

На правах рукописи



Богданович Антон Юрьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ФГБУ «ИГКЭ»), отделе изучения взаимодействия атмосферы и природных систем суши.

Научный руководитель:

Семенов Сергей Михайлович,

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля».

Официальные оппоненты:

Рубинштейн Константин Григорьевич,

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации».

Сухова Мария Геннадьевна,

доктор географических наук, доцент, проректор по научной и инновационной деятельности, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Горно-Алтайский государственный университет».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук».

Защита диссертации состоится «30» сентября 2025 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета 26.1.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru/disserboard>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Шатунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Согласно оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) наблюдаемые и ожидаемые в XXI веке изменения климата во многих регионах способны оказывать негативное и даже неприемлемое воздействие на природные и социально-экономические системы, на здоровье населения. Международное Парижское соглашение [UNFCCC, 2015], заключенное под эгидой Рамочной конвенции ООН об изменении климата [UNFCCC, 1992] направлено на то, чтобы ограничить, смягчить изменения климата и адаптировать различные системы к изменениям климата. Адаптация направлена на то, чтобы уменьшить ущерб от негативных воздействий изменения климата и увеличить выгоду от позитивных воздействий. Во исполнение Парижского соглашения страны-участницы должны разрабатывать и реализовывать Национальные планы адаптации (НПА). В России первый этап плана адаптации был утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р.: «Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года» [Национальный план..., 2019].

Для того, чтобы разрабатывать и внедрять меры адаптации, необходимо прежде всего установить те части географического пространства, где могут проявляться негативные воздействия климата, а также указать, как будут двигаться границы этих частей в условиях определенных сценариев изменения климата.

Данная диссертационная работа направлена на решение проблем этого актуального круга.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка методики и ее реализация в виде вычислительной системы для установления средствами математического моделирования части географического пространства, климат которой допускает систематическое наличие природного явления, – климатической области распространения (КОР).

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. развитие методики моделирования, позволяющей получать вероятностные оценки климатической области распространения (КОР) в географическом пространстве природного явления с использованием специфической совокупности гидрометеорологических величин и/или индексов, вычисленных на их основе, исходя из данных мониторинга или/и моделирования климата;
2. разработка вычислительной системы и порядка расчета КОР и ее изменений, исходя из характеристик климата и его изменений, выполнение алгоритмической и программной реализации;

3. приложение развитой методики и средств расчета к установлению КОР некоторых явлений различной природы (доминирование теплой части года, сильная засуха, наличие опасных насекомых-вредителей сельского и лесного хозяйства) для демонстрации эффективности выполненных разработок.

Научная новизна

1. Предложенная методика расчета вероятности принадлежности точки географического пространства климатической области распространения (КОР) природного явления с использованием байесовского подхода является новой.

2. Впервые разработана вычислительная система (RANGES), позволяющая на персональных компьютерах выполнять вероятностную оценку КОР природного явления, соответствующую заданному климату, и ее изменение при изменении климата в соответствии с современными сценариями. Система обеспечена возможностью использования результатов расчетов климатических моделей и широкого набора климатических предикторов. На вычислительную систему получено свидетельство Роспатента.

3. Продемонстрирована эффективность разработанных методики и схемы расчетов при оценке (в том числе для нужд адаптации) КОР на территории России для ряда явлений различной природы – доминирования теплой части года, сильной засухи, наличия опасных насекомых-вредителей сельского и лесного хозяйства (оценки получены впервые).

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы показывают, что описание КОР природного явления в вероятностных терминах, допускающее оценку неопределенности, можно проводить, используя специфическую совокупность гидрометеорологических переменных – гидрометеорологических величин и рассчитанных на их основе прикладных индексов, исходя из данных мониторинга климата и данных моделирования климата в условиях различных климатических сценариев.

Предложенный подход позволяет в настоящее время получать оценки в пользовательском режиме для множества явлений, что весьма востребовано в связи с реализацией Национального плана адаптации, предусмотренного Парижским соглашением.

Основные результаты диссертации получены в ходе выполнения плана НИТР Росгидромета по направлению 3.1. «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций», раздел 3.1.2. «Разработка новых методов и моделей для учета климатической информации при решении задач снижения рисков в отраслях

экономики, связанных с климатическими факторами» (регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР АААА-А20-120070990079-6).

Методология исследования

Основным инструментом исследования является статистическое моделирование КОР природного явления на основе информации о допустимых диапазонах изменения гидрометеорологических переменных из специфической для явления совокупности. Такая информация собирается путем поиска в специальной научной литературе. Вероятность принадлежности точки географического пространства к КОР явления определяется на основе статистического подхода. Алгоритмы, на которых основана вычислительная система, реализованы в виде программ на языке FORTRAN (версия ПО, находящаяся в свободном доступе). При картографическом отображении полученных результатов моделирования использовался картографический пакет QGIS (версия, находящаяся в свободном доступе).

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенные статистическая модель и методика расчета позволяют оценивать вероятность принадлежности точки географического пространства климатической области распространения (КОР) природного явления, исходя из данных о климате и допустимых диапазонах значений гидрометеорологических величин и/или индексов, рассчитанных на их основе, из специфической совокупности, соответствующей явлению.

2. Методика и порядок расчетов реализованы в форме системы RANGES, которая дает возможность осуществлять расчет КОР природных явлений и ее изменений в условиях различных сценариев изменения климата. При этом используемая схема вычислений позволяет выполнять оценки в региональном и глобальном масштабах с помощью обычных персональных компьютеров.

3. Эффективность предложенной методики и построенной на ее основе системы RANGES продемонстрирована при расчете КОР ряда явлений различной природы: доминирования теплой части года (т.е. когда суммарная продолжительность части года с положительными среднесуточными температурами превосходит полгода), сильной засухи, наличия насекомых-вредителей сельского и лесного хозяйства (средиземноморской плодовой мухи, хлопковой совки и непарного шелкопряда), наносящих значительный ущерб. Расчеты выполнены для территории России для климата 1990–1999 гг., а также для климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. с использованием нескольких климатических сценариев.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждается применением в диссертационной работе методологических подходов к вероятностной оценке

последствий изменения климата, используемых Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в ее научных докладах. Результаты применения системы RANGES к оценке КОР явлений различной природы, приведенные в диссертации, показали сходство расчетных оценок с фактами для базового периода. Результаты работы успешно представлялись на профессиональных международных и российских семинарах и конференциях.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях: на международной конференции и школе для молодых учёных по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES в 2023 г. (Москва, Россия); на всероссийской конференции с международным участием «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» (КЛИМАТ–2023) в 2023 г. (Москва, Россия); на Третьей всероссийской научной конференции с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества» в 2023 г. (Москва, Россия); на международной научно-практической конференции «Системы контроля окружающей среды» в 2023 и 2024 гг. (Севастополь, Россия); на всероссийской конференции с международным участием «Региональные геоэкологические проблемы в контексте глобальных изменений» в 2024 г. (Москва, Россия).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 8 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК), и 8 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций. Получено 1 свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя

Для современной версии системы RANGES соискателем предложен представленный в диссертации новый порядок расчета вероятности принадлежности точки географического пространства климатической области распространения природного явления, исходя из данных о климате и допустимых диапазонах значений климатических предикторов – гидрометеорологических величин и/или индексов, рассчитанных на их основе, из специфической совокупности, соответствующей явлению. Расширен набор климатических предикторов. Обеспечена возможность использования результатов расчетов отечественных глобальных и региональных климатических моделей для характеристики будущего климата. Разработана логическая структура и алгоритмическое решение современной версии системы RANGES, в связи с чем получено соответствующее авторское свидетельство (Свидетельство Роспатента

№ 2024668052). Соискателем проведены расчеты КОР явлений различной природы для территории России для базового климата конца XX века и будущих климатов для двух периодов времени в XXI веке, а также выполнено картографическое отображение этих результатов. Этим продемонстрирована эффективность разработанной расчетной методики и созданной на ее основе вычислительной системы RANGES.

Структура и объём диссертации

Работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 161 наименования и приложения. Общий объём диссертации – 145 страниц, включая 7 таблиц и 53 рисунка.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность профессору Сергею Михайловичу Семенову за руководство диссертационным исследованием. Автор признателен сотрудникам ИГКЭ имени академика Ю.А. Израэля за доброжелательное отношение и поддержку в процессе подготовки диссертации. Отдельную благодарность автор адресует сотрудникам кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за фундаментальные знания и профессиональные навыки, полученные во время обучения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Приведенные далее ссылки на публикации соответствуют Списку литературы, приведенному в тексте диссертации.

Во **Введении** представлена актуальность исследования, указаны цели и задачи диссертационной работы, её научная новизна, научная и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и личном вкладе соискателя.

В **главе 1** представлены базовые понятия, постановка задач и методика расчетов.

Область распространения какого-либо природного явления – часть пространства, где оно систематически происходит. При этом характер проявления может быть различным – непрерывным, периодическим, циклическим.

Точки пространства, в которых совокупность гидрометеорологических факторов допускает на значительных промежутках времени (десятилетия) данное природное явление при способствующем явлению сочетании остальных факторов среды, составляют климатическую область распространения (КОР) явления.

Фактическая область распространения явления является частью КОР, поскольку даже при допускающем явлении климате какие-то факторы среды иной природы могут явление заблокировать. В связи с этим климатическая область распространения может быть недоступна для непосредственного наблюдения и может быть установлена лишь в ходе анализа гидрометеорологических факторов, ее формирующих.

Положение в пространстве КОР природного явления определяется климатом и меняется при изменении климата.

Для описания КОР природного явления используется специфическая для явления совокупность гидрометеорологических переменных – непосредственно гидрометеорологических величин или/и прикладных индексов, рассчитанных на их основе. В литературе они иногда называются климатическими предикторами. Для каждого из них указывается диапазон значений, допустимых для описываемого явления.

