

## Структура температурного поля Северного полушария в период современных климатических изменений

Ю.В. Волков, Н.Н. Чередыко, В.А. Тартаковский\*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

Развивается оригинальный метод объективной классификации климата на основе идеи об универсальности принципа согласованности природно-климатических процессов. Он позволяет исследовать реакцию структуры климатической системы на различные внешние факторы с учетом региональных особенностей. Созданный под эту задачу уникальный программный комплекс с интерактивным доступом позволяет выделять, исследовать и моделировать климатические кластеры по данным природно-климатических характеристик любого пространственного и временного масштабов. Приведены примеры реализации метода.

*Ключевые слова:* мониторинг изменений климата, синхронность, фаза температурных рядов, классификация климата; climate change monitoring, synchronicity, temperature series phase, climate classification.

### Введение

Климатическая система (КС) Земли в настоящее время находится в режиме, который характеризуется значительными отклонениями от среднего равновесного состояния: меняются характеристики сезонов, наблюдается и прогнозируется рост числа экстремальных событий и их интенсивности [1]. Наиболее актуальный и естественный вариант стратегии обеспечения безопасности и своевременной адаптации любой территории к таким процессам — оптимизация мониторинга состояния климатических ресурсов. Наибольшие риски связаны со смещением границ климатических зон при изменении климата.

Сегодня при оценках климатических ресурсов той или иной территории, как правило, опираются на данные справочников, которые редко, но обновляются, или климатических классификаций, которые, будучи одним из основных этапов анализа данных, организуют их исходный набор в группы по принципу высокой степени сходства какого-либо признака. Классические климатические классификации, определяющая роль в развитии которых принадлежит В.П. Кеппену, А.И. Воейкову, Л.С. Бергу, Б.П. Алисову, А.А. Григорьеву, М.И. Будыко, представляют собой результат обобщений комплекса параметров, полученных в период до современного глобального потепления, являясь, таким образом, индикацией климатических различий этого периода, но не изменений климата, которые, безусловно, должны сопровождаться трансформацией полей его элементов. Для повышения эффективности социально-

экономической адаптации к меняющимся условиям климата задачу анализа его ресурсов, обобщаемых в климатических классификациях, необходимо решать в оперативном режиме. В ряде работ предлагается пересмотр наиболее используемой в мире классификации В.П. Кеппена [2, 3], исследуются в глобальном и региональном масштабах вероятные изменения климатических зон при разных прогнозных сценариях [4, 5]. Этот процесс требует информационных и вычислительных затрат. Из-за сложности КС общедоступных средств оперативного объективного мониторинга изменений ее пространственной структуры практически не предложено. В период прогрессирующего увеличения объема данных мониторинга состояния КС актуализируется проблема выбора информативных критериев и методов именно объективных классификаций, которые способствуют существенной экономии информационно-вычислительных ресурсов при моделировании климата.

Авторами развивается новый феноменологический подход к анализу внутренней структуры данных и выявлению скрытой в них информации о закономерностях их динамики и согласованности с внешними факторами на основе целевого обращения к рядам данных. Планетарная геосистема открыта и подвержена влиянию развивающихся космических факторов, активирующих и синхронизирующих динамические процессы геосистемы. В отклике КС определяющую роль играет не столько мощность внешних воздействий, сколько структура внутренних факторов и обратных связей, реализующих этот отклик. Нами выдвинута и проверяется гипотеза о том, что синхронность является существенным свойством КС. Изучение этого свойства может привести к выявлению новых закономерностей, а ее критерии создают возможность для объективной классификации климата.

\* Юрий Викторович Волков (yvvolkov@mail.ru); Наталья Николаевна Чередыко (atnik3@rambler.ru); Валерий Абрамович Тартаковский (trtk@list.ru).

