

На правах рукописи

Бабанов Борис Андреевич

**Режимы крупномасштабной атмосферной циркуляции в
регионах Евро-Атлантики и Северной Евразии в условиях
меняющегося климата**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН).

Научный руководитель: **Семёнов Владимир Анатольевич**,
доктор физико-математических наук,
академик РАН

Официальные оппоненты: **Грицун Андрей Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН, зам. директора по науке
Института вычислительной математики им.
Г.И. Марчука Российской академии наук

Гавриков Александр Владимирович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Института
океанологии им. П.П. Ширшова Российской
академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики им. А.В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук» (ИПФ
РАН)

Защита состоится 1 июля 2025 года в 14 ч. 00 м. на заседании
диссертационного совета Д 002.096.ХХ (24.1.130.01) в Федеральном
государственном бюджетном учреждении науки Институте физики
атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук по адресу:
119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА РАН и на
официальном сайте ИФА РАН: <http://ifaran.ru/science/dissertations.html>

Автореферат разослан ____ 2025 года

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.096.ХХ (24.1.130.01)
кандидат физико-математических наук

А. В. Чернокульский

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Крупномасштабная циркуляция атмосферы во внетропических широтах Северного полушария является одним из центральных объектов изучения климатологии и метеорологии. Существует множество подходов к изучению крупномасштабных атмосферных структур, в т. ч. статистический анализ данных наблюдений и гидродинамическое моделирование. Одним из подходов к изучению крупномасштабной циркуляции атмосферы является выделение ограниченного числа характерных структур пространственной изменчивости [Barnston and Livezey, 1987], имеющих выраженные особенности, позволяющие отделять эти структуры друг от друга.

При классификации атмосферных течений фактически непрерывно меняющиеся состояния атмосферы, уникальные в каждый момент времени, в результате определенной процедуры типизации приписываются одному из выделенных типов. Состояния атмосферы, отнесенные в результате типизации на основе выбранных исследователем критериев, к одному и тому же типу течения, рассматриваются как подобные, и уже не анализируются отдельно, а лишь как частные проявления одного из выделенных типов. Анализ всего множества состояний атмосферы при таком подходе сводится к исследованию свойств ограниченного числа выделенных типов течений, включая их пространственные и временные характеристики, а эволюция атмосферы рассматривается как череда сменяющих друг друга квазистационарных типов течений.

Активные исследования по типизации крупномасштабных циркуляционных процессов в атмосфере начались с середины XX века [Baur et al., 1944; Дзердзеевский и др., 1946; Вангенгейм, 1952], критерии при оценке числа типов и способе их разделения в ранних работах основывались на некоторых, не всегда очевидных, экспертных оценках исследователей, благодаря чему в последствии такие типизации были названы «субъективными» [Huth et al., 2008]. Благодаря распространению и росту мощностей компьютеров со второй половины XX века [Lund, 1963] начали разрабатываться и рутинно применяться численные классификации («объективные»), основанные на компьютерной обработке больших объёмов данных [Huth et al., 2008].

Распространенным методом объективных классификаций атмосферных течений является идентификация так называемых погодных режимов. При «режимном подходе» низкочастотная изменчивость атмосферы на крупных

масштабах – всего Северного полушария [Kondrashov et al., 2007] или отдельных континентов [Robertson and Ghil, 1999] – рассматривается в виде набора из небольшого числа квазистационарных повторяющихся пространственных структур, называемых погодными режимами, в каждом из которых атмосфера пребывает в течение некоторого длительного, относительно синоптических масштабов, времени, обычно от одной до нескольких недель, а затем сменяется другим режимом. Идентификация погодных режимов в современных исследованиях [Huth et al., 2008] происходит на основе методов кластерного анализа, например, метода *k*-means, которые, как правило, применяются к среднесуточным полям высоты геопотенциальной поверхности на различных уровнях, обычно на уровне 500 гектопаскалей (*z*500), например, в [Cassou, 2008], или давления на уровне моря (SLP), как в [Santos et al., 2005], при этом отдельную непростую задачу представляет определение оптимального числа режимов [Christiansen, 2007] (актуальную вплоть до настоящего времени [Falkena et al., 2020]).

Наиболее часто режимный подход, при использовании его на континентальных масштабах, применяется для выделения режимов в области, называемой Северная Атлантика или Евро-Атлантика (ЕАТ), охватывающей северную внетропическую часть Атлантического океана и Европу. Режимный подход для исследования циркуляции атмосферы в регионе ЕАТ обычно применяется в зимний период, который, относительно других сезонов, характеризуется высокой изменчивостью полей SLP и *z*500. Ведущая модой низкочастотной изменчивости SLP в Северном полушарии находится в регионе ЕАТ и представляет собой диполь давления между областями вблизи Исландии и Азорских островов, названный Северо-Атлантическим колебанием (NAO – North Atlantic Oscillation) [Hurrell, 1995; Visbeck et al., 2001].

При идентификации небольшого числа, *K*, погодных режимов, обычно, от 4 до 6 [Falkena et al., 2020], в зимний период в области ЕАТ, как правило, всегда появляются два режима, которые можно ассоциировать с положительной и отрицательной фазами колебания NAO – NAO+ и NAO- [Cassou, 2008]. Оставшиеся два режима, при *K*=4, обычно представляют собой положительную фазу Скандинавской осцилляции, называемую Скандинавский блокинг (SB – Scandinavian Blocking) и режим с положительной аномалией *z*500 над Северной Атлантикой (AR - Atlantic Ridge), см., например, [Dawson et al., 2012; Fabiano et al., 2020].

Помимо региона Евро-Атлантики, на континентальных масштабах режимный подход в Северном полушарии так же применялся к идентификации режимов в регионах Северной Америки [Robertson and Ghil, 1999; Lee et al., 2019], Восточной Азии [Yang et al., 2022] и северной части Тихого океана [Fabiano et al., 2020], однако область Северной Евразии (СЕ), занимаемая Россией, остается малоисследованной в рамках режимного подхода. Его применение в регионе СЕ позволило бы развить понимание крупномасштабных циркуляционных процессов, непосредственно влияющих на погоду, включая её экстремальные проявления, на территории России. Известно, что погодные режимы влияют на распределение опасных экстремальных погодных явлений [Yiou et al., 2004], включая волны жары и холода [Cattiaux et al., 2010], сильные осадки [Santos et al., 2005] и ветер [Garrido-Perez., 2020].

Важной особенностью погодных режимов является их время жизни, часто превышающее временной масштаб одной-двух недель [Babanov and Semenov, 2024], и которое принято считать пределом предсказуемости погоды, связанным со стохастической природой динамики атмосферы и экспоненциальным нарастанием со временем малых начальных возмущений состояния атмосферы [Lorenz, 1963]. Исследование предсказуемости погоды в рамках эволюции крупномасштабных погодных режимов потенциально может увеличить предел предсказуемости прогноза погоды. Например, для наиболее изученной в рамках режимного подхода области ЕАТ известно, что повторяемость погодных режимов NAO+ и NAO- модулируется фазами осцилляции Маддена – Джулиана в Тихом океане за 1-2 недели до их наступления [Cassou, 2008].

Цель работы – сравнить известные методы кластерного анализа, использующиеся для идентификации погодных режимов; получить количественные оценки и тренды пространственных и временных характеристик погодных режимов в регионах ЕАТ и СЕ в зимний и летний периоды по данным реанализа; оценить воспроизводимость характеристик режимов в климатических моделях; исследовать предсказуемость режимов с помощью ведущих мод изменчивости климатической системы и влияние погодных режимов на вероятности экстремальных погодных явлений.

В рамках диссертационной работы были поставлены **задачи**:

1. Проанализировать используемые в научной литературе методы кластерного анализа для идентификации погодных режимов и произвести количественное сравнение характеристик погодных режимов, полученных различными методами, с целью выбора наиболее оптимального метода кластеризации для дальнейшего анализа погодных режимов.

2. Идентифицировать погодные режимы с помощью выбранного оптимального метода кластеризации для регионов ЕАТ и СЕ в зимний и летний периоды по данным реанализа и произвести сравнительный анализ пространственных и временных характеристик погодных режимов в этих регионах, а также их долгосрочных трендов.

3. Исследовать пространственно-временные характеристики погодных режимов по данным климатических моделей и сравнить их с характеристиками погодных режимов, полученных по данным реанализа.

4. Оценить изменение повторяемости погодных режимов в зависимости от фаз ведущих мод естественной изменчивости климатической системы в предшествующие сезоны, таких как колебание температуры поверхности в области Тихого океана (Эль-Ниньо – Южное колебание) и вариации площади морского льда в Северном полушарии.

5. Количественно оценить частоту событий с экстремально высокими и низкими аномалиями температур, осадков и скорости ветра в зависимости от наличия тех или иных погодных режимов в регионах ЕАТ и СЕ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты сравнения четырех наиболее распространённых методов кластерного анализа, используемых для идентификации погодных режимов, указывающие на то, что k-means является оптимальным методом, позволяющим выделять погодные режимы в Евро-Атлантике с наименьшими внутрикластерными расстояниями и наибольшими пространственными корреляциями с полями погодных режимов, полученных другими методами.

2. Получены пространственные структуры, количественные оценки повторяемости, продолжительности и матрицы переходов зимних и летних погодных режимов в Евро-Атлантике и Северной Евразии за 1940-2022 гг. по данным реанализа ERA5, в том числе статистически значимые тренды сезонной повторяемости режимов и значимые по частоте переходы между режимами.