В прикладных исследованиях этого направления часто используются следующие климатические предикторы:

- А) средняя температура воздуха за определенные месяцы календарного года;
- Б) сумма осадков за определенные месяцы календарного года;
- В) максимальная среднемесячная температура за календарный год;
- Г) минимальная среднемесячная температура за календарный год;
- Д) максимальная среднесуточная температура за календарный год;
- Е) минимальная среднесуточная температура за календарный год;
- Ж) сумма активных температур (САТ): сумма среднесуточных значений температуры, превышающих заданное пороговое значение, за календарный год;
- З) сумма пассивных температур (СПТ): сумма среднесуточных значений температуры, меньших заданного порогового значения, за календарный год;
- И) сумма эффективных температур (СЭТ): сумма превышений среднесуточными значениями температуры заданного порогового значения за календарный год;
- К) гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК): отношение суммы осадков в миллиметрах за период календарного года со среднесуточными температурами, превышающими $+10^{\circ}\text{C}$, к сумме этих значений температуры, деленной на 10;
- Л) другие гидротермические коэффициенты.

Общий подход к описанию КОР какого-либо природного явления следующий:

I. Анализируется специальная научная литература, в которой рассматривается явление по существу экспертами по предмету, в том числе обсуждается вопрос о роли гидрометеорологических факторов в его формировании;

II. По результатам этого определяется совокупность климатических предикторов, которые описывают гидрометеорологические факторы, участвующие в формировании явления; устанавливаются допустимые диапазоны изменения предикторов из этой совокупности;

III. Для заданных значительного промежутка времени (одно или несколько десятилетий – N лет) и архива гидрометеорологических данных (результаты наблюдений, реанализа или сценарного модельного расчета) анализируются значения климатических предикторов из

сформированной совокупности на предмет принадлежности их значений допустимым диапазонам; точки географического пространства, для которых анализ такого соответствия дал положительные результаты, считаются принадлежащими КОР исследуемого явления. Если речь идет о будущем климате, и имеется несколько его независимых модельных реализаций, то N лет есть общее число лет во всех реализациях.

На последнем этапе – этапе **III** – возможно применять два подхода – детерминистический и вероятностный. В первом случае используются климатические средние значения предикторов, а во втором – совокупность их значений за все N лет из рассматриваемого промежутка времени (и при всех реализациях климата в случае работы с результатами моделирования климата) и определяются те k лет из них, когда значения всех рассматриваемых предикторов находятся в допустимых диапазонах.

В данной работе принят второй, вероятностный подход. Предполагается, что в пределах рассматриваемого климатического периода:

– условия, когда в году значения всех климатических предикторов принадлежат допустимым диапазонам, наступают каждый год независимо с вероятностью p , т.е. при фиксированном p случайная величина k имеет биномиальное распределение:

$$b(k, N; p) = C_N^k p^k (1 - p)^{N-k}; \quad (1)$$

– если значение p превосходит пороговое значение p_0 , то считается, что явление систематически происходит.

Значение порога p_0 определяют эксперты по предмету. Если эта информация отсутствует, то полагается $p_0 = 0.5$. В этом случае, тем самым, $p > p_0$ означает, что явление в пределах климатической области его распространения наступает с большей вероятностью, чем не наступает.

В данной работе p рассматривается как случайная величина, используется байесовский подход. Плотность ее «априорного распределения вероятностей» на отрезке $[0, 1]$ – равномерная, а плотность ее «апостериорного распределения вероятностей» f на отрезке $[0, 1]$ есть плотность условной вероятности p при данном k :

$$f(k, N; p) = \frac{b(k, N; p)}{\int_0^1 b(k, N; \theta) d\theta}. \quad (2)$$

Соответствующая функция распределения имеет следующий вид:

$$F(k, N; p) = \frac{\int_0^p \theta^k (1 - \theta)^{N-k} d\theta}{\int_0^1 \theta^k (1 - \theta)^{N-k} d\theta}. \quad (3)$$

Значение PR вероятности того, что $p \geq p_0$, вычисляется по формуле:

$$PR = 1 - F(k, N; p_0). \quad (4)$$

При программном расчете значений F используется порядок расчетов, который эффективен в отношении затраты времени на расчет [Добролюбов, Семенов, Володин, Богданович, 2023]. При $0 < k < N$ используется формула:

$$F(k, N; p) = p^{N+1} + \left[\sum_{i=0}^{N-k-1} \frac{(k+i+2) \dots (N+1)}{(N-k-i)!} p^{k+i+1} (1-p)^{N-k-i} \right], \quad (5)$$

если $k = 0$, то $F(k, N; p) = 1 - (1-p)^{N+1}$,

если $k = N$, то $F(k, N; p) = p^{N+1}$.

Такие вероятностные характеристики можно непосредственно применять в процедурах оценки рисков, связанных с климатом и его изменениями. Это соответствует рекомендациям МГЭИК, изложенным в руководстве по оценке неопределенностей [Mastrandrea et al., 2010].

В **Главе 2** представлена система RANGES (Свидетельство Роспатента № 2024668052 [Богданович и др., 2024], см. [Богданович, 2025]), предназначенная для расчета КОР природного явления. Ее методологические основы приведены в главе 1.

Расчет производится на основе данных о фактическом или модельном климате.

Для глобальных оценок привлечены данные расчетов климатической модели Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН). Данные любезно предоставлены д.ф.-м.н. Е.М. Володиным. Временные срезы: 1990–1999 гг., 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. в условиях сценариев SSP2.6, SSP4.5, SSP7.0 и SSP8.5 (см. обзор [Семенов, Гладильщикова, 2022]). Число модельных реализаций климата – 1 или 5. Изначальное пространственное разрешение характеристик расчетного климата составляло 1.5° по широте и 2.0° по долготе. Эти расчетные данные нами интерполированы на сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, и для системы RANGES используется уже это разрешение.

Для региональных оценок на территории России привлечены модельные климатические данные Климатического центра Росгидромета (КЦР), рассчитанные с помощью региональной климатической модели (РКМ) Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО). Данные любезно предоставлены к.ф.-м.н. И.М. Школьников. Временные срезы: 1990–1999 гг., 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. Их исходное пространственное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Число модельных реализаций климата – 50. Модельные оценки для будущих периодов времени в этом случае соответствуют сценариям семейства RCP (см. обзор [Семенов, Гладильщикова, 2022]). Используются умеренный RCP4.5 и экстремальный RCP8.5 сценарии.

Для выполнения расчетов КОР природных явлений в данной работе к обоим описанным выше массивам модельных климатических данных были введены поправки, минимизирующие

расхождение с фактическими данными – данными мониторинга о среднемесячных значениях температуры и месячных суммах осадков для базового, исходного периода 1990–1999 гг. Источником фактических данных о климате в данной работе является массив CRU TS v. 4.04 [Harris et al., 2020], созданный Отделом исследования климата (Climatic Research Unit, CRU) Университета Восточной Англии, Великобритания. Откорректированные массивы данных обозначаются с надстрочной буквой «a» (например, КЦР^a) – от слова «adjusted».

Для проведения расчета КОР природного явления необходимо указать те климатические предикторы, которые определяют эту область, и допустимые диапазоны их значений. Набор возможных предикторов в точности соответствует перечню предикторов А-К, приведенному выше при описании главы 1. При этом для каждого из предикторов А и Б можно указывать до трех отрезков из последовательных месяцев календарного года. Если есть необходимость использовать данные о среднесуточной температуре, то в текущей версии системы они интерполируются по 12 данным о среднемесячной температуре с использованием гармонических функций (см. главу 1).

Вычислительная система RANGES реализована в виде совокупности программ на языке программирования FORTRAN (версия ПО, находящаяся в свободном доступе). Для ввода входных параметров для расчета имеется дружественный пользовательский интерфейс, который создан в ФГБУ «ИГКЭ» Н.Ю. Добролюбовым в среде MS Visual Studio Community (имеется в свободном доступе) на языке программирования Visual Basic .NET (VB.NET). Расчеты по используемым в данной работе глобальной и региональной сеткам занимают не более получаса на обычном персональном компьютере.

В Таблице 1 для диапазонов оценок вероятности *PR* точки географического пространства принадлежать КОР природного явления указаны числовые ранги, далее используемые при картографировании, и вербальные характеристики.

Такой подход к оценке неопределенности соответствует применяемому в научных докладах МГЭИК – см. методические рекомендации [Mastrandrea et al., 2010].

Таблица 1. Числовые ранги и вербальные характеристики *PR*
[Семенов и др., 2020, с изменениями]

Диапазон значений <i>PR</i>	Ранг, <i>N</i>	Словесная характеристика
(0.99; 1]	4	Практически достоверно
(0.90; 0.99]	3	Весьма вероятно
(0.66; 0.90]	2	Вероятно
(0.33; 0.66]	1	Средневероятно
≤ 0.33	0	Маловероятно

При картографическом отображении рангам соответствуют следующие цвета: 0 – белый, 1 – желтый, 2 – тёмно-жёлтый, 3 – коричневый, 4 – тёмно-коричневый.

В главе 3 демонстрируется эффективность разработанной методологии и построенной на ее основе вычислительной системы RANGES при расчете климатической области распространения (КОР) на территории России следующих явлений:

- доминирование теплой части года в календарном году;
 - сильные засухи, частота которых превышает пороговое значение, соответствующее хозяйственной целесообразности культивирования зерновых;
 - наличие опасных насекомых-вредителей сельскохозяйственных культур (средиземноморская плодовая муха, хлопковая совка) и лесных растений (непарный шелкопряд);
- КОР для этого класса явлений в научной литературе часто обозначается термином «климатический ареал».

Этот анализ проводился для климатов КЦР^а в условиях умеренного сценария RCP4.5 и экстремального сценария RCP8.5. В качестве исходного, базового периода использовался 1990–1999 гг. Анализ для будущих климатов выполнен для 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг.

При переходе от климата базового периода к климату будущего числовые ранги точек географического пространства будут, вообще говоря, изменяться в пределах от (-4) до (+4). Соответствующие вербальные характеристики и цветовое отображение приведено в Таблице 2.

Таблица 2. Вербальная характеристика и цветовое отображение результатов изменений рангов вероятности *PR* [Семенов и др., 2020, с изменениями]

Изменение ранга	Вербальная характеристика		Цвет
+4	Увеличение	Очень сильное	Фиолетовый
+3		Сильное	Темно-красный
+2		Среднее	Красный
+1		Слабое	Розовый
0	Изменений не выявлено		Бежевый
-1	Уменьшение	Слабое	Салатовый
-2		Среднее	Светло-зеленый
-3		Сильное	Зеленый
-4		Очень сильное	Темно-зеленый

При исследовании КОР *доминирования теплой части года в календарном году* использовался следующий климатический предиктор и допустимый диапазон его значений:

- число суток с положительными значениями среднесуточной температуры воздуха превосходит 182 (т.е. составляет больше половины продолжительности невисокосного года).