Сложность КС обусловлена взаимодействием и трансформацией протекающих в ней процессов, а их нелинейность затрудняет повышение качества прогноза климата несмотря на стремительное развитие суперкомпьютерных технологий. В предлагаемом методе климатические структуры выделяются на основе лишь температурных данных, но не исходных (измерений), а характеристик изменчивости температуры приземного воздуха. Изменения температуры есть следствие влияния огромного числа процессов КС и могут считаться интегральным показателем всего комплекса факторов климаторегулирования. Введенный в [6] функционал от корреляции разнознаковых производных среднегодовой температуры может служить мерой проявления эмерджентных свойств КС. Преимущество метода состоит в возможности оперативно получать распределение климатических кластеров (классы, группы, структуры, которые получаются в результате классификации как характеристики типов климата) для территорий любого пространственного масштаба и отслеживать их временную трансформацию с любым дискретом по времени и масштабом осреднения данных измерений, в частности в условиях изменения климата, только по наиболее доступным и объективным данным о температуре.

Полученные ранее результаты применения развитаемого метода классификации климата на основе описания колебаний средней приземной температуры воздуха как фазомодулированного процесса [7, 8] соответствуют основным закономерностям географии климата, что подтверждает адекватность выдвинутой гипотезы и метода. Результаты поиска закономерностей и основных предикторов трансформации структуры синхронизации полей параметров климата могут быть использованы для развития моделей климата, а также для понимания неоднородных во времени и пространстве климатических изменений. В настоящей работе оценивается устойчивость структуры поля приземной температуры воздуха Северного полушария на фоне глобальных изменений климата с целью выявления зон, наиболее чувствительных к глобальным внешним климаторегулирующим сигналам, с учетом новых и полученных ранее результатов.

## Метод и материалы исследования

Для оценки структуры поля приземной температуры и особенностей трансформации структуры на фоне климатических изменений разработан алгоритм объективной динамической кластеризации [9], в основу которого положено преобразование Гильберта — известный инструмент анализа временных рядов данных измерений параметров сложных систем [10]. Природно-климатические процессы представляют собой колебания физических величин во времени, которые могут быть описаны в терминах огибающей и фазы. На взаимном сравнении огибающей и фазы построен алгоритм выделения групп с согласованным временным ходом. В каче-

стве меры синхронности используется коэффициент корреляции.

Под объективностью кластеризации мы понимаем естественность группировки с помощью численного алгоритма в смысле ненавязывания количества получаемых кластеров и получения результатов, имманентных системе. Динамической кластеризация названа ввиду возможности оценивать состояние структуры поля в любом временном дискрете и ее трансформацию во времени. Предлагаемый способ кластеризации соответствует принципам любого районирования: малые различия показателя внутри кластера и существенные — между кластерами; географическая связность каждой структуры. Метод может быть применен именно к классификации климата, так как он позволяет выстраивать иерархию структуры рассматриваемой системы, степень дифференциации которой обусловлена факторами различного масштаба, и исследовать генетические связи разных уровней.

Предложены различные способы кластеризации [11], разные критерии максимума сходства параметров внутри класса и максимума их различимости, определение которых остается актуальным для проблемы кластеризации данных. Как объективные чаще всего применяются методы кластерного и факторного анализа [12–15]. Одним из наиболее используемых алгоритмов кластеризации уже более 50 лет является метод  $k$ -средних [11], он прост в реализации и подтвердил свою эффективность в решении задач разного рода.

Обеспечение автоматического определения количества выделяемых кластеров — одна из основных задач в проблеме объективной кластеризации [11]. Чаще всего, например в методе  $k$ -средних, в алгоритме задается несколько вариантов числа классов, а потом экспертно выбирается наиболее удовлетворяющий условиям задачи вариант. В предлагаемом нами методе [8, 9] количество классов заранее не задается, однородные районы объективно выделяются в результате выполнения алгоритма. К недостаткам известных методов можно также отнести отсутствие подхода к выбору критериев кластеризации, имманентных КС. Результат предлагаемой кластеризации представляет собой естественную совокупность структур, отражающую объективную картину согласованности колебаний (в данном случае — температуры). При этом полученные кластеры географически обособлены.