3. Количественные оценки способности моделей климата воспроизводить поля и временные характеристики погодных режимов в Евро-Атлантике в экспериментах historical. Большинство исследованных моделей воспроизводят пространственные структуры и особенности временных характеристик погодных режимов, полученных по реанализу ERA5; зимние погодные режимы в моделях воспроизводятся лучше, чем летние.

4. Выявленные связи повторяемости погодных режимов в Северной Евразии с фазами явления Эль-Ниньо и площадью морского льда в Северном полушарии в предшествующие сезоны, включая статистически значимую связь повторяемости режимов уральского максимума (WUH и SUH) с отрицательными аномалиями площади морского льда.

5. Количественные характеристики связи погодных режимов в Евро-атлантическом и Северо-Евразийском регионах с вероятностями сильных аномалий температуры, осадков и ветра над континентами Северного полушария, включая значимую связь летнего режима уральского максимума в СЕ с ростом вероятности жарких дней на европейской территории России в 2-3 раза и зимнего режима NAO- в ЕАТ с кратным ростом аномально-холодных дней на территории Европы.

Научная новизна исследования. В работе впервые произведено количественное сравнение характеристик погодных режимов в Евро-Атлантике, полученных несколькими различными методами кластерного анализа. Впервые в рамках режимного подхода получены типы атмосферной циркуляции отдельно для региона Северной Евразии в зимний и летний периоды и представлены их пространственные и временные характеристики, включая многолетние тренды и особенности переходов. Оценена воспроизводимость пространственно-временных характеристик не только зимних, но и летних погодных режимов в Евро-Атлантике в современных климатических моделях, включая вероятности переходов. Получены оценки изменения повторяемости погодных режимов в Северной Евразии в зависимости от фаз Эль-Ниньо и аномалий площади морского льда в Северном полушарии с заблаговременностью в несколько месяцев. В работе впервые получено пространственное распределение вероятностей экстремальных аномалий температур, осадков и скорости ветра в зависимости от погодных режимов Северной Евразии и режимов циркуляции в европейском регионе с экстремальными осадками на Крымском полуострове.

Теоретическая и практическая значимость. В работе представлен анализ крупномасштабной атмосферной циркуляции над Евро-Атлантикой и Северной Евразией в рамках режимного подхода с применением кластерного анализа. Режимный подход позволяет по-новому взглянуть на климатические процессы в атмосфере и их долгосрочные изменения, представляя атмосферу как набор из различных чередующихся квазистационарных состояний, характеристики которых при этом испытывают долгосрочные изменения, что может рассматриваться как проявление современных изменений климата.

Проведенный анализ погодных режимов в атмосфере над обширными территориями, влияющими на погоду, включая её экстремальные проявления, на территории России, показывает значимость режимного подхода в исследовании механизмов формирования экстремальных погодных явлений. Анализ воспроизводимости характеристик погодных режимов в Евро-Атлантическом регионе может использоваться для диагностирования способности моделей воспроизводить крупномасштабную циркуляцию атмосферы. Оценки предсказуемости режимов ведущими модами климатической изменчивости могут использоваться для повышения точности предсказуемости погоды на субсезонных масштабах.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обоснована использованием современного реанализа ERA5 с высоким пространственным разрешением и ряда современных климатических моделей из проекта сравнения моделей климата CMIP6. Количественные оценки, включая их степени неопределенности и статистические значимости, проверены современными широко применимыми статистическими методами, включая тесты значимости трендов, генерации случайных подвыборок на основе реальной выборки данных, в том числе бутстрэппинг, и прочие. Достоверность подтверждается согласием результатов идентификации погодных режимов в Евро-Атлантическом регионе, полученных автором, с результатами других известных исследований на эту тему за аналогичный период и для схожего региона [Cassou 2008; Dawson et al., 2012; Charlton-Perez et al., 2018], включая результаты для летнего сезона [Guemas et al., 2010].

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования представлялись на следующих отечественных и международных научных конференциях и семинарах:

«Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы» посвященная памяти А. И. Семенова и Н. Н. Шефова // Москва, 22-23 ноября 2021; «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова // Москва, 22–24 ноября 2022; XX научная школа «Нелинейные волны – 2022» // Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2022; Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» // Майкоп, 2023; Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде CITES-2023 // Москва, 2023; Russian-China workshop: 15th Conference of Atmospheric Physics, Climate and Environment // Moscow, September 11, 2023; V Международная научная конференция «Наука будущего» // Орёл, 2023; WCRP Open Science Conference 2023 // Kigali, Rwanda, 2023; «Национальная модель Земной системы: теория, технологии и результаты» // Сириус, 20-22 февраля 2024; Семинар в научном фонде «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена» // Санкт-Петербург, 5 марта 2024; Школа «Климатическая система Земли: диагностика, моделирование и прогноз» научно-технологического университета «Сириус» // Сириус, 14-19 октября 2024; Доклады на семинарах и ученых советах ИФА РАН о методах кластерного анализа и погодных режимах // Москва ноябрь 2023, Москва 11.04.2024, Кисловодск 17.05.2024.

Личный вклад автора. Все научные результаты, представленные в диссертационной работе, включая сравнение методов кластерного анализа и последующего исследования полученных с помощью них характеристик погодных режимов, получены автором лично или соавторстве с научным руководителем д.ф.-м.н. Семеновым В. А. Автору принадлежит ведущая роль в постановке задач диссертационного исследования, подготовке публикаций полученных результатов в научных журналах, а также их представлении на конференциях и семинарах. Текст диссертации полностью написан автором. Иллюстрации, кроме случаев, когда в подписи приведена ссылка, получены автором. Для обработки данных, расчета результатов и построения графиков и прочих иллюстраций, использованы программы, написанные автором лично для среды MATLAB, либо их комбинация с пакетом программ «Climate Data Toolbox» [Greene et al., 2019], находящихся в свободном доступе.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в базы данных SCOPUS, Web of Science и Russian Science Citation Index (RSCI).

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, академику РАН, доктору физико-математических наук, Семенову Владимиру Анатольевичу. Автор также признателен старшим коллегам и соавторам публикаций за поддержку, помощь и советы при написании диссертации – старшему научному сотруднику ИФА РАН, кандидату физико-математических наук, Мирсеиду Акперову, главному научному сотруднику ИФА РАН и доктору физико-математических наук Елисееву Алексею Викторовичу, академику РАН и доктору физико-математических наук, главному научному сотруднику ИФА РАН, Мохову Игорю Ивановичу. Автор выражает благодарность всем коллегам из ИФА РАН, в особенности сотрудникам лабораторий теории климата и лаборатории предсказуемости климата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 126 страниц, включая 27 рисунков, 18 таблиц. Список литературы содержит 108 наименований.

Основное содержание работы

Введение. Во введении представлен краткий обзор режимного подхода в исследовании крупномасштабной атмосферной циркуляции, обоснована актуальность работы, прежде всего связанная с потенциалом улучшения предсказуемости погодных режимов. Сформулирована цель работы и связанные с ней конкретные задачи. Представлены защищаемые положения, практическая значимость и научная новизна работы, указан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

В **Главе 1** приводится описание использовавшихся в середине XX века и современных методов кластерного анализа, используемых для типизации крупномасштабной атмосферной циркуляции. Подробно описываются четыре современных метода кластерного анализа и их алгоритмов, используемых в исследованиях для идентификации погодных режимов. Выполнен сравнительный анализ результатов кластеризации погодных режимов различными методами в регионе Евро-Атлантики в зимний и летний сезоны по данным реанализа ERA5 и определен оптимальный метод для дальнейшего использования в решении поставленных задачах.

В **разделе 1.1** описаны ранние метод объективной типизации на основе матриц взаимных расстояний $TD(t_1, t_2)$ между суточными полями высот геопотенциальной поверхности или давления на уровне моря формата $z500(lon, lat, time)$ или $SLP(lon, lat, time)$. Расстояния между полями при таком методе считаются по метрике квадрата Евклидова расстояния $TD(t_1, t_2) = d^2(t_1, t_2)$, либо пространственной корреляции r , перед этим проходя взвешивание по пространству на \sqrt{w} для уравнивания вклада ячеек полей $z500$ или SLP на разных широтах в общую разницу или корреляцию между двумя полями:

$$d^2(t_1, t_2) = \sum_{i,j} (z500_w(i, j, t_1) - z500_w(i, j, t_2))^2 \quad (1)$$

Описана методика получения кластеров с использованием пороговых значений пространственной корреляции или квадрата расстояний в матрице взаимных расстояний для создания кластеров.

В **разделе 1.2** приводится описание алгоритмов работы четырех методов кластерного анализа, наиболее часто использовавшихся для идентификации погодных режимов. Эти методы: иерархическая кластеризация со сцепкой Уорда (HW, Hierarchical Ward's clustering), k-means (KM), модель гауссовой

смеси (GM, Gaussian mixture model) и метод самоорганизующихся карт Кохонена (SOM, Self-organizing maps). Общим элементом во всех методах является использование квадрата Евклидова расстояние в качестве метрики, задающая расстояние между любыми двумя кластеризуемыми объектами \mathbf{X}_i (поля z500 или SLP):

$$d^2(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) = \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|^2 = \sum_{l=1}^L (x_{il} - x_{jl})^2, \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{il}, \dots, x_{iL}\}, \quad i = [1, \dots, N], \quad l = [1, \dots, L] \quad (3)$$

где $l = [1, L]$ указывает на размерность кластеризуемых данных \mathbf{X}_i . Для z500/SLP размерность L равна числу узлов прямоугольной сетки $[lon] \times [lat]$, а N равна числу кластеризуемых полей.

