Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»
(ФГБУ «ИГКЭ»)

На правах рукописи

Богданович Антон Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор, чл.-корр. РАН
Семенов Сергей Михайлович

Москва – 2025

Оглавление

Введение 4

Глава 1. Базовые понятия, постановка задачи и методология 12

1.1. Прикладные гидрометеорологические индексы как инструмент описания климатической области распространения явления 13

1.2. Детерминистические оценки климатической области распространения явления 21

1.3. Вероятностные оценки климатической области распространения явления . 28

1.3.1. Критерий уверенности 31

1.3.2. Критерий вероятности 33

1.4. Заключение по Главе 1 37

Глава 2. Система RANGES – программный комплекс для расчетной оценки климатической области распространения природного явления 39

2.1. Входная информация 39

2.1.1. Информация о климате 39

2.1.2. Параметры для расчета климатической области распространения явления 48

2.1.2.1. Технические параметры расчета 48

2.1.2.2. Параметры, отражающие климатические условия, соответствующие исследуемому явлению 50

2.1.3. Пользовательский интерфейс 60

2.2. Порядок расчета и использование подпрограмм 62

2.3. Заключение по Главе 2 70

Глава 3. Расчет климатической области распространения некоторых природных явлений 71

3.1. Климатический ареал средиземноморской плодовой мухи 72

3.1.1. Общая характеристика вида 72

3.1.2. Требования к климату 74

3.1.3. Расчетный климатический ареал 75

3.2. Климатический ареал хлопковой совки 83
3.2.1. Общая характеристика вида 83
3.2.2. Требования к климату 84
3.2.3. Расчетный климатический ареал 85
3.3. Климатический ареал непарного шелкопряда 91
3.3.1. Общая характеристика вида 91
3.3.2. Требования к климату 93
3.3.3. Расчетный климатический ареал 95
3.4. Сильные засухи и пригодность территории для культивирования зерновых 100
3.4.1. Общая характеристика явления сильной засухи 100
3.4.2. Частота сильных засух и пригодность территории для культивирования зерновых 102
3.4.3. Результаты расчета 103
3.5. Доминирование теплой части года в календарном году 107
3.5.1. Общая характеристика явления 107
3.5.2. Расчет климатической области распространения доминирования теплой части года в календарном году 108
3.6. Заключение по Главе 3 114
Заключение 117
Список используемых источников и литературы 119
Приложение 138

Введение

Актуальность работы

Изменения климата Земли приобрели в XX веке глобальный масштаб и сейчас наблюдаются практически повсеместно. Это отмечено в научных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в том числе в ее основных, оценочных докладах [IPCC, 1990, 1995, 2001, 2007, 2014, 2021, 2022a, 2022b]. Согласно оценкам Рабочей группы I (МГЭИК) «Физическая научная основа», опубликованных в ее вкладе в Шестой оценочный доклад, глобальное потепление в приповерхностном слое воздуха в 2011–2020 гг. составило 1.09 (0.95–1.20)°C по сравнению с базовым периодом времени 1850–1900 гг. При этом над сушей увеличение составило 1.59 (1.34–1.83)°C, а над океаном 0.88 (0.68–1.01)°C [IPCC, 2021].

Потепление климата XX – XXI вв. – глобальная вековая климатическая тенденция. Она неравномерно проявляется в различных странах и регионах, демонстрирует временные замедления роста и даже спады температуры. Территория России теплеет быстрее, чем суша глобально. Так, за период 1976–2023 гг. потепление на территории России происходило в среднем с темпом 0.5°C/10 лет (см. «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год» [Доклад об особенностях…, 2024]). Особенно сильное потепление наблюдается на севере страны.

Существенные региональные изменения климата, в первую очередь негативные, регулярно рассматриваются во вкладах Рабочей группы II МГЭИК «Воздействия, адаптация и уязвимость» в ее оценочных докладах (например, [IPCC, 2022a]). Они также описаны в специальном докладе МГЭИК «Управление рисками экстремальных явлений и бедствий для продвижения адаптации к изменению климата» [IPCC, 2012].

Согласно оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата 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. В России первый этап плана адаптации был утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р. [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.

Глава 1. Базовые понятия, постановка задачи и методология

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

Практически все природные явления многофакторны. Для множества природных явлений среди факторов, их определяющих, существенную роль играют гидрометеорологические факторы. Так, например, условием возникновения лесного пожара является продолжительный период жаркой погоды без осадков, хотя непосредственной причиной пожара могут стать молнии или нарушение людьми правил обращения с огнем [Barros et al., 2021; Kharuk et al., 2021; Zacharakis, Tsihrintzis, 2023; Parvar et al., 2024].

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 климатической области распространения, поскольку даже при допускающем явление климате какие-то факторы среды иной природы могут явление блокировать. Так, например, такое явление, как устойчивое существование популяции определенных видов листо- и хвоегрызущих насекомых в некоторых стациях с благоприятным климатом, оказывается блокированным местными неспециализированными видами их естественных врагов [Лямцев, 2003; Керчев, 2014].

Положение в пространстве климатической области распространения явления определяется климатом и меняется при изменении климата. Однако скорость изменений этой области может быть различной. При высокой скорости эти изменения могут без запаздывания следовать за изменениями климата. Так происходит, когда явление непосредственно, физически связано с климатом.

Типичный пример – метеорологическая засуха. Противоположный пример явления – климатический ареал (климатическая область распространения) вида древесных растений. Эти виды естественным образом перемещаются в пространстве лишь в чреде поколений, и занимает это несколько десятилетий и более. Поскольку климат – «статистический ансамбль состояний, проходимых земной климатической системой за периоды времени в несколько десятилетий» [Монин, Шишков, 2000], то в последнем случае следует говорить лишь о климатической области распространения, соответствующей климату определенного периода времени, но не фактически реализованной в этот период времени.

Цели данной главы методологические:

– описать существующие подходы к характеризации климатической области распространения некоторых природных явлений;

– представить детерминистический подход к оценке расположения в пространстве климатической области распространения;

– представить вероятностный подход к оценке расположения в пространстве климатической области распространения.

1.1. Прикладные гидрометеорологические индексы как инструмент описания климатической области распространения явления

Характеризация распространения в пространстве различных явлений, в формировании которых существенную роль играют погодно-климатические факторы, с помощью гидрометеорологических индексов имеет давнюю историю, в том числе в отечественной науке. Укажем здесь лишь несколько подходов, которые стали важными этапами в этом отношении.

Агрометеоролог и климатолог Г.Т. Селянинов предложил [Селянинов, 1958] специальный прикладной гидрометеорологический индекс – гидротермический коэффициент (ГТК) –, характеризующий условия увлажнения. ГТК Селянинова пропорционален с коэффициентом 10 отношению суммы суточных значений осадков в мм за те сутки календарного года, когда среднесуточная температура

воздуха превышала +10ºС, к сумме среднесуточных значений температуры в ºС за такие сутки. Этот индекс широко используется в том числе для идентификации различных зон увлажнения территорий:

- зона избыточного увлажнения (>1.3);
- зона обеспеченного увлажнения (1.0–1.3);
- засушливая зона (0.7–1.0);
- зона сухого земледелия (0.5–0.7);
- зона ирригации (<0.5).

К настоящему времени специализированных индексов засушливости используется значительное множество [Zargar et al., 2011; Danandeh Mehr et al., 2023; Raposo et al., 2023].

Для оценки пожарной опасности в лесных и степных ландшафтах В.Г. Нестеровым был предложен индекс горимости [Кат и др., 1975]. Для заданных суток этот индекс равен сумме произведений значений температуры воздуха (ºС) в полдень на дефицит точки росы, причем суммирование выполняется для текущих и всех предшествующих суток без дождя (т.е. с осадками <2.5 мм). При выполнении практических оценок удобно пользоваться не собственно значениями индекса, а диапазонами его значений – см. Таблицу 1.1. В климатических исследованиях используются такие показатели, как число суток в календарном году с заданным классом горимости [Grishin, Filkov, 2011; Perevedentsev et al., 2022; Glagolev et al., 2024].

Таблица 1.1 – Классы горимости [Шерстюков, 2003]

Класс горимости	Вербальная характеристика горимости	Диапазон значений индекса горимости, $(^oC)^2 \cdot$ сут
I	отсутствует	0–300
II	малая	301–1000
III	средняя	1001–4000
IV	высокая	4001–10000
V	чрезвычайная	>10000

В.Н. Беклемишев, основатель отечественной школы медицинской энтомологии, использовал гидрометеорологические индексы для описания области распространения некоторых видов беспозвоночных – переносчиков опасных заболеваний человека [Беклемишев, 1970]. Им, в частности, были указаны климатические условия распространения комаров рода *Anopheles* – переносчиков малярии человека. Это проблема стала весьма важной в 1920-е годы, когда малярия широко распространилась в нашей стране, в том числе на ее европейской части.