Для оптимизации работы алгоритма и обеспечения возможности его встраивания, например, в модели климата, разработан и реализован программный комплекс климато-экологического мониторинга (ПККЭМ). Его достоинства — относительная простота реализации, возможность выделения и анализа трансформации климатических кластеров для регионов любой площади, визуальный контроль результатов. Предусмотрены интерактивный режим работы с распределением отдельных программных модулей и выводом результатов на удаленные вычислительные машины, возможности хранения

и обработки больших массивов данных и увеличение производительности за счет параллельной реализации основного алгоритма. Также заложена возможность использования данных любой природы, в том числе палеоисследований. Использование «облачных» вычислений предоставляет для конечного пользователя вычислительные ресурсы в готовом виде и дает возможность стандартизировать программное обеспечение, если на компьютерах установлены разные операционные системы. При этом вычислительная мощность теоретически не ограничена, что актуально для анализа больших массивов данных.

На главной странице веб-приложения ПККЭМ пользователю предлагаются поля ввода входных данных (значения параметра, долгота, широта, номер метеостанции или места сбора образцов) и значения минимального коэффициента корреляции. В процессе вычисления используются постоянные и временные массивы данных. Два постоянных массива состоят из исходных данных и соответствующих расчетных. Временные массивы – массив сравнения, содержащий значения, идентичные массиву, исходному для текущей итерации, и массив со значениями взаимной корреляции. Процесс итерации завершается, когда значения расчетного массива и массива сравнения различаются на величину меньше заданного уровня отклонения. При этом формируется окончательный постоянный массив кластеров, содержащий информацию об их составе, географических и информационных характеристиках. Эта информация выводится в отдельное окно и входит в итоговый отчет. Отчет включает данные, выбранные исследователем, сохраняемые в текстовый файл. Результаты отправляются клиенту, формируется карта с нанесенными на нее маркерами в соответствии с географическими координатами. Каждому кластеру присваивается маркер своего цвета; станции, не вошедшие ни в один из кластеров, обозначаются символом «x» или не обозначаются совсем. Реализована возможность изменять название, имя, цвет, вид, размер маркера. Визуализация, получаемая на основе географических характеристик (положение, размер кластеров), позволяет определить границы кластеров и их изменения на фоне глобальных климатических трендов. Информационные характеристики представляются в виде функциональных зависимостей и оценочных критериев.

В настоящей работе представлены некоторые результаты применения метода и ПККЭМ для десятилетних интервалов: 1956–1965, 1966–1975, 1976–1985, 1986–1995, 1996–2005, 2006–2015 гг. Уровень тесноты связи задавался коэффициентом корреляции 0,8. Материалами для верификации послужили данные среднемесячной температуры с 927 метеостанций Северного полушария за 1956–2015 гг. [16]. В стремлении к равномерной и достаточной представленности различных территорий отбирались станции, суммарный период отсутствия данных на которых не превышал 3% от числа рассмотренных среднемесячных значений.

## Результаты и обсуждение

Ранее было показано [8], что в период ускоренного потепления, с 1976 г., изменились закономерности синхронизации температурных колебаний, что стало индикацией перестройки структуры КС Северного полушария. В Западной Европе, во Внутренней Азии, в Средней и Восточной Сибири, на восточно-азиатских островах, в северо-западной части Северной Америки согласованность температурных колебаний увеличилась. В подтверждение усиления потепления в Арктике [17, 18] многие станции, расположенные в высоких широтах, присоединились к более южным классам. К ускоренному росту глобальной температуры наиболее чувствительными оказались территории Фенноскандии, Британских островов, Центрально-европейской географической области и Среднеевропейской равнины, Гренландии, российской горно-островной Арктики и субарктики, горные районы Евразии и зоны влияния основных центров действия атмосферы. Наиболее устойчивая структура синхронизации температурных колебаний была выявлена для Пиренейской области, Прикаспийско-Туранской страны, горной системы Памиро-Алай, Средней Сибири, крайнего северо-востока Азии, Северного Индостана и Индо-Гангской равнины, восточной части Центральных равнин и Береговых низменностей Северной Америки, п-ова Лабрадор.

