достоверности воспроизводства ре-анализами температурного режима на Европейской территории России с 1981 по 2010 год с использованием классификации климатов Кеппена.
3. Выбор МОЦДиО, наиболее достоверно воспроизводящих термический режим
4. Выявление ре-анализа, который наиболее качественно воспроизводит исследуемые температурные характеристики на ЕТР

Для достижения поставленных целей были разработаны следующие задачи:

- сбор данных наблюдений, моделей и ре-анализов по исследуемым температурам на ЕТР
- интерполяция данных ре-анализов и моделей в координаты выбранных метеостанций
- распределение полученных данных по климатическим зонам Кеппена
- оценка выходных данных ре-анализов и моделей с использованием статистических показателей для каждого месяца каждой климатической зоны
- сравнение и анализ полученных результатов по каждой климатической зоне Кеппена и для всей ЕТР

## 1. Актуальность исследования

Температурный режим территории во многом определяет особенности жизни человека, и неподготовленность и неосведомленность о его изменении могут привести к неприятным последствиям. В соответствии с Докладом об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год (Доклад, 2020), аномалия средней годовой температуры воздуха для территории РФ от среднего за 1961-90 гг., составила  $+2.07^{\circ}\text{C}$ . Европейская территория России (ЕТР) не стала исключением в изменении температурного режима. В 2019 году на данной территории наибольшие температурные аномалии наблюдались в зимний ( $+2.65^{\circ}\text{C}$ ) и весенний ( $+2.29^{\circ}\text{C}$ ) периоды (Доклад, 2020).

Проявление глобального потепления неравномерно в пространственном и временном аспекте. Потепление имеет региональный характер, его пространственно-временные черты выражаются в потеплении или похолодании в отдельных регионах в отдельные сезоны, годы, месяцы.

Вместе с прогрессом глобального потепления наблюдается быстрое развитие и совершенствование моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАиО) и ре-анализов для исследования исторического и будущего климата как в научных, так и прикладных целях.

Ре-анализы широко применяются в исследованиях природных и антропогенных систем: вечной мерзлоты (Тао, 2019), прогноза штормовых условий (Rusu, 2017), моделирования ветроэнергетических систем (Sołowiej, 2018), изучения загрязнений воздуха (Sitnov, 2020). Однако несмотря на прогресс в их использовании, качество выходных данных не всегда удовлетворяет исследователей (Tan, 2019; Bhattacharya, 2020).

Данные моделей общей циркуляции атмосферы также являются распространенным методом изучения тех или иных геофизических параметров. Их данные могут использоваться как в прогнозировании опасных природных явлений, например, наводнений (Hirabayashi, 2021), так и в исследовании агроклиматических показателей (Sun, 2016), при этом данные МОЦАиО также не всегда обладают достаточной точностью (Baker, 2021). Также именно смоделированные значения того или иного метеорологического параметра используются в отчетах межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change), согласно которым практически все глобальные модели указывают на потепление на ЕТР, существенно превышающие глобально усредненные величины.

## 2. Используемые данные.

В ходе работы были использованы данные по среднемесячным температурам воздуха и почвы на Европейской территории России с 1981 по 2010 год. Наблюдаемые значения были получены из базы данных Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Climatic Data Center, 2020) и базы ВНИИГМИ-МЦД (Доступ к данным, 2020) в градусах Цельсия. Станции были отфильтрованы, и в работе использовалось 123 станции по температурам воздуха и 98 станций по температуре поверхности почвы.

Данные исторических прогонов моделей были получены из веб-сайта World Climate Research Programme (WCRP) (Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6), 2020). Модельные значения температуры были даны в градусах Кельвина и переведены в градусы Цельсия для возможности сравнения. Источником данных ре-анализов являлись ресурсы Earth Data (Earth Data, 2020), Physical Sciences Laboratory NOAA (Physical Sciences Laboratory, 2020) и Climate Data Store (Climate Data Store, 2020).

## 2.2 Модели общей циркуляции атмосферы

Численные модели общей циркуляции атмосферы и океана, представляющие физические процессы в атмосфере, океане, криосфере и на поверхности суши, являются наиболее современными инструментами, доступными в настоящее время для моделирования изменений глобальной климатической системы под воздействием естественных и антропогенных факторов.

МОЦ воспроизводят климат с использованием трехмерной сетки над земным шаром (см. рис. 1), обычно с горизонтальным разрешением от 250 до 600 км, от 10 до 20 вертикальных слоев в атмосфере и иногда до 30 слоев в океанах. Многие физические процессы, например, связанные с облаками, происходят в меньших масштабах и не могут быть должным образом смоделированы. Вместо этого их известные свойства усредняются по большему масштабу по методике, известной как параметризация. Это один из источников неопределенности при моделировании будущего климата на основе МОЦ (IPCC Data Distribution Centre, 2020).

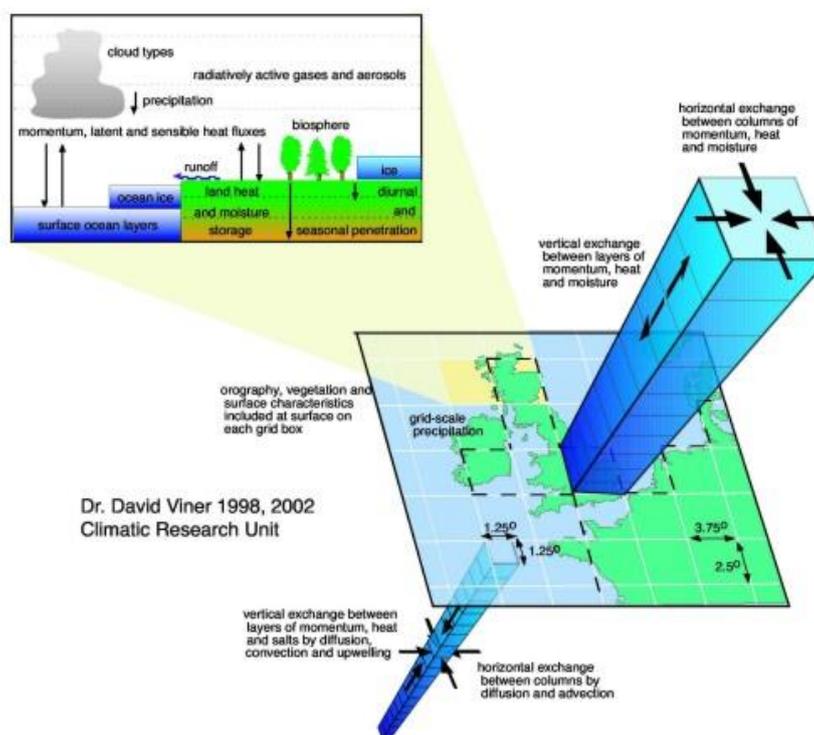


Рисунок 1. Пример использования трехмерной сетки (IPCC Data Distribution Centre, 2020).

Увеличение количества МОЦиО в последние десятилетия привело к необходимости их сравнения, которое выполняется в рамках специальных международных проектах. Одним из таких проектов является CMIP. Цель CMIP - создать

набор стандартных симуляций, которые будет запускать каждая модель. Это позволяет напрямую сравнивать результаты различных моделей, чтобы установить, где модели согласуются, а где нет, относительно будущих изменений. В данном исследовании использовались модели, относящиеся к 6 фазе CMIP.

### *О CMIP6.*

Климатические модели постоянно обновляются, поскольку различные группы моделирования по всему миру включают более высокое пространственное разрешение, новые физические процессы и биогеохимические циклы. Эти группы по моделированию координируют свои обновления в соответствии с графиком отчетов об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), выпуская набор результатов моделирования - известных как «прогоны» - в преддверии каждого из них.

Эти скоординированные усилия являются частью проектов взаимного сравнения связанных моделей (CMIP). В пятом оценочном отчете МГЭИК за 2013 год представлены климатические модели из CMIP5 (Stocker, 2013), а в предстоящем шестом оценочном отчете IPCC за 2021 год будут представлены новые современные модели CMIP6.

CMIP включает в себя разные типы экспериментов. В данной работе исследуется исторический (“historical”) эксперимент. При моделировании он учитывает следующие показатели и свойства (Eyring, 2016):

1. выбросы короткоживущих видов и долгоживущих парниковых газов,
2. концентрации парниковых газов,
3. воздействие землепользования,
4. воздействие солнечной радиации,
5. стратосферные аэрозоли (вулканы),
6. температура поверхности моря и концентрация морского льда,
7. оптические свойства аэрозолей.

Для идентификации каждой симуляции в CMIP используются специальные индексы (Taylor, 2018):

- индекс реализации (realization index, отвечает за начальные условия),
- индекс инициализации (initialization index, создан для того, чтобы различать симуляции, выполняемые при одинаковых начальных условиях, но с разными процедурами инициализации),

- физический индекс (physics index, позволяет различать симуляции по используемым параметризациям),
- индекс воздействия (forcing index, на случай если используются разные наборы входных данных в одном эксперименте).

В процессе работы были выбраны модели с симуляцией «r1i1p1f1».

Стоит отметить, что данное исследование базируется на предположении о том, что модели, хорошо воспроизводящие климатические параметры за исторический период, должны на таком же уровне воспроизводить климат будущего. Такое предположение основано на том, что для воспроизводства моделями климата в прошедшие и будущие периоды используются одни и те же алгоритмы и схемы параметризации.

*Модели, используемые в работе.*

В данной работе исследуется десять моделей общей циркуляции атмосферы, входящих в CMIP6. Со списком используемых моделей можно ознакомиться в таблице 1. Выбор данных моделей обоснован наличием и разнообразным пространственным разрешением.

Таблица 1. Список моделей, используемых в исследовании.

Модель	Организация	Пространственное разрешение
ACCESS-ESM1.5	CSIRO Climate Science Centre, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (ARCCSS), Bureau of Meteorology, Australia	1,875°x1,25°
BCC-ESM1.0	Beijing Climate Center, China	2.8°x2.8°
EC-Earth3	European Centre for MediumRange Weather Forecasts	0.7°x0.7°
IPSL-CM6A-LR	Institut PierreSimon Laplace, France	2.5°x1.3°
INMCM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russia	2.0°x1.5°
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	2.8°x2.8°
GISS-E2.1-H	Goddard Institute for Space Studies, National Aeronautics and Space Administration, USA	2.0°x2.5°
GFDL-ESM4.1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	1.0°x1.0°
MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, Japan Agency for MarineEarth Science and Technology, Japan	1.4°x1.4°
MRI-ESM2.0	Meteorological Research Institute, Japan	1.13°x1.13°

#### Модель ACCESS-ESM1.5.

ACCESS-ESM1.5 — это обновленная версия ACCESS-ESM1, целью которой является устранение некоторых ограничений производительности более ранней версии и обеспечение дополнительных функций. Проверка данных за исторический период по наблюдениям показывала хорошие результаты, а также значительные улучшения по сравнению с предыдущей версией ACCESS-ESM1. По мнению разработчиков, ACCESS-ESM1.5 является полезным инструментом для изучения будущих сценариев поглощения углерода суши и океаном и смягчения последствий (Ziehn, 2020).

#### Модель INMCM5-0.

Модель Института вычислительной математики в сравнение со своей предыдущей версией из CMIP5 обладает улучшенной атмосферной моделью с более сложной параметризацией образования облаков, и в дополнение она имеет в два раза более высокое разрешение в горизонтальных направлениях (Volodin, 2017). Наиболее заметным улучшением по сравнению с INMCM4 является способность новой модели воспроизводить экваториальные стратосферные квазидвухлетние колебания (Volodin, 2017). Эта модель также способна достаточно точно воспроизвести динамику глобальной приземной температуры воздуха (Volodin, 2018), и относительно других моделей может лучше моделировать количество осадков в отдельных регионах (Young, 2020).

#### Модель CanESM5.

CanESM5 имеет заметно более высокую равновесную чувствительность климата (долгосрочное повышение температуры, которое ожидается в результате удвоения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере), чем его предшественник. Также обновленная модель включает в себя улучшения моделей атмосферы, поверхности земли и наземных экосистем. Было отмечено, что данная МОЦАиО в тройке лучших моделей по воспроизводству внутригодовой динамики осадков в Азии (Yan, 2021).

#### Модель BCC-ESM1.0.

BCC-ESM1.0 - это первая версия полностью связанной модели системы Земли с интерактивным химическим составом атмосферы и аэрозолей. Разработчики данной модели сделали упор на аэрозоли, химический состав атмосферы и их взаимосвязь с климатической системой (Tongwen, 2020).

### Модель EC-Earth3.

Основными компонентами данной модели являются IFS (модель атмосферы), HTESSEL (модель рельефа), NEMO (модель океана), LIM (модель морского льда), LPJGUESS (модель для учета растительного покрова), TM5 (моделирует химический состав атмосферы) (EC-Earth, 2020). По мнению некоторых исследователей (Zhang, 2021) данная модель может хорошо отражать реакцию климата при различных климатических воздействиях в связи с достоверным моделированием климата среднего голоцена и среднего плиоцена.