Исследование климатических ареалов – климатических областей распространения – биологических видов приобрело особую значимость в наше время в связи с происходящим глобальным изменением климата. Некоторые области географического пространства, в которых распространение определенных видов ранее ограничивалось климатическими факторами, становятся доступными для заселения и устойчивого существования этих видов. Учащаются биологические инвазии. Фундаментальное обобщение по этим вопросам представлено в публикации [Дгебуадзе и др., 2018].

Отметим, что к настоящему времени обозначилась тенденция к использованию все более сложных математических моделей для оценки пригодности климата для устойчивого существования популяций. Так, например, в работе [Jung et al., 2017] для описания будущего климатического ареала опасного вредителя растений – пятнистой фонарницы *Lycorma delicatula* (см. Рисунок 1.1) использована модель CLIMEX [Сайт модели CLIMEX]. При этом потребовалась информация о значениях 18 параметров, выражавших требования вида к климату среды обитания. Конечно, лишь для немногих видов уже выполнены специальные проекты, в результате которых получена подобная детализированная информация [Byeon et al., 2018; Early et al., 2022; Souza et al., 2023; Hayat et al., 2024]. Накопление такой информации будет происходить по мере развития фундаментальной науки. Однако в настоящее время при проведении прикладных оценок целесообразно опираться на более простые подходы – на традиционные гидрометеорологические индексы. Это к тому же позволяет использовать накопленный опыт их применения.

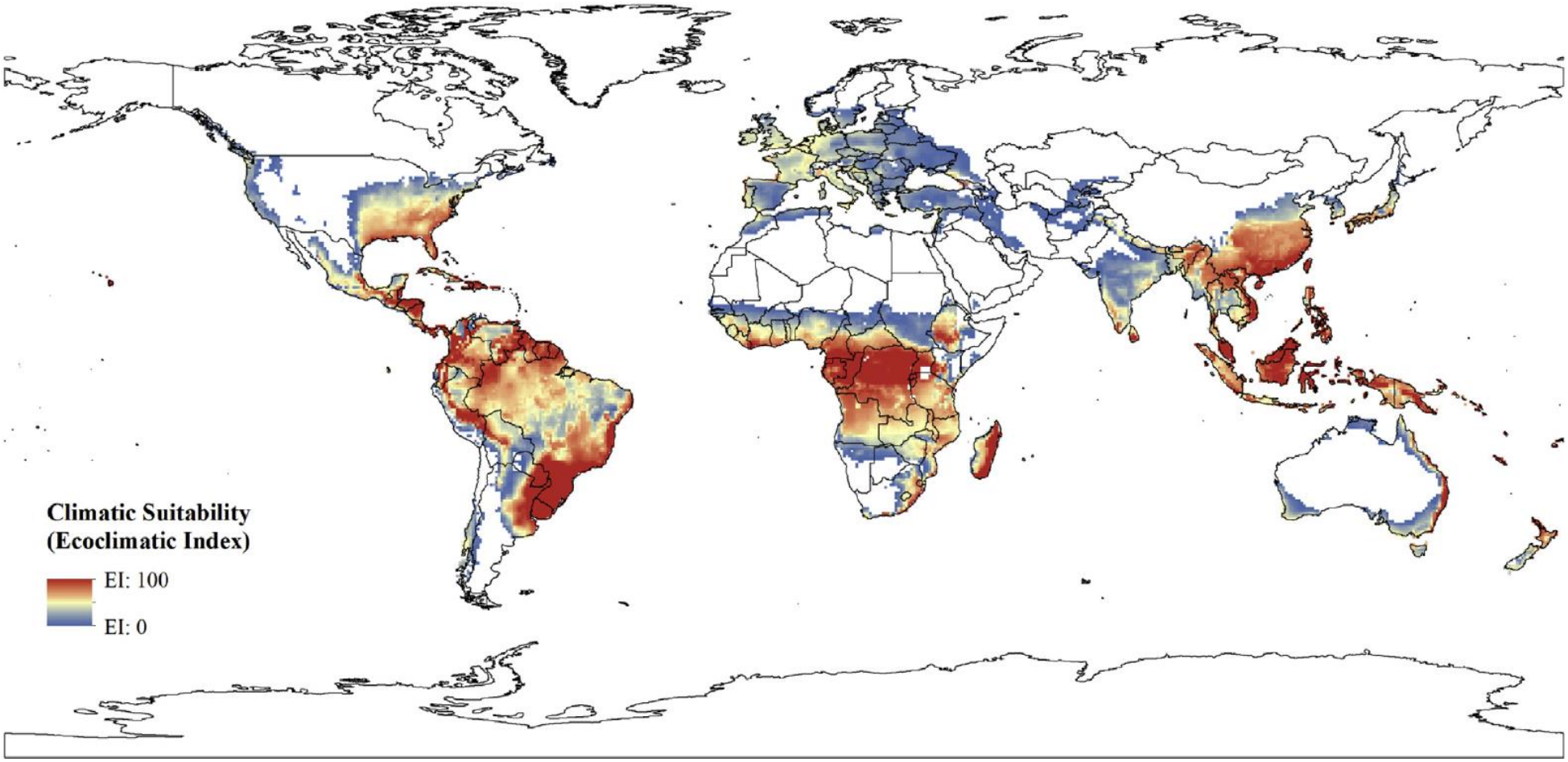


Рисунок 1.1 – Прогнозируемое потенциальное глобальное распространение пятнистой фонарницы (*Lycorma delicatula*) по данным CLIMEX. Значения экоклиматического индекса (EI) от 0 до 100 представлены цветовой шкалой. Более интенсивный красный цвет указывает на более благоприятное место для акклиматизации вида, тогда как более интенсивный синий цвет соответствует неблагоприятному региону [Jung et al., 2017]

Наиболее часто в прикладных исследованиях можно встретить следующие гидрометеорологические индексы (которые часто называются климатическими предикторами [Nkiruka et al., 2021; Bochenek, Ustrnul, 2022; Slater et al., 2023; Shi et al., 2023 и др.]), значения которых вычисляются исходя их данных о температуре воздуха в приповерхностном слое и количестве осадков:

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°С, к сумме этих значений температуры, деленной на 10;

Л) другие гидротермические коэффициенты.

Для вычисления значений гидрометеорологических индексов А) – Г) необходима информация месячного временного разрешения. Данные о среднемесячных значениях температуры воздуха в приповерхностном слое и месячных суммах осадков широко представлены в базах данных результатов метеорологических наблюдений, реанализов и сценарных климатических прогнозов.

Для вычисления значений остальных упомянутых выше гидрометеорологических индексов необходимы данные суточного разрешения. Соответствующие базы данных результатов гидрометеорологических наблюдений существуют (см., например, базу суточных данных о температуре и осадках, созданную и поддерживаемую во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД), [Сайт ВНИИГМИ-МЦД]). Существуют и архивы результатов расчетов суточного разрешения по времени, полученные с помощью климатических моделей, реанализа (см., например, [Сайт ESGF], [Сайт CORDEX], [Сайт NCEI], [Сайт Copernicus]). Однако доступность и надежность такой информации не всегда приемлемы.

В связи с этим возможно генерировать данные суточного разрешения с помощью интерполяции данных месячного разрешения. Для этого применяются, в том числе, алгоритмы, использующие гармонические функции [Семенов и др., 2006; Богданович и др., 2021а]. А именно, рассматривается линейное пространство функций на множестве суток календарного года $\{1, 2, \ldots, J\}$, принимающих действительные значения. В качестве метрики в этом пространстве функций на множестве $\{1, 2, \ldots, J\}$ рассматривается обычная евклидова метрика (т.е. скалярное произведение двух функций есть сумма произведений их J соответствующих значений).

Последовательности из 12 чисел – данные месячного временного разрешения для 12-ти месяцев календарного года – ставится в соответствие ступенчатая функция f на множестве суток календарного года $\{1, 2, \ldots, J\}$. В каждые сутки какого-либо месяца она принимает значение, которое предписывалось ему в исходной последовательности из 12 чисел. Затем полученная функция на $\{1, 2, \ldots, J\}$ разлагается по ортонормированному базису в линейном пространстве функций и для интерполяции используется функция F, которая задается суммой нескольких первых членов этого разложения.

В качестве ортонормированного базиса рассматривается следующая система тригонометрических ортогональных функций.