Безусловно, реакция КС на внешние факторы в виде изменений в ее структуре зависит от рассматриваемой временной шкалы. В само определение климата заложено понимание, что для анализа состояния КС целесообразно использовать период в несколько десятилетий. Временной масштаб для кластеризации 20 лет и более [8] отражает, как правило, влияние крупномасштабных климаторегулирующих факторов. Результаты кластеризации для десятилетних периодов подтвердили успешность развиваемого метода в отслеживании трансформации структуры поля в динамике и ее отклика на факторы в масштабе между погодным и климатическим (несколько лет). Полученные структуры более изменчивы.

Трансформация структуры температурного поля обусловлена, прежде всего, изменениями режима крупномасштабной циркуляции атмосферы и океана; постоянная перестройка макроциркуляционных процессов – основной механизм отклика на различные факторы. Выделяются продолжительные циркуляционные эпохи [19], подробно исследуются различные циркуляционные моды и отклик на них глобальных и региональных процессов (например, [14, 20, 21]). Согласно [22] потепление климата с середины 1970-х гг. почти на 50% может быть объяснено изменчивостью процессов взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике. Для примера на рис. 1 приведены результаты кластеризации по десятилетиям для регионов наибольшего влияния в Северной Атлантике.

Североатлантическое колебание (САК) и связанное с ним Арктическое колебание признаются