В разделе 1.2.1 описан алгоритм кластеризации HW, представляющий собой итеративный поиск пар кластеров A и B в наборе данных, потенциальная прибавка к внутрикластерному расстоянию которых после объединения будет наименьшей среди всех потенциальных пар. Алгоритм начинается, когда каждая точка представляет собой отдельный кластер, в процессе кластеры объединяются по вышеприведенному принципу до момента, пока все точки не будут объединены в единственный кластер или до момента когда число кластеров не станет равным необходимому числу K .

В разделе 1.2.2. описана кластеризация k-means, суть которой состоит в случайной инициализации K начальных положений центров будущих кластеров – центроидов, и последующем их пересчете как «центров масс» по координатам точек, оказавшихся ближайшими к этим центроидам. В процессе алгоритма k-means минимизируется сумма внутрикластерных расстояний V :

$$V(K) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in k} d^2(\mathbf{X}_i, \mathbf{C}_k), \quad \mathbf{C}_k = \langle \mathbf{X}_i \rangle_{i \in k}, \quad (4)$$

где \mathbf{C}_k – центроид k -го кластера. Описаны оптимизации k-means: 1) «k-means++», оптимизирующая инициализацию центроидов и 2) метод имитации отжига, добавляющий случайность на этапе присвоения точек ближайшим кластерам. Эти оптимизации позволяют находить решения с меньшими V .

В разделе 1.2.3 описана кластеризация GM, основанная на алгоритме «Expectation-Maximization». В процессе алгоритма GM оптимизируются параметры K многомерных нормальных распределений – средние $\boldsymbol{\mu}_k$, матрицами ковариаций $\boldsymbol{\Sigma}_k$ (СКО в одномерном случае) и веса \mathbf{w}_k . В процессе GM подбираются такие параметры $\boldsymbol{\mu}_k$, $\boldsymbol{\Sigma}_k$, \mathbf{w}_k для которых максимальна

функция правдоподобия – логарифмическая суммы вероятностей принадлежности точек K многомерным нормальным распределениям.

В разделе 1.2.4. описана методика кластеризации самоорганизующимися картами, SOM. Основная идея метода состоит в создании двумерной нейронной сети в пространстве, независимом от входного набора данных. Веса нейронов (центроиды кластеров) в процессе алгоритма сходятся к итоговым значениям таким образом, что центроиды нейронов, соседствующих на нейронной сети, имеют центроиды, соседствующие друг с другом (по евклидовой метрике) в реальном фазовом пространстве входного набора данных. Таким образом, основное преимущество SOM относительно других методов состоит во взаимной сортировке кластеров на двумерной карте, что удобно для их визуализации.

В разделе 1.3 описаны методы определения оптимального числа кластеров K . Описаны как простые методы: 1) метод локтя, при котором ищется точка перегиба на графике суммы внутрикластерных расстояний $V(K)$ (формула 4); 2) метод Силуэта, при котором ищется максимум функции коэффициента Силуэта $S(i)$ в зависимости от числа кластеров K :

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (5)$$

где $a(i)$ – среднее расстояние от точки i до остальных точек из её кластера; $b(i)$ – среднее расстояние от точки из кластера k до точек из ближайшего к ней соседнего кластера $k' \neq k$. Помимо простых методов, описываются более сложные методы – критерий Калински-Харабаша, при котором ищется максимум отношения межкластерных расстояний к внутрикластерным при различных K , а также индексы классифицируемости и воспроизводимости, описанные в [Michelangeli et al., 1995], при которых ищутся максимумы параметров, основанных на корреляции центроидов кластеров путем сравнения с аналогичными параметрами, полученными для случайно сгенерированных выборок (индекс классифицируемости) или для случайных половинчатых подвыборок (индекс подвыборок) из оригинальной выборки.

В разделе 1.4 описана предобработка данных для получения погодных режимов в Евро-Атлантике (ЕАТ) зимой и летом, анализ оптимального числа режимов, и сравнение результатов кластеризации, полученных разными методами.

Предобработка данных приведена в разделе 1.4.1. для ЕАТ выбран сектор от 80 з.д. до 40 в.д. и от 30 с.ш. до 80 с.ш., кластеризовались суточные

поля z500 по данным реанализа ERA5 за 1940 – 2022 гг. Перед кластеризацией из z500 удален сезонный цикл и произведена фильтрация низких частот с периодом отсечки 10 суток. Фильтрованные поля аномалий z500 разложены на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ), объясняющие 95% пространственной изменчивости полей аномалий z500 – 13 первых ЭОФ для зимы, 20 для лета. Алгоритму кластеризации передавались временные ряды главных компонент разложения полей аномалий z500 на ЭОФ. Также в разделе 1.4.1 проводится анализ на оптимальное число кластеров. Простые методы локтя и силуэта не дали оптимальных чисел K . Индексы классифицируемости и воспроизводимости показали локальные незначимые при $K = 4$ и $K = 6$. Индекс Калински-Харабаша для оригинальной выборки по сравнению со случайно сгенерированным показал, что при $K \geq 4$ оригинальная выборка данных кластеризуется лучше, чем 95% генераций красного шума, имеющих одинаковую длину, средние дисперсии и lag-1 автокорреляцию, что и у оригинальной выборки. $K = 4$ выбрано для зимних и летних режимов в ЕАТ.

В разделе 1.4.2 представлены поля погодных режимов в Евро-Атлантике (рисунок 1), полученные различными методами кластерного анализа (KM, HW, GM). Результаты по методу SOM оказались идентичны результатам метода KM и не приведены на рисунке 1, т.к. визуально совпадают с полями по методу KM. Различие в классификации различных суток к режимам по KM и SOM составило $<0.2\%$ длины выборки z500, а внутрикластерные расстояния по KM и SOM различаются лишь в четвертом знаке, поэтому сделан вывод, что два метода производят идентичные результаты при кластеризации среднесуточных полей z500 в ЕАТ для небольших K .

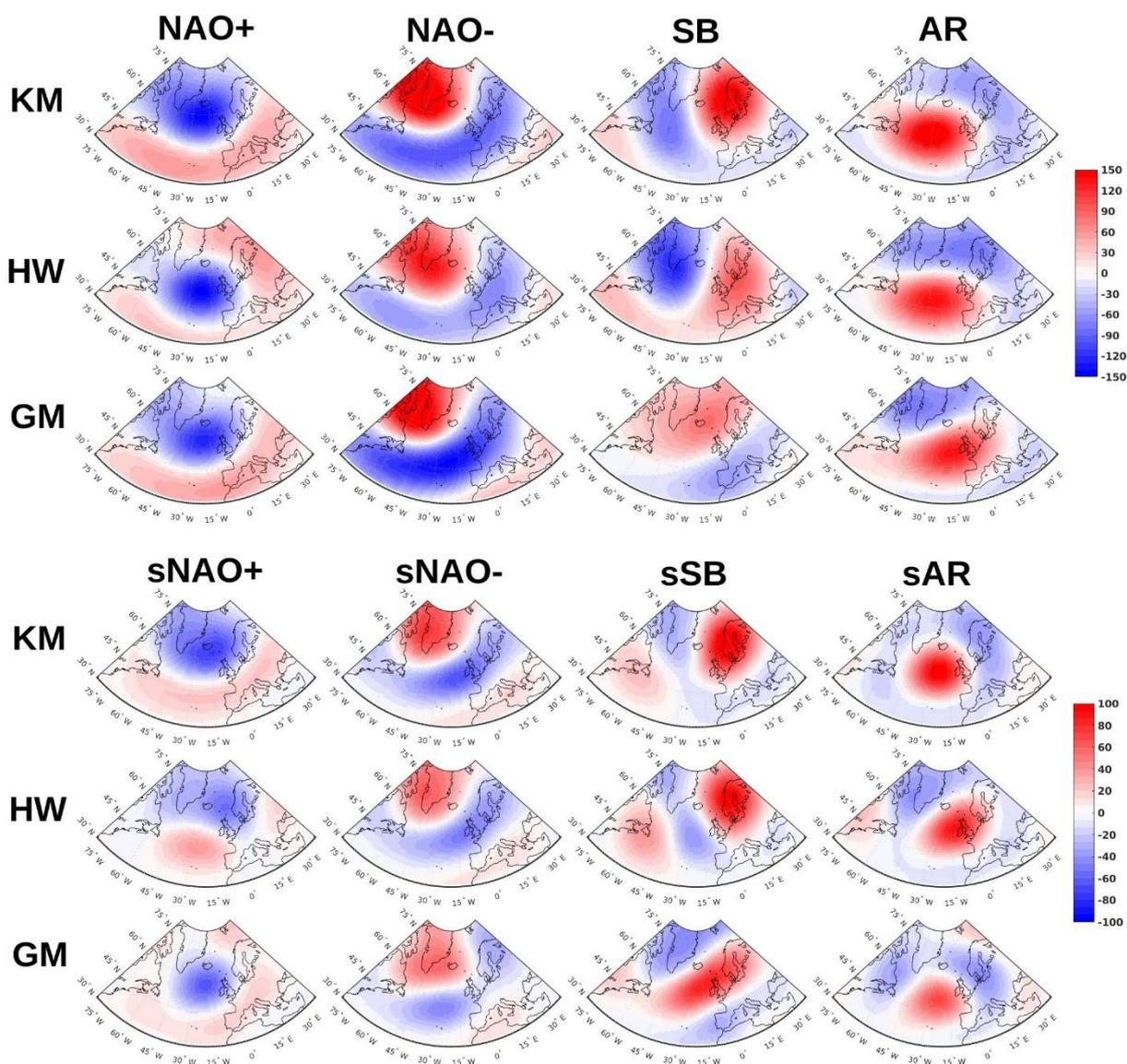


Рисунок 1. Средние поля аномалий z500 зимних и летних режимов в ЕАТ секторе за 1940–2022 гг., полученных с помощью различных методов кластеризации – k-means (KM), иерархическая кластеризация Уорда (HW), гауссова смесь (GM). Верхние три ряда – зимние режимы, нижние три ряда – летние. Справа от полей приведены шкалы аномалий z500 в метрах.