Для високосного года, т.е. при $J = 366$, эта система ортогональных функций на множестве $\{1, 2, \ldots, J\}$ следующая:

$$\varphi_0(j) = \sqrt{\frac{1}{J}}\,; \tag{1.1}$$

$$\varphi_n(j) = \sqrt{\frac{2}{J}}\cos\left(\frac{2\pi nj}{J}\right), \qquad n = 1, 2, \ldots, \left(\frac{J}{2} - 1\right); \tag{1.2}$$

$$\psi_n(j) = \sqrt{\frac{2}{J}}\sin\left(\frac{2\pi nj}{J}\right), \qquad n = 1, 2, \ldots, \left(\frac{J}{2} - 1\right); \tag{1.3}$$

$$\varphi_n(j) = \sqrt{\frac{1}{J}}\cos\left(\frac{2\pi nj}{J}\right), \qquad n = \frac{J}{2}. \tag{1.4}$$

Для невисокосного года, т.е. при $J = 365$, эта система ортогональных функций на множестве $\{1, 2, \ldots, J\}$ следующая:

$$\varphi_0(j) = \sqrt{\frac{1}{J}}\,; \tag{1.5}$$

$$\varphi_n(j) = \sqrt{\frac{2}{J}}\cos\left(\frac{2\pi nj}{J}\right), \qquad n = 1, 2, \ldots, \left(\frac{J-1}{2}\right); \tag{1.6}$$

$$\psi_n(j) = \sqrt{\frac{2}{J}}\sin\left(\frac{2\pi nj}{J}\right), \qquad n = 1, 2, \ldots, \left(\frac{J-1}{2}\right). \tag{1.7}$$

На Рисунке 1.2 для примера приведен результат интерполяции 12-ти значений среднемесячной температуры в г. Москва (климатические средние за 1991–2020 гг.) на множество $\{1, 2, \ldots, J\}$ при $J = 365$ с помощью описанного выше алгоритма. При интерполяции использовались первые члены ряда – разложения функции f по ортонормированному базису – от нулевого до четвертого ($NF = 4$):

$$F(j) = a_0\varphi_0(j) + \sum_{n=1}^{NF}\left(a_n\varphi_n(j) + b_n\psi_n(j)\right), \qquad (1.8)$$

где $a_0 = \sum_{j=1}^{J} f(j)\,\varphi_0(j)$,

$a_n = \sum_{j=1}^{J} f(j)\,\varphi_n(j)$ и $b_n = \sum_{j=1}^{J} f(j)\,\psi_n(j)$ при n = 1, 2, 3, 4.

Таким образом при интерполяции используются гармоники с периодом 1, 1/2, 1/3 и 1/4 года.

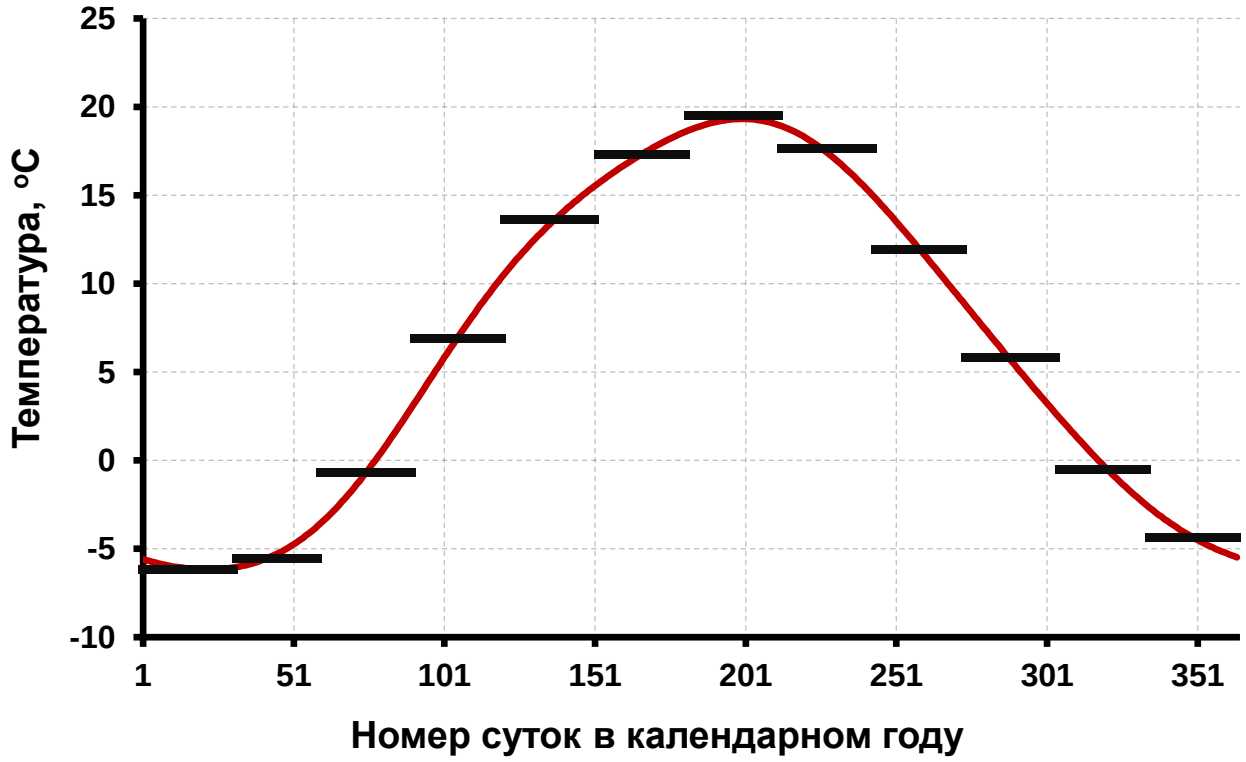


Рисунок 1.2 – Ступенчатая функция *f* на множестве {1, 2, …, *J*} (график представлен черным цветом) и результат ее интерполяции – функция *F* (график представлен красным цветом); исходные данные – 12 среднемесячных значений температуры в г. Москва (климатические средние значения за 1991–2020 гг.); *J* = 365; графики представлены соответственно кусочно-непрерывной линией и непрерывной линией для наглядности

Приведенный выше алгоритм эффективен, как видно на Рисунке 1.2, при интерполяции значений температуры, но не осадков в силу их гораздо менее определенной внутригодовой изменчивости. Поэтому при интерполяции сумм осадков с месячного масштаба времени на суточный при необходимости (например, при расчете гидротермических коэффициентов) приходится равномерно распределять месячную сумму осадков в пределах месяца.

1.2. Детерминистические оценки климатической области распространения явления

Общий подход к описанию климатической области распространения какого-либо явления при детерминистическом подходе 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 гидрометеорологических величин и/или индексов, построенных на их основе, которые описывают гидрометеорологические факторы, участвующие в формировании явления; устанавливаются допустимые диапазоны изменения факторов из этой совокупности (т.е. если параметры состояния климата укладываются в эти диапазоны, то при способствующем – «благоприятном для явления» – сочетании других факторов среды явление систематически происходит);

III. Для заданных значительного промежутка времени (одно или несколько десятилетий) и архива гидрометеорологических данных (результаты наблюдений, реанализа или сценарного модельного расчета), анализируются гидрометеорологические переменные (непосредственно гидрометеорологические величины или же индексы, построенные на их основе) на предмет принадлежности допустимым диапазонам; те точки, географического пространства, для которых

анализ такого соответствия дал положительные результаты, считаются принадлежащими климатической области распространения явления.

В связи с последним пунктом возникает вопрос о том, как именно следует определять значения гидрометеорологических переменных, характерные для выбранного промежутка времени? Традиционный, детерминистический подход состоит в том, чтобы использовать климатические средние значения, т.е. средние за выбранный значительный промежуток времени.

Однако в случае использования баз данных гидрометеорологических наблюдений часто возникает так называемая проблема пропусков данных (при работе с реанализами и результатами модельных расчетов этой проблемы обычно не возникает). Они особенно часто встречаются в базах суточных данных и, конечно, в базах данных большего временного разрешения. Проблема пропусков в рядах данных – одна из серьезных в анализе данных [Литтл, Рубин, 1991].

В связи с этой проблемой в работе [Семенов, Гельвер, 2002] был предложен следующий способ оценки среднегодовых значений гидрометеорологических величин и их годового хода в ситуации, когда имеются пропуски в данных.