В середине XXI века в условиях сценариев RCP4.5 и RCP8.5 на территории России ожидается значительное смещение границы КОР доминирования теплой части года на север (по сравнению с базовым периодом 1990–1999 гг. (Рисунок 1)). Наиболее выраженные изменения ожидаются в условиях сценария RCP8.5: к 2050–2059 гг. (Рисунок 2) в Европейской части России (ЕЧР) теплая часть года может доминировать практически на всей территории, включая северные

регионы, такие как Мурманская и Архангельская области, Республика Коми и значительная часть Ненецкого автономного округа. Существенное продвижение границы к северу будет характерно также для Западной Сибири, где теплая часть года станет доминирующей в Ханты-Мансийском автономном округе и затронет Ямало-Ненецкий автономный округ [Богданович, 2025].

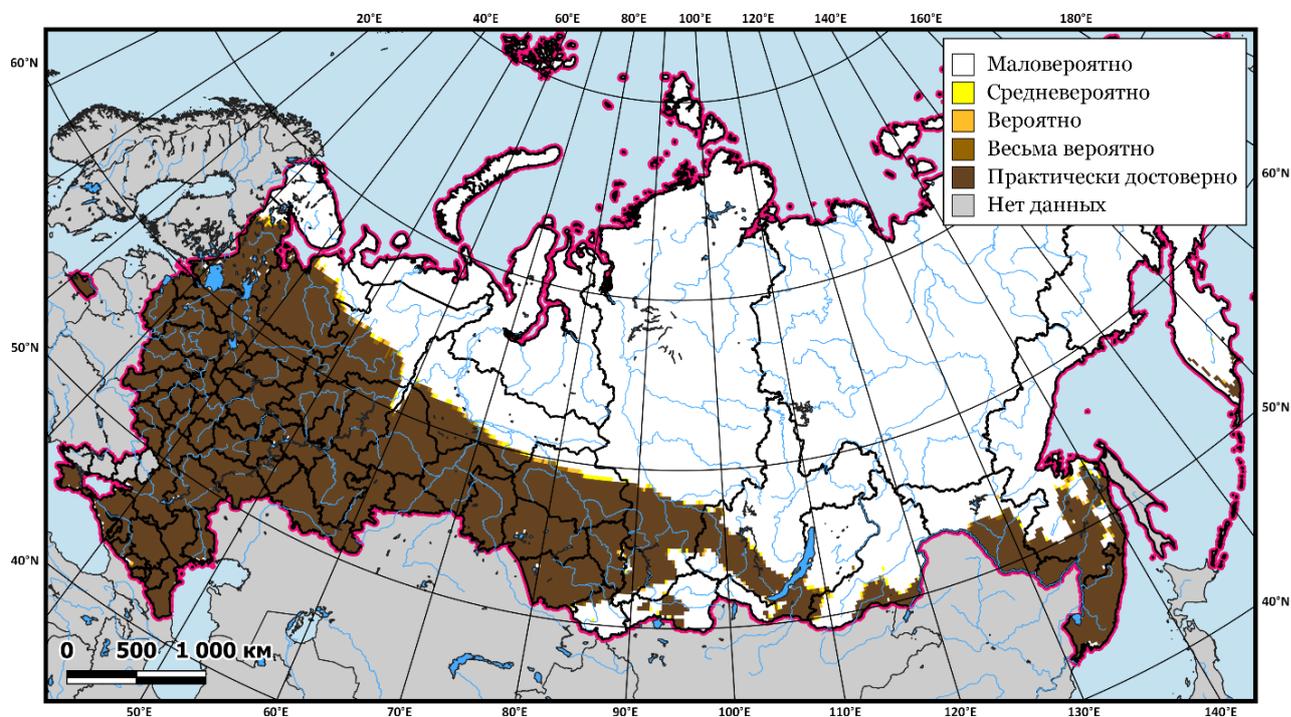


Рисунок 1. Расчетная КОР доминирования теплой части года в календарном году на территории России в условиях климата КЦР^а для 1990–1999 гг. [Богданович, 2025]

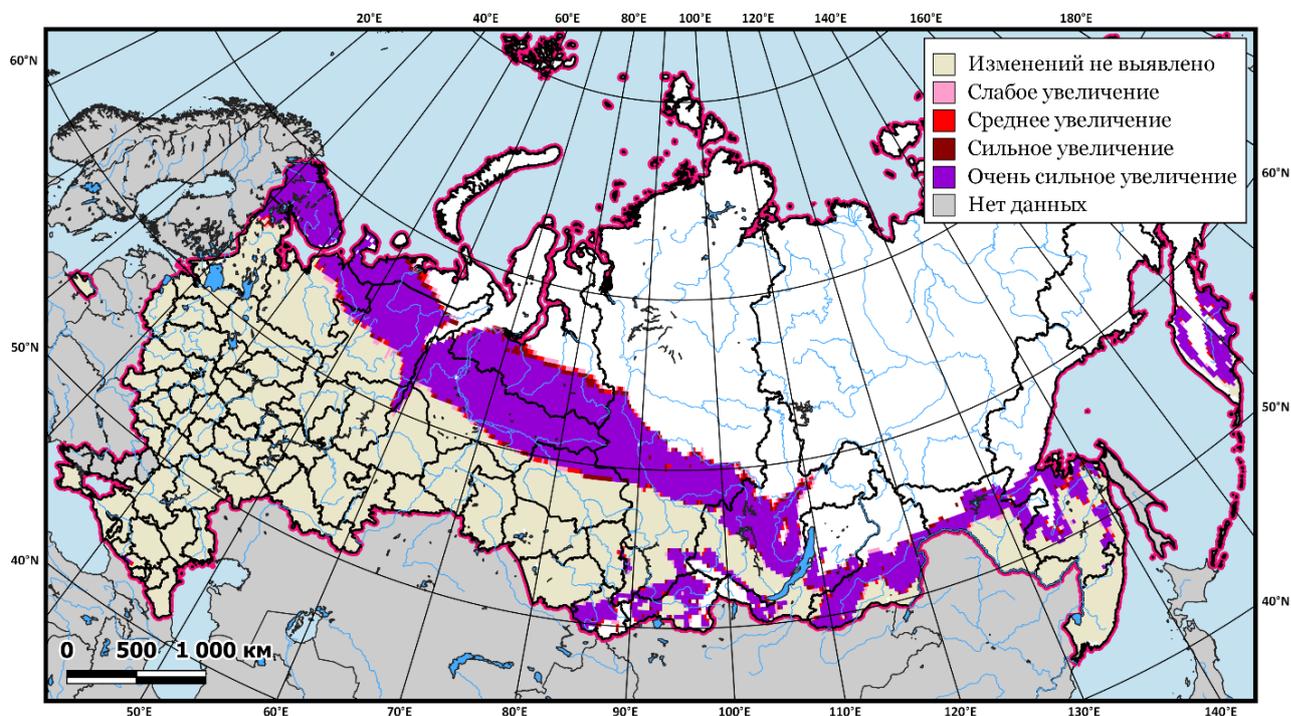


Рисунок 2. Изменение расчетной КОР доминирования теплой части года в календарном году на территории России в условиях климата КЦР^а при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. [Богданович, 2025]

При исследовании климатической области распространения *сильных засух*, частота которых превышает пороговое значение, соответствующее хозяйственной целесообразности культивирования зерновых, используется классический климатический предиктор – гидротермический коэффициент Селянинова в следующей форме:

$$\text{ГТК}_{\text{май-август}} = \frac{(\text{сумма осадков, мм})}{0.1 \cdot (\text{сумма среднесуточных значений температуры, } ^\circ\text{C})}. \quad (6)$$

Считается, что вегетационный период данного года характеризуется сильной засухой, если значение гидротермического коэффициента оказывается менее 0.6 [Павлова и др., 2020]. Вероятность этого события обозначается как p . Согласно установленным «Правилам отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции территориям» [Правила отнесения территорий..., 2015], климат региона считается неблагоприятным для возделывания зерновых культур, если p превышает $p_0 = 0.5$.

На Рисунке 3 представлена КОР сильной засухи, частота которой в 1990–1999 гг. превышала 0.5, на Европейской части России. На Рисунках 4 и 5 представлены ее изменения в условиях климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. соответственно [Богданович и др., 2021a]. Климат – КЦР^а. Климатический сценарий – RCP8.5.

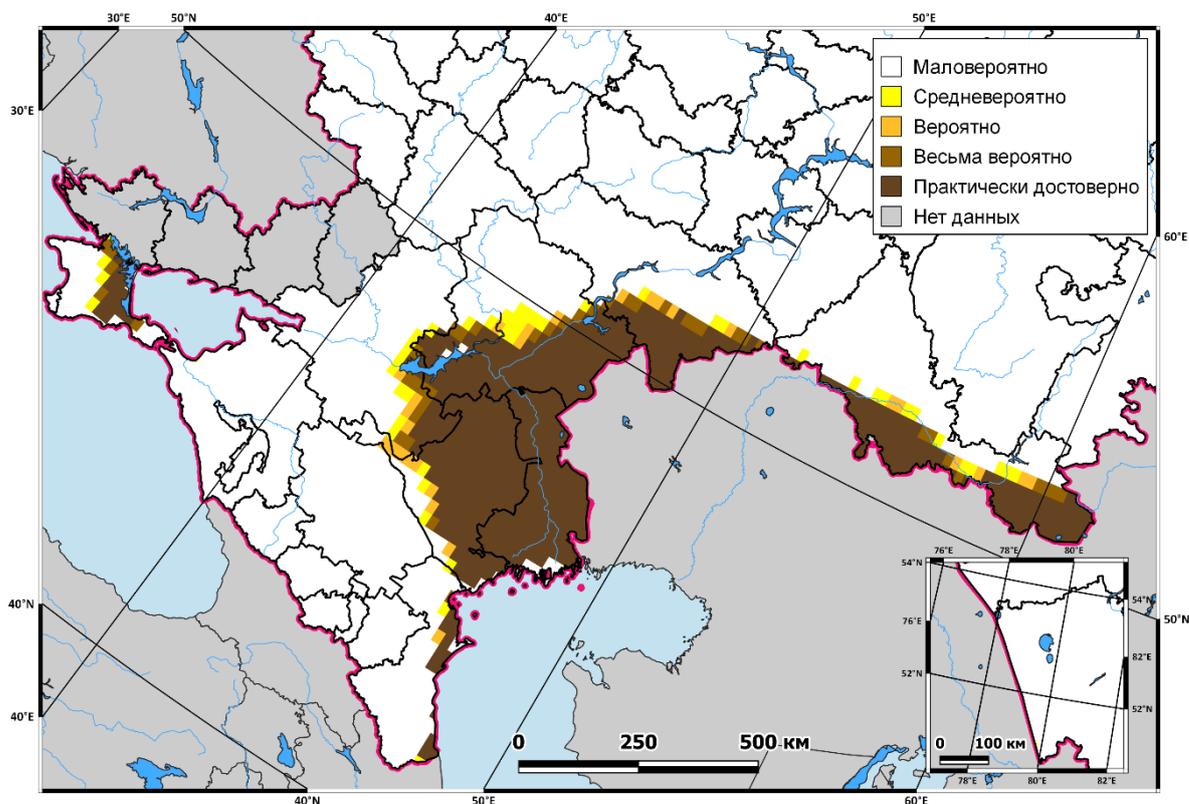


Рисунок 3. Расчетная КОР сильной засухи, частота которой превосходила порог целесообразности для культивирования зерновых, на территории России в условиях климата КЦР^а для 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2021a]