Полученные режимы визуально совпали с основными известными модами изменчивости z500/SLP в Евро-Атлантике и с результатами других авторов при выделении зимних режимов в Евро-Атлантике методом k-means с $K=4$, поэтому названы согласно их устоявшимся названиям – NAO+ и NAO-, ассоциированные с фазами Североатлантического колебания, режим скандинавского блокинга SB (Scandinavian Blocking) и режим AR (Atlantic Ridge) с положительной аномалией z500 над северной частью Атлантического океана. Летние погодные режимы названы аналогично зимним с приставкой «s» (summer). В разделе 1.4.2 сравниваются результаты кластеризации по

различным методам путем сопоставления сумм внутрикластерных расстояний и пространственных корреляций центроидов z500 погодных режимов для зимы и лета.

В разделе 1.5 приводятся выводы главы 1. Среди четырех протестированных методов k-means выбран как оптимальный метод кластерного анализа для задачи идентификации погодных режимов по следующим признакам: 1) выше корреляция полей режимов при сравнении с другими методами, чем у остальных методов по сравнению друг с другом; 2) выше корреляция полей режимов в различные сезоны; 3) минимальная сумма внутрикластерных расстояний; 4) вычислительная эффективность относительно метода SOM, производящего идентичные погодные режимы.

В Главе 2 анализируются характеристики и тренды зимних и летних погодных режимов в Евро-Атлантике, полученных с помощью метода кластеризации КМ в предыдущей главе. Так же впервые представлены зимние и летние погодные режимы для региона Северной Евразии, полученные методом КМ, анализируются их пространственные структуры и основные характеристики – повторяемости, продолжительности и матрицы вероятностей переходов между режимами.

В разделе 2.1 приводится обсуждение основных временных характеристик ПР – повторяемость, продолжительность, матрица вероятностей переходов. Описывается метод расчета статистически значимых переходов между режимами. Описаны характерные особенности распределения повторяемости зимних режимов в ЕАТ, полученных другими исследователями для этого региона в последние десятилетия, в т. ч. наибольшая повторяемость режима NAO+ и наименьшая повторяемость (из четырех) режима NAO-.

В разделе 2.2 анализируются основные характеристики зимних и летних погодных режимов в ЕАТ, полученных автором с помощью метода КМ. Показано (рисунок 2), что NAO+ самый частый режим со средней относительной повторяемостью 30.2% за период 1940–2022 гг. и положительным статистически значимым трендом, а NAO- – самый редкий со средней относительной повторяемостью 21.4% и отрицательным статистически значимым трендом.



Рисунок 2. Временные ряды (линии с точками), скользящие средние с окном осреднения в 10 лет (черные жирные кривые) и линейные тренды (пунктирные линии) сезонной повторяемости режимов NAO+ и NAO-. Линейный тренд NAO+: +0.22 дней за сезон / год, p -value = 0.004; линейный тренд NAO-: -0.15 дней за сезон / год, p -value = 0.050.

В разделе 2.2 приводится описание летних погодных режимов в ЕАТ и их сопоставление с традиционными зимними. Указывается на различие в величине летних аномалий z_{500} и на различие в средней повторяемости режимов. Для летних режимов за исследуемый период 1940-2022 гг. в ЕАТ не обнаружено статистически значимых трендов повторяемости. Для зимнего NAO- и летнего sNAO- отмечены самые высокие средние продолжительности по сравнению с другими режимами – 10.4 суток зимой и 9.1 летом. Показано, что продолжительность погодных режимов зимой в среднем выше, чем летом. Проанализированы вероятности переходов между режимами и обнаружены статистически значимо частые переходы между ними, рассчитанные по методике, описанной в [Vautard et al., 1990].

В разделе 2.3 приводится описание предобработки суточных полей z500 для их последующей кластеризации и получения зимних и летних погодных режимов в Северной Евразии. Для СЕ выбран сектор от 0 до 180 в.д. и от 40 до 80 с.ш. Данные по z500 для СЕ, как и для ЕАТ, брались из реанализа ERA5 за период 1940 – 2022 гг. Предобработка полей z500 в целом аналогична таковой для погодных режимов в ЕАТ. Для погодных режимов в СЕ зимний и летний сезоны проведен анализ на оптимальное количество кластеров по индексам классифицируемости и воспроизводимости и индексу Калински-Харабаша. Получено, что в зимние месяцы оптимальное число $K=4$, а в летние месяцы индексы классифицируемости и воспроизводимости резко убывают при $K>4$, в связи с этим одинаковое $K=4$ выбрано для обеих сезонов.

В разделе 2.4 приводятся пространственные характеристики полученных четырех зимних и летних погодных режимов в СЕ по методу k-means. Зимние четыре режима – Скандинавский минимум (WSL), Уральский максимум (WUH), Скандинавский блокинг (WSB), и Северо-Восточный максимум (WNEH). Летние четыре режима – Баренцевский минимум (SBL), Уральский максимум (SUH), Скандинавский блокинг (SSB) и арктический блокинг (SAB). Они приведены на рисунке 3. Самые частые зимние и летние режимы в СЕ – WSL (27.7% относительной повторяемости) и SBL (26.4% повторяемости) – способствуют усилению западного переноса на Европейской территории России. Остальные режимы в той или иной степени соответствуют антициклоническим и блокирующим формированиям.

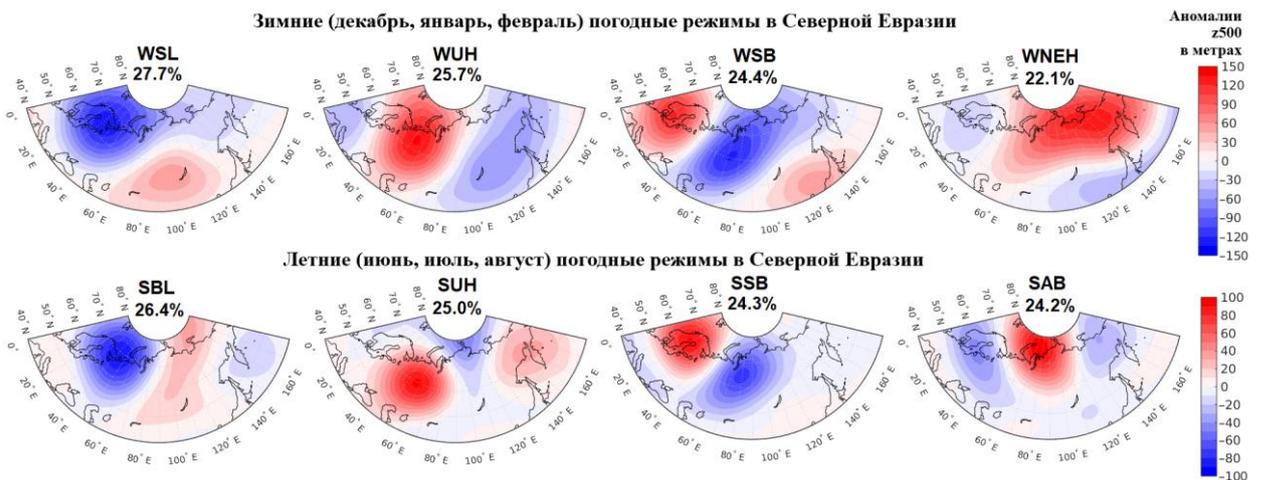


Рисунок 3. Средние поля аномалий z500 четырех зимних и летних погодных режимов в Северной Евразии, полученных методом КМ. В верхнем ряду представлены зимние погодные режимы, в нижнем – летние. Подписи к режимам указывают на их названия и относительную повторяемость в процентах за 1940 – 2022 гг. Шкалы аномалий z500, соответствующих погодным режимам, представлены справа.

В разделе 2.5 анализируются основные характеристики погодных режимов в СЕ – их сезонные повторяемости, распределение их продолжительностей и их средние величины, а также матрицы вероятностей переходов и их особенности. На рисунке 4 приведены сезонные повторяемости зимних и летних погодных режимов в СЕ и их статистически значимые (на уровне 5%) тренды.