### Модель GISS-E2.1-H.

Данная версия модели отличается от предыдущей модели (GISS-E2) в основном за счет улучшения параметризации компонентов модели атмосферы и океана при сохранении разрешения атмосферы на том же уровне. Качество воспроизводства климата значительно выше, чем в предыдущих версиях, также значительно улучшилось моделирование климата Южных океанов (Kelley, 2020).

### Модель GFDL-ESM4.1

Модель сфокусирована на химии и комплексности экосистемы, а не на разрешении океана, как в предыдущей версии. Она отличается значительно улучшенным представлением о климатических закономерностях и изменчивости по сравнению с предыдущими версиями (Dunne, 2020). Стоит также отметить улучшения в компонентах модели, отвечающих за аэрозоли и физику океана.

### Модель IPSL-CM6A-LR.

Климатические компоненты модели, описываемые рядом показателей (солнечная радиация, температура, осадки и ветер), значительно улучшились по сравнению с предыдущими версиями модели. (Boucher, 2020). Также отмечено, что модельное изменение средней глобальной приземной температуры воздуха находится в диапазоне от +1,1 до +1,6 К в 2014 г. по сравнению с 1850–1899 годом, что выше наблюдаемых значений.

### Модель MIROC6.

Результаты показывают, что общая воспроизводимость среднего климата и внутренней изменчивости климата в MIROC6 лучше, чем в MIROC5 (предыдущая

версия). Тропические климатические системы (например, летние осадки в западной части Тихого океана) и атмосферная циркуляция в средних широтах воспроизводятся значительно лучше. Эти улучшения связаны в первую очередь с более качественной параметризацией конвективных процессов в последней версии модели (Tatebe, 2019).

#### Модель MRI-ESM2.0.

Также как и остальные исследуемые модели, данная не является исключением. Она имеет различные улучшения, касающиеся образования облаков, что привело к значительному снижению ошибок при рассмотрении солнечной радиации. Также это улучшило распределение солнечной радиации и меридиональный перенос тепла (Yukimoto, 2019).

## 2.3 Ре-анализы

Ре-анализ — это научный метод для разработки всеобъемлющей информации о том, как погода и климат меняются с течением времени. В нем наблюдения и численная модель, которая моделирует один или несколько компонентов климатической системы Земли, объединяются, чтобы получить обобщенную оценку состояния системы. Ре-анализ обычно продлевается на несколько десятилетий или дольше и охватывает весь земной шар от поверхности Земли до стратосферы. Продукты ре-анализа широко используются в климатических исследованиях, в том числе для мониторинга и сравнения текущих климатических условий с прошлыми, выявления причин изменения климата и подготовки климатических прогнозов.

В данном исследовании было изучено и оценено воспроизводство термического режима на ЕТР ре-анализами ERA5 от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, MERRA-2, созданный управлением глобального моделирования и ассимиляции (GMAO) от НАСА, и NCEP/NCAR Reanalysis 1 от Национального управления океанических и атмосферных исследований США. Общая информация об исследуемых ре-анализах представлена в таблице 2.

Выбор данных ре-анализов обоснован как наличием данных по всем исследуемым термическим характеристикам (MERRA-2, NCEP), так и распространенностью в применении (ERA5).

Таблица 2. Общая информация об используемых ре-анализах.

Ре-анализ	Разработчик	Горизонтальное разрешение	Исследуемые метеорологические характеристики
ERA5	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF	0.25°x0.25°	-Средняя температура воздуха -Температура поверхности почвы
MERRA-2	Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), NASA	0.5°x0.625°	-Средняя температура воздуха -Максимальная температура воздуха -Минимальная температура воздуха -Температура поверхности почвы
NCEP/NCAR Reanalysis 1	National Oceanic and Atmospheric Administration, USA	2.5°x1.9°	-Средняя температура воздуха -Максимальная температура воздуха -Минимальная температура воздуха -Температура поверхности почвы

ERA5 — это ре-анализ пятого поколения от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Набор данных ERA5 предоставляет данные разного временного масштаба о приземных и аэрологических параметрах с глобальным разрешением

примерно 31 км на 137 вертикальных уровнях (до 1 Па). Он также включает 10 элементов из системы ассимиляции данных ансамбля 4D-Var, используемой для проведения ре-анализа (Climate Data Guide, 2020). ERA5 создана с использованием интегрированной системы прогнозирования (IFS), которая была улучшена по сравнению с предыдущей версией ре-анализа ERA-Interim (Climate Data Guide, 2020).

Преимущества (Climate Data Guide, 2020):

1. Высокое временное и пространственное разрешение.
2. Качественное представление циркуляции тропосферы в течение современного периода наблюдений с 1979 г.

Недостатки (Climate Data Guide, 2020):

1. Изменения в комплексе наблюдений могут привести к нереалистичным тенденциям и изменчивости данных, особенно в тех случаях, когда охват наблюдениями недостаточен.

Повторный анализ MERRA-2 состоит из системы ассимиляции атмосферных данных системы наблюдений за Землей Годдарда (GEOS ADAS), которая включает в себя схему анализа глобальной статистической интерполяции (GSI, Global Statistical Interpolation). Основная причина замены MERRA на MERRA-2 заключается в том, что MERRA не способна ассимилировать важные новые типы данных, а старение и отказ старых спутниковых инструментов значительно уменьшили объем данных, доступных для ассимиляции для более раннего повторного анализа, в то время как система GEOS у MERRA-2 способна ассимилировать данные от более современных приборов (Climate Data Guide, 2020).

Преимущества (Climate Data Guide, 2020):

1. Включает наблюдения с более поздних спутниковых инструментов
2. Использование ассимилированных интерактивных аэрозолей и наблюдаемых, и изменяющихся во времени выбросов.

Недостатки (Climate Data Guide, 2020):

1. Возможны региональные разрывы данных
2. Нереалистичные изменения в рядах данных, связанных с качеством спутниковых данных

NCEP/NCAR использует замороженную современную глобальную систему усвоения данных и максимально полную базу данных (по состоянию на 1995 г.) (Climate Data Guide, 2020).

Преимущества (Climate Data Guide, 2020):

1. Один из самых продолжительных ре-анализов
2. Используется во многих публикациях

Недостатки (Climate Data Guide, 2020):

1. Устаревшие ассимиляция данных и модель
2. Разрывы данных в Южном полушарии

## 2.4 Пространственные границы сравнения МОЦАиО и ре-анализов с данными наблюдений на сети метеорологических станций

В идеале, климатические модели должны предоставлять детализированную в пространстве информацию, привязанную к локальным объектам. Однако, по общепринятому мнению, на настоящем этапе развития моделей общей циркуляции атмосферы бесполезно интерпретировать модельные результаты отдельно в каждом узле сетки. Поэтому для уменьшения случайных ошибок и увеличения надежности результатов данные моделей, как правило, усредняются по пространству.

В данном исследовании районирование было выполнено для климатических зон классификации В.П. Кеппена. Классификация климатов Кеппена основана на месячном распределении температуры и осадков, в связи с чем границы климатических зон сформированы с помощью метеорологических показателей, а не только с учетом особенностей распределения растительного покрова или циркуляции атмосферы.

На рисунке 2 представлена дискретизация Европейской территории России на основе классификации климатов Кеппена по климатическим зонам. Самыми крупными климатическими зонами по Кеппену, на которых располагается территория ЕТР, являются Dfc – бореальный климат тайги с равномерным увлажнением, где температура поднимается выше 10 °С не чаще трех месяцев в году; Dfb – бореальный климат лиственных лесов с равномерным увлажнением, где температура самого теплого месяца ниже 22 °С; Dfa бореальный климат лиственных лесов с равномерным увлажнением, где температура самого теплого месяца выше 22 °С; Cfa умеренно теплый климат с равномерным увлажнением, где температура самого теплого месяца выше 22 °С; Bsk – холодный сухой степной климат (Дроздов, 1989).



Рисунок 2. Дифференциация Европейской территории России по климатическим зонам классификации В.П. Кёппена (World Map of the Köppen-Geiger climate classification, 2020).

### 3. Методический подход

Перед сравнением и оцениванием данных моделей и ре-анализов была произведено преобразование срочных станционных данных сети метеорологических станций по температуре поверхности почвы в среднемесячные значения. Потому как на всей исследуемой территории за исследуемый период есть лишь 40 станций с данными по температуре поверхности почвы, не содержащие пропусков данных, что недостаточно для исследования, были произведены следующие преобразования для увеличения количества используемых станций. Был выполнен анализ всех доступных данных по ЕТР для температуры поверхности почвы. В начале было произведено усреднение данных для суток, в котором не было ни одного пропуска. При осреднении для каждого месяца необходимым условием было наличие не более 3 пропусков среднесуточных данных за каждый месяц. Если условие не выполнялось, месяц пропускался. Данное преобразование позволило увеличить количество метеостанций до 98.

Для выполнения процедуры анализа и сравнения данных МОЦАиО, ре-анализов с данными наблюдений была разработана схема методического подхода, что позволило оценить достоверность воспроизведения термического режима в МОЦАиО и ре-анализах. Методический подход заключался в выполнении логически взаимосвязанных этапов, включающих в себя как обработку данных, так и их оценку.

Первый этап включал в себя интерполяцию данных моделей и ре-анализов в координаты метеорологических станций для уменьшения искажения значений. Распределение станций представлено на рисунке 3. Для интерполяции использовался метод тонкой пластины, также известный как thin plate spline (TPS). Сплайны используют ковариационную функцию, которая определяется путем минимизации обобщенной ошибки перекрестной проверки, и, таким образом, объем сглаживания данных можно легко оптимизировать. Выбор этого метода интерполяции объясняется тем, что в нем качество проинтерполированных данных меньше зависит от плотности интерполируемых точек, чем у большинства других методов (Camera, 2014; Jiang, 2010; Hofstra, 2008), поэтому разное пространственное разрешение у исследуемых ре-анализов слабо повлияло на качество данных при интерполяции.

Следующим этапом после интерполяции было распределение полученных данных по климатическим районам и осреднение значений для каждой зоны.

Третий этап является собственно статистической оценкой воспроизведения ре-анализами и моделями данных натуральных наблюдений. Оценка качества повторных анализов и МОЦАиО проводилась с помощью пяти параметрических оценок для каждого месяца в каждой климатической зоне. Также дополнительно для моделей также была произведена оценка линейного тренда для каждого месяца в каждой зоне, так как некоторые модели могут быть ориентированы на воспроизводство изменений термического режима.

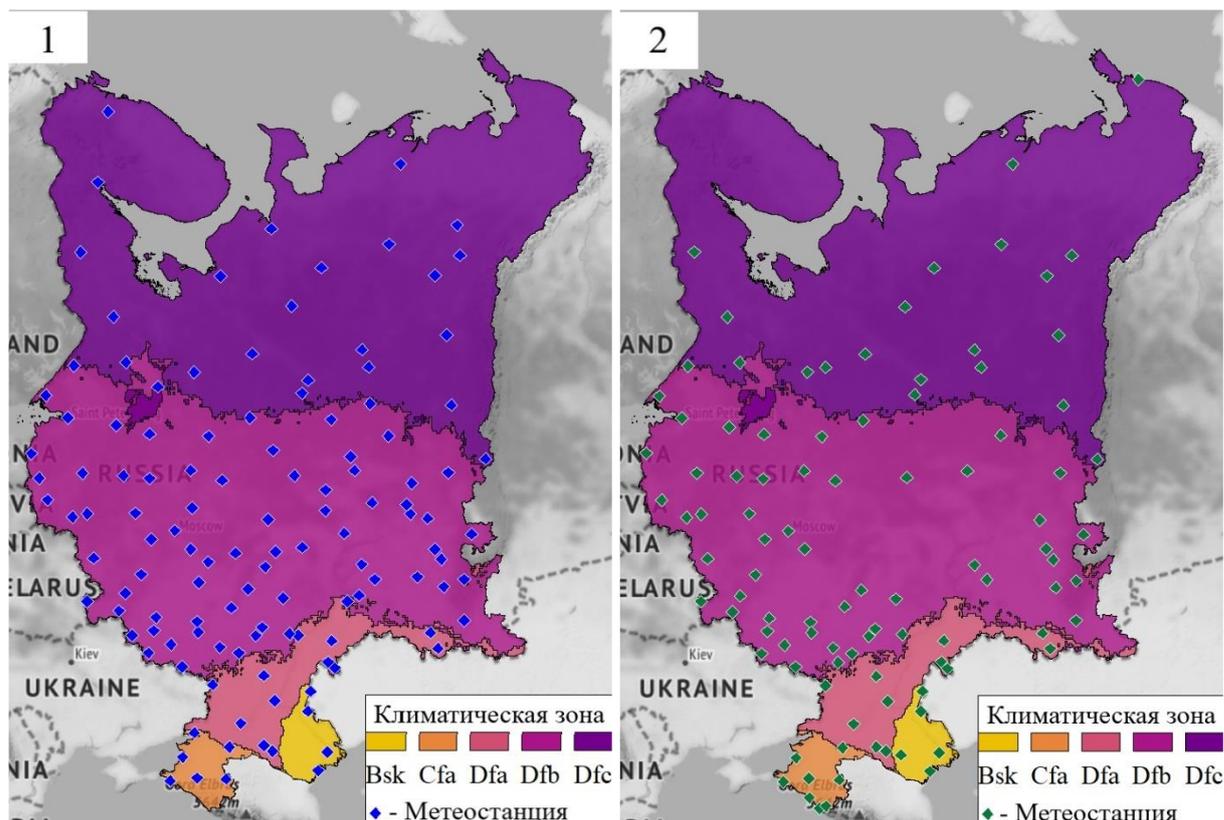


Рисунок 3. Распределение метеорологических станций с данными по 1- температурам воздуха, 2 – температуре поверхности почвы на Европейской территории России (World Map of the Köppen-Geiger climate classification, 2020).