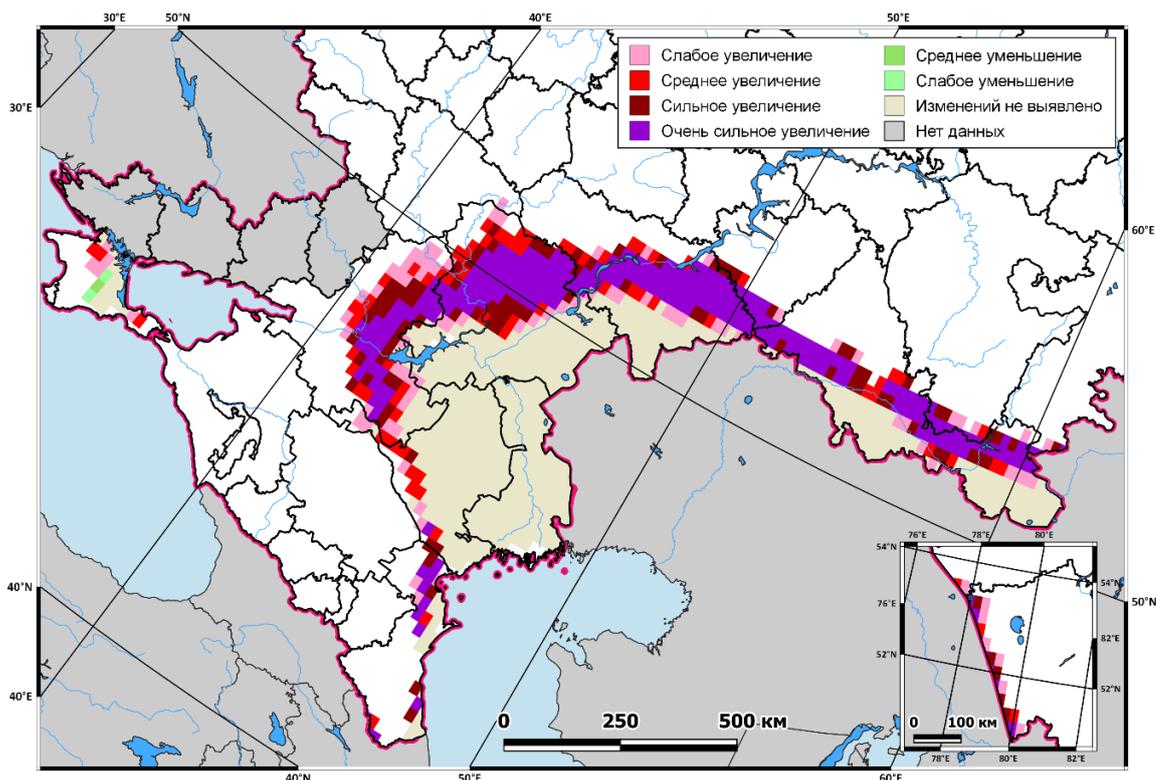


Рисунок 4. Изменение расчетной КОР сильной засухи, частота которой превосходит порог целесообразности для культивирования зерновых, на территории России в условиях климата КЦР^a при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

[Богданович и др., 2021a]

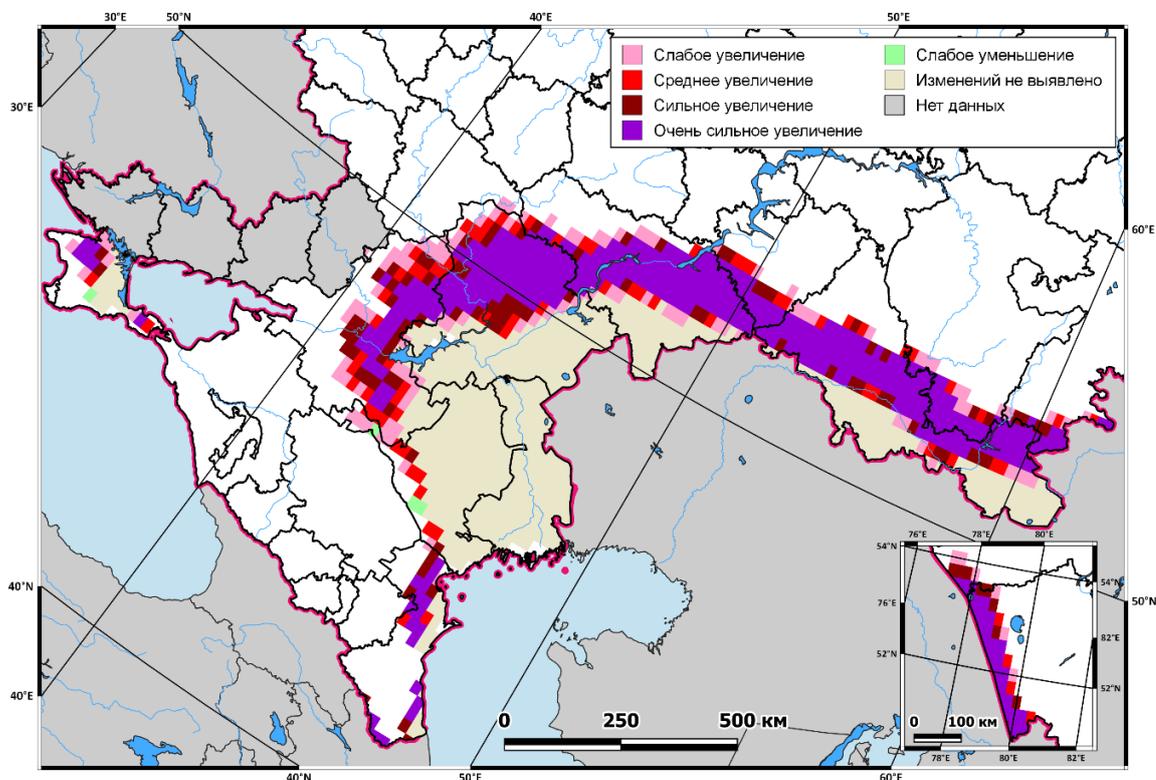


Рисунок 5. Изменение расчетной КОР сильной засухи, частота которой превосходит порог целесообразности для культивирования зерновых, на территории России в условиях климата КЦР^a при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

[Богданович и др., 2021a]

Согласно оценкам (см. Рисунки 4 и 5), в 2030–2039 гг. ожидается ухудшение ситуации по сильной засухе как в ранее явно подверженных этому риску локациях, так и в тех, где ситуация была более благоприятна. Оценки для периода 2050–2059 гг. указывают на схожие изменения, однако степени их выраженности становятся ещё значительнее.

В работе исследована КОР – климатический ареал – *средиземноморской плодовой мухи* *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824). Это насекомое – опасный вредитель продукции плодовых культур, поражающий до 100% урожая и причиняющий значительный экономический ущерб в мировом масштабе [Магомедов, 2011; Szyntyszewska, 2013]. Для региональных оценок на территории России использовались сценарии RCP4.5 и RCP8.5, а также следующая совокупность климатических предикторов и диапазоны их допустимых значений:

- годовая сумма активных среднесуточных температур (САТ), должна превосходить 2700°C (это значение соответствует крайним северным точкам фактического ареала); порог 10°C соответствует температуре, при которой останавливается развитие особей *C. capitata* [Магомедов, Атанов, 2012];

- все среднемесячные значения температуры за период декабрь-февраль должны быть положительными, что дает возможность зимовки куколкам *C. capitata* [Магомедов, Атанов, 2012; Богданович и др., 2023а];

- сумма осадков в каждый месяц периода декабрь-февраль должна превосходить 13 мм [Магомедов, Атанов, 2012].

На Рисунке 6 представлена расчетная оценка КОР – климатического ареала – *C. capitata* в части Северного полушария в условиях исходного, базового климата 1990–1999 гг. по данным ИВМ^а.

На Рисунках 7–9 по данным КЦР^а представлена расчетная оценка климатического ареала *C. capitata* на Европейской части России в условиях исходного, базового климата 1990–1999 гг. и его изменений в условиях будущих климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. соответственно [Богданович и др., 2023а]. Климатический сценарий – RCP8.5.

Результаты расчета (см. Рисунки 8 и 9) свидетельствуют о потенциальном расширении климатически подходящей для этого вида части географического пространства на юге России. Так, ожидается, что расширение охватит практически весь Краснодарский край, территорию Крыма и Республики Адыгея. Это представляет серьезную проблему, так как в этих регионах страны выращивается значительное количество плодовых культур. Целесообразна заблаговременная подготовка средств и программ борьбы с средиземноморской плодовой мухой, что позволит избежать существенных потерь в производстве плодово-ягодной продукции в будущем.