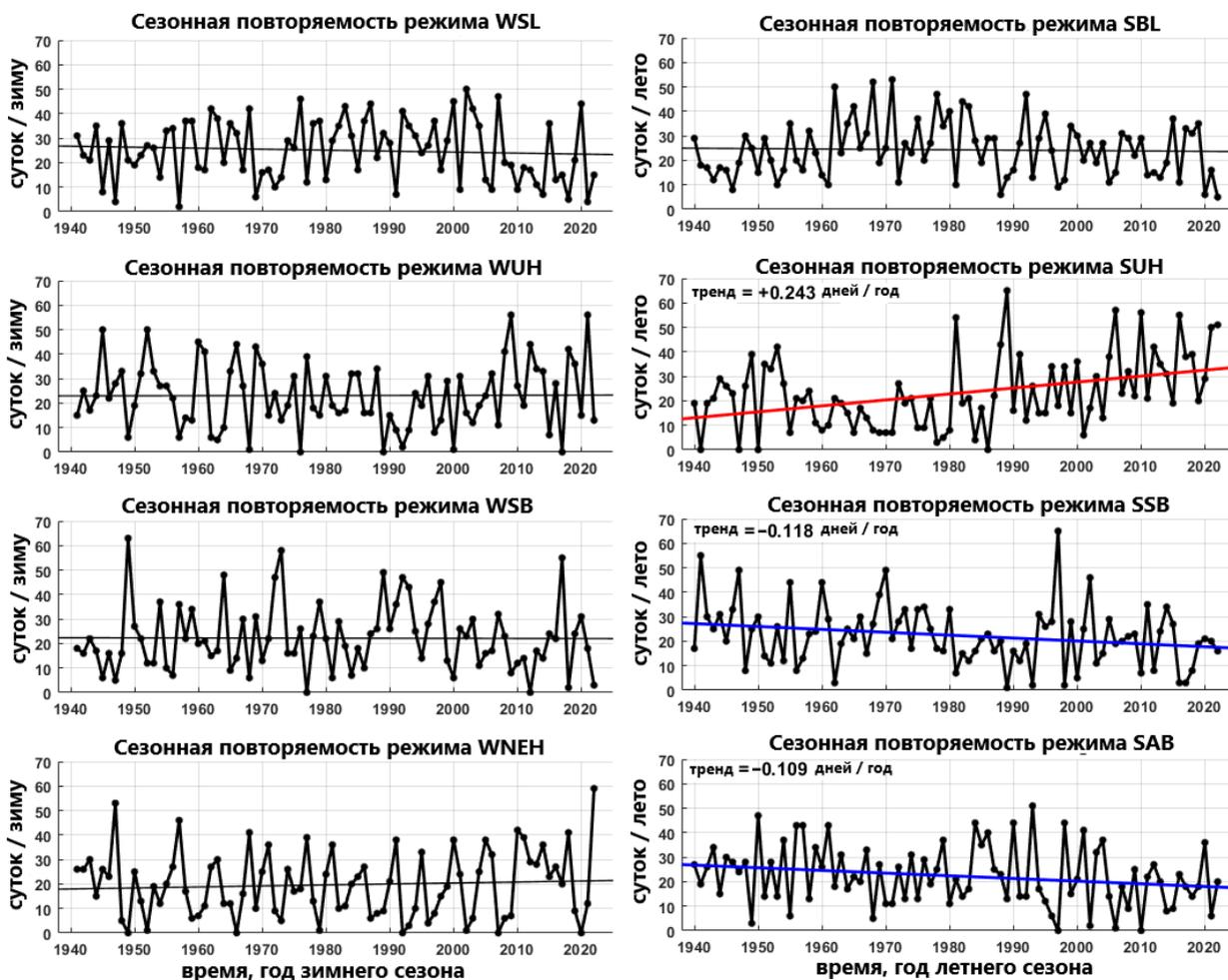


Рисунок 4. Временные ряды сезонной повторяемости погодных режимов в СЕ (в сутках за сезон), полученных методом КМ. Статистически значимые на уровне 5% линейные тренды показаны цветными линиями, незначимые линейные тренды показаны черными линиями.

Анализ продолжительности режимов показал, что в среднем 60% времени зимних и летних месяцев занимают события погодных режимов продолжительностью от 10 и более суток, а короткие переходные события продолжительностью 1-3 суток занимают в среднем около 6% времени. Таким образом, погодные режимы в Северной Евразии представляют собой явления, длительность коротких часто превышает теоретический предел предсказуемости погоды, составляющий около 10 суток. Анализ матриц вероятностей переходов между режимными событиями в зимние и летние

месяцы в СЕ показал, что между режимами в СЕ существуют последовательности статистически значимых частых переходов, проходящие через всю систему из четырех режимов зимних и летних погодных режимов, эти значимо частые переходы схематически изображены на рисунке 7.

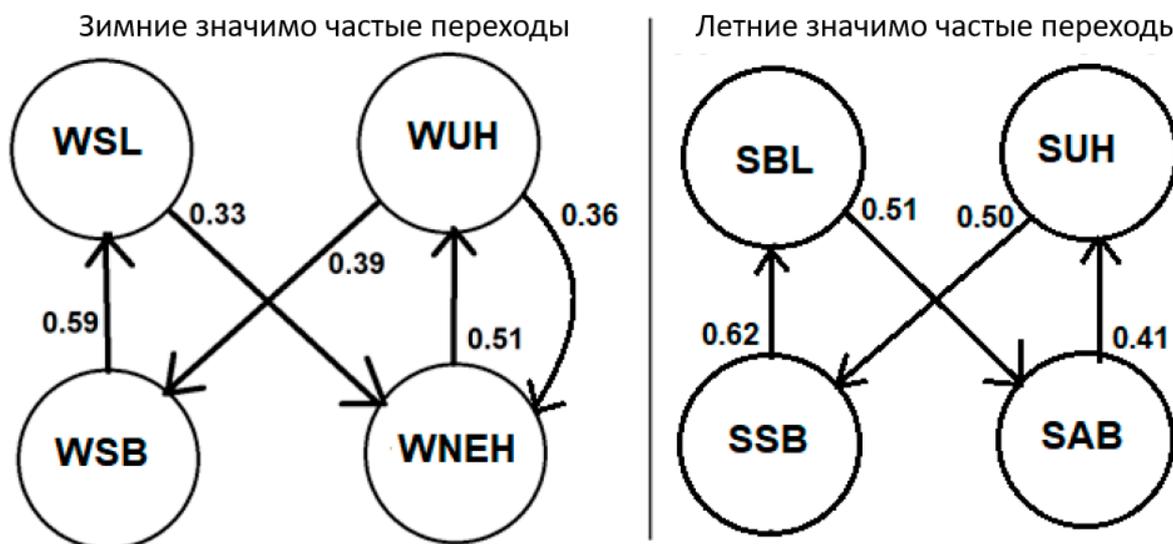


Рисунок 5. Схематическое изображение статистически значимо частых переходов (на уровне 5%) между погодными режимами в Северной Евразии. Цифрами возле стрелок обозначены вероятности этих переходов.

В разделе 2.6 обобщены основные результаты Главы 2: в рамках диссертационного исследования получены пространственные и временные характеристики погодных режимов в Евро-Атлантике и Северной Евразии по данным реанализа ERA5 за период 1940–2022 гг., включая тренды их сезонной повторяемости, распределение продолжительностей режимных событий и особенности переходов.

В Главе 3 исследуется способность климатических моделей из проекта CMIP6 воспроизводить пространственные структуры и основные характеристики зимних и летних погодных режимов в Евро-Атлантике, полученных по данным реанализа ERA5 методом кластеризации КМ (k-means).

В разделе 3.1 перечислены использованные модели: 1) INM-CM5-0 (ИВМ РАН, Россия); 2) CESM2 (NCAR, США); 3) GFDL-CM4 (NOAA, США); 4) EC-Earth3 (Европа); 5) MIROC6 (JAMSTEC, Япония); 6) NorESM2-LM (NCC, Норвегия); 7) CanESM5 (CCCMA, Canada); 8) ACCESS-CM2 (CSIRO, Австралия). Эти 8 моделей, участвовавших в проекте CMIP6, выбраны из-за лучшей доступности суточных данных z500 в экспериментах historical. Приведена методика предобработки полей z500 по реанализу и по модельным данным за период 1950 – 2014 гг. для получения погодных режимов в Евро-

Атлантике. Методика предобработки полей z500 и последующей кластеризации в целом аналогична той, которая использовалась для их идентификации в главе 1. Модельные поля аномалий z500 раскладывались на собственные ЭОФ, что позволило получить модельные погодные режимы, по пространственным характеристикам отличающиеся от режимов реанализа, и оценить это различие. Такой подход отличается от методов в других исследованиях, когда модельные режимы получают путём проекции модельных dz500 на ЭОФ реанализа [Fabiano et al., 2020], или проекцией модельных dz500 на центроиды погодных режимов реанализа, что предписывает модельным режимам иметь структуру, идентичную режимам реанализа.

В разделе 3.2 приводятся оценки воспроизведения зимних и летних погодных режимов в Евро-Атлантике путем сравнения центроидов модельных погодных режимов с центроидами погодных режимов реанализа ERA5. Оценка проводилась путем расчета пространственных корреляций и сумм квадратов расстояний размера модельных ПР с ПР реанализа. Из восьми использованных моделей, весь набор из четырех зимних режимов в EAT («NAO+», «NAO-», «SB», «AR») не воспроизвела модель MIROC6, а набор из четырех летних режимов («sNAO+», «sNAO-», «sSB», «sAR») не воспроизвела модель CESM2.

В разделе 3.3 приведены оценки воспроизведения временных характеристик модельных погодных режимов в Евро-Атлантике с режимами по данным реанализа. Оценка производилась формуле:

$$\Delta F_{\text{ПР модель}} = \frac{|F_{\text{ПР модель}} - F_{\text{ПР ERA5}}|}{F_{\text{ПР ERA5}}} * 100\%, \quad (6)$$

где $F_{\text{ПР}}$ – одна из временных характеристик ПР – относительная повторяемость или средняя продолжительность режима за исследуемый период (1950-2014 гг.). Модели сравнивались между собой по характерной величине ошибки $\Delta F_{\text{ПР модель}}$ по всем режимам, кроме режима SB в MIROC6 зимой и режима sAR в CESM2 летом, так как центроиды полей данных режимов в этих моделях не воспроизвелись. Помимо повторяемостей и продолжительностей ПР, в разделе 3.3.1 для модельных ПР оценивалось воспроизведение вероятностей переходов между режимами – получено, что в среднем по моделям статистически значимые частые переходы между режимами соответствуют таковым в ПР по данным реанализа.