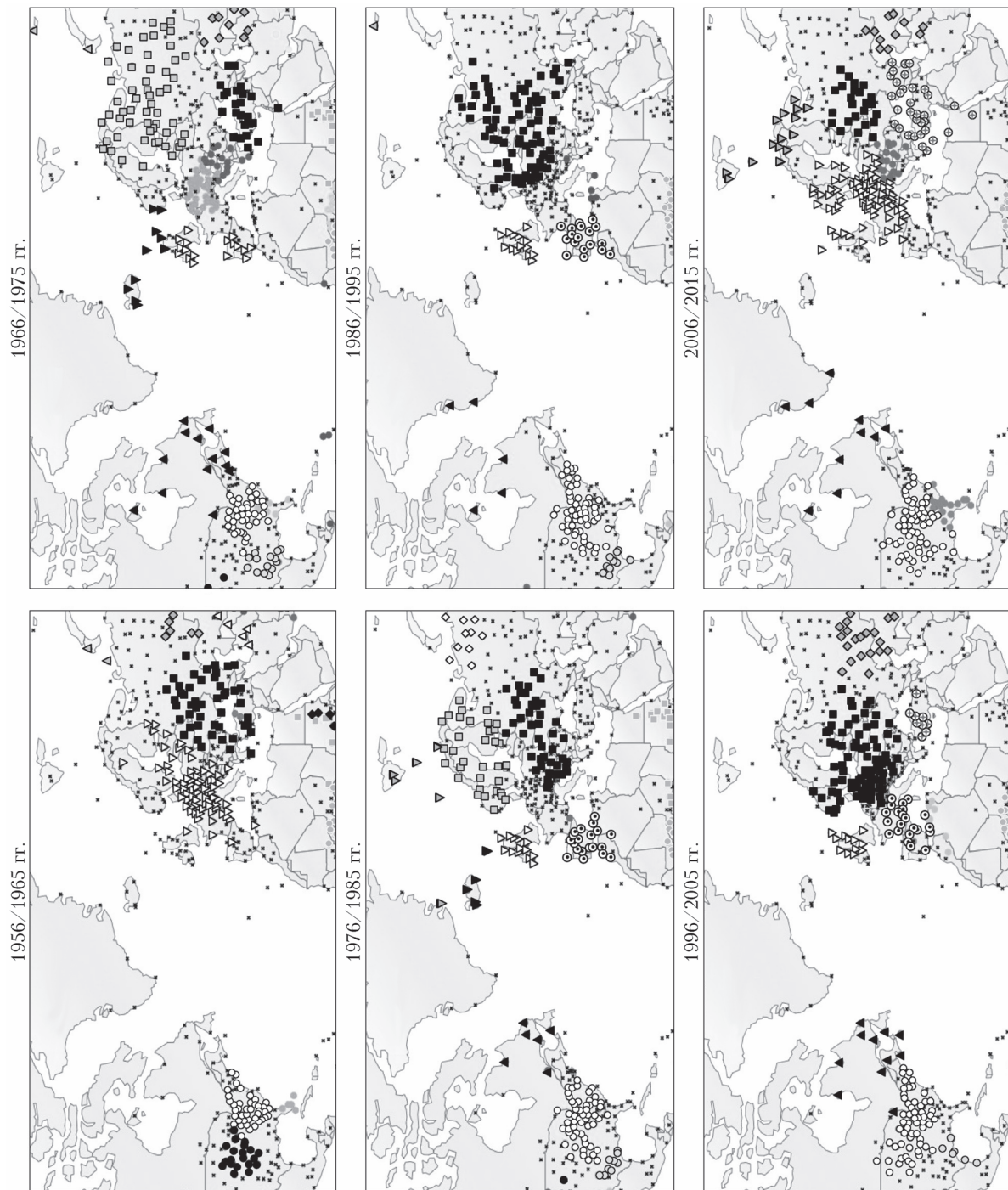


Рис. 1. Кластеризация поля приземной температуры Северного полушария по десятилетиям за период 1956–2015 гг. (район максимального влияния процессов взаимодействия атмосферы и океана в Северной Атлантике); пороговый коэффициент корреляции 0,8. Разные классы станций обозначены разными значками; станции, не вошедшие ни в один из классов, отмечены знаком «x»

одними из доминирующих циркуляционных мод в изменчивости температуры Северного полушария. С середины 1970-х гг. начался направленный рост индекса САК [20]. Для зим 1980-х и 1990-х гг. были характерны очень высокие его значения. Влияние САК на поле температуры характеризуется дипольными структурами в различных регионах [20, 23]. Эти диполи проявляются и в структуре группировки станций при любом временном дискрете: и на рис. 1 и в [8]. На этих территориях потепления и похолодания происходят согласованно, но в разных фазах. Так, например, в периоды пониженных значений САК происходило похолодание над северной частью Евразии и потепление над востоком Канады и западом Гренландии [24]. Возможно, расширение к югу класса станций с ядром на п-ове Лабрадор (рис. 1) — это отклик на эти процессы в период замедления потепления (1996–2005 гг.), как и в 1966–1975 гг.

В 10-летнем масштабе выявляется более низкая согласованность температурных колебаний на большей части территории, чем для более длительных периодов. Число станций, не вошедших ни в один из классов, максимально в 1986–1995 гг.; оно остается высоким и в следующие два десятилетия (рис. 1). Возможно, это связано с существенным ростом и максимумом в эти годы повторяемости меридиональной южной группы циркуляции по классификации Б.Л. Дзердзеевского [19]. При этом типе циркуляции над Арктикой формируется область пониженного давления, приходящие с юга циклоны регенерируют на арктическом фронте, усиливается межширотный обмен воздушных масс, состояние атмосферы крайне неустойчиво, что способствует росту частоты аномальных погодных процессов и рассинхронизации температурных колебаний.

С начала XXI в. наблюдается значительное потепление в морях Северного Ледовитого океана [25], оно наиболее устойчиво в Баренцевом море [26]. На рис. 1 хорошо видно, что в 2006–2015 гг. сформировался класс, включающий станции о-ва Шпицберген, Кольского и севера Скандинавского п-овов. В это же десятилетие отмечается наибольшая за весь рассмотренный период синхронизация в поле температуры большей части Европы, кроме ее южной части. По расположению кластеров прослеживается большая климатическая ось Евразии (ось Воейкова) с некоторым смещением к югу, что способствует аномальному усилению адвекции тепла к Европе и в арктические широты. Станции о-ва Шпицберген входили в один из классов еще в период 1976–1985 гг., когда произошло усиление САК.