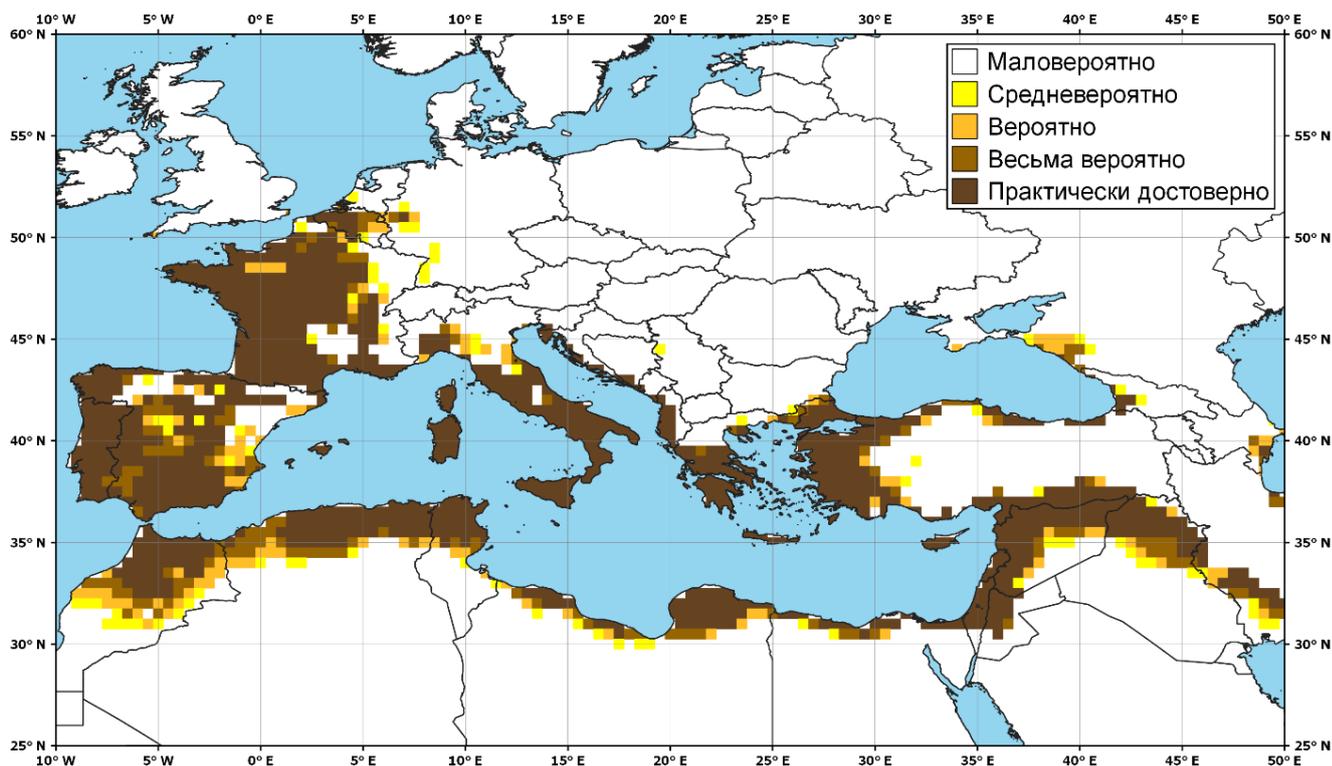


Рисунок 6. Расчетный климатический ареал средиземноморской плодовой мухи в изображенной части Северного полушария в условиях климата ИВМ^а для 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2023а]

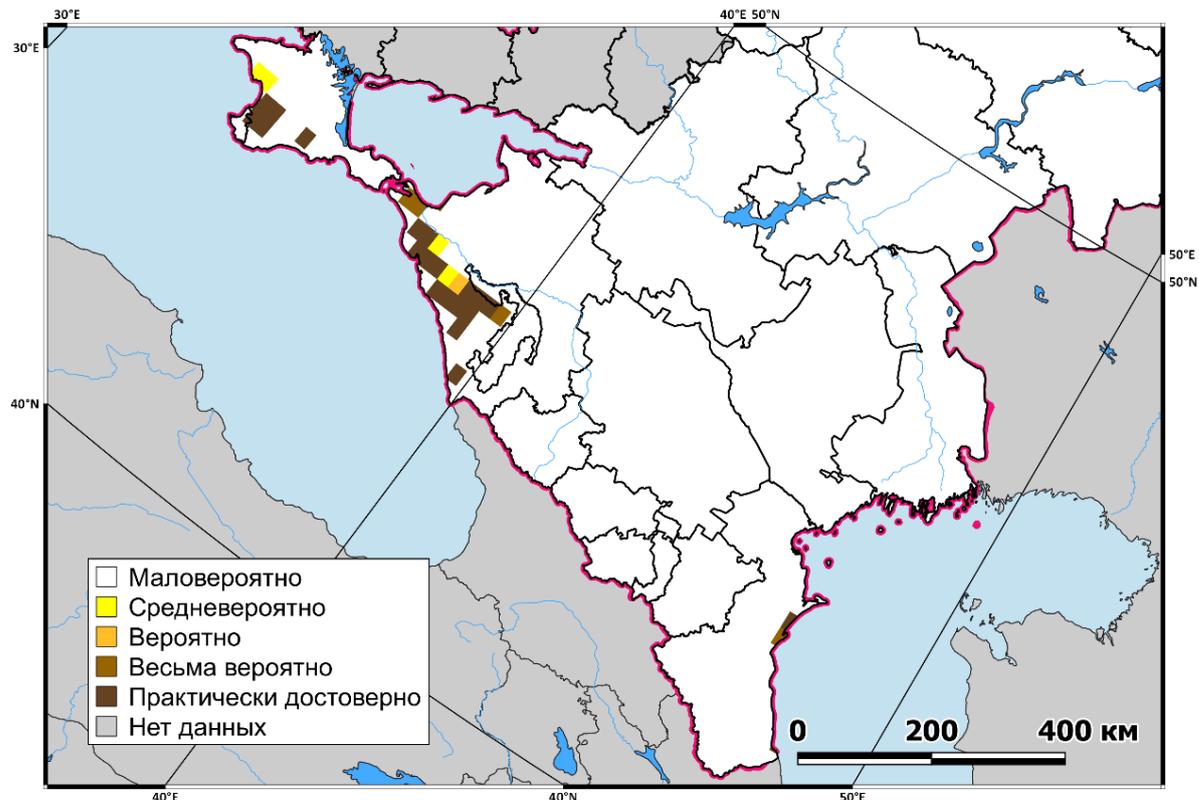


Рисунок 7. Расчетный климатический ареал средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР^а для 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2023а]

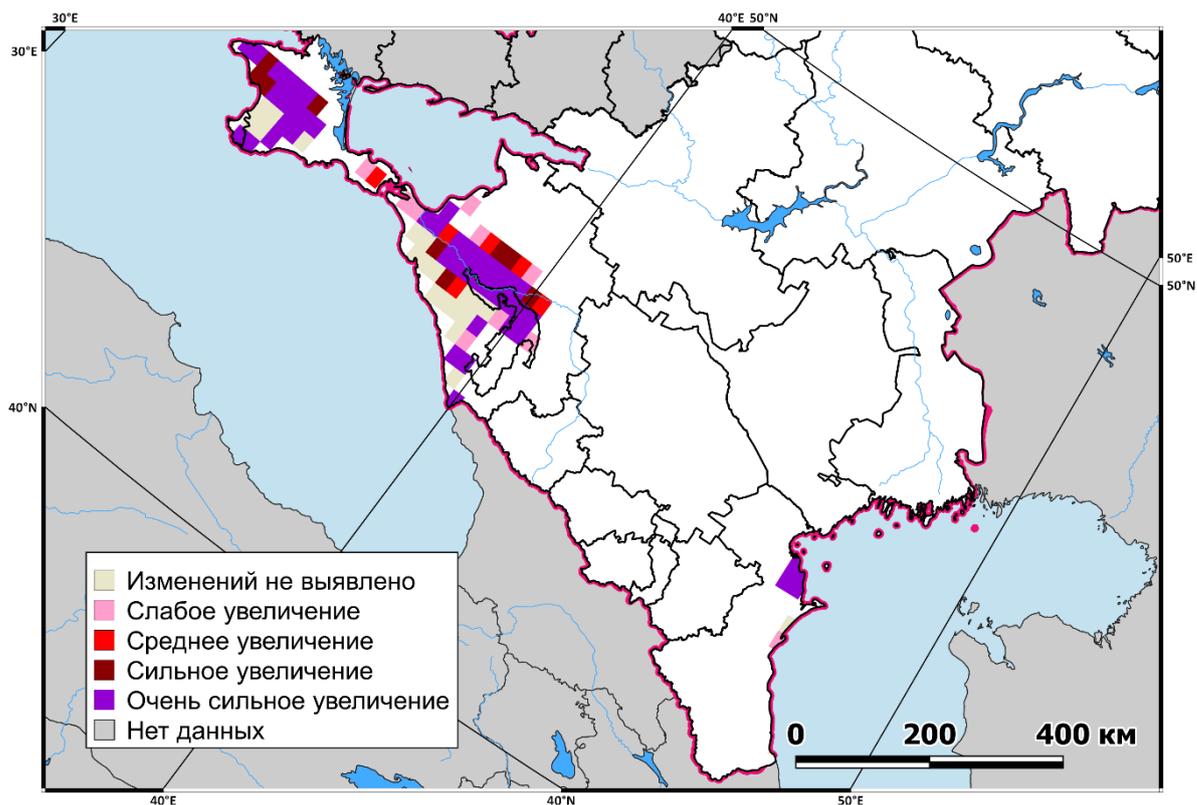


Рисунок 8. Изменение климатического ареала средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР^а при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2023a]