В разделе 3.4 приведены выводы по результатам, представленным в главе 3. Основным результатом является факт воспроизведения центроидов полей погодных режимов в Евро-Атлантике большинством из восьми исследованных моделей, кроме MIROC6 в зимние месяцы и CESM2 в летние. Центроиды полей погодных режимов в ЕАТ в зимние месяцы воспроизводятся лучше, чем в летние – среднее значение пространственной корреляции между полями погодных режимов реанализа с их лучшими аналогами в моделях составило 0.85 зимой и 0.80 летом. Ошибка воспроизведения временных характеристик ПР в моделях так же ниже зимой, чем летом – средняя $\Delta F_{\text{ПР модель}}$ по всем моделям и режимам для повторяемостей составила 8.4% зимой и 11.4% летом, для продолжительностей – 7.3% зимой и 12.7% летом.

В Главе 4 исследована связь повторяемости погодных режимов в Северной Евразии с аномалиями индекса явления Эль-Ниньо (Nino3.4) и площадью морского льда в Северном полушарии. Приведены оценки связи погодных режимов в Северной Евразии с вероятностями аномальных температур осадков и ветра, превышающих 95-ый перцентиль их распределений. Отдельно исследовался регион южного побережья Крыма (ЮБК), для которого анализировалась связь осадков с погодными режимами в Европейском регионе.

Раздел 4.1 посвящен исследованию предсказуемости погодных режимов в Северной Евразии, представленных в разделах 2.4 и 2.5. Оценивалось изменение повторяемости погодных режимов в зависимости от значений индекса Nino 3.4 и колебаний площади морского льда в Северном полушарии в предшествующие погодным режимам сезоны, то есть связь частоты зимних погодных режимов в СЕ с Nino 3.4 и арктическим льдом в предшествующую осень и летних погодных режимов в СЕ с Nino 3.4 и арктическим льдом в предшествующую весну. Для расчета Nino 3.4 и площади морского льда в Северном полушарии использовались данные реанализа ERA5 по температуре поверхности океана (ТПО) и площади морского льда. Данные по ТПО использовались за тот же период, что и для идентификации погодных режимов – с 1940 по 2022 гг., для льда – с 1979 года, когда начались регулярные спутниковые наблюдения за арктическим морским льдом. Временные ряды осенних и весенних значений Nino 3.4 и площади морского льда разделялись на 3 группы – «отрицательная фаза» со значениями ниже 25-го перцентиля, «нейтральная фаза» со значениями между 25-ым и 75-ым перцентилем и «положительная фаза» со значениями выше 75-го перцентиля. Для каждой из трёх фаз Nino 3.4 и площади морского льда рассчитывались повторяемости

погодных режимов в Северной Евразии в последующие сезоны, результаты представлены на рисунке 6. Изменения повторяемости ПР в СЕ в противоположных фазах Nino 3.4 и морского льда оценивались с помощью двухвыборочного t-критерия Стьюдента.

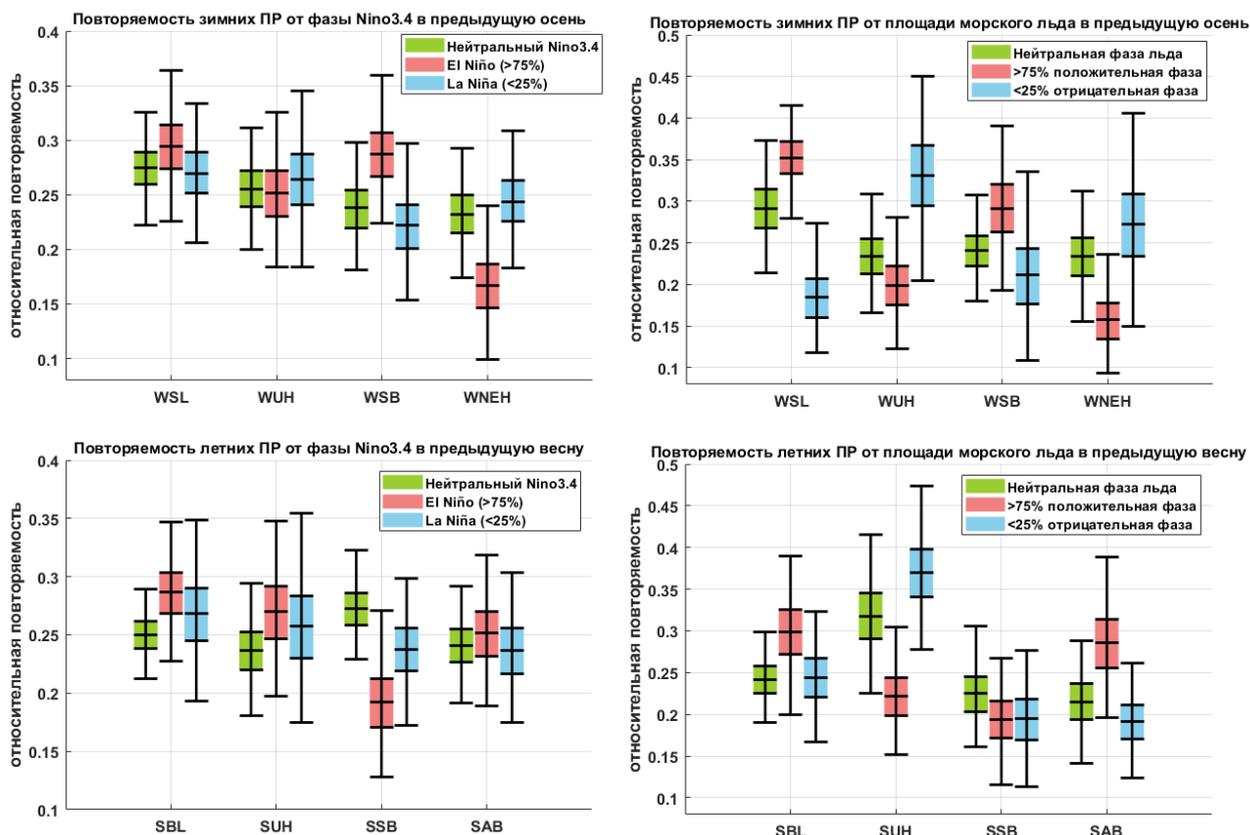


Рисунок 6. Относительная повторяемость погодных режимов в Северной Евразии как доля сезона во время нейтральных (зеленые блоки), положительных (красные блоки) и отрицательных (синие блоки) фаз Nino 3.4 и аномалий площади морского льда в Северном полушарии в предшествующие режимам сезоны. Середины цветных блоков указывают на фактические значения повторяемостей в данных фазах. Верхние и нижние границы цветных блоков указывают на 3-ий и 1-ый квартили (75-ый и 25-ый перцентили) распределения, а верхние и нижние линии «усов» указывают на 99-й и 1-й перцентили. Границы блоков и «усы» получены с помощью метода «бутстрэп», примененного к временным рядам сезонной повторяемости ПР.

Получено, что при положительной фазе Nino 3.4, отмечается рост повторяемости зимнего режима Скандинавского блокинга WSB (p-value 0.139) и снижение повторяемости режима Северо-восточного максимума WNEH (p-value = 0.074), а для разных фаз весеннего Nino 3.4 значимых изменений повторяемости ПР в СЕ летом не обнаружено. Осенние и весенние отрицательные аномалии площади морского льда в Северном полушарии связаны с ростом повторяемости режима Уральского максимума зимой (WUH,

p-value = 0.058) и летом (SUN, p-value = 0.017) соответственно. Так же отрицательные аномалии льда осенью связаны со снижением повторяемости зимнего режима скандинавского минимума WSL (p-value = 0.002).

В разделе 4.2 анализируются распределения вероятностей аномальных значений среднесуточных приземных температур (T2M) и сумм осадков (TP) в Северной Евразии в зависимости от погодных режимов. На рисунке 7 показано, что погодные режимы в СЕ влияют на пространственное распределение частоты редких аномалии T2M и TP выше 95-го перцентиля – в зависимости от наличия тех или иных погодных режимов они происходят в несколько раз чаще или реже, чем среднестатистически, то есть с вероятностью 0.05 или раз в 20 суток. Пространственное распределение изменений этих вероятностей в зависимости от погодных режимов в СЕ представлено на рисунке 7. Так же в разделе 4.2 приведена связь летних ПР в СЕ со случаями атмосферного блокирования, наличие которых рассчитывалось по критериям Тибальди-Мольтени и Леженаса-Окланда. Показано, что блокирование преимущественно соответствует режимам SUN и SSB. Таким образом, рост частоты положительных аномалий температур на европейской территории России (ЕТР) во время летнего режима SUN, можно связать с блокирующими процессами в атмосфере. Локальные пики повторяемости режима SUN наблюдались в 2010 и 2016 гг. (см. рисунок 4), в те же годы, когда над ЕТР отмечались волны жары.