В процессе работы использовалась программная среда RStudio, с помощью которой производилась оценка ре-анализов и моделей. Для оценки качества воспроизводства термического режима МОЦАиО и ре-анализами были использованы различные статистические показатели, такие как:

1. Средняя ошибка между значениями модели ( $S_i$ ) и наблюдаемыми на станции ( $O_i$ ):

$$me = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (1)$$

2. Модифицированный коэффициент Нэша-Сатклиффа. У преобразованного коэффициента чувствительность немного ниже, чем у первоначального.

$$mNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|} \quad (2)$$

$mNSE = 0$  указывает на то, что модель обладает той же способностью к предсказанию, что и среднее значение временного ряда в терминах суммы квадратов ошибок. Эффективность меньше нуля ( $mNSE < 0$ ) возникает, когда наблюдаемое среднее является лучшим предсказателем, чем модель (Nash, Sutcliffe, 1970). Данный коэффициент чувствителен к экстремальным значениям и может давать неоптимальные результаты, если набор данных содержит большие выбросы.

3. Индекс согласия Уилмота между значениями модели ( $S_i$ ) и наблюдаемыми на станции ( $O_i$ ):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{S}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

Индекс согласия — это показатель степени ошибки прогноза модели и варьируется от 0 до 1. Значение 1 указывает на полное совпадение, а значение 0 указывает на полное отсутствие согласия. С помощью индекса согласия можно обнаружить аддитивные и пропорциональные различия в наблюдаемых и смоделированных средних и отклонениях; однако он слишком чувствителен к экстремальным значениям (Legates, McCabe, 1999).

4. Коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2 (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

5. Абсолютные величины нормированных разностей отклонений модельно восстановленных значений от их соответствующих значений по данным наблюдений:

$$Z = \frac{ABS(S_i - O_i)}{\bar{O}} \quad (5)$$

Стоит отметить, что данная оценка была отмечена как показатель, характеризующий точность модельных воспроизведений изменений параметров климатического режима (Менжулин, 2012).

Условные обозначения:  $S_i$  — значение по модели,  $O_i$  — наблюдаемое значение на станции.

В ходе работы по значениям данных оценок проводилось ранжирование моделей отдельно для каждого месяца с обобщением результата. Все термические показатели в результате ранжирования рассматривались одновременно, а не каждый по отдельности. Наименьший ранг присваивался “лучшей” модели.

Дополнительно для моделей общей циркуляции атмосферы также было оценено воспроизводство линейного тренда. Для этого был проведен регрессионный анализ для каждого ряда наблюдений и моделей по каждой термической характеристике в каждый месяц. Использовалась модель парной линейной регрессии:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (6)$$

где  $Y$  – зависимая переменная,  $X$  – независимая переменная,  $\beta_1$  и  $\beta_0$  – числовые коэффициенты регрессии, подлежащие оцениванию;  $\varepsilon$  – случайное отклонение.

Для оценки параметров модели использовалось уравнение:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i \quad (7)$$

где  $\hat{y}$  – прогнозируемое значение объясняемой переменной;  $b_0$  – статистическая оценка параметра  $\beta_0$ ;  $b_1$  – статистическая оценка параметра  $\beta_1$ .

В ходе работы для каждого ряда данных была вычислена оценка угловой коэффициента ( $b_1$ ) с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$b_1 = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x^2} \quad (8)$$

Для вычисления доли дисперсии данных, которая объясняется подобранной линией тренда, использовался коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (9)$$

где  $RSS$  – дисперсия регрессионных остатков,  $TSS$  – дисперсия зависимой переменной.

Качество воспроизводства моделью линейного тренда каждой рассматриваемой термической характеристики определялось близостью модельных оценки углового коэффициента и коэффициента детерминации к натурным. Также учитывалось воспроизводство знака тренда.

## 4. Результаты

Полученные в ходе работы результаты статистического оценивания ошибок воспроизведения десятию МОЦАиО реального климата имеют большие отклонения от «критериев качества» для используемых статистического показателя. Поэтому был применен способ выбора «лучших» среди «плохих» моделей. Лучшими из списка моделей будут считаться те, которые по значениям указанных статистических показателей наиболее близки к идеальным. Ре-анализы также оценивались с применением данного подхода.

В данной главе каждая климатическая зона рассматривается отдельно.

Результаты по МОЦАиО представлены в виде ранжированных списков, которые позволяют выявить лучшую модель относительно остальных, и графиков внутригодовых распределений каждой термической характеристики каждой модели и наблюдаемых значений, которые дают визуальное представление о качестве воспроизводства той или иной температуры. В ранжированном списке указано два значения – первый ранг присваивался при оценке значений термических показателей, а второй ранг, указанный в скобках, при оценке линейного тренда. Значение ранга может повторяться, что говорит о схожести результатов.

Визуализация результатов воспроизводства ре-анализами термического режима дается при помощи диаграмм Тейлора. Данные диаграммы описывают результат с помощью среднеквадратического отклонения каждого ряда данных, центрированного среднеквадратического отклонения данных ре-анализа относительно наблюдаемых значений и коэффициента корреляции Пирсона. Соответственно, чем ближе положение точки ре-анализа к точке, полученной по данным метеорологических наблюдений, тем лучше результат у того или иного ре-анализа. Диаграммы строились для января и июля для наиболее простых и сложных для воспроизводства термических характеристик в данных зоне и месяце.

### 4.1 Климатическая зона Dfc.

*Результаты по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.*

В таблице 3 представлен ранжированный список моделей как при оценке термического режима, так и при оценке линейного тренда (значение в скобках). На рисунке 4 изображены графики внутригодовых распределений исследуемых температур.

В целом, «лучшей» моделью в данном регионе является модель MIROC6. Особенно хороший результат относительно других моделей она показывает в период с мая по сентябрь. Например, среднее значение индекса согласия в этот период по всем моделям равно 0.38, а у MIROC6 – 0.48. Также стоит отметить модели MRI и ACCESS, которые на относительно высоком уровне воспроизводят температурный режим второго полугодия и осеннего и зимнего периодов соответственно.

Таблица 3. Ранжированный список моделей для зоны Dfc.

Модель	Месяц												Общий итог
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	
<b>MIROC6</b>	7(4)	1(5)	6(4)	2(8)	1(8)	2(6)	1(7)	2(3)	2(3)	4(4)	2(1)	4(5)	1(5)
<b>MRI</b>	6(2)	6(3)	8(7)	2(3)	2(4)	7(2)	4(3)	3(5)	1(10)	2(7)	1(6)	3(3)	2(4)
<b>ACCESS</b>	1(1)	4(8)	1(5)	1(9)	3(10)	9(9)	5(5)	5(1)	4(8)	1(2)	3(3)	2(4)	3(6)
<b>IPSL</b>	9(3)	10(4)	9(9)	5(4)	5(7)	1(4)	2(2)	1(3)	3(1)	3(1)	4(4)	4(1)	4(1)
<b>GFDL</b>	4(4)	3(1)	3(2)	7(5)	4(5)	3(1)	9(4)	8(8)	9(5)	8(10)	7(10)	7(2)	5(2)
<b>CanESM5</b>	2(6)	7(7)	10(3)	9(7)	10(6)	5(5)	2(9)	6(6)	7(6)	5(3)	6(7)	1(10)	6(7)
<b>EC</b>	3(8)	5(10)	7(8)	10(10)	9(9)	10(10)	8(10)	4(10)	5(7)	6(9)	5(8)	9(9)	7(10)
<b>INM</b>	7(7)	2(2)	4(1)	8(1)	7(2)	4(7)	6(8)	7(2)	6(2)	7(6)	9(9)	8(8)	8(3)
<b>GISS</b>	5(10)	9(6)	5(10)	6(6)	6(1)	8(8)	7(1)	9(7)	8(4)	9(5)	8(2)	6(6)	9(8)
<b>BCC</b>	10(9)	8(9)	2(6)	4(2)	7(3)	6(3)	10(6)	10(9)	10(9)	10(8)	10(5)	10(7)	10(9)

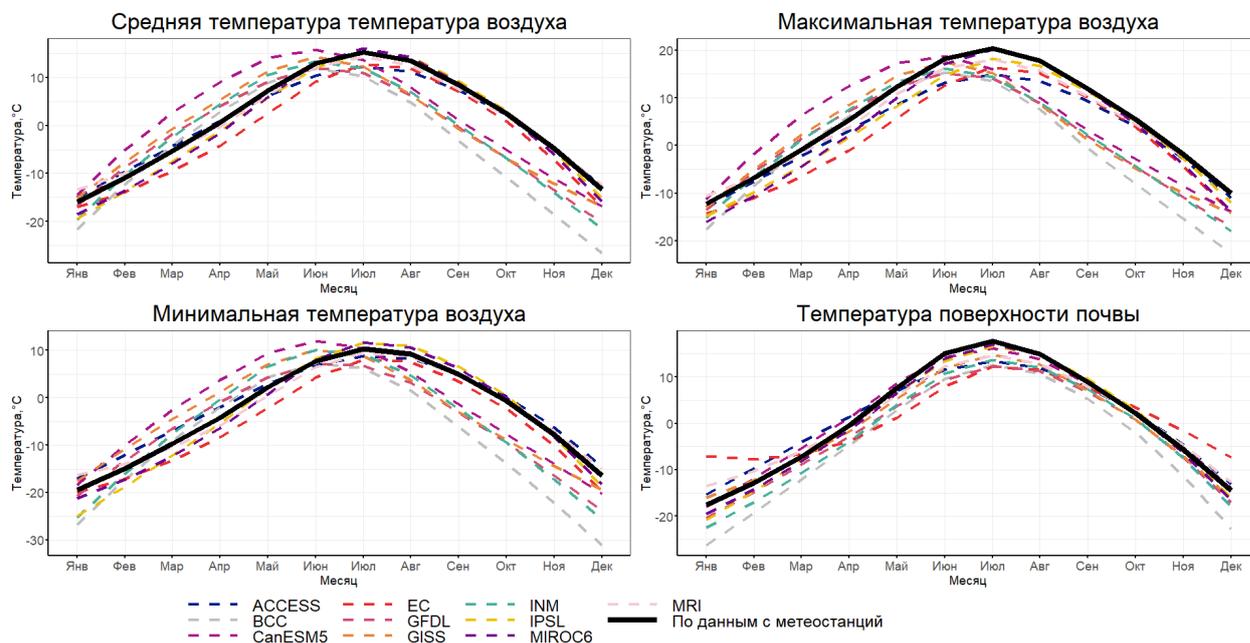


Рисунок 4. Внутригодовое распределение термических характеристик в зоне Dfc.

В процессе работы было выявлено, что наиболее качественно модели в данных широтах воспроизводят летний период. Наиболее трудной для моделирования является минимальная температура воздуха, легче воспроизводится средняя температура воздуха. Как правило, модели занижают все исследуемые температуры, особенно в период с июля

по декабрь. В весенний период около половины рассматриваемых моделей склонны завышать значения. Лучше всего термический режим данного региона моделирует MIROC6.

Стоит отметить, что некоторые модели (GFDL, INM) за все месяцы имеют плохой результат при рассмотрении температурных значений, при этом анализ оценок тренда показал, что они на хорошем уровне воспроизводят линейный тренд.

*Результаты по ре-анализам.*

Отдельные результаты по ре-анализам продемонстрированы на рисунке 5.