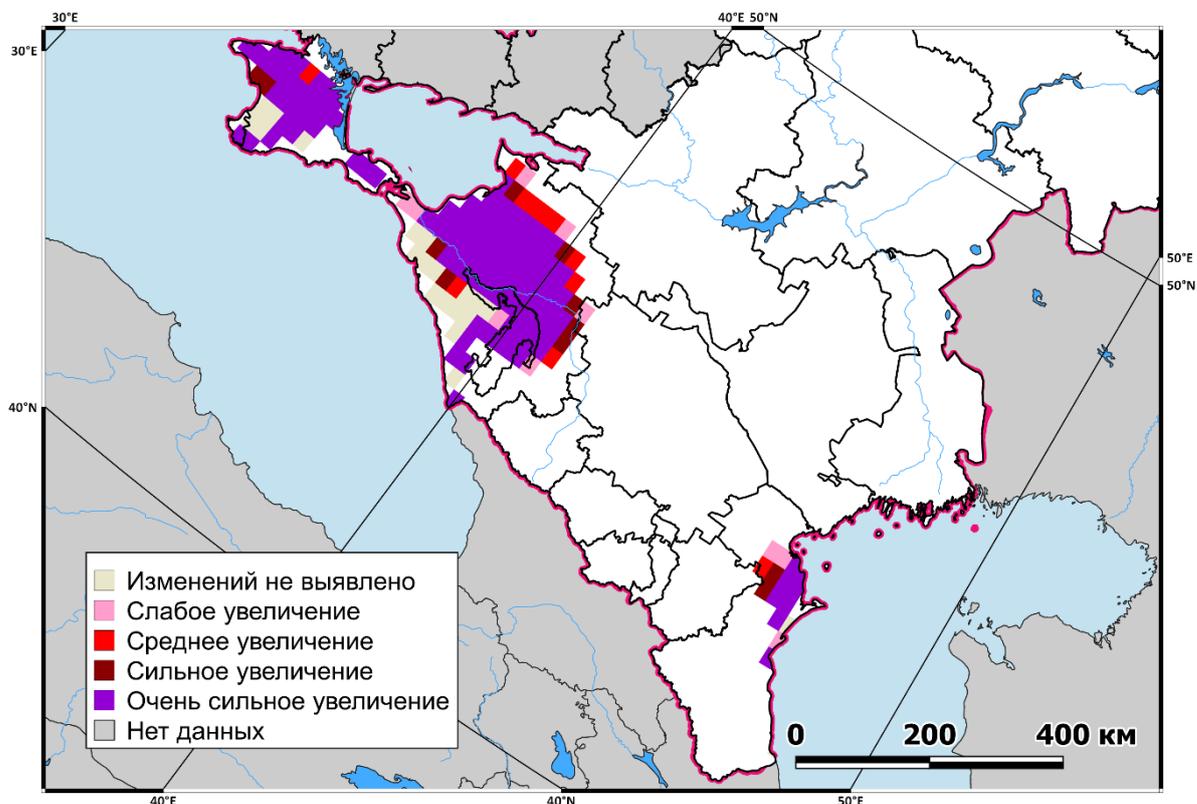


Рисунок 9. Изменение климатического ареала средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР^а при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2023a]

При исследовании климатического ареала *хлопковой совки* *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) – опасного насекомого-вредителя сельскохозяйственных растений – использовался следующий климатический предиктор и его допустимый диапазон:

– сумма эффективных температур (СЭТ) превосходит 550°C при пороговом значении 11°C [Ларченко, 1968; Ли, 1998; Фефелова, 2007; Церковная, Черная, 2017; Чумаков, Кузнецова, 2008].

На Рисунках 10–12 представлены результаты расчета климатического ареала хлопковой совки на территории России в условиях исходного, базового климата 1990–1999 гг. и его изменений в условиях будущих климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. (климатический сценарий RCP4.5).

Приведенные результаты расчетов показали, что даже в условиях умеренного сценария RCP4.5 КОР хлопковой совки на территории России продвинется существенно на север, особенно в Европейской части России, а также в Западной и Средней Сибири. Распространение вида может сдерживаться отсутствием сельхозрастений (его современных хозяев), но широкая полифагия хлопковой совки может преодолеть этот фактор [Riaz et al., 2021; *Helicoverpa armigera*..., 2021; Yadav et al., 2022; Богданович и др., 2025].

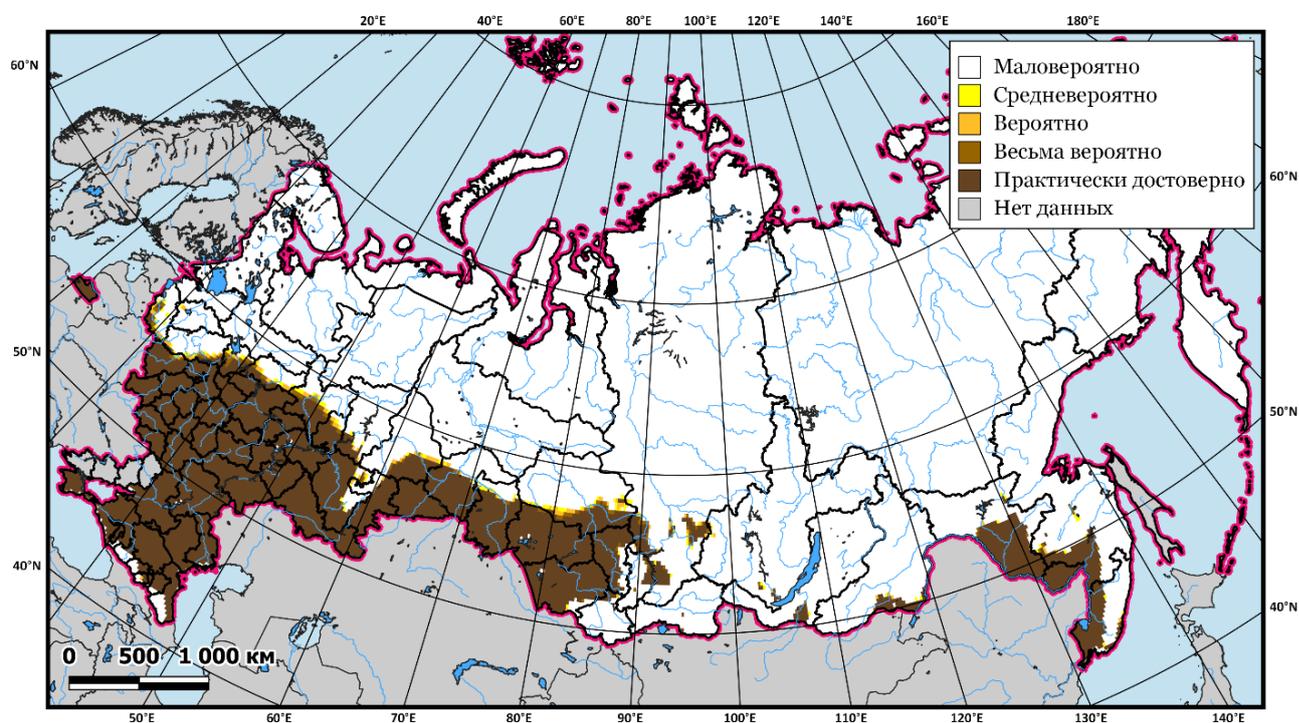


Рисунок 10. Расчетный климатический ареал хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР^a для 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2025]

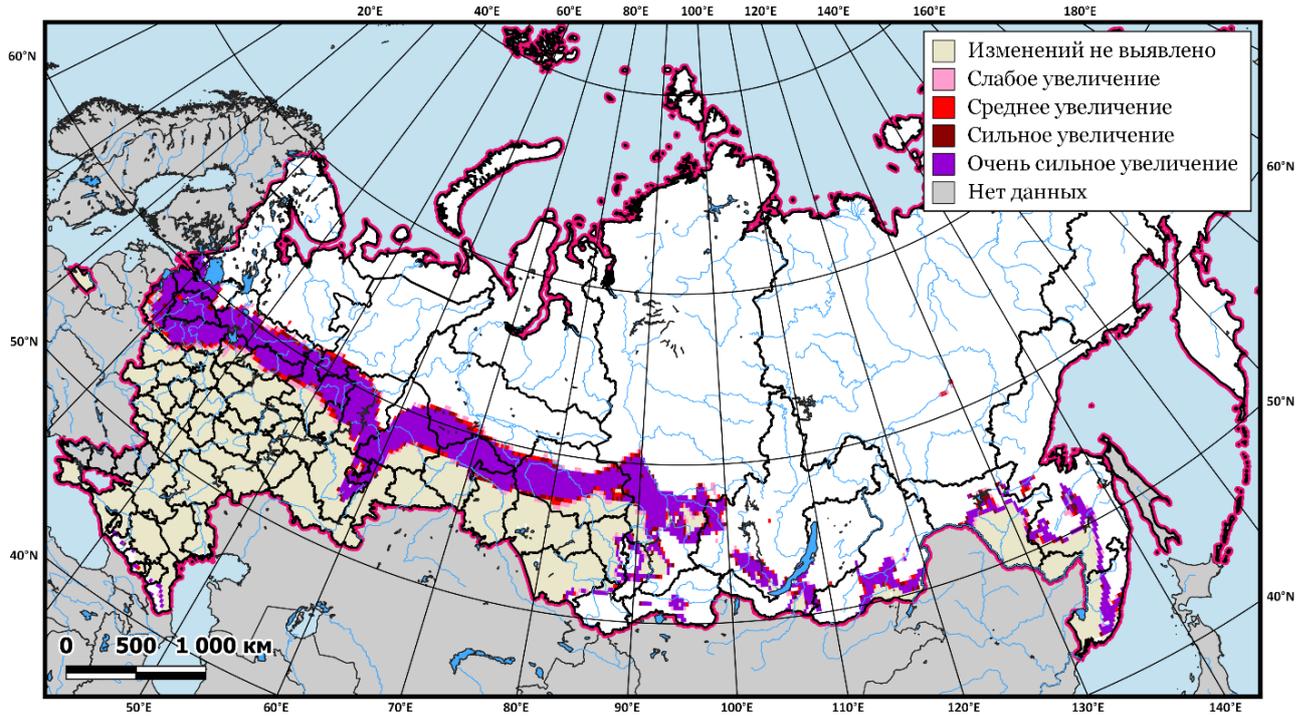


Рисунок 11. Изменение расчетного климатического ареала хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР^а при сценарии RCP4.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2025]