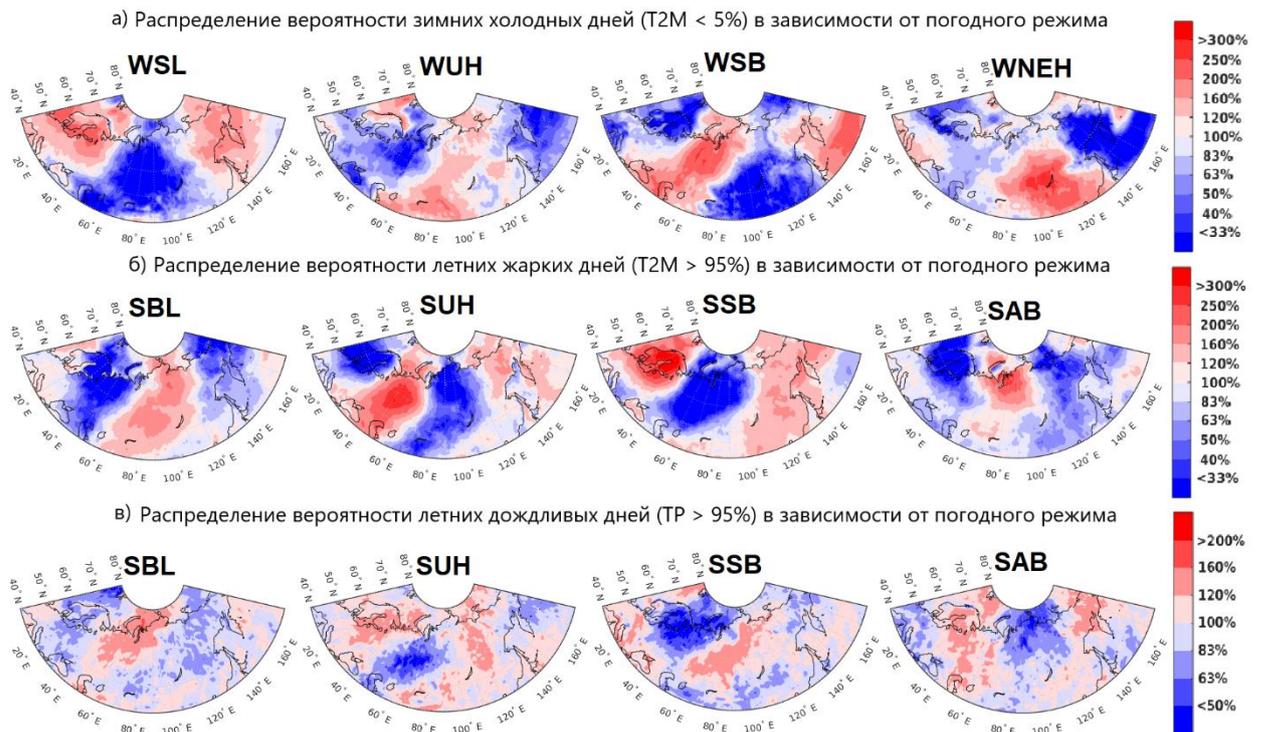


Рисунок 7. (а) пространственное распределение относительной частоты событий с аномалиями среднесуточной $T2M$ ниже 5-го перцентиля (холодные зимние дни) для зимних ПР в СЕ; (б) пространственное распределение относительной частоты событий с аномалиями среднесуточной $T2M$ выше 95-го перцентиля (жаркие летние дни) для летних ПР в СЕ; (в) как (б), но для TP , суточных сумм осадков (дождливые летние дни). Шкалы справа от карт указывают на наблюдаемое количество превышений частоты $T2M$ или TP для разных режимов за 1940-2022 гг. в % относительно среднестатистического количества таких дней ($N_k * 0,05$).

В разделе 4.3 приведены результаты анализа распределений вероятностей аномальных температур, осадков и ветра для зимних погодных режимов в Евро-Атлантике, полученных за современный период 1979–2021 гг., аналогично тому как это показано для режимов в Северной Евразии в предыдущем разделе. В разделе 4.3 показано, что за период 1979-2021 гг. для сезонной повторяемости не наблюдается трендов $NAO+$ и $NAO-$, полученных за период 1940–2022 гг. Так же приведены результаты анализа трендов полей погодных режимов в Евро-Атлантике, показано что значимые тренды наблюдается преимущественно на южной границе области Евро-Атлантики.

Распределения частот экстремальных аномалий приземных температур ($T2M$), сумм осадков (TP) и скорости ветра в 10 метрах над поверхностью ($WS10$), связанных с зимними погодными режимами в Евро-Атлантике за 1979 – 2021 гг., приведены на рисунке 8. Показано, погодные режимы в Евро-Атлантике, определенных в пределах от 80 з.д. до 40 в.д., связаны с

вероятностями аномалий температур и осадков в том числе и на территории Сибири (NAO-) и Северной Америки (AR).

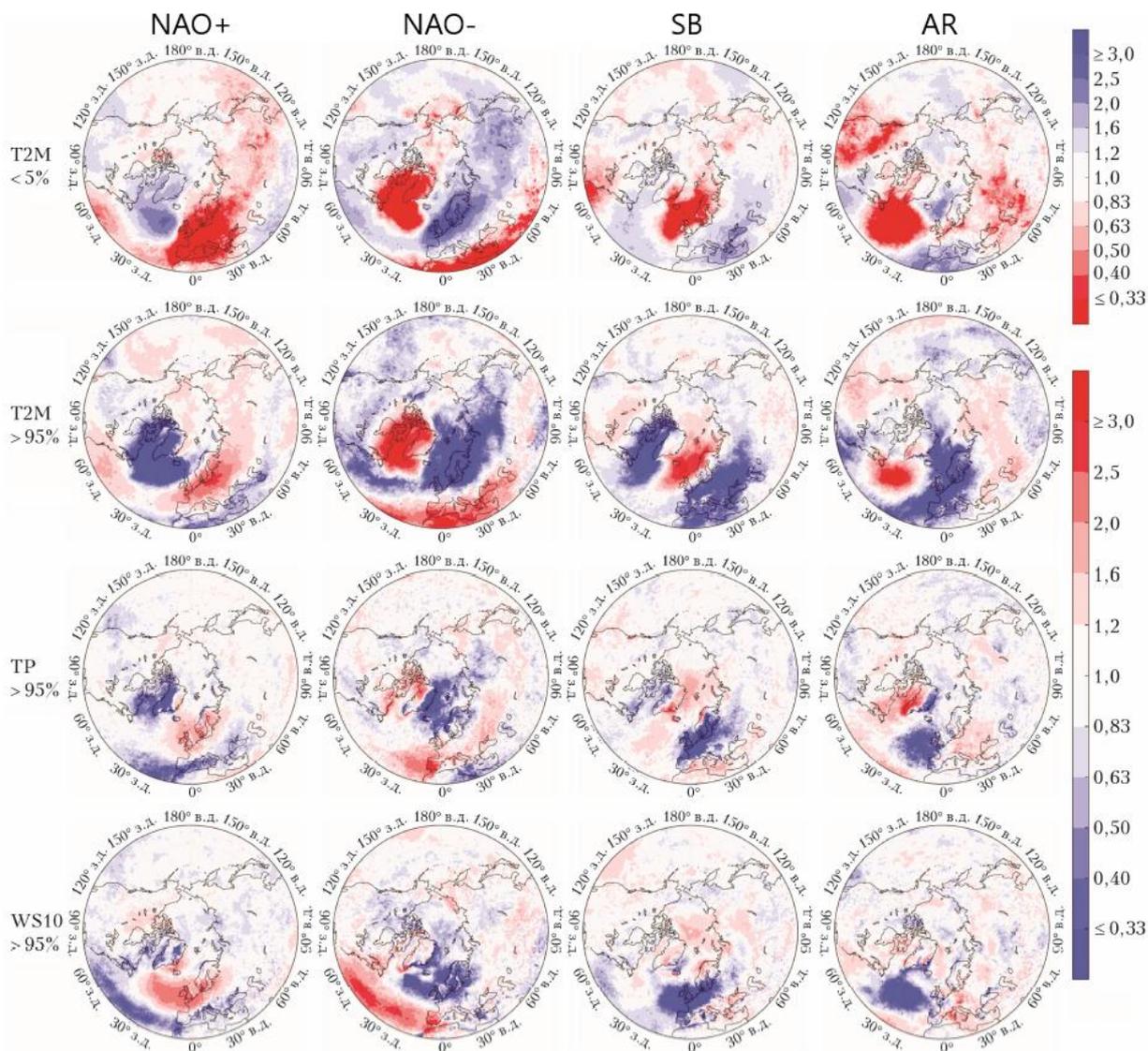


Рисунок 8. Связанная с зимними погодными режимами в ЕАТ (за 1979-2021 гг.) относительная частота экстремальных аномалий суточных T2M, TP, WS10 (отношение фактически наблюдаемой частоты экстремальных событий при данном погодном режиме к среднестатистической, т.е. 0.05 или один раз в 20 суток). Верхний ряд – повторяемость аномалий T2M ниже 5-го перцентиля, то есть холодных дней. Со 2-го по 4-ый ряд: повторяемость аномалий выше 95-го перцентиля, то есть повторяемость аномально теплых зимних дней, снегопадов и сильных ветров.

В разделе 4.4 приведены результаты анализа влияния крупномасштабной атмосферной циркуляции на экстремальные осадки на Южном берегу Крыма (ЮБК). Путём одновременной кластеризации среднесуточных полей z500 и SLP за период 1979 – 2021 гг. получено 7 режимов циркуляции в Европейском регионе (сектор 40 з.д. – 60 в.д.) и исследована связь этих режимов с экстремальными осадками на ЮБК.