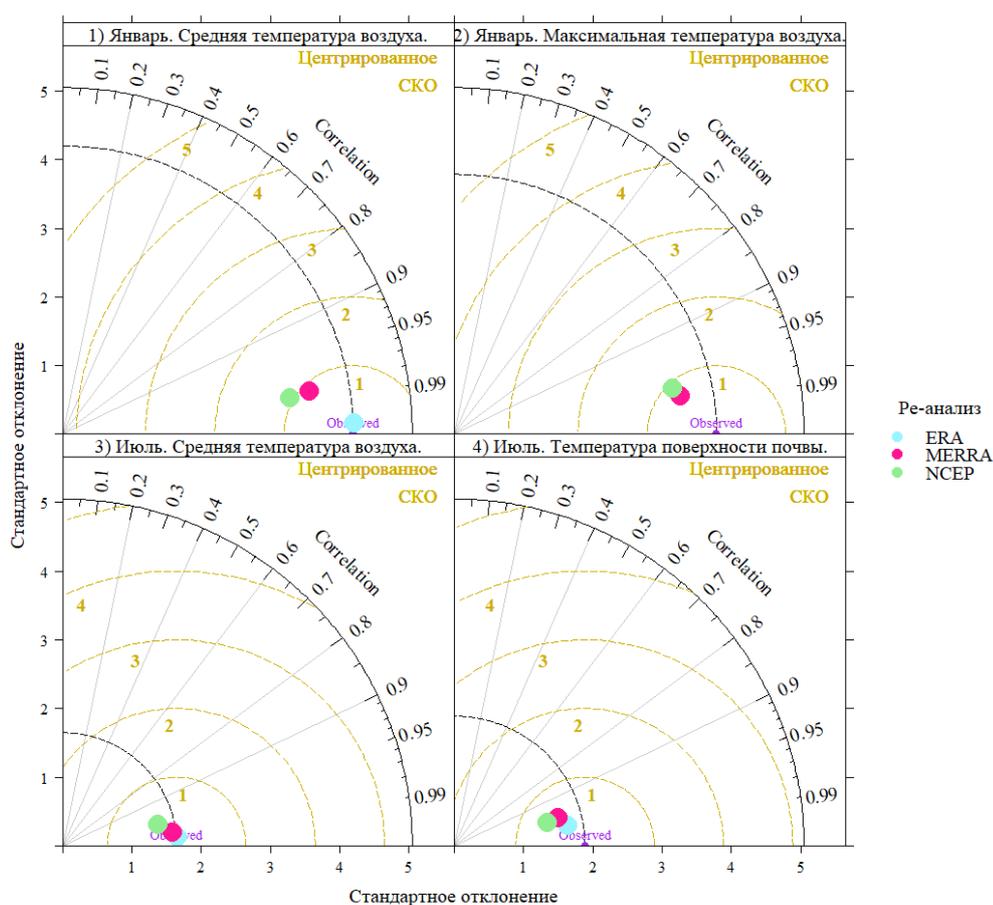


Рисунок 5. Диаграммы Тейлора по данным ре-анализов: 1,3 - для наиболее «простых» и 2,4- наиболее «сложных» для воспроизводства термических характеристик в зоне Dfc.

В процессе анализа результатов было выявлено, что лучше всего воспроизводится средняя температура воздуха ре-анализом ERA5 в течение всего года. В тоже время ре-анализ MERRA-2 лучше воспроизводит минимальную температуру воздуха. Также данный ре-анализ показывает лучший результат, чем ERA5, по температуре поверхности

почвы за весь год, особенно в переходные сезоны. Повторный анализ NCEP показал посредственный результат по всем термическим показателям относительно остальных ре-анализов.

Ре-анализы MERRA-2 и NCEP в течение всего года занижают значения экстремальных температур. По максимальным температурам средняя ошибка может достигать  $-4^{\circ}\text{C}$ . В тоже время ре-анализу ERA5 свойственно завышать значения температуры поверхности почвы холодный период года. Коэффициент корреляции, как правило, имеет высокие значения, однако, его значение может достигать 0.45 по данным ре-анализа NCEP при исследовании максимальной температуры воздуха.

#### *4.2. Климатическая зона Dfb.*

##### *Результаты по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.*

На рисунке 6 изображены графики внутригодовых распределений исследуемых температур. Ранжированный список моделей можно найти в таблице 4.

В ходе работы было выявлено, что наиболее качественным воспроизводством температур в данной климатической зоне обладает модель MRI, особенно в осенний период. Летние температуры лучше моделирует IPSL, в то время как ACCESS относительно других моделей лучше воспроизводит зимние и весенние месяцы, кроме февраля и мая.

Оценка линейного тренда показывает, что модели GFDL и GISS, несмотря на плохие результаты при рассмотрении значений термического режима, значительно лучше воспроизводят линейный тренд. Также следует отметить модели MRI и MIROC6, которые относительно других моделей хорошо воспроизводят термический режим и линейный тренд в данной климатической зоне.

В соответствие с используемыми статистическими оценками, наиболее сложной для воспроизводства является минимальная температура воздуха, а наиболее простой – температура поверхности почвы, особенно летний и осенний периоды. Также было выявлено, что модели, как правило, занижают температуру поверхности почвы. Модель как EC-Earth занижает все температуры воздуха, а ACCESS и MRI завышают минимальную и среднюю температуры воздуха в каждый месяц.

Таблица 4. Ранжированный список моделей для зоны Dfb.

Модель	Месяц												Общий итог
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	
<b>MRI</b>	5(2)	2(1)	2(9)	2(6)	2(2)	3(1)	2(5)	4(5)	1(8)	1(10)	1(1)	2(6)	1(2)
<b>ACCESS</b>	1(3)	9(3)	1(2)	1(7)	3(10)	4(10)	3(10)	2(10)	2(10)	2(1)	2(4)	1(7)	2(8)
<b>IPSL</b>	10(4)	8(5)	6(6)	7(9)	5(8)	1(6)	1(7)	1(6)	5(3)	5(3)	5(9)	6(5)	3(9)
<b>MIROC6</b>	7(1)	1(8)	7(1)	3(8)	1(9)	5(4)	10(4)	5(8)	3(1)	3(2)	3(2)	5(3)	3(1)
<b>EC</b>	3(9)	7(9)	5(5)	10(10)	7(7)	6(8)	9(6)	3(7)	4(9)	4(7)	4(8)	8(9)	5(10)
<b>GFDL</b>	6(5)	4(7)	3(3)	5(5)	4(6)	2(3)	8(2)	10(2)	10(4)	8(6)	9(10)	7(2)	6(3)
<b>CanESM5</b>	2(7)	6(4)	10(10)	9(1)	8(3)	6(5)	4(9)	6(4)	6(2)	6(5)	7(7)	4(10)	7(6)
<b>INM</b>	8(10)	3(2)	8(4)	8(2)	6(5)	8(9)	5(8)	7(9)	8(7)	7(9)	8(5)	9(1)	8(7)
<b>GISS</b>	3(5)	10(6)	9(6)	6(4)	9(4)	9(7)	7(1)	8(1)	9(5)	10(7)	6(6)	3(4)	9(4)
<b>BCC</b>	9(8)	5(10)	4(8)	4(3)	10(1)	10(2)	6(3)	9(3)	7(6)	9(4)	10(3)	10(8)	10(5)

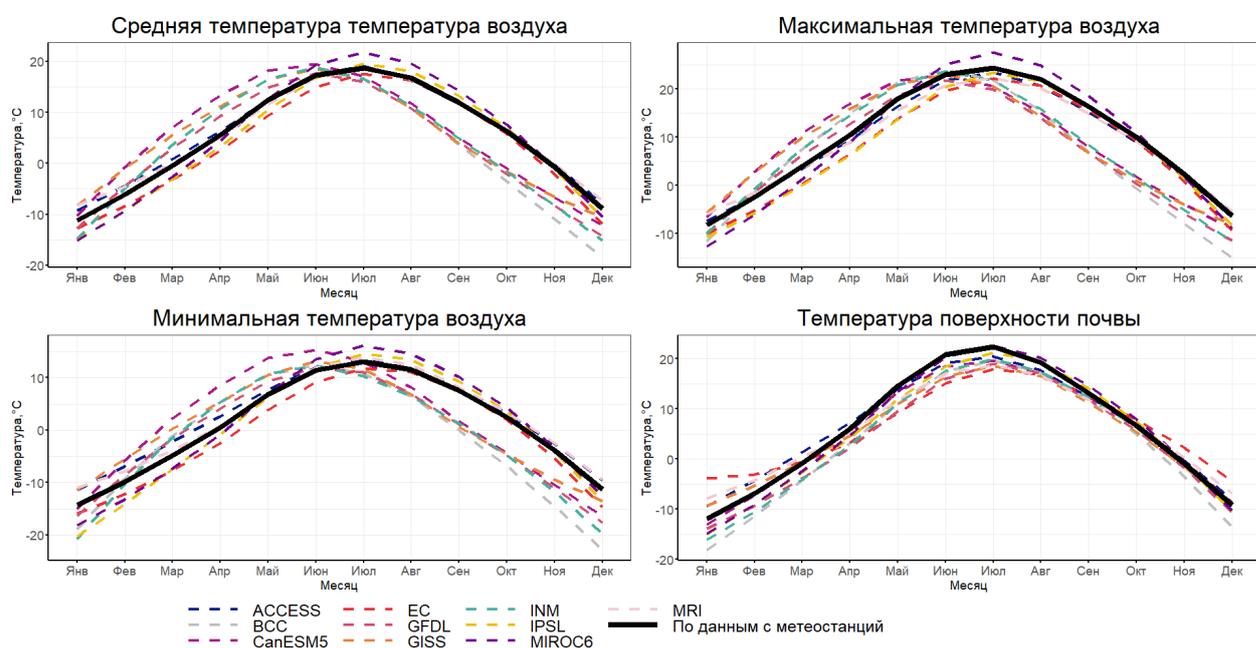


Рисунок 6. Внутригодовое распределение термических характеристик в зоне Dfb.

*Результаты по ре-анализам.*

Визуализация некоторых результатов для центральных месяцев летнего и зимнего сезонов представлена на рисунке 7.

Анализ статистических оценок показал, что каждый ре-анализ лучше всего воспроизводит среднюю температура воздуха. ERA5, также как и в зоне Dfc, показывает наилучшие результаты, однако, в августе и сентябре она уступает ре-анализам MERRA-2 и NCEP соответственно. Стоит отметить, что коэффициент корреляции по данным средней температуры воздуха при сравнении с натурными наблюдениями у ERA5 в каждый месяц равен 1. Нормированные значения при оценке всех рядов температур данного ре-анализа также находятся в пределах нормы (меньше 0.2). MERRA-2

значительно лучше воспроизводит экстремальные температуры, чем NCEP, особенно в переходные сезоны (индекс согласия по ре-анализу NCEP мог достигать 0.5).

В процессе анализа было выявлено, что ре-анализы, как правило, занижают температурные показатели. В частности, средняя ошибка по данным температуры поверхности почвы в июне равна  $-3.6^{\circ}\text{C}$ ,  $-3.9^{\circ}\text{C}$  и  $-3.5^{\circ}\text{C}$  для ре-анализов ERA5, MERRA-2 и NCEP соответственно.

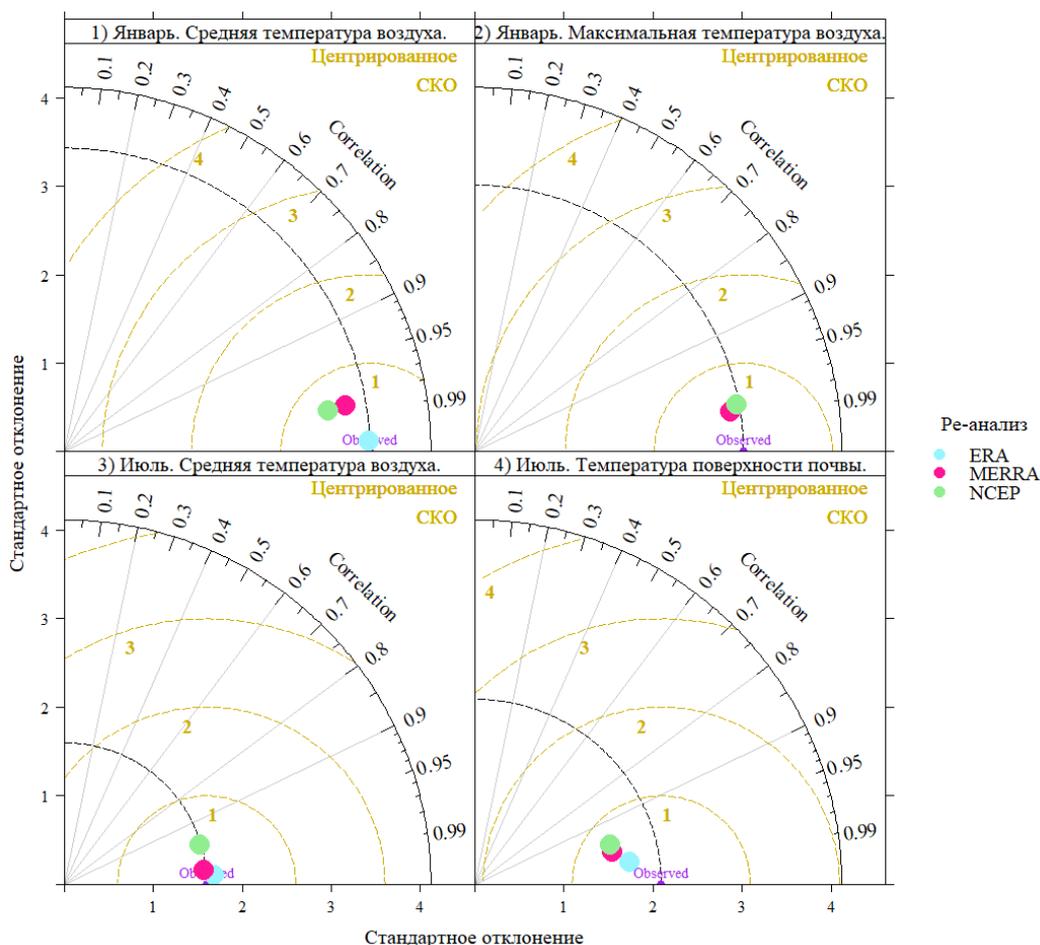


Рисунок 7. Диаграммы Тейлора по данным ре-анализов 1,3 - для наиболее «простых» и 2,4- наиболее «сложных» для воспроизводства термических характеристик в зоне Dfb.