Снижение интенсивности Азиатского максимума в 1978–2001 гг. [27] прослеживается в изменениях структуры кластеров на территории наибольшего его влияния (рис. 2). Обширный класс, включающий станции Западной и Средней Сибири, к 1996–2005 гг. сконцентрировался вблизи климатического центра Азиатского максимума, уменьшившись пространственно почти втрое. В Атлантике в этот период отмечалось компенсационное усиление субтропического антициклона (см. рис. 1): только в эти десяти-

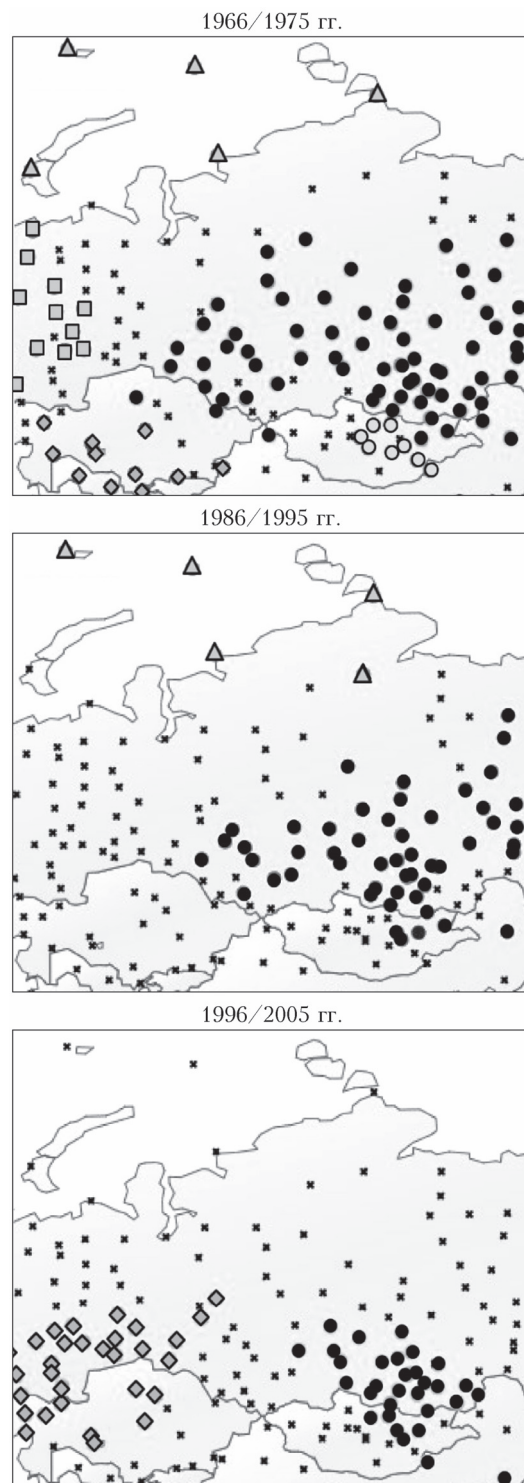


Рис. 2. Кластеризация поля приземной температуры Северного полушария по десятилетиям за период 1956–2015 гг. (зона максимального влияния Азиатского максимума: Западная, Средняя, Восточная Сибирь, территория Монголии); пороговый коэффициент корреляции 0,8

летия станции Пиренейского п-ова формируют обособленный класс.

Территории, выделенные ранее [8] как наиболее чувствительные к направленному тренду современного потепления, при рассмотрении по десятилетиям

подтвердили свой статус. Устойчивость структуры синхронизации температурных колебаний подтвердилась только для низменности Инда, юга Средней Сибири, восточной части Центральных равнин и Береговых низменностей Северной Америки и в большинстве периодов для Пиренейской области. Это говорит в пользу необходимости регулярных оценок структуры КС.