Для полученных режимов анализировалось распределение суточных сумм осадков в ЮБК, полученных по сеточным данным из базы E-OBS с шагом 0.1 градуса, осредненным вдоль узлов сетки, попадающих на область ЮБК. Помимо E-OBS, использовались данные с метеостанции Феодосия, имевшей наиболее полный временной ряд осадков за исследуемый период. Результаты анализа приведены на рисунке 9. Показано, что, несмотря на слабые различия в средних осадках от режима к режиму, наиболее сильные осадки с интенсивностью выше 95-го перцентиля наблюдаются преимущественно во время режимов #1, #3 и #5. Режим #5 присутствовал в дни рекордных для ЮБК осадков с 14 по 19 июня 2021 года. Так же проанализирована совокупная повторяемость погодных режимов #1, #3 и #5, во время которых наблюдается повышенная частота экстремальных осадков, и получено, что за исследуемый период 1979–2021 гг. их повторяемость растёт на +2.2 суток в летний сезон за десятилетие ($p\text{-value} = 0.07$).

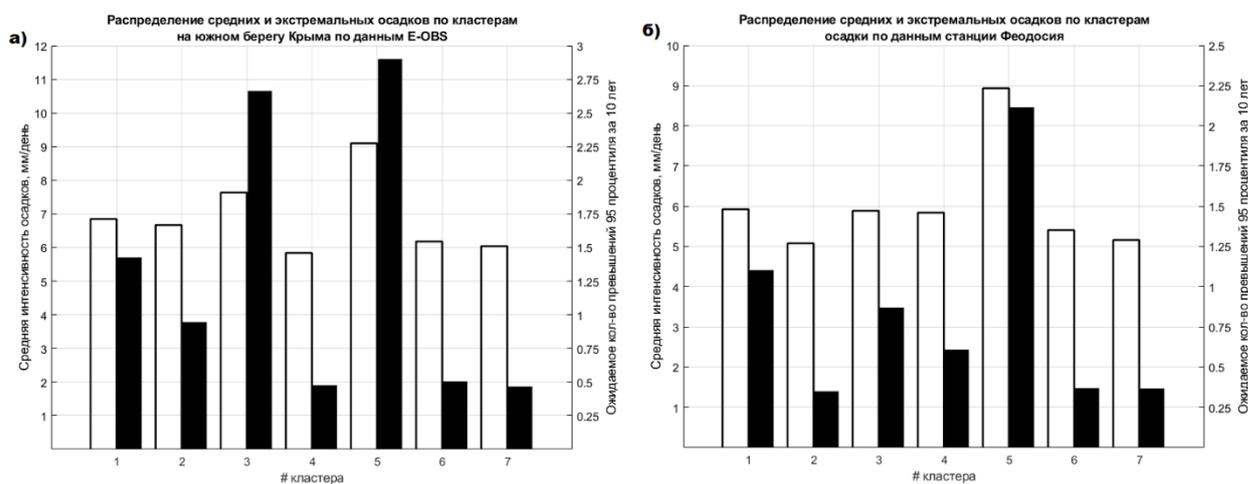


Рисунок 9. а): распределение средней интенсивности осадков (левая шкала, белые столбцы) и частоты экстремальных осадков выше 95 перцентиля интенсивности (правая шкала, черные столбцы) при различных режимах циркуляции по данным E-OBS; б) то же, но по данным метеостанции в Феодосии.

В разделе 4.5 перечислены выводы Главы 4. Показано, что повторяемость определенных ПР в СЕ зимой и летом зависит от индекса Nino 3.4 и площади морского льда в Северном полушарии в предшествующие сезоны. Показано влияние ПР в СЕ и ЕАТ на вероятности экстремальных температур, осадков и ветра не только в зоне определения этих режимов, но и за её пределами. ПР связаны в определенных регионах с кратным изменением вероятности наблюдения сильных аномальных температур, осадков и ветра по сравнению со среднестатистическими. Исследован частный случай влияния

крупномасштабной атмосферной циркуляции на осадки на Южном берегу Крыма и показано, что экстремальные осадки связаны с конкретными режимами циркуляции, повторяемость которых статистически значимо растёт в последние десятилетия.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Проведен сравнительный анализ методов кластеризации, используемых для идентификации ПР в Евро-Атлантическом регионе. Получено, что среди методов иерархической кластеризации Уорда (HW), модели гауссовой смеси (GM), k-means (KM) и самоорганизующихся карт Кохонена (SOM), KM является оптимальным. Оптимальность KM основывается на его простоте и способности выделять ПР в фазовом пространстве полей z500 с наименьшими суммами внутрикластерных расстояний. Расчет пространственных корреляций средних полей ПР, полученных разными методами, показал, что KM производит наиболее усредненный результат по сравнению с остальными методами.

2. В регионах Евро-Атлантики (ЕАТ) и Северной Евразии (СЕ) методом KM идентифицированы ПР, представлены и проанализированы их характеристики, включая повторяемости, продолжительности и матрицы переходов. Получено, что в зимний период оптимальное число режимов $K = 4$ как для ЕАТ, так и для СЕ. За период 1940–2022 гг. зимой в ЕАТ наблюдается положительный тренд повторяемости NAO+ и отрицательный тренд повторяемости NAO-. В Северной Евразии за 1940–2022 гг. повторяемость зимних ПР стабильна, а летом у трёх из четырёх ПР статистически значимо на уровне 5% меняется повторяемость, наиболее значимый тренд у режима уральского максимума SUN – его повторяемость растёт на 0.243 суток за год. Для ПР в СЕ получены замкнутые цепочки статистически значимых по частоте переходов, указывающих на неслучайную последовательность смены погодных режимов.

3. Проведен анализ способности климатических моделей воспроизводить характеристики ПР в ЕАТ в экспериментах historical. Получено, что ПР, идентифицированные методом k-means в собственном фазовом пространстве модельных полей z500, качественно совпадают с полями по данным реанализа ERA5. Средняя пространственная корреляция зимних модельных ПР с ПР реанализа составила 0.85 в зимние месяцы и 0.80 в летние. Повторяемости и продолжительности ПР в моделях зимой воспроизводятся лучше, чем летом.

4. Выявлена связь повторяемости зимних и летних ПР в СЕ с индексом явления Эль-Ниньо, Nino3.4, и площадью морского льда в Северном полушарии в предшествующие сезоны. Явление Эль-Ниньо в осенние месяцы связано с ростом повторяемости режима WSB в последующие зимы. Отрицательные аномалии площади морского льда в Северном полушарии в осенний и весенний период связаны с ростом повторяемости режимов уральского максимума в последующие зимний (WUH) и летний (SUN) сезоны.

5. Показано влияние ПР в ЕАТ и СЕ на вероятности экстремальных аномалий температур, осадков и ветра. Летний режим SUN связан с ростом вероятности жарких дней на европейской территории России 2-3 раза, а зимних режим NAO- в ЕАТ связан с кратным ростом аномально холодных дней на территории Европы. Показана связь антициклонических погодных режимов в Европе с экстремальными осадками на южном берегу Крыма, и выявлен рост совокупной повторяемости этих режимов в период 1979–2021 гг.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК:

1. **Бабанов Б. А.**, Семенов В. А., Мохов И. И. Сравнение различных методов кластеризации для определения погодных режимов в Евро-Атлантическом секторе в зимний и летний сезоны // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 59, № 6. – С. 686-706. – DOI 10.31857/S0002351523060020.
2. **Б. А. Бабанов**, Семенов В. А., Акперов М. Г., Мохов И. И., Keenlyside N. S. Повторяемость зимних режимов атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом регионе и связанные с ними экстремальные погодно-климатические аномалии в Северном полушарии // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36, № 4(411). – С. 304-312. – DOI 10.15372/AOO20230407.
3. **Babanov B. A.**, Semenov V. A. Weather Regimes in Northern Eurasia: Statistics, Predictability and Associated Weather Anomalies // Atmosphere. – 2024. – Vol. 15, No. 11. – P. 1392. – DOI 10.3390/atmos15111392.

Другие публикации по теме диссертации:

1. Семенов В.А., Алешина М.А., Акперов М.Г., Бабанов Б.А. Экстремальные осадки на ЮБК и их связь с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // «Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы» посвященная памяти А. И. Семенова и Н. Н. Шефова. Москва, 22-23 ноября 2021.
2. Бабанов Б. А., Семенов В. А. Кластеризация погодных режимов в Евро-Атлантическом секторе в зимний и летний периоды различными методами // IV Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова. Москва, 22–24 ноября 2022.
3. Бабанов Б. А. Методы кластерного анализа для анализа режимов атмосферной циркуляции в средних широтах // Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп, 2023.
4. Babanov B. A., Semenov V. A. Comparison of weather regimes' characteristics in Euro Atlantic region obtained by different cluster analysis methods // Russian-China workshop: 15th Conference of Atmospheric Physics, Climate and Environment. Moscow, September 11, 2023.

5. Бабанов Б. А., Семенов В. А. СВЯЗЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ ЛЕТОМ НА ЮЖНОМ БЕРЕГУ КРЫМА С ПОГОДНЫМИ РЕЖИМАМИ В ЕВРО-АТЛАНТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ // XX научная школа «Нелинейные волны – 2022». Нижний Новгород, 7-13 ноября 2022.

6. Бабанов Б. А. Кластерный анализ в задачах диагностики и предсказуемости погодных режимов // V Международная научная конференция «Наука будущего». Орёл, 20-23 сентября 2023.