Рассмотрим матрицу $\boldsymbol{X} = (x_{ij})$ метеорологических данных суточного разрешения в Таблице 1.2. Здесь I – число лет в рассматриваемом промежутке времени, а $J = 366$ – число суток в календарном году:

Таблица 1.2 – Матрица метеорологических данных суточного разрешения

Год, порядковый номер	**Сутки, номер от начала календарного года**					
	1	**2**	**...**	***j***	**...**	***J***
1	x_{11}	x_{12}	…	x_{1j}	…	x_{1J}
2	x_{21}	x_{22}	…	x_{2j}	…	x_{2J}
...	...	...	...	...	...	...
i	x_{i1}	x_{i2}	…	$x_{i\,j}$	…	x_{iJ}
...	...	...	...	...	...	...
I	x_{I1}	x_{I2}	...	$x_{I\,j}$	...	x_{IJ}

Для удобства будем считать (хотя это и не обязательно), что годы занумерованы по возрастанию. Некоторые значения элементов в матрице $\boldsymbol{X}$ могут отсутствовать.

Наряду с матрицей $\boldsymbol{X} = (x_{ij})$ рассматривается матрица $\boldsymbol{G} = (g_{ij})$:

$g_{ij} = 1$, если данное x_{ij} имеется;

$g_{ij} = 0$, если нет.

Для невисокосного i года всегда $g_{i366} = 0$.

В работе [Семенов, Гельвер, 2002] предполагалась следующая структура данных, представленных в матрице $\boldsymbol{X}$:

$$x_{ij} = a_i + b_j + \theta_{ij} , \qquad (1.9)$$

где $a_1, \ldots, a_I$ и $b_1, \ldots, b_J$ – неизвестные параметры, а θ_{ij} – реализации центрированных случайных величин $\boldsymbol{\theta}_j$. Параметры $a_1, \ldots, a_I$ имеют смысл среднегодовых значений переменной x в соответствующие годы, а параметры $b_1, \ldots, b_J$ представляют годовой ход суточных значений.

Значения этих параметров устанавливаются при минимизации квадратичного функционала:

$$\Phi(a_1, a_2, \ldots, a_I; b_1, b_2, \ldots, b_J) = \sum_{\substack{i=1,2,\ldots,I \\ j=1,2,\ldots,J \\ g_{ij}=1}} (x_{ij} - (a_i + b_j))^2 . \qquad (1.10)$$

При этом соблюдается условие $b_1 + \ldots + b_J = 0$.

Получаемые таким способом оценки $\widehat{a_1}$, $\widehat{a_2}$ …, $\widehat{a_I}$, $\widehat{b_1}$, $\widehat{b_2}$ …, $\widehat{b_J}$ характеризуют не какой-то определенный год, а весь отрезок времени от 1-го до I-го года, т.е. являются параметрами климата этого промежутка времени. Их можно

использовать и для получения других характеристик климата. Так, например, параметры

$$\bar{\hat{a}} = \frac{1}{I}\left(\sum_{i=1}^{I} \hat{a}_i\right) \text{ и} \tag{1.11}$$

$$s_b = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{J} \hat{b}_j^2}{J}} \tag{1.12}$$

характеризуют климатическое среднее значение рассматриваемой гидрометеорологической переменной *x* и амплитуду ее годового хода (в случае синусоидального изменения $\hat{b}$ в течение года с амплитудой *A* значение s_b есть $A \cdot (2)^{-1/2}$). Индекс s_b можно использовать, например, для оценки тенденций изменения выраженности годового хода среднесуточных значений температуры воздуха в приповерхностном слое (см. Рисунок 1.3).

В рамках такого, детерминистического подхода климат промежутка времени от 1-го до *I*-го по каждой рассматриваемой гидрометеорологической переменной *y* может характеризоваться ее климатическими значениями в следующем виде:

$$y_j = \bar{a} + b_j, \qquad j = 1, \ldots, J; \tag{1.13}$$

$$\bar{a} = \frac{1}{I}\left(\sum_{i=1}^{I} a_i\right). \tag{1.14}$$

При этом оценки $\widehat{b_1}$, $\widehat{b_2}$ …, $\widehat{b_J}$ и $\widehat{a_1}$, $\widehat{a_2}$ …, $\widehat{a_I}$ параметров a_1, ..., a_I и b_1, ..., b_J получаются описанным выше способом. При необходимости к последовательности $\widehat{b_1}$, $\widehat{b_2}$ …, $\widehat{b_J}$ может быть применена фильтрация с использованием совокупности ортонормированных тригонометрических функций, описанных в предыдущем разделе.

Построенные таким способом последовательности $\{y_1, \ldots, y_J\}$ широко использовались для вычисления климатических значений гидрометеорологических величин и индексов из определенной совокупности, определяющей климатическую

область распространения какого-либо явления. На основе такого подхода было построено множество соответствующих карт-схем для отечественных оценочных докладов [Оценочный доклад Росгидромета, 2008; Второй оценочный доклад Росгидромета, 2014; Третий оценочный доклад Росгидромета, 2022]. Эти карты-схемы представляли изменение климатических областей распространения различных явлений в живой природе, а именно, представляли изменения климатических ареалов биологических видов вследствие изменения климата.

Для примера на Рисунке 1.4 представлены климатические области распространения возбудителя *Plasmodium vivax* трехдневной малярии на территории России и соседних стран в условиях климата 1966–1995 гг. и при потеплении на 1°С [Оценочный доклад Росгидромета, 2008].

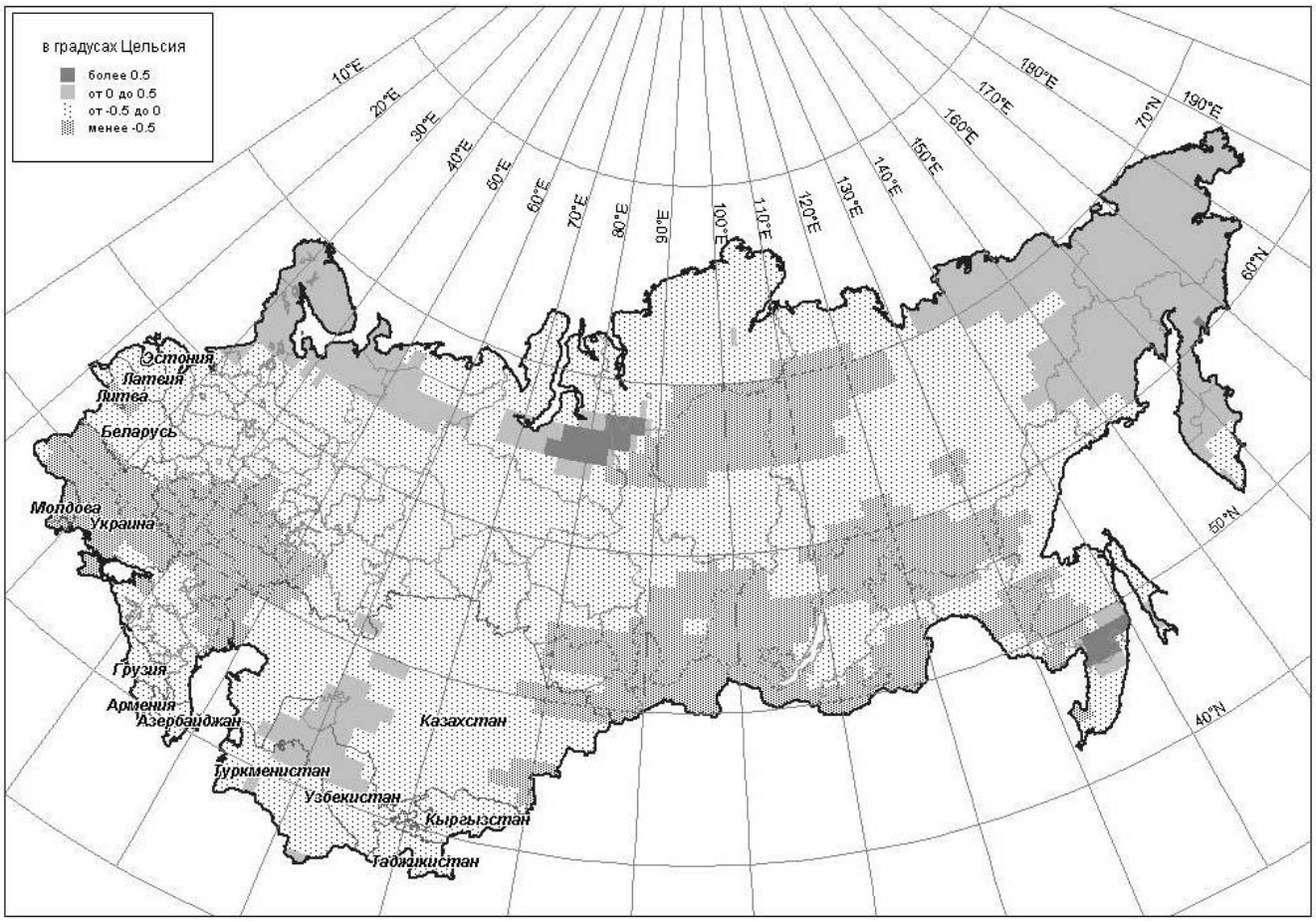


Рисунок 1.3 – Изменение среднеквадратического значения центрированного годового хода температуры в 1966–1995 гг. по сравнению с 1936–1965 гг., ºС [Семенов и др., 2006]