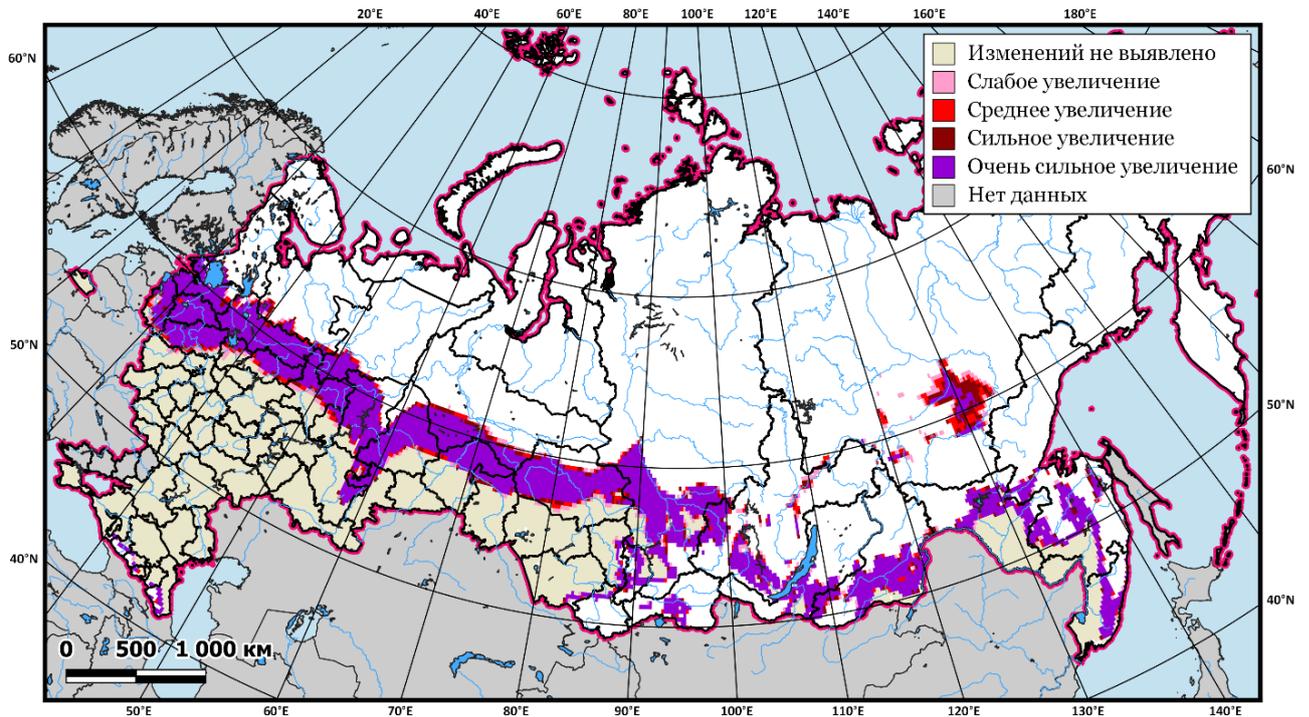


Рисунок 12. Изменение расчетного климатического ареала хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР^а при сценарии RCP4.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2025]

В формировании климатического ареала *непарного шелкопряда* *Lymantria dispar* (Linnaeus, 1758) – опасного насекомого-вредителя древесных растений – значительную роль

играют абиотические факторы. Так, засушливая погода может прямо и/или косвенно увеличивать численность популяции шелкопряда за счет повышения его плодовитости и снижения эффективности естественных врагов [Лямцев, 2018].

При моделировании климатического ареала этого вида использовались следующие климатические предикторы и допустимые диапазоны их значений:

- сумма эффективных среднесуточных температур (СЭТ) за календарный год должна превышать 500°C при пороговом значении $+10.4^{\circ}\text{C}$ [Vanhanen et al., 2007];
- средняя месячная температура в самый теплый месяц года не должна превышать $+27^{\circ}\text{C}$ [Клобуков и др., 2018].

На Рисунках 13–15 представлена расчетная оценка климатического ареала непарного шелкопряда на территории России в условиях исходного, базового климата 1990–1999 гг. и его изменений в условиях будущих климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. Климатический сценарий RCP8.5 [Богданович и др., 2023б].

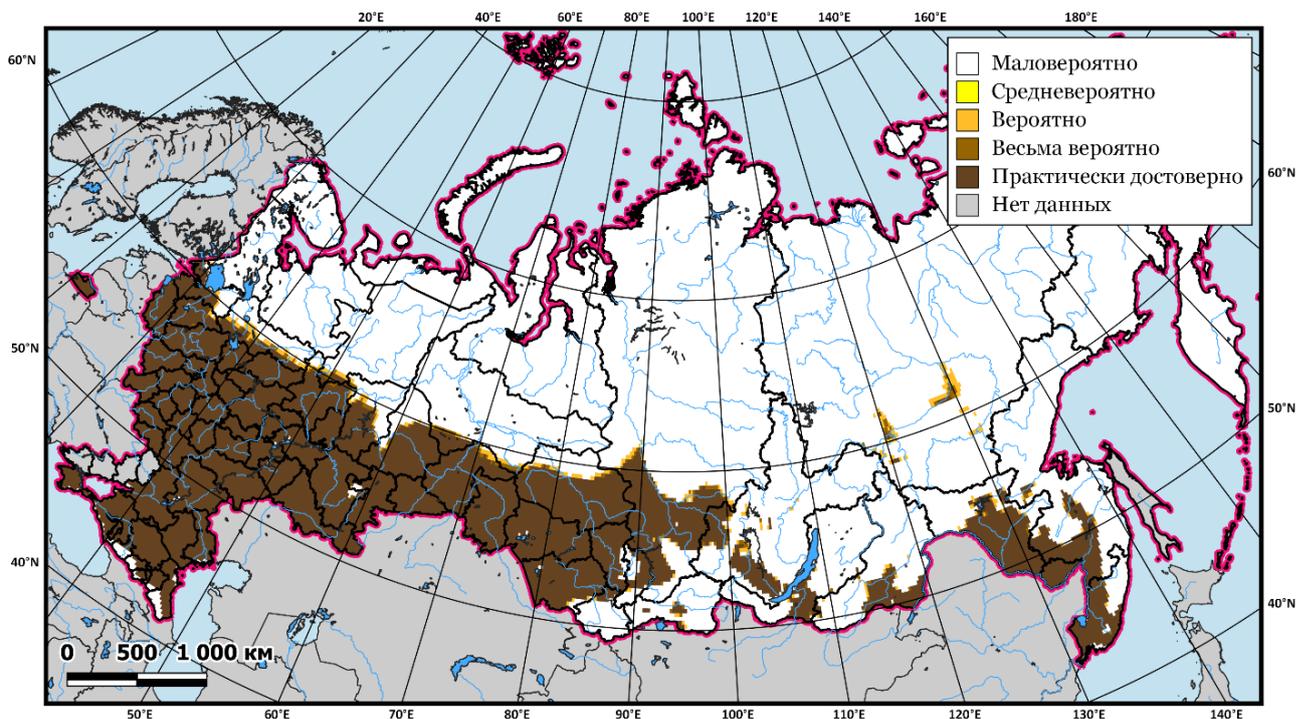


Рисунок 13. Расчетный климатический ареал непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^а для 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2023б]

Согласно полученным результатам, при дальнейшем изменении климата в Европейской части России (ЕЧР) ожидается расширение климатической области распространения непарного шелкопряда в северном направлении, а также в направлении больших высот на Северном Кавказе. В Азиатской части России расширение ожидается как в северном, так и в восточном направлениях. На юге ЕЧР ареал непарного шелкопряда сократится.

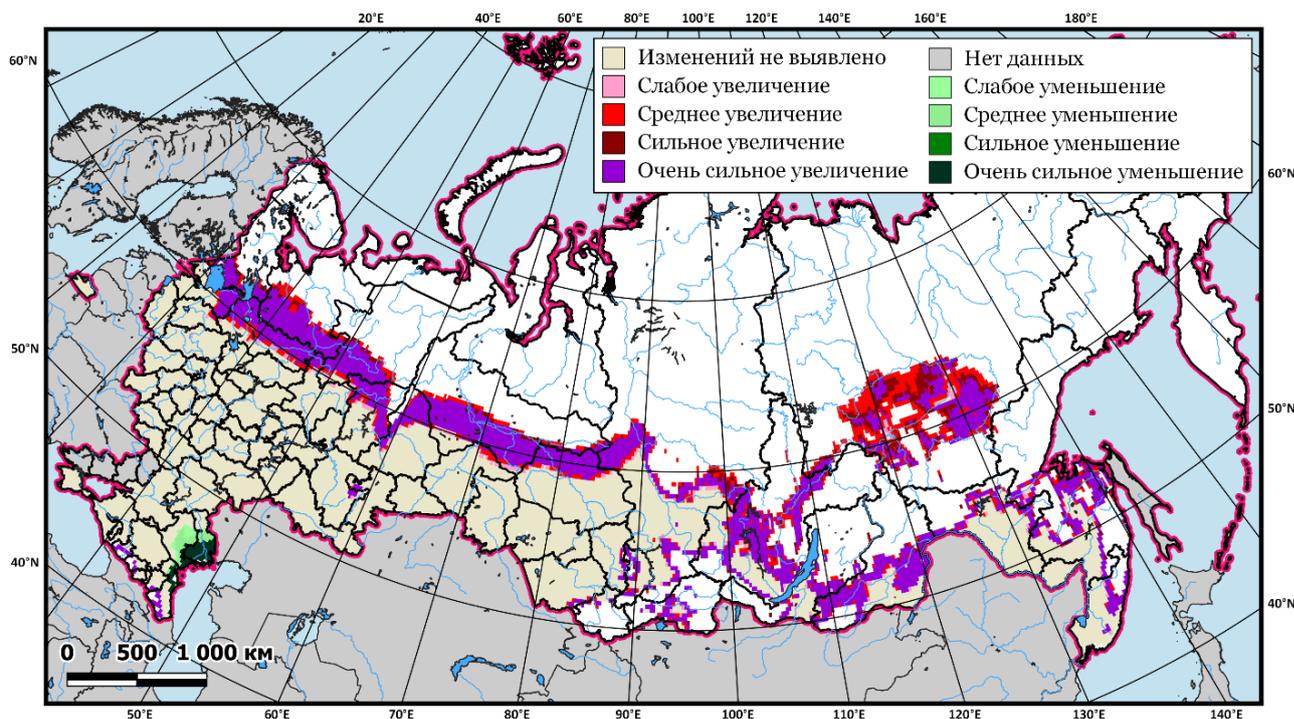


Рисунок 14. Изменение расчетного климатического ареала непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^а при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2023б]