#### 4.3. Климатическая зона Dfa.

##### *Результаты по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.*

В таблице 5 представлен список моделей со значениями рангов для каждого месяца. На рисунке 8 представлены внутригодовые распределения каждой исследуемой температуры.

В ходе работы было выявлено, что модель MRI относительно других моделей лучше воспроизводит термический режим исследуемой климатической зоны. Это подтверждают, как и нормированные значения (за период с мая по октябрь данный показатель был меньше 0.2), так и значения индекса согласия, который в среднем для всех моделей был равен 0.36, а среднее значение у MRI - 0.45. Модель ACCESS показывает хороший результат для периода с август по январь, а EC-Earth3 - с февраля по июнь.

Такие модели как BCC, CanESM5, GFDL, GISS и INM значительно занижают температуры воздуха в осенний период и завышают в весенний. Однако, стоит отметить, что при этом GISS и GFDL имеют хороший результат при оценке тренда.

Таблица 5. Ранжированный список моделей для зоны Dfa.

Модель	Месяц												Общий итог
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	
<b>MRI</b>	6(4)	2(3)	2(5)	1(8)	3(6)	3(1)	6(5)	4(3)	1(4)	1(8)	1(1)	3(6)	1(2)
<b>ACCESS</b>	1(9)	9(2)	4(8)	2(6)	4(10)	7(9)	8(9)	2(2)	3(6)	2(4)	2(6)	1(7)	2(9)
<b>EC</b>	4(10)	3(10)	1(1)	4(9)	1(7)	1(10)	7(3)	3(4)	4(10)	4(5)	4(3)	9(8)	3(10)
<b>IPSL</b>	10(6)	4(4)	4(2)	6(10)	2(5)	2(6)	5(10)	1(1)	2(7)	3(1)	5(10)	5(3)	4(7)
<b>MIROC6</b>	8(5)	1(1)	3(3)	3(7)	5(9)	10(3)	10(8)	8(10)	6(1)	5(3)	6(2)	2(9)	5(3)
<b>INM</b>	2(3)	5(7)	8(9)	7(2)	6(1)	8(8)	2(7)	9(9)	8(9)	8(9)	3(5)	8(5)	6(8)
<b>GFDL</b>	3(7)	8(5)	6(6)	10(2)	10(8)	4(5)	4(1)	6(8)	9(5)	7(6)	7(7)	6(2)	7(3)
<b>CanESM5</b>	5(2)	6(8)	10(10)	9(4)	8(2)	6(2)	2(6)	7(7)	5(3)	6(2)	10(9)	7(10)	8(6)
<b>GISS</b>	7(1)	10(6)	9(7)	5(5)	7(4)	4(4)	9(2)	10(5)	10(8)	10(10)	7(8)	4(1)	9(1)
<b>BCC</b>	9(8)	7(8)	7(4)	8(1)	9(2)	9(7)	1(4)	5(6)	7(2)	9(7)	9(4)	10(4)	10(5)

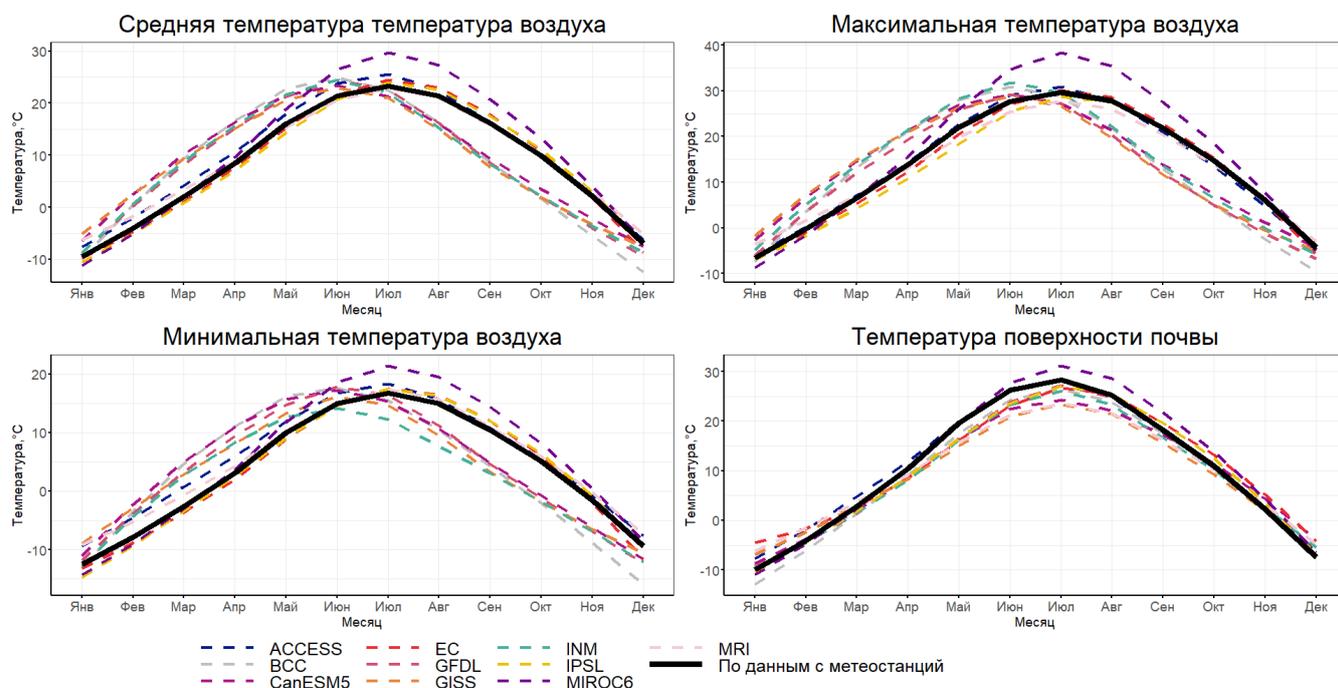


Рисунок 8. Внутригодовое распределение термических характеристик в зоне Dfa.

При рассмотрении каждой термической характеристики отдельно, наиболее качественно воспроизведена температура поверхности почвы, а худшие результаты, как правило, наблюдаются при оценке максимальной температуры воздуха. Стоит отметить, что качество воспроизводства той или иной характеристики у каждой модели разное. Например, модель MRI лучше воспроизводит среднюю температуру воздуха и хуже всего – температуру поверхности почвы, а ACCESS лучше в воспроизводстве минимальной температуры воздуха и температуре поверхности почвы, при этом худший результат по данной модели наблюдается при рассмотрении средней температуры воздуха.

*Результаты по ре-анализам.*

Диаграммы Тейлора для центральных месяцев летнего и зимнего периодов представлены на рисунке 9.

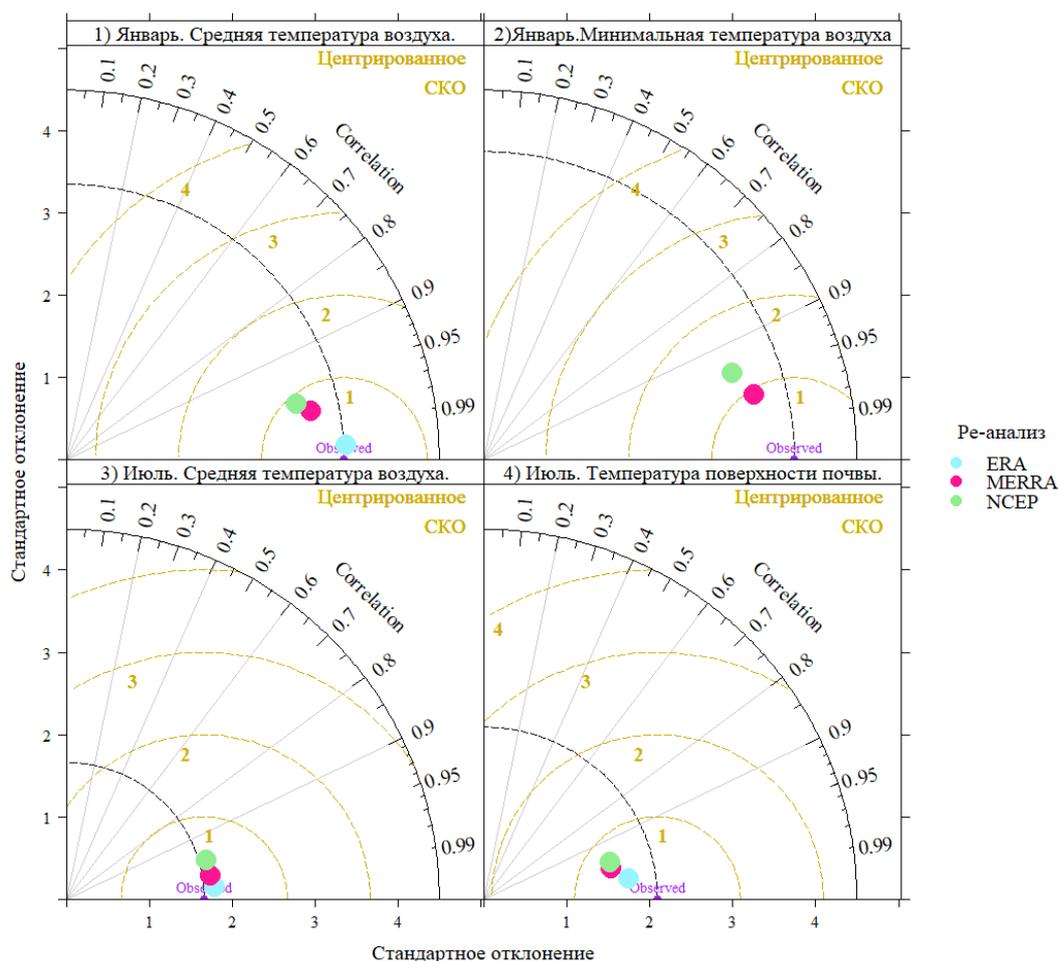


Рисунок 9. Диаграммы Тейлора по данным ре-анализов 1,3 - для наиболее «простых» и 2,4- наиболее «сложных» для воспроизводства термических характеристик в зоне Dfa.

Как и в более высоких широтах, повторный анализ ERA5 лидирует по воспроизводству средней температуры воздуха и температуре поверхности почвы. Нормированное значение по данным ERA5 в каждый месяц 0.2, кроме марта и ноября, но высокие показатели в данные месяцы могут быть связаны с чувствительностью данной оценки к значениям, стремящимся к нулю. Ре-анализ MERRA-2 на высоком уровне воспроизводит максимальную и среднюю температуры воздуха, особенно в теплые периоды года (коэффициент корреляции больше 0.95). Также хорошие статистические оценки при рассмотрении температур воздуха имеет ре-анализ NCEP в летний период (индекс согласия не меньше 0.88).

В ходе работы было выявлено, что ре-анализы занижают экстремальные температуры (каждый месяц) и температуру поверхности почвы (в период с апреля по октябрь). В целом, ре-анализы лучше воспроизводят среднюю температуру воздуха и хуже – минимальную температуру воздуха.

#### *4.4. Климатическая зона Cfa.*

##### *Результаты по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.*

Список с ранжированными моделями представлен в таблице 6, а на рисунке 10 представлены графики внутригодового распределения каждой исследуемой температуры.

Полученный результат показал, что в данном регионе модель EC-Earth3 лучше воспроизводит термический режим относительно других моделей. В период с июня по октябрь и в январе у данной модели были одни из самых высоких значений коэффициента корреляции при сравнении с другими моделями. Также стоит отметить модели MRI и IPSL, которые моделируют температуры в переходные сезоны (среднее значение индекса согласия равно 0.41) на приемлемом уровне.

Также было обнаружено, что модели GISS, INM и BCC лучше воспроизводят линейный тренд. Модель MRI имеет удовлетворительные результаты не только при оценке значений температур, но и при рассмотрении линейного тренда, в то время как «лучшая» модель данной климатической зоны EC-Earth относительно других моделей плохо воспроизводит линейный тренд.

В данной климатической зоне модели лучше воспроизводят температуру поверхности почвы. Самой трудной с точки зрения моделирования оказалась средняя температура воздуха. Стоит отметить, что модель EC-Earth3 лучше воспроизводит температуры воздуха, и хуже – температуру поверхности почвы.

Таблица 6. Ранжированный список моделей для зоны Cfa.