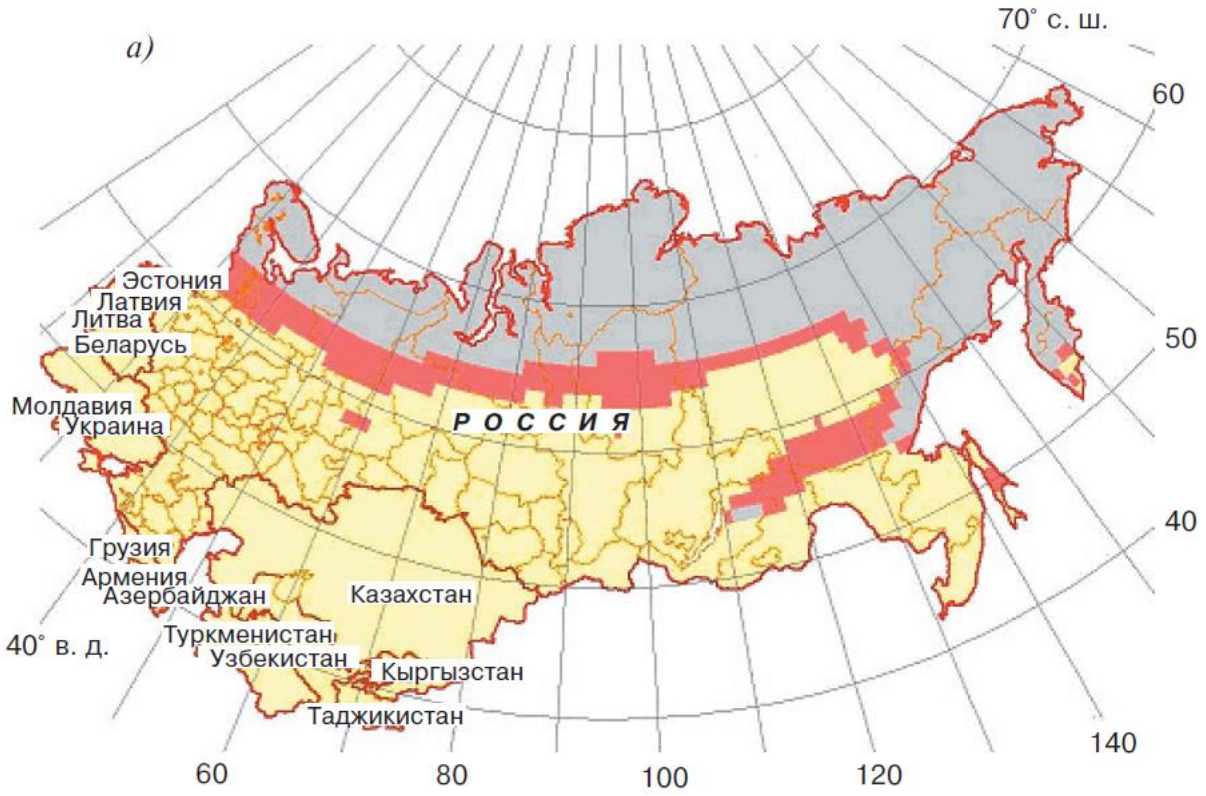


Рисунок 1.4 – Расширение климатического ареала возбудителя трехдневной малярии *Plasmodium vivax* при увеличении температуры на 1°С по сравнению с климатом 1966–1995 гг.: серый цвет — возбудитель не мог развиваться в обоих климатах; красный цвет – развитие было невозможно в условиях климата 1966–1995 гг., а при потеплении стало возможным; желтый — возбудитель мог развиваться в условиях обоих климатов

[Оценочный доклад Росгидромета, 2008, с. 239]

Еще один пример представлен на Рисунке 1.5. Это – климатический ареал итальянского пруса *Calliptamus italicus* на территории России и соседних стран в условиях климатов 1951–1970 гг. и 1991–2010 гг. Эти исследования проводились Е.Н. Поповой, см., например, [Попова, 2014; Попов, Попова, 2019]. Данный вид саранчовых – опасный вредитель сельскохозяйственных растений.

Широкое применение изложенного в этом разделе подхода для построения климатических областей распространения явлений, в основном, для описания климатических ареалов биологических видов, в том числе в прикладных

исследованиях при оценке последствий изменения климата для природных и хозяйственных систем показало эффективность описанной методологии.

Следует, однако, отметить, что изложенный подход, в той версии, в которой он применялся, имеет следующий недостаток: он не предполагал количественной оценки неопределенности полученных результатов. В то же время отсутствие сведений о неопределенности не дает возможности оценить риски, что необходимо при принятии решений в области адаптации. На важность учета неопределенности указывает в том числе Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), которая инициировала разработку соответствующего руководства для авторов своих научных докладов [Mastrandrea et al., 2010].

Рисунок 1.5 – Климатический ареал итальянского пруса *Calliptamus italicus* на территории России и соседних стран в условиях климатов 1951–1970 гг. и 1991–2010 гг.[Второй оценочный доклад Росгидромета, 2014, с. 936; Попова, 2014]:

1 – территория вне границ ареала в оба периода; 2 – территория ареала в оба периода; 3 – территория приращения ареала

Поэтому последующее развитие изложенного выше подхода связано с учетом естественной межгодовой изменчивости состояния климатической системы как фактора неопределенности суждения о принадлежности точки географического пространства климатической области распространения явления, т.е. с внедрением вероятностных оценок.

1.3. Вероятностные оценки климатической области распространения явления

Оценку неопределенности принадлежности заданной точки географического пространства к климатической области распространения явления можно получить, вводя в рассмотрение естественную изменчивость гидрометеорологических величин и/или построенных на их основе индексов на исследуемом промежутке времени. Для этого требования к значениям параметров среды (т.е. их принадлежность к «благоприятным для явления», допустимым диапазонам) проверяются не для среднего климата, а для каждого календарного года.

Вводится параметр p, отражающий частоту лет, в которые все параметры среды принадлежат допустимым диапазонам. Если частота p превосходит критическую частоту p_0, при которой явление систематически происходит, то рассматриваемая точка географического пространства принадлежит климатической области распространения явления. Напомним еще раз, что речь может идти как о фактической реализации встречаемости явления в исследуемый промежуток времени, если явление успевает сформироваться в течение исследуемого промежутка времени, так и о его формировании за большие времена в условиях климата, соответствующего климату исследуемого промежутка времени.

Однако априорной информации о значении частоты p обычно нет. Суждение о том, превосходит ли p значение p_0 выносится на основе информации о продолжительности исследуемого промежутка времени N лет и числа лет k в нем, в которые все параметры из совокупности, описывающей климатическую область распространения рассматриваемого явления, принадлежат допустимым

диапазонам. В предположении, что случайная величина k имеет биномиальное распределение, можно оценить уверенность в том, что (вероятность того, что) $p > p_0$ в условиях климата исследуемого промежутка времени в N лет. Эта уверенность/вероятность может быть различной, не обязательно характеризоваться бинарно (0/1) как в детерминированном случае – см. предыдущий раздел. В условиях иного климата, при его изменении, оценка уверенности/вероятности может измениться.

При расчетах значение p_0 определяется экспертами в том разделе науки, в которой изучается данное явление. В случае отсутствия таких сведений принимается $p_0 = 0.5$. В этом случае, тем самым, $p > p_0$ означает, что явление в пределах климатической области его распространения наступает с большей вероятностью, чем не наступает.

Для оценки того, в какой степени возможно, что $p > p_0$, можно использовать два подхода. А именно, исходя из чисел N и k:

– оценивать, на каком минимальном уровне значимости ε ($1 > \varepsilon > 0$) можно отвергнуть гипотезу $p \leq p_0$; тогда принимается $CONF = 1 - \varepsilon$, что характеризует уверенность (confidence) в том, что $p > p_0$, или

– непосредственно вычислять байесовскую вероятность PR того, что $p > p_0$.