Здесь приведены лишь некоторые примеры согласованности перестройки структуры с циркуляционными климаторегулирующими механизмами. Перестройка структурных элементов общей циркуляции атмосферы на фоне общей тенденции глобального потепления обуславливает существенные региональные вариации отклика на изменения климата. Подобные закономерности метод кластеризации позволяет исследовать глубже в любых временных масштабах. Это, а также исследования для разработки теоретической базы для обоснования характерных временных периодов для тех или иных фундаментальных и практических задач поставлены в планы дальнейшей работы.

### Заключение

В меняющемся климате знание закономерностей трансформации границ климатических кластеров во времени актуальнее и важнее, чем разделение на средние типы климата. Развиваемый метод динамической климатической кластеризации на основе согласованности колебаний метеопараметров характеризуется объективностью и оперативностью при минимальном использовании вычислительных ресурсов, что выделяет его среди прочих. Простая форма представления различных региональных климатических режимов только по данным приземной температуры может существенно снижать неопределенности, связанные с особенностями региональных реакций на изменения глобального климата при моделировании.

Результаты кластеризации для десятилетних периодов подтвердили успешность применения развиваемого метода для отслеживания трансформации структуры поля в динамике и ее отклика на влияние факторов в масштабах между погодным и климатическим. В масштабе десятилетий согласованность температурных колебаний на большей части территории ниже, чем при анализе за 20 лет и более, структура поля более изменчива, прослеживается влияние декадной изменчивости общей циркуляции атмосферы. Углубление в детали обусловленности трансформации структуры поля циркуляционными паттернами позволит выявить и систематизировать закономерности региональных реакций и развить потенциал данного метода в задачах моделирования климата и расширения возможностей учета ими региональных обратных связей за счет выявления универсальных признаков эволюции исследуемых компонентов геосистемы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РАН в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект № 121031300155-8).

1. *Изменения климата*, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Т.Ф. Стокер, Д. Цинь, Платтнер [и др.]. Кембридж; Нью-Йорк: Кембридж Университи пресс, 2013. 222 с.
2. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen–Geiger climate classification updated // *Meteorol. Z.* 2006. V. 15. P. 259–263.
3. Rohli R.V., Joyner T.A., Reynolds St. J., Shaw C., Vazquez J.R. Globally Extended Köppen–Geiger climate classification and temporal shifts in terrestrial climatic types // *Phys. Geographi.* 2015. V. 36, iss. 2. P. 142–157.
4. Belda M., Holtanová E., Kalvová J., Halenka T. Global warming-induced changes in climate zones based on CMIP5 projections // *Clim. Res.* 2016. V. 71. P. 17–31. DOI: 10.3354/cr01418.
5. Wu B., Lang X., Jiang D. Köppen climate zones in China over the last 21000 years // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2021. V. 126, iss. 6. DOI: 10.1029/2020jd034310.
6. Тартаковский В.А., Чередыко Н.Н., Максимов В.Г. Эмергентные свойства климатической системы. Производные среднегодовой температуры на метеостанциях Северного полушария // *Оптика атмосфер. и океана.* 2021. Т. 34, № 5. С. 369–373. DOI: 10.15372/AOO20210509; Tartakovsky V.A., Cheredko N.N., Maximov V.G. Emergent properties of a climate system: Derivatives of annual average temperature at weather stations of the Northern hemisphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 4. P. 341–346. DOI: 10.1134/S1024856021040138.
7. Чередыко Н.Н., Тартаковский В.А., Крутиков В.А., Волков Ю.В. Классификация климатов Северного полушария на основе оценки фазы температурного сигнала // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 625–632; Cheredko N.N., Tartakovsky V.A., Krutikov V.A., Volkov Yu.V. Climate classification in the Northern hemisphere using phases of temperature signals // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 63–69. DOI: 10.1134/S1024856017010043.
8. Чередыко Н.Н., Тартаковский В.А., Волков Ю.В., Крутиков В.А. Трансформация пространственной структуры поля приземной температуры Северного полушария // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020. № 1. С. 1–9.
9. Volkov Yu.V. Analysis of temperature signals and their clusterization algorithm // *Opto-electron. Instrum. Data Proc.* 2019. V. 55, N 3. P. 243–248. DOI: 10.3103/S8756699019030051.
10. Huang N.E., Wu Z. A review on Hilbert–Huang transform method and its applications to geophysical studies // *Rev. Geophys.* 2008. V. 46. DOI: 10.1029/2007RG000228.
11. Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means // *Patt. Recognit. Lett.* 2010. V. 31, iss. 8. P. 651–666. DOI: 10.1016/j.patrec.2009.09.011.
12. Закусилов В.П., Закусилов П.В. Использование компонентного анализа для характеристики атмосферной циркуляции над западным географическим районом // *Вест. ВГУ. Сер.: Геогр. Геоэкол.* 2009. № 2. С. 67–71.
13. Попова В.В., Шмакин А.Б. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в Северной Евразии во второй половине XX – начале XXI веков // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2010. Т. 46, № 2. С. 161–175.
14. Netzel P., Stepinski T. On using a clustering approach for global climate classification // *J. Clim.* 2016. V. 29, iss. 9. P. 3387–3401. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0640.1.