Модель	Месяц												Общий итог
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	
<b>EC</b>	1(10)	4(2)	4(1)	3(8)	2(7)	1(10)	3(8)	2(4)	3(10)	2(1)	4(2)	1(6)	1(9)
<b>MRI</b>	8(3)	2(1)	1(5)	4(9)	3(2)	4(7)	8(9)	4(2)	4(1)	1(5)	1(3)	6(3)	2(1)
<b>IPSL</b>	6(5)	9(9)	2(9)	6(10)	1(4)	2(2)	9(4)	1(1)	1(8)	3(2)	8(10)	7(4)	3(6)
<b>ACCESS</b>	9(9)	5(7)	5(3)	2(4)	4(10)	3(5)	7(10)	2(3)	2(7)	4(7)	5(9)	10(9)	4(10)
<b>MIROC6</b>	5(7)	1(5)	2(3)	1(7)	5(9)	7(6)	10(3)	7(9)	7(2)	6(3)	2(1)	9(7)	5(3)
<b>GFDL</b>	7(6)	3(3)	6(7)	5(1)	8(6)	6(4)	6(5)	8(10)	8(9)	7(6)	9(6)	4(8)	6(7)
<b>BCC</b>	3(8)	7(6)	7(8)	9(2)	9(3)	10(3)	1(1)	6(5)	6(4)	9(8)	7(4)	8(2)	7(2)
<b>INM</b>	2(4)	10(8)	7(2)	8(5)	7(5)	8(8)	5(7)	9(6)	9(6)	8(9)	3(5)	2(1)	8(4)
<b>CanESM5</b>	10(2)	6(10)	10(10)	10(6)	10(1)	9(1)	2(6)	5(7)	5(5)	5(4)	6(7)	5(10)	9(8)
<b>GISS</b>	4(1)	8(4)	9(6)	7(3)	6(8)	5(9)	4(2)	9(8)	10(3)	10(10)	10(8)	3(5)	9(5)

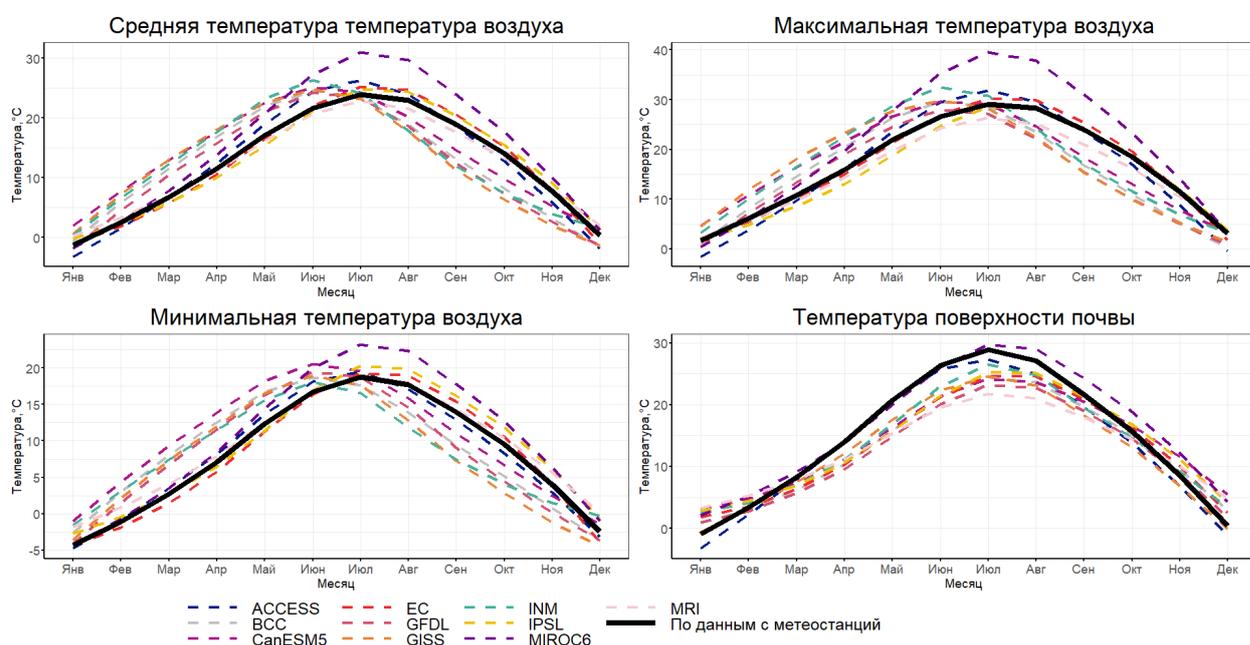


Рисунок 10. Внутригодовое распределение термических характеристик в зоне Cfa.

*Результаты по re-анализам.*

Диаграммы Тейлора для центральных месяцев летнего и зимнего периодов представлены на рисунке 11.

В данной климатической зоне re-анализ MERRA-2 показал наилучшие результаты при рассмотрении температур воздуха. В частности, нормированное значение при рассмотрении максимальной температуры воздуха у данного re-анализа меньше 0.2 в каждом месяце. Re-анализ ERA5 лучше остальных воспроизводит среднюю температуру воздуха (индекс согласия не меньше 0.93) и температуру поверхности почвы (коэффициент корреляции не больше 0.8). Термический режим re-анализа NCEP меньше

остальных соответствует наблюдаемым значениям, особенно при рассмотрении результатов по температуре поверхности почвы.

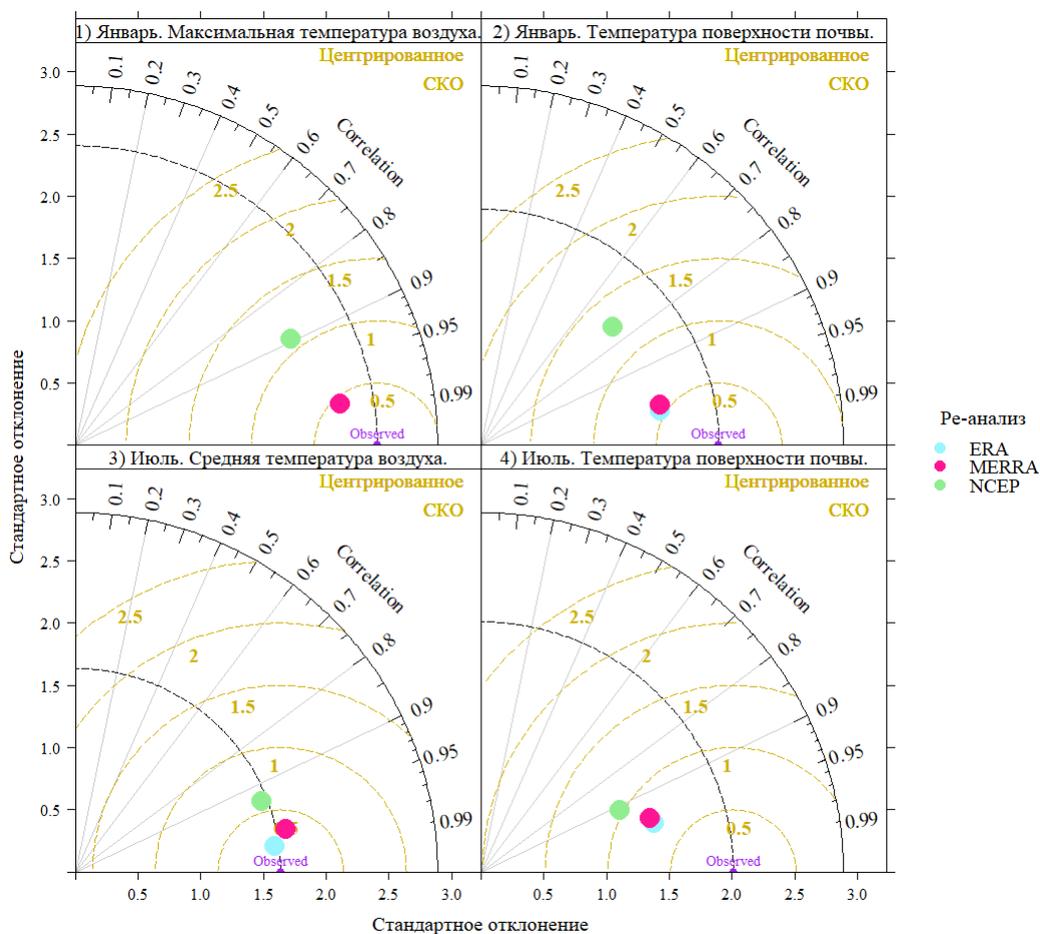


Рисунок 11. Диаграммы Тейлора по данным ре-анализов 1,3 - для наиболее «простых» и 2,4- наиболее «сложных» для воспроизводства термических характеристик в зоне Cfa.

В процессе работы было выявлено, что максимальная и средняя температуры, как правило, занижаются ре-анализами. В период с марта по октябрь повторные анализы значительно занижают температуру поверхности почвы (до 6°C).

#### 4.5. Климатическая зона Bsk.

*Результаты по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.*

В таблице 7 представлен ранжированный список моделей. На рисунке 12 изображены графики внутригодовых распределений исследуемых температур.

Таблица 7. Ранжированный список моделей для зоны Bsk.

Модель	Месяц												Общий итог
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	
<b>ACCESS</b>	1(9)	3(1)	4(3)	2(5)	5(10)	8(7)	4(8)	2(4)	2(2)	2(8)	3(7)	2(8)	1(10)
<b>MRI</b>	8(5)	2(5)	3(1)	1(9)	3(5)	4(1)	9(7)	4(2)	3(8)	1(6)	1(6)	3(7)	2(2)
<b>EC</b>	4(10)	4(7)	1(2)	4(8)	1(6)	2(10)	3(3)	3(4)	4(10)	5(1)	5(4)	5(4)	3(6)
<b>IPSL</b>	5(4)	6(9)	5(6)	5(10)	2(3)	1(6)	5(10)	1(1)	1(5)	3(2)	7(10)	8(3)	4(8)
<b>MIROC6</b>	2(6)	1(4)	2(4)	3(6)	4(9)	10(3)	10(9)	7(8)	6(3)	6(5)	10(1)	9(9)	5(5)
<b>CanESM5</b>	10(2)	5(6)	6(5)	9(7)	9(8)	7(4)	8(5)	5(7)	5(1)	4(3)	4(9)	7(10)	6(7)
<b>INM</b>	3(1)	8(10)	10(10)	6(3)	6(1)	3(8)	6(6)	10(10)	9(9)	8(9)	2(3)	4(5)	7(9)
<b>GFDL</b>	6(7)	10(2)	9(8)	8(2)	9(7)	5(5)	1(1)	6(9)	8(4)	7(4)	6(5)	6(1)	8(1)
<b>GISS</b>	7(3)	9(8)	8(9)	7(4)	7(2)	9(2)	7(2)	9(3)	10(7)	9(10)	9(8)	1(2)	9(3)
<b>BCC</b>	9(8)	7(3)	7(7)	10(1)	8(4)	6(9)	2(4)	8(6)	7(6)	10(7)	8(2)	10(6)	10(4)

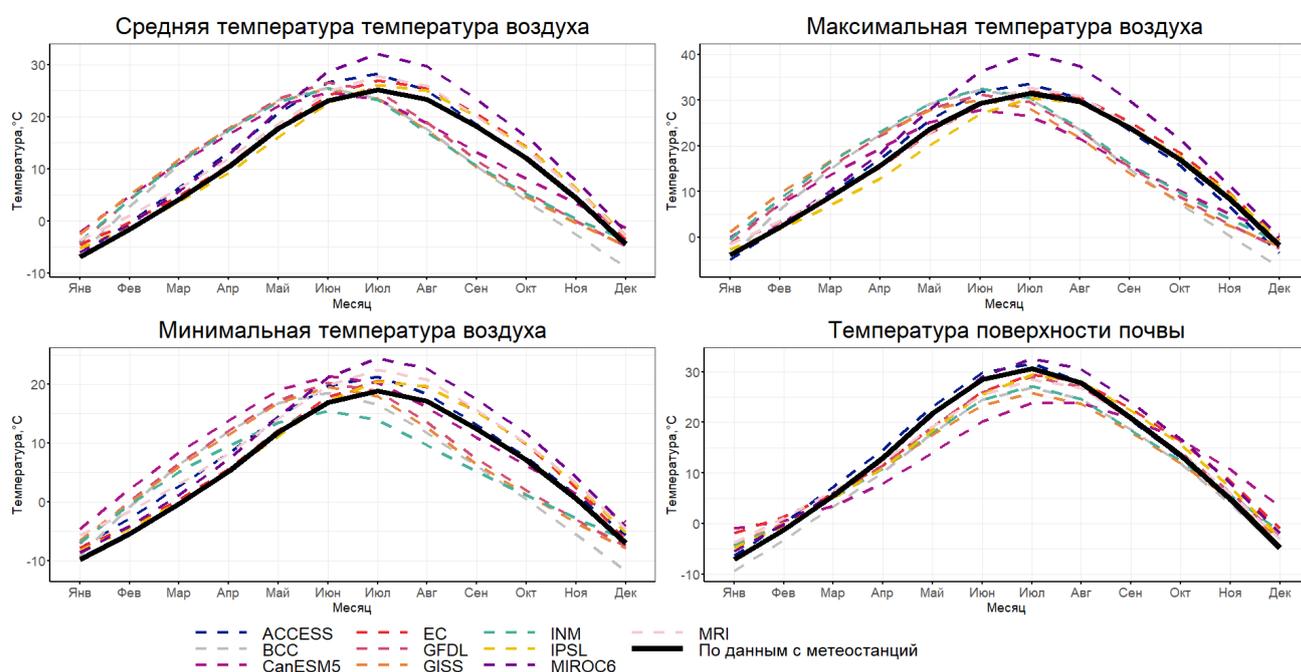


Рисунок 12. Внутригодовое распределение термических характеристик в зоне Bsk.