Используемые в этом аспекте термины «уверенность» (confidence) и «вероятность» (likelihood) соответствуют принятыми в научных докладах Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). Рекомендации изложены в руководстве [Mastrandrea et al., 2010]. Первый критерий имеет более качественный характер и используется Рабочей группой II МГЭИК «Воздействия, адаптация и уязвимость». Второй критерий – количественный, принят в оценках Рабочей группой I «Физическая научная основа».

При формализации этих подходов в исследованиях, представленных в данной работе, мы стремились в максимальной степени сблизить эти два подхода. Для этого в качестве основы использовалась концепция вероятность, а также была введена единая балльная шкала для результатов оценки и соответствующие

вербальные характеристики (см. Таблицу 1.3), что важно для приложений. Балльная характеристика необходима для картографирования, в том числе для построения карт-схем изменений климатической области распространения явления при меняющемся климате.

Таблица. 1.3 – Числовые ранги и вербальные характеристики *PR* [Семенов и др., 2020, с изменениями]

Диапазон значений *PR*	**Ранг, *NBR***	**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.

При изменении условий климата балльные оценки для различных точек географического пространства могут меняться в пределах от (-4) до (+4). В Таблице 1.4 приведены соответствующие вербальные характеристики и цвета для использования при картографировании при построении карт-схем [Семенов и др., 2020].

Введенные балльные оценки дали возможность унифицировать способ визуализации результатов при картографическом представлении.

Первый из упомянутых выше подходов (основанный на критерии уверенности) был обоснован в работе [Семенов и др., 2020]. Второй (основанный на критерии вероятности) был обоснован в работе [Добролюбов, Семенов, Володин, Богданович, 2023]. Ниже в двух подразделах эти два подхода характеризуются более подробно.

Таблица 1.4 – 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

1.3.1. Критерий уверенности

Пусть из всех годов исследуемого промежутка времени в N лет в k годах все параметры среды, определяющие климатическую область распространения рассматриваемого явления, принадлежали допустимым диапазонам. Следуя [Мюллер и др., 1982, раздел 1] определим нижнюю доверительную границу $p_{\min}$ для p следующим образом. Введем в рассмотрение функцию

$$S(k, N; p) = \sum_{i=k}^{N} C_N^i p^i (1-p)^{N-i} . \qquad (1.15)$$

Это – вероятность того, что $i \geq k$. При $N \geq 1$ и $0 < k \leq N$ функция S – монотонно возрастает по p на отрезке [0, 1]. Обозначим через $p_{\min}$ решение уравнения $S(k, N; p) = \varepsilon$. Гипотеза о том, что истинное значение p меньше $p_{\min}$ отвергается на уровне значимости ε. Поэтому, если $p_0 \leq p_{\min}$, то гипотеза $p < p_0$ также отвергается на уровне значимости ε. При этом полагается $CONF = 1 - \varepsilon$.

На Рисунках 1.6–1.7 приведены примеры результата использования этого подхода – приведены карты-схемы климатической области распространения (т.е. климатического ареала) на территории России и соседних стран для таежного клеща *Ixodes persulcatus* – переносчика опасных заболеваний человека (клещевой вирусный энцефалит, иксодовый клещевой боррелиоз). На Рисунке 1.6 представлена ситуация в условиях климата 2001–2010 гг., а на Рисунке 1.7 – произошедшие изменения по сравнению с 1971–1980 гг. Расчет произведен [Попов и др., 2021] на основе климатических данных, которые являются результатом обобщения гидрометеорологических наблюдений, проведенного Отделом исследования климата Университета Восточной Англии [Harris et al., 2014].

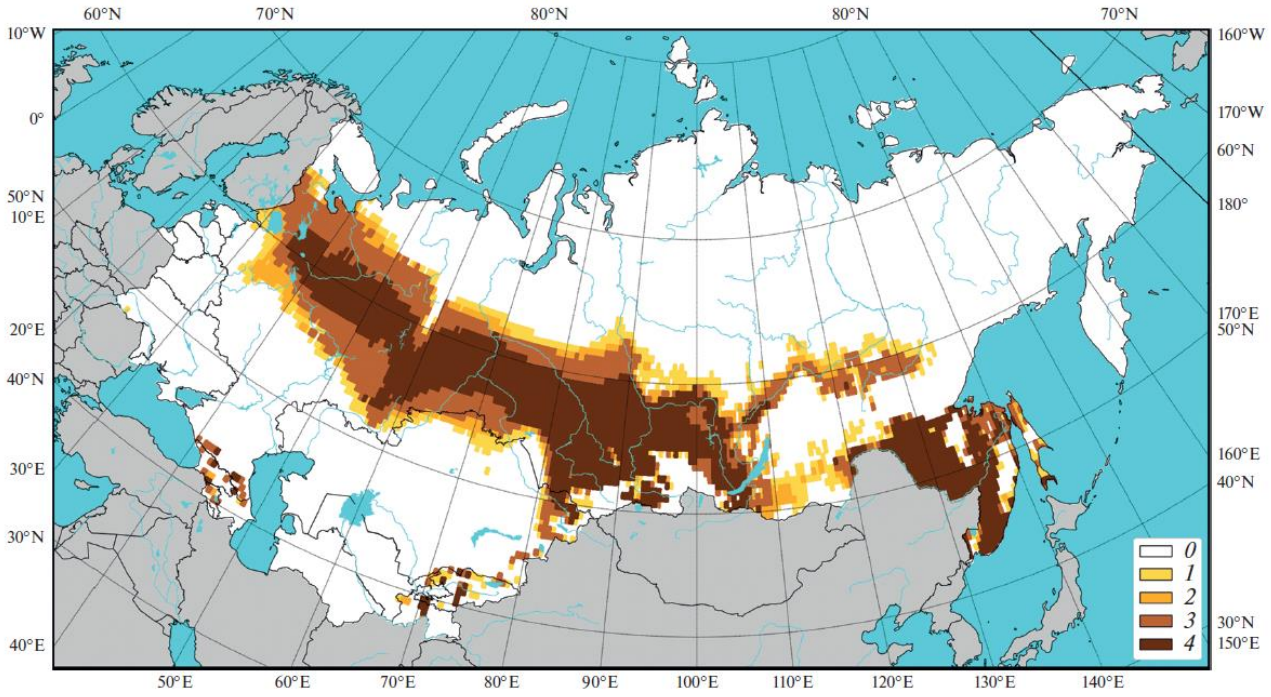


Рисунок 1.6 – Климатический ареал таежного клеща *Ixodes persulcatus* на территории России и соседних стран в 2001–2010 гг. [Попов и др., 2021]; легенда соответствует Таблице 1.3

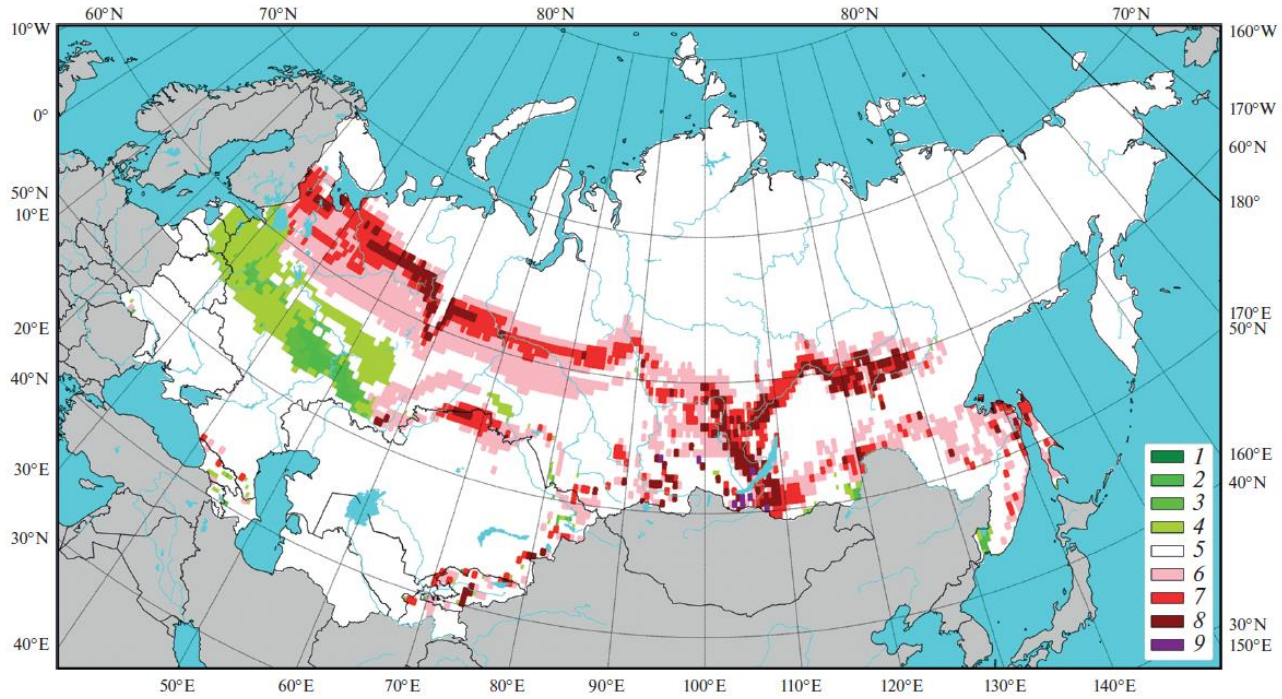


Рисунок 1.7 – Изменение климатического ареала таежного клеща *Ixodes persulcatus* на территории России и соседних стран в 2001–2010 гг. по сравнению с 1971–1980 гг. [Попов и др., 2021];
легенда соответствует Таблице 1.4 (за исключением результата оценки «изменений не выявлено», где использован белый цвет, вместо бежевого)