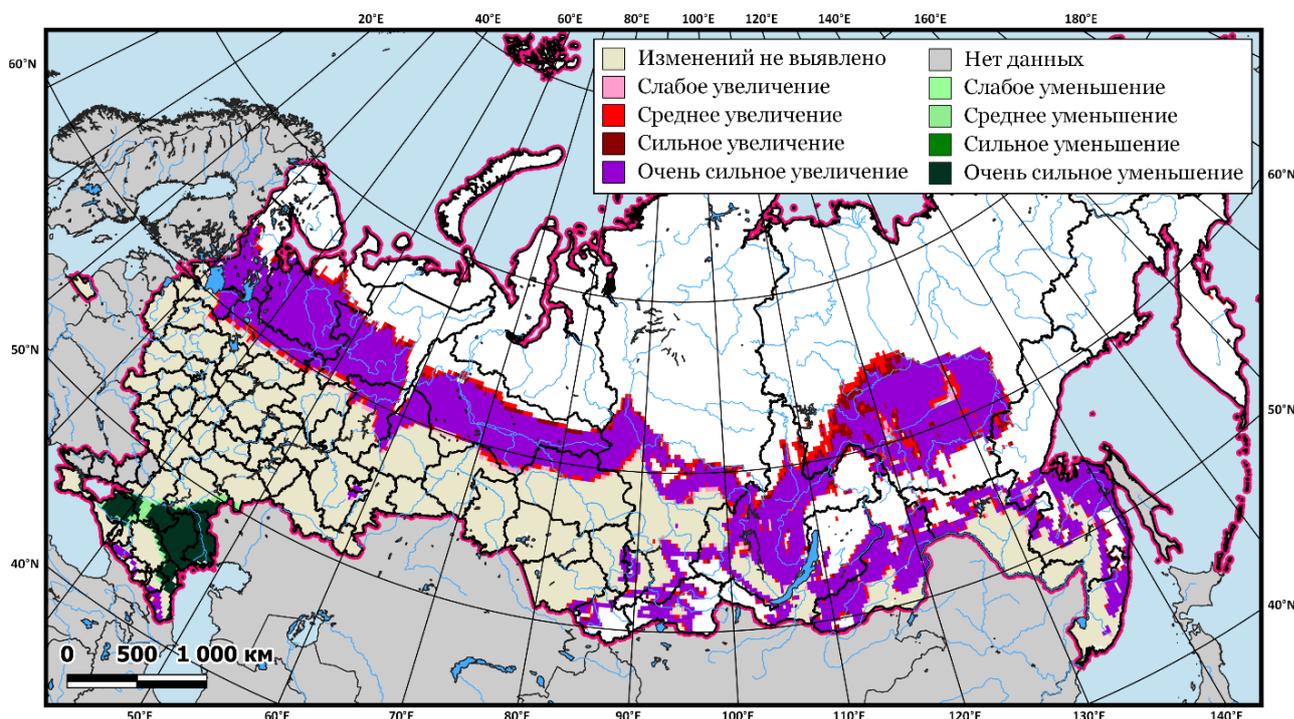


Рисунок 15. Изменение расчетного климатического ареала непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^а при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. [Богданович и др., 2023б]

В **Заключении** представлены в обобщенном виде основные результаты диссертации.

1. Гидрометеорологические факторы определяют климатическую область распространения (КОР) природного явления, т.е. ту часть географического пространства, где в

условиях, соответствующих климату исследуемого промежутка времени, данное явление систематически происходит при способствующем сочетании остальных факторов среды. При изменении климата такая область распространения будет, вообще говоря, изменяться.

При моделировании КОР природного явления возможно и целесообразно описывать с помощью специфической совокупности гидрометеорологических переменных – собственно гидрометеорологических величин или/и индексов, вычисляемых на их основе. Для каждой из них устанавливается допустимый диапазон, и, если для всех них значения заданного временного разрешения находятся в пределах своих диапазонов, то гидрометеорологическая ситуация является способствующей рассматриваемому явлению.

2. Суждение о принадлежности данной точки географического пространства КОР природного явления, соответствующей климату заданного отрезка времени (в данной работе – десятилетие), целесообразно делать на основе всей совокупности оценок для каждого года рассматриваемого отрезка времени. Разработанные на основе этого подхода методика и расчетные алгоритмы ее реализации позволяют находить оценку вероятности того (уверенности в том), что данная точка географического пространства принадлежит КОР.

3. На основе разработанной в диссертации методики создана система RANGES, которая позволяет вычислять пространственное распределение вероятностей принадлежности точек географического пространства КОР природного явления, исходя из специфической для явления совокупности гидрометеорологических переменных и данных о климате – фактическом или же модельном – определенного промежутка времени. Программная реализация алгоритмов системы RANGES выполнена с использованием общедоступной версии языка программирования FORTRAN.

4. Продемонстрирована эффективность разработанной системы математико-модельных блоков, соответствующих алгоритмов и их программной реализации в форме системы RANGES при расчетах КОР некоторых природных явлений на территории России. А именно, проведены расчеты КОР для явления доминирования теплой части года в календарном году и явления сильной засухи, частота которой превышает порог экономической целесообразности культивирования зерновых, а также расчеты климатических ареалов (КОР) некоторых опасных насекомых-вредителей растений – хлопковой совки, средиземноморской плодовой мухи и непарного шелкопряда.

5. Эти расчеты проводились для базового периода 1990–1999 гг. и двух периодов XXI века – 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. – в условиях климатических сценариев RCP4.5 и RCP8.5. Расчеты показали, что в условиях этих сценариев КОР рассмотренных явлений будет в основном расширяться.

Статьи по теме диссертации в научных журналах из перечня ВАК:

1. **Богданович А.Ю.** Система RANGES: структура, порядок расчета и пример применения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2025. – №.1(395). – С.37-50. (<https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-37-50>)
2. **Богданович А.Ю.,** Фролов А.Н., Семенов С.М. Современный климатический ареал хлопковой совки и его трансформация в XXI веке вследствие изменения климата // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2025. – Т.11. – №.1. – С.8-54. (<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2025-1-8-54>)
3. Dobrolyubov N.Yu., Semenov S.M., Volodin E.M., **Bogdanovich A.Yu.** Algebraic algorithm for statistical estimation of the binomial distribution parameter and an example of its application in a global geoinformation task of applied climatology // Russian Meteorology and Hydrology. – 2023. – Vol.48. – №.10. – P.837-844. (<https://doi.org/10.3103/S1068373923100023>)
4. **Bogdanovich A.Yu.,** Andreeva A.P., Dobrolyubov N.Yu, Krylenko S.V., Lipka O.N., Semenov S.M. Possible expansion of the climatic range of the mediterranean fruit fly being a dangerous fruit pest // Russian Meteorology and Hydrology. – 2023. – Vol.48. – №.1. – P.72-78. (<https://doi.org/10.3103/S1068373923010090>)
5. **Богданович А.Ю.,** Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Баранчиков Ю.Н., Липка О.Н., Семенов С.М. Климатический ареал непарного шелкопряда на территории России, соответствующий климатам конца XX века и XXI века // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2023. – Т.9. – №.1. – С.65-88. (<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-65-88>)
6. **Богданович А.Ю.,** Павлова В.Н., Ранькова Э.Я., Семенов С.М. Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т.7. – №.1. – С.20-35. (<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-20-35>)
7. Ясюкевич В.В., **Богданович А.Ю.** Климатические предикторы для модельного описания климатических ареалов некоторых биологических видов и их изменений в условиях будущего климата // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т.7. – №.1. – С.117-137. (<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-117-137>)
8. Pavlova V.N., **Bogdanovich A.Yu.,** Semenov S.M. Assessment of climate favorability for the grain cultivation based on the frequency of severe droughts // Russian Meteorology and Hydrology. – 2020. – Vol.45. – №.12. – P.864-869. (<https://doi.org/10.3103/S1068373920120079>)

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:

9. **Богданович А.Ю.,** Семенов С.М., Добролюбов Н.Ю. Система RANGES // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024668052. Дата государственной регистрации 01 августа 2024 года.

Другие публикации по теме диссертации:

10. **Богданович А.Ю.** Расчетный климатический ареал непарного шелкопряда на территории России и его изменения в XXI веке // *Фундаментальная география в Сибири: этапы развития, результаты и перспективы / Материалы Международной научной конференции (Иркутск, 27 ноября – 30 ноября 2024 г.). – Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН Иркутск: 2024. – С.276-279.*

11. **Богданович А.Ю.** Система RANGES для расчета климатической области распространения климатообусловленного явления // *Системы контроля окружающей среды – 2024 / Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – Севастополь, 05-08 ноября 2024 г. – 2024. – Севастополь: ИП Куликов А.С. – С.66-66.*

12. **Богданович А.Ю.** Расчетный климатический ареал средиземноморской плодовой мухи на территории России и его изменения в XXI веке // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XIV / Науч. ред. И.А. Керимов, В.А. Широкова. – Т.14. – ИИЕТ РАН Москва: 2024. – С.376-381.*

13. **Богданович А.Ю.** Изменение температуры и осадков как климатообусловленная причина трансформации ареалов видов // *Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества / Материалы III всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 15-17 ноября 2023 г. – М.: ФГБУ «ИГКЭ». – 2023. – С.463-466.*

14. **Богданович А.Ю.** Система для оценки и визуализации изменений климатических ареалов видов // *Системы контроля окружающей среды – 2023 / Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – Севастополь, 07-10 ноября 2023 г. – 2023. – Севастополь: ИП Куликов А.С. – С.48-48.*

15. **Богданович А.Ю., Семенов С.М.** Оценка климатических ареалов видов с использованием системы RANGES // *Сборник тезисов докладов Международной конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат–2023». 9-13 октября 2023 года. – М.: Физматкнига. – 2023. – С.220-220.*

16. **Крыленко С.В., Добролюбов Н.Ю., Богданович А.Ю., Липка О.Н.** Вероятностная оценка изменения климатического ареала *Ixodes ricinus* Linnaeus, 1758 – переносчика опасных заболеваний человека // *Сборник тезисов докладов Международной конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат–2023». 9-13 октября 2023 года. – М.: Физматкнига. – 2023. – С.152-152.*

17. **Богданович А.Ю., Семенов С.М.** Система RANGES для оценки климатических ареалов видов // *Тезисы международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES–2023 / под ред. Е.П. Гордова. – Томск: ИМКЭС СО РАН. – 2023. – С.80-82.*