В ходе работы было выявлено, что модель ACCESS относительно других моделей лучше воспроизводит термический режим данной климатической зоны. При рассмотрении периода с апреля по октябрь, среднее нормированное значение по всем моделям достигает 0.25, а для ACCESS оно равно 0.15. Отдельного упоминания стоят модели MRI и MIROC6, которые относительно других моделей качественно воспроизводят переходные сезоны (MRI) и период с января по апрель (MIROC6).

По результатам оценки линейного тренда некоторые модели, которые хуже воспроизводят термический режим, лучше моделируют линейный тренд (GISS, GFDL, BCC). Помимо этого, было выявлено, что модели MIROC6 и MRI на одном уровне качества воспроизводят значения температур и их тренд.

По результатам статистических оценок наиболее простой термической характеристикой для моделирования для большинства моделей является температура поверхности почвы, которую на приемлемом уровне воспроизводит большинство моделей, особенно период с мая по сентябрь. В целом, модели склонны завышать температуры в данном регионе, кроме моделей BCC, CanESM5, GFDL, GISS и INM в осенний период.

*Результаты по ре-анализам.*

Визуализация части результатов с использованием диаграмм Тейлора представлена на рисунке 13.

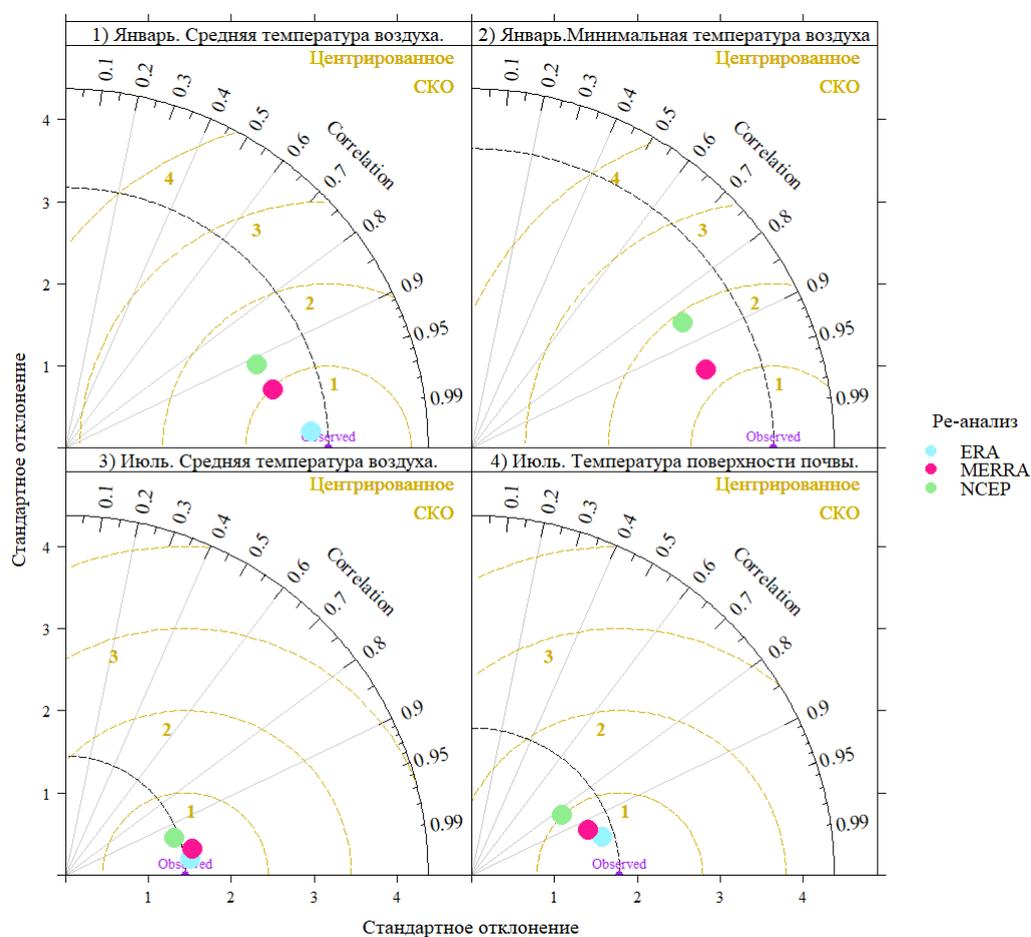


Рисунок 13. Диаграммы Тейлора по данным ре-анализов 1,3 - для наиболее «простых» и 2,4- наиболее «сложных» для воспроизводства термических характеристик в зоне Bsk.

В процессе работы было обнаружено, что ре-анализы ERA5 и MERRA-2 почти на одном уровне качества воспроизводят среднюю и максимальную температуры соответственно. Также стоит отметить, что ERA5 в период с октября по март приемлемо

воспроизводит температуру поверхности почвы. Результат по ре-анализу NCEP значительно хуже остальных. Коэффициент корреляции по экстремальным температурам воздуха и температуре поверхности почвы варьируется от 0.69 до 0.91, в то время как у остальных ре-анализов он в большинстве случаев выше 0.9. По остальным статистическим оценкам NCEP также уступает другим ре-анализам.

Также как и в зоне Cfa, ре-анализы значительно занижают температуры поверхности почвы в период с марта по сентябрь. Например, в июне средние ошибки равны  $-4.5^{\circ}\text{C}$  (ERA5),  $-3.6^{\circ}\text{C}$  (MERRA-2) и  $-4.4^{\circ}\text{C}$  (NCEP). Ре-анализы MERRA-2 и NCEP склонны завышать температуры воздуха в летний период и занижать в зимний, при этом абсолютные значения у NCEP выше.

#### *4.6. Обсуждение результатов.*

##### *Результаты по моделям общей циркуляции атмосферы и океана.*

В целом, значения ни одной модели нельзя назвать достаточно надежными с точки зрения воспроизведения термического режима ЕТР при данных методах оценки. Смоделированные значения среднемесячной температуры воздуха за изучаемый период не всегда и не во всех районах коррелируют с наблюдаемыми значениями и могут сильно отличаться от них по модулю. Оценка линейного тренда также показала, что модели не всегда верно воспроизводят как значимость тренда, так и его угол наклона.

Наиболее оптимальные модели для того или иного района в каждый месяц представлены на рисунках 14-17. Цвет каждой климатической зоны соответствует той модели, которая лучше воспроизводит данный район в рассматриваемый период года. По данным картам видно, что, например, модели IPSL и MRI, как правило, лучше воспроизводят термический режим в летние и осенние месяцы соответственно. В зимний период можно отметить две модели – ACCESS и MIROC6, а в весенний – ACCESS, MIROC6 и EC-Earth3.

При более углубленном анализе полученных результатов можно прийти к выводу, что в целом наиболее оптимальной моделью с точки зрения воспроизводства термического режима для ЕТР является модель MRI-ESM2.0 от Метеорологического научно-исследовательского института Японии.

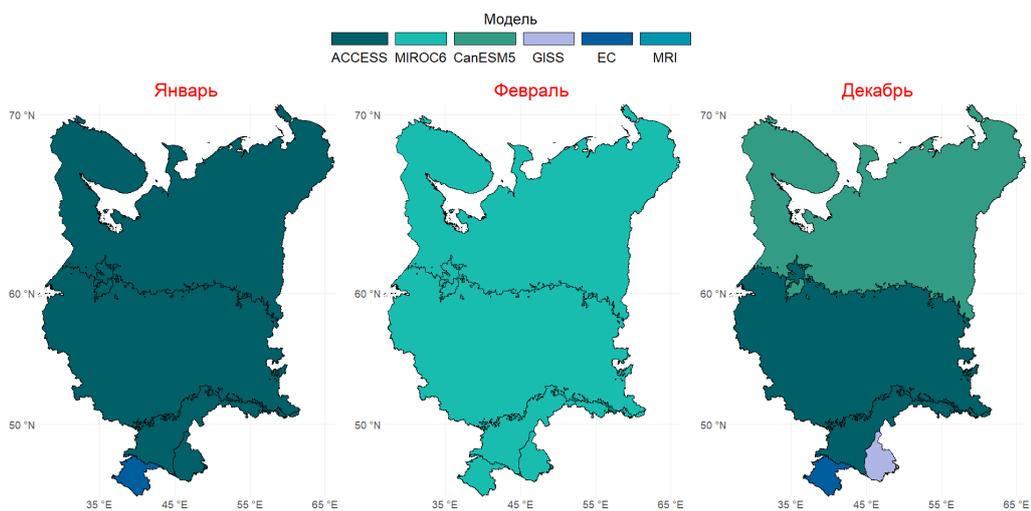


Рисунок 14. Карты-схемы «лучших» моделей для зимних месяцев.

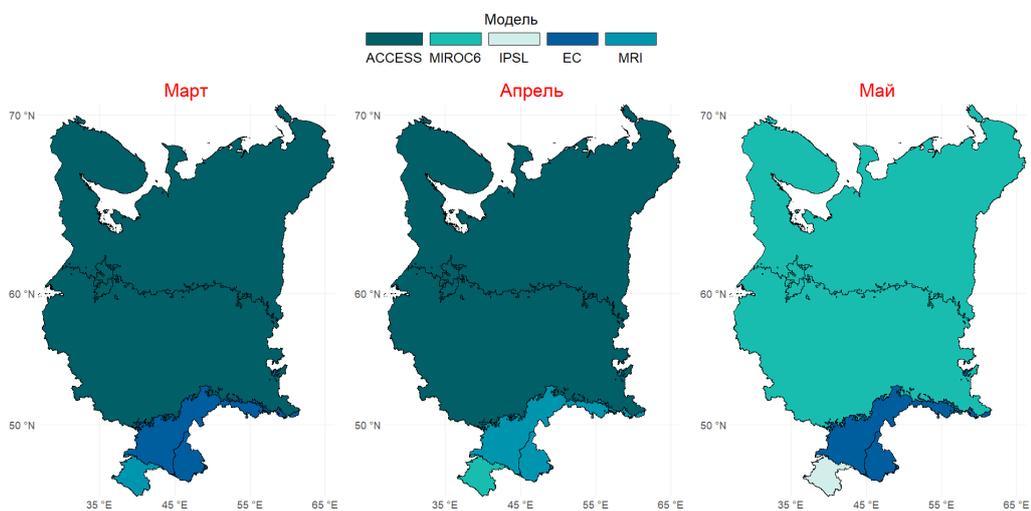


Рисунок 15. Карты-схемы «лучших» моделей для весенних месяцев.

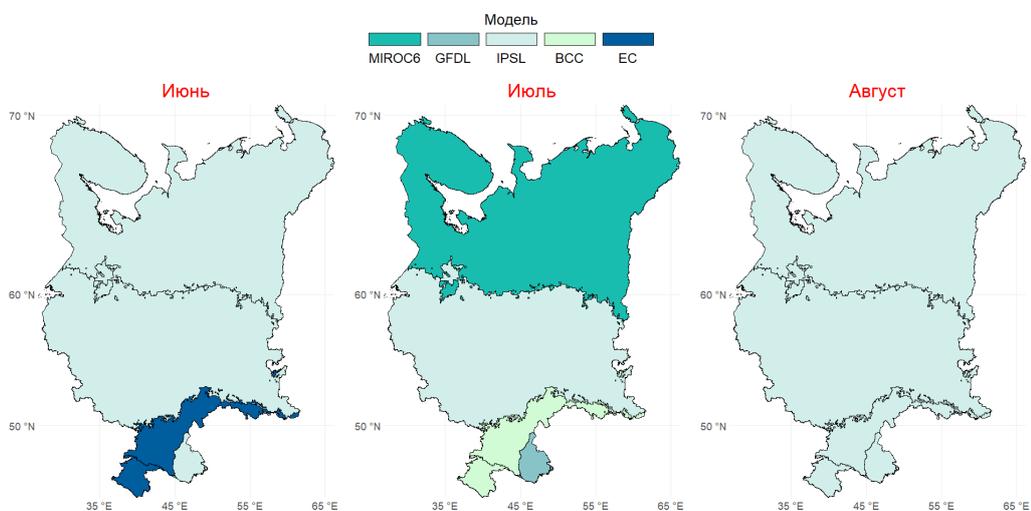


Рисунок 16. Карты-схемы «лучших» моделей для летних месяцев.