1.3.2. Критерий вероятности

Второй подход к оценке p связан с использованием байесовских вероятностей. При этом считается, что при фиксированном p случайная величина k имеет биномиальное распределение:

$$b(k, N; p) = C_N^k \, p^k (1-p)^{N-k}. \qquad (1.16)$$

Однако p рассматривается также как случайная величина. Ее плотность вероятности – плотность «априорной вероятности» на отрезке [0, 1] – равномерная, а плотность ее «апостериорной вероятности» f на отрезке [0, 1] есть условная плотность вероятности p при данном k:

$$f(k,N;\ p) = \frac{b(k,N;\ p)}{\int_0^1 b(k,N;\theta)\ d\theta}. \tag{1.17}$$

Соответствующая функция распределения имеет следующий вид:

$$F(k,N;\ p) = \frac{\int_0^p \theta^k\ (1\ -\ \theta)^{N-k}\ d\theta}{\int_0^1 \theta^k\ (1\ -\ \theta)^{N-k}\ d\theta}. \tag{1.18}$$

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

$$PR = 1 - F(k,N;p_0). \tag{1.19}$$

При программном выполнении расчетов значений функции F желательно избегать прямого вычисления интегралов, поскольку это негативно сказывается на точности и времени расчета. В связи с этим мы использовали порядок расчетов, который не имеет этих недостатков. Он основан на следующих соотношениях.

При $0 < k < N$, применяя последовательно интегрирование по частям и понижая на каждом шаге степень при $(1-\theta)$, получаем:

$$\begin{aligned}&\int_0^p \theta^k\ (1\ -\ \theta)^{N-k}\ d\theta = \\ &= \frac{1}{(k+1)}\left[p^{k+1}\ (1-p)^{N-k}\right. \\ &+ \left.\sum_{i=1}^{N-k} \frac{(N-k)\ldots(N-k-i+1)}{(k+2)\ldots(k+i+1)}\ p^{k+i+1}\ (1-p)^{N-k-i}\right].\end{aligned} \tag{1.20}$$

Числовой коэффициент (дробь, обозначим ее через a) при последнем члене суммы, соответствующем $i = N - k$, равен

$$a = \frac{(N-k)!}{(k+2)\ldots(N\ +1)}. \tag{1.21}$$

Вынесем его за квадратные скобки:

$$\int_0^p \theta^k\,(1\,-\,\theta)^{N-k}\,d\theta = \frac{a}{(k+1)}\left[p^{N+1} + \sum_{i=0}^{N-k-1} \frac{(k+i+2)\,\ldots\,(N+1)}{(N-k-i)!}\,p^{k\,+\,i\,+1}\,(1-p)^{N-k-i}\right]. \quad (1.22)$$

Поскольку при $p = 1$ выражение в квадратных скобках равно 1, то

$$F(k,N;\,p) = p^{N+1} + \left[\sum_{i=0}^{N-k-1} \frac{(k+i+2)\,\ldots\,(N+1)}{(N-k-i)!}\,p^{k\,+\,i\,+1}\,(1-p)^{N-k-i}\right]. \quad (1.23)$$

Напомним, что эта формула справедлива при $0 < k < N$. Для остальных значений k:

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

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

Для примера результатов использования изложенного подхода на Рисунке 1.8 представлена оценка климатического ареала на территории России в условиях климата 1990–1999 гг. европейского лесного клеща *Ixodes ricinus* – переносчика опасных заболеваний человека (клещевой вирусный энцефалит, иксодовый клещевой боррелиоз). На Рисунке 1.9 показано изменение климатического ареала в 2030–2039 гг. по сравнению с 1990–1999 гг. Расчет основан на результатах моделирования климата с помощью региональной климатической модели, созданной и поддерживаемой в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Климат представлен 50 реализациями.

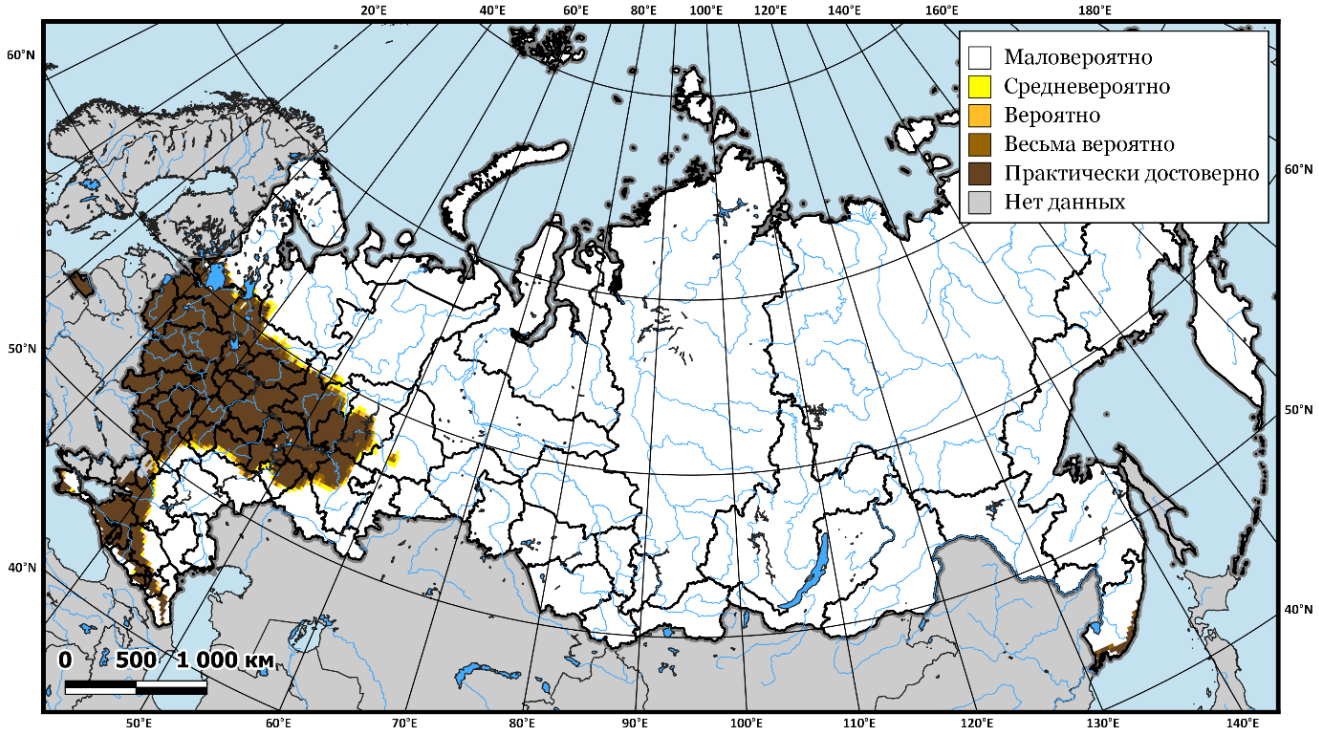


Рисунок 1.8 – Расчетный климатический ареал европейского лесного клеща на территории России в условиях климата 1990–1999 гг.

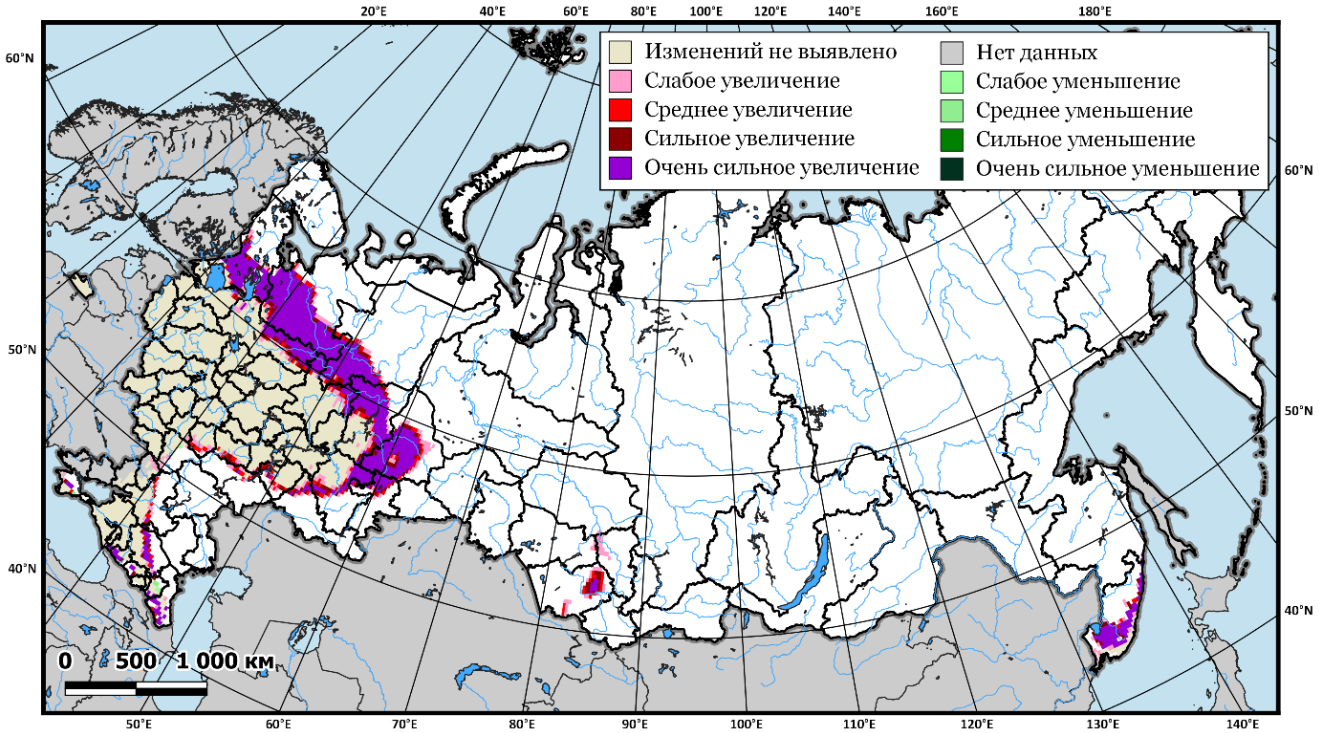


Рисунок 1.9 – Изменение расчетного климатического ареала европейского лесного клеща на территории России в условиях климата 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

1.4. Заключение по Главе 1

Среди факторов, участвующих в формировании многих природных явлений, заметную роль играют гидрометеорологические факторы. Они определяют климатическую область распространения природного явления в пространстве, т.е. ту его часть, где в условиях климата, соответствующего климату исследуемого климатически значимого промежутка времени (десятилетия) данное явление систематически происходит при способствующем сочетании остальных факторов среды. При изменении климата такая область распространения будет, вообще говоря, изменяться.

Детализированные математические модели, наиболее полно описывающие возникновение природного явления при определенном сочетании факторов среды, являются наиболее совершенным средством анализа. Такие модели требуют выполнения целевой программы фундаментальных исследований, что в широком масштабе возможно лишь в перспективе. В тоже время прикладные оценки климатической области распространения многих явлений востребованы уже сейчас. Это касается многих экстремальных погодных явлений, лесных и степных пожаров, распространения насекомых-вредителей лесного и сельского хозяйства и др. Для выполнения таких оценок целесообразно использовать упрощенный подход, основанный на описании климатических областей распространения природных явлений с помощью гидрометеорологических переменных. Это – собственно гидрометеорологические величины и индексы, построенные на их основе (сумма эффективных температур, гидротермические коэффициенты и т.п.). Для каждой переменной из специфической для рассматриваемого явления их совокупности определяются допустимые диапазоны. Если все такие переменные оказываются в своих допустимых диапазонах, то это способствует явлению. Последнее можно интерпретировать в детерминистическом и вероятностном аспектах.

Детерминистический подход состоит в том, чтобы использовать климатические средние значения переменных – гидрометеорологических величин и индексов – для исследуемого климатически значимого промежутка времени. Для

точки географического пространства проверяется, что именно эти климатические средние переменных из совокупности, ассоциированной с явлением, принадлежат допустимым диапазонам. Точки, обладающие этим свойством, и составляют климатическую область распространения явления в рамках такого, детерминистического понимания.

Вероятностный подход состоит в том, что такая проверка выполняется для каждого года из исследуемого промежутка времени в N лет. Число лет k, для которых такая проверка дала положительный результат, позволяет оценить теоретическую частоту p такого результата. Уверенность в том (вероятность того), что p превосходит определенное пороговое значение, характерное для явления, и является вероятностной мерой надежности суждения о том, что данная точка принадлежит климатической области распространения явления. В работе использованы для такого анализа в том числе байесовские вероятности.

Глава 2. Система RANGES – программный комплекс для расчетной оценки климатической области распространения природного явления

Система RANGES является инструментом для расчета климатической области распространения какого-либо природного явления. При этом расчете определяется та часть географического пространства, где явление может устойчиво наблюдаться при заданном климате и благоприятном – для явления – сочетании остальных факторов среды.

На систему RANGES получено авторское свидетельство (Свидетельство Роспатента № 2024668052 [Богданович и др., 2024]). Работа по созданию системы проведена А.Ю. Богдановичем. Н.Ю. Добролюбовым создан пользовательский интерфейс. Общее руководство работами осуществлял С.М. Семенов.

Расчеты подобной области распространения могут производиться для достаточно широкого класса природных явлений. Примеры: сильная засуха, наличие особей какого-либо биологического вида – вредителя сельскохозяйственных или лесных растений, наличие особей какого-либо биологического вида – переносчика заболевания человека (например, малярии).

В системе RANGES реализованы те методологическое подходы и алгоритмы расчета области распространения природного явления, которые описаны в главе 1.

Цель данной главы:

– описать входную информацию, необходимую для проведения расчетов с помощью системы RANGES, в том числе использованную в данной работе;

– представить в общем плане порядок расчета;

– охарактеризовать выходную информацию (результат работы системы).

2.1. Входная информация

2.1.1. Информация о климате

В программном комплексе RANGES расчет производится на основе данных о фактическом или модельном климате. Под фактическим климатом понимается

климатическая информация, полученная путем обобщения данных наблюдений на суше и океанах, а также в атмосфере. Под модельным климатом понимается климатическая информация, полученная расчетным путем с помощью климатических моделей. Модельный климат может характеризовать прошлое, настоящее и будущее.

Для целей расчета с помощью системы RANGES данные как о фактическом, так и о модельном климате должны быть представлены на регулярной широтно-долготной сетке, для чего, если нужно, должна быть проведена соответствующая интерполяция.

Если для расчета используется модельный климат, и для исследуемого периода времени имеются несколько его реализаций, то они приводятся в разных файлах климатической информации. Каждый файл входной климатической информации соответствует определенному году и определенной реализации климата. Различным сценариям антропогенного воздействия на климатическую систему Земли соответствуют свои группы файлов входной климатической информации.

Климатическая входная информация помещается в отдельный каталог (папку), в которой содержатся текстовые файлы с климатическими данными. Названия и их структура регламентированы. Название каждого файла должно иметь следующий вид:

NOM_SCENA_YEAR_NR.DAT

Здесь:

– NOM – сокращенное название из трёх символов расчетной климатической модели, с помощью которой были получены исходные климатические данные; например, INM – глобальная климатическая модель Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН), MGO – региональная климатическая модель Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО);

– SCENA – сокращенное название из пяти символов климатического сценария, например, HISTR (исторический), RCP85 (сценарий RCP8.5), SSP26 (сценарий SSP2.6);

– YEAR – год, для которого приведены данные в этом файле (например, 1990);

– NR – номер запуска расчетной модели (не больше 100), т.е. реализации климата (например, 01, 15, 50 и т.д.); если имеется лишь одна реализация, то указывается значение 01;

– DAT – указывает на