15. *Falquina R., Gallardo C.* Development and application of a technique for projecting novel and disappearing climates using cluster analysis // *Atmos. Res.* 2017. V. 197. P. 224–231. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.06.031.
16. *Архив* Университета Восточной Англии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metoffice.gov.uk>, <http://www.cru.uea.ac.uk> (дата обращения: 01.08.2019).
17. *Walsh J.E.* Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on middle latitudes // *Glob. Planetary Change.* 2014. V. 117. P. 52–63. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.03.003.
18. *Алексеев Г.В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фунд. и прикл. климатол.* 2015. Т. 1. С. 11–26.
19. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзедзеевскому / отв. ред. А.Б. Шмакин. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
20. *Hurrell J.W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation // *Science.* 1995. V. 269. P. 676–679.
21. *Kundzewicz Z.W., Pińskwar I., Koutsoyiannis D.* Variability of global mean annual temperature is significantly influenced by the rhythm of ocean-atmosphere oscillations // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 747. 141256. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141256.
22. *Семенов В.А., Мохов А.Б., Полонский А.Б.* Моделирование влияния естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике на формирование аномалий климата // *Мор. гидрофиз. журн.* 2014. № 4. С. 14–26.
23. *Hurrell J.W., van Loon H.* 1997 Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation // *Climat. Change* V. 36. P. 301–326.
24. *Iles C., Hegerl G.* Role of the North Atlantic Oscillation in decadal temperature trends // *Environ. Res. Lett.* 2017. V. 12, N 11. P. 114010. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9152.
25. *Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Балакин А.А.* Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // *Пробл. Арктики и Антарктики.* 2010. Т. 86, № 3. С. 22–34.
26. *Matishov G.G., Matishov D.G., Moiseev D.V.* Inflow of Atlantic-origin waters to the Barents Sea along glacial troughs // *Oceanologia.* 2009. V. 3, N 51. P. 293–312.
27. *Panagiotopoulos F., Shahgedanova M., Hannachi A., Stephenson D.B.* Observed trends and teleconnections of the Siberian High: A recently declining center of action // *J. Clim.* 2005. V. 18, iss. 9. P. 1411–1422. DOI: 10.1175/JCLI3352.1.

*Yu.V. Volkov, N.N. Cheredko, V.A. Tartakovsky.* **Structure of the temperature field in the Northern hemisphere during the period of modern climate change.**

An original method for objective climate classification is being developed based on the idea of the universality of the principle of consistency of natural and climatic processes. The method makes it possible to study the response of the climate system structure to different external factors taking into account regional characteristics. A unique interactive software package created for this task allows one to select, study, and simulate climatic clusters based on the climatic characteristics of any nature on any spatial and temporal scales. Examples of the method implementation are given.