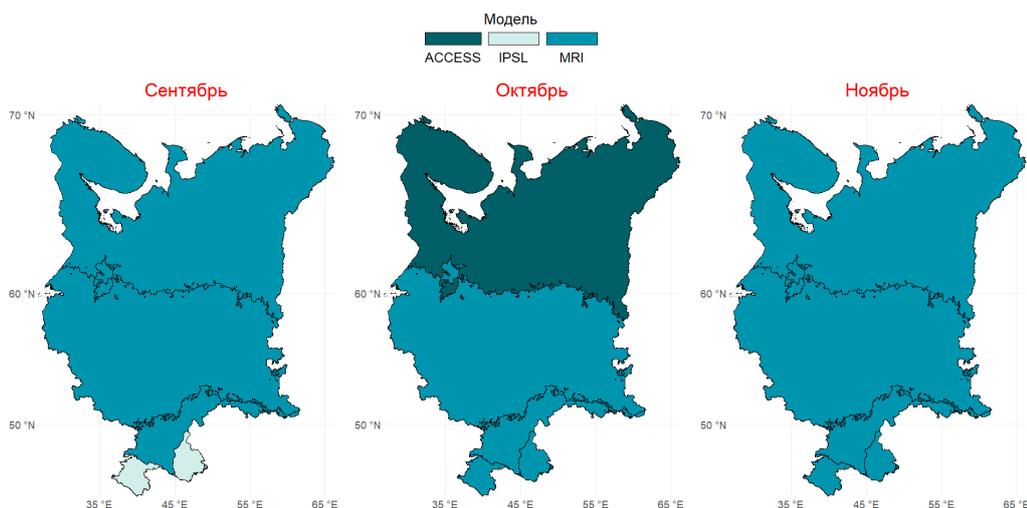


Рисунок 17. Карты-схемы «лучших» моделей для осенних месяцев.

В процессе работы также было выявлено, что, возможно, некоторые модели общей циркуляции следует использовать при оценке изменений термического режима. В таблице 8 представлен список с ранжированными моделями в зависимости от характеристики оценки.

Таблица 8. Ранжированные модели в зависимости от предмета оценки.

Модель	Ранг (при оценке значений ряда)	Модель	Ранг (при оценке тренда)
MRI	1	MRI	1
ACCESS	2	GFDL	2
IPSL	3	MIROC6	3
EC	4	GISS	4
MIROC6	5	BCC	5
GFDL	6	INM	6
CanESM5	7	IPSL	6
INM	8	CanESM5	8
GISS	9	ACCESS	9
BCC	10	EC	10

По данным таблицы 8 видно, что, как правило, воспроизводство моделями значений температур и их линейного тренда не совпадает. Однако, есть модели (MRI, CanESM5), которые способны воспроизводить температурные значения и их тренд примерно на одном уровне качества. Также стоит отметить, что качество воспроизводства тренда и термических характеристик у моделей ACCESS и GISS значительно отличается.

Используемые в данной работе методы оценки показали, что наибольшее соответствие наблюдаемым линейным трендам имеет модель от Метеорологического научно-исследовательского института Японии MRI-ESM2.0, которая также лучше остальных моделей воспроизводит термический режим ЕТР.

*Результаты по ре-анализам.*

В процессе работы все исследуемые в данной работе ре-анализы показали хорошие результаты. Качество воспроизводства той или иной характеристики термического режима может меняться от одной климатической зоны к другой, однако, у ре-анализов, как правило, уровень качества данных не меняется. В таблице 9 представлен обобщенный ранжированный список для всей Европейской территории России.

Таблица 9. Ранжированные ре-анализы.

Температура	Ре-анализ	Ранг
Средняя температура воздуха	ERA	1
Средняя температура воздуха	MERRA	2
Максимальная температура воздуха	MERRA	3
Средняя температура воздуха	NCEP	4
Минимальная температура воздуха	MERRA	5
Температура поверхности почвы	ERA	6
Температура поверхности почвы	MERRA	7
Минимальная температура воздуха	NCEP	8
Максимальная температура воздуха	NCEP	9
Температура поверхности почвы	NCEP	10

В целом, ре-анализ ERA5 наиболее приемлемо воспроизводит температуру поверхности почвы и среднюю температуру воздуха, чем остальные ре-анализы. Если же рассматривать ре-анализы, которые имеют данные по экстремальным температурам воздуха, то MERRA-2 имеет более качественные данные, чем NCEP. Также стоит отметить, что при используемых в данной работе методах оценивания на ЕТР ре-анализы лучше воспроизводят среднюю температуру воздуха, а наиболее «сложной» является температура поверхности почвы.

## Заключение.

Основной результат данной работы – выбор моделей проекта CMIP6 и ре-анализов, которые могут наиболее качественно воспроизвести термический режим на Европейской территории России с 1981 по 2010 год. В ходе работы было выявлено, что лучшей моделью по воспроизводству термического режима и линейного тренда является MRI-ESM2.0 от Метеорологического научно-исследовательского института Японии. Ре-анализом, который наиболее качественно воспроизводит все термические характеристики и имеет данные по ним, является MERRA-2, созданный управлением глобального моделирования и ассимиляции (Global Modeling and Assimilation Office, GMAO) от НАСА. Стоит отметить, что часть результатов исследования была представлена на конференциях «Ломоносов-2021» (Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021») и «БГФ-2021».

В ходе исследования были сделаны следующие выводы о качестве воспроизводства температурного режима используемыми в работе ре-анализами:

- Температура воздуха (средняя месячная, средняя годовая, средняя за сезон) воспроизводится ре-анализами лучше, чем экстремумы температуры воздуха и температура поверхности почвы.
- Ре-анализ ERA5 наиболее адекватно воспроизводит среднемесячные значения средней температуры воздуха и поверхности почвы.
- Ре-анализы лучше воспроизводят среднюю температуру воздуха, а наиболее «сложной» является температура поверхности почвы.

Исследование качества воспроизводства температурного режима используемыми в работе моделями общей циркуляции атмосферы и океана позволило сделать следующие выводы:

- Ни одна из изученных в работе моделей не воспроизводит термический режим ЕТР с высокой точностью, в соответствии с выбранными статистическими параметрами достоверности.
- Модели воспроизводят каждый район и период года по-разному. Например, модели MIROC6 и EC-Earth лучше воспроизводят северный и южный районы соответственно, а модель IPSL лучше воспроизводит теплые период года вне зависимости от климатической зоны.

В качестве заключения следует подчеркнуть, что в практике использования данных моделей общей циркуляции атмосферы следует учитывать для какого времени года и географического региона проводится исследование, потому как ни одна модель качественно не воспроизводит все периоды года и климатические зоны.

## Список литературы.

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. – Москва, 2020. – 97 стр.
2. Дроздов, О.А. Климатология / Дроздов, О.А.; Васильев, В.А.; Кобышева, Н.В. и др.- Учебник. -Ленинград.: Гидрометиздат, 1989. - 568 с
3. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2021
4. Менжулин Г.В., Галахова Ю.Е. Оценки достоверности модельных сценариев изменений глобального климата в применении к задачам расчета их влияния на экологические процессы // Материалы конференции (21 марта 2012 г., Санкт-Петербург) «Настоящее и будущее урбанизации: экологические вызовы» – СПб., 2012. – с. 54-64
5. Baker J. et al. Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. // HESS. 2021. V. 25. Pp. 2279–2300
6. Bhattacharya T., Khare D. & Arora M. Evaluation of reanalysis and global meteorological products in Beas River basin of North-Western Himalaya // Environmental Systems Researchю 2020. Vol. 9, Pp.1-29
7. Boucher O. et al. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LRclimate model. // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2020. Vol.12, № 7. Pp. 1-52. – <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>
8. Camera C. et al. Evaluation of interpolation techniques for the creation of gridded daily precipitation (1 × 1 km<sup>2</sup>); Cyprus, 1980–2010 // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2014. Vol. 119. Pp. 693–712
9. Dunne J. P. et al. The GFDL-ESM4.1 Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM4.1-ESM 4.1): Overall Coupled Model Description and Simulation Characteristics // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2020. Vol. 12, № 11 <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
10. Eyring, V et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. // Geosci. Model Dev. 2016. Vol. 9. Pp. 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
11. Hirabayashi, Y., Tanoue, M., Sasaki, O. et al. Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. // Sci Rep. 2021. Vol. 11. No. 3740. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83279-w>

12. Hofstra N. et al. Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2008. Vol.113, № D21. Pp. 1-19. <https://doi.org/10.1029/2008JD010100>
13. Jiang X. et al. Comparison of spatial interpolation methods for daily meteorological elements // *The journal of applied ecology*. 2010. Vol. 21,3. Pp. 624-630.
14. Taylor K. E. et al. CMIP6 Global Attributes, DRS, Filenames, Directory Structure, and CV's [Online] // *Controlled Vocabularies (CVs) for use in CMIP6*. – 2018 September. - <https://goo.gl/v1drZl>
15. Kelley, M. et al. GISS-E2.1: Configurations and climatology. // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. Vol. 12. Pp. 1942-2466. <https://doi.org/10.1029/2019MS002025>
16. Legates, D. R., McCabe, G. J. Evaluating the Use of “Goodness-of-Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. // *Water Resources Research*, 1999. №35. Pp. 233-241. <http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018>
17. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. // *J. Hydrol.* 1970. №10. Pp. 282–290
18. Rusu L., Goncalves M., Guedes Soares C. Prediction of storm conditions using wind data from the ECMWF and NCEP reanalysis // *Developments in Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources*. 2017. Vol. 2. Pp.1111-1117
19. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Likhosherstova A.A. Exploring large-scale black-carbon air pollution over Northern Eurasia in summer 2016 using MERRA-2 reanalysis data // *Atmospheric Research*. 2020. Vol. 235. article id. 104763.
20. Sołowiej A., Dimitrova-Grekow T., Sobolewski R.A. Meteorological Data Acquisition from MERRA-2 Reanalysis for Wind Energy Systems Modeling Support. // *Contemporary Complex Systems and Their Dependability*. 2018. Vol 761. Pp. 451-460
21. Stocker T.F. et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* // Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013
22. Sun, Q., Miao, C. and Duan, Q. Extreme climate events and agricultural climate indices in China: CMIP5 model evaluation and projections. // *Int. J. Climatol.* 2016. V. 36 Pp. 43-61. <https://doi.org/10.1002/joc.4328>
23. Tan E. Evaluation of NCEP/NCAR Reanalysis Precipitable Water Data Comparing to Radiosonde Observations for Turkey // *Cumhuriyet Science Journal*. 2019. Vol. 40-2. Pp. 527-535

24. Tao J. et al. Permafrost variability over the Northern Hemisphere based on the MERRA-2 reanalysis // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. Pp. 2087–2110
25. Tatebe H. et al. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6 // *Geoscientific Model Development*, 2019. Vol.12. № 7. Pp. 2727. – URL: <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
26. Tongwen W. et al. Beijing Climate Center Earth System Model version 1 (BCC-ESM1): model description and evaluation of aerosol simulations // *Geosci. Model Dev.* 2020. Vol. 13. Pp. 977–1005 <https://doi.org/10.5194/gmd-13-977-2020>
27. Volodin, E. and Gritsun, A. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5. // *Earth Syst. Dynam.* 2018. Vol. 9. Pp. 1235–1242, <https://doi.org/10.5194/esd-9-1235-2018>
28. Volodin E.M., Mortikov, E.V., Kostykin, S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. // *Clim Dyn.* 2017. Vol. 49, Pp. 3715–3734. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3539-7>
29. Yan Y., Zhu, C., Liu, B., Jiang, S. Annual Cycle of East Asian Precipitation Simulated by CMIP6 Models. // *Atmosphere* 2021, Vol. 12, no. 24. <https://doi.org/10.3390/atmos12010024>
30. Young H. S. et al., Advances in CMIP6 INM-CM5 over CMIP5 INM-CM4 for precipitation simulation in South Korea. // *Atmospheric Research*. 2020. Vol. 247, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105261>
31. Yukimoto S. et al. The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. 2019. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Vol. 97. Issue 5. P. 931-965
32. Zhang Q. et al. Simulating the mid-Holocene, last interglacial and mid-Pliocene climate with EC-Earth3-LR. // *Geosci. Model Dev.* 2021. Vol. 14. Pp. 1147–1169. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1147-2021>
33. Ziehn T. et al. The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5 // *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science* 2020. Vol. 70, Pp. 193-214. <https://doi.org/10.1071/ES19035>
34. Доступ к данным [Электронный ресурс] // ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://meteo.ru/> (Дата обращения: 14.09.2020)
35. Climate Data Guide [Электронный ресурс] // National Center for Atmospheric Research. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/> (Дата обращения: 07.11.2020)
36. Climate Data Store [Электронный ресурс] // Copernicus. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (Дата обращения: 17.10.2020)

37. Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6) [Электронный ресурс] // World Climate Research Programme (WCRP). URL: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/> (дата обращения: 19.09.2020)
38. Earth Data [Электронный ресурс]: URL: <https://earthdata.nasa.gov/> (Дата обращения: 30.10.2020)
39. EC-Earth [Электронный ресурс]: URL: <http://www.ec-earth.org/> (Дата обращения: 03.11.2020)
40. IPCC Data Distribution Centre [Электронный ресурс]: URL: <https://www.ipcc-data.org> (Дата обращения: 03.02.2020)
41. National Climatic Data Center [Электронный ресурс] // National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/> (Дата обращения: 01.10.2020)
42. Physical Sciences Laboratory [Электронный ресурс] // National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <https://psl.noaa.gov/> (Дата обращения: 01.10.2020)
43. World Map of the Köppen-Geiger climate classification [Электронный ресурс]: URL: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm> (Дата обращения: 17.10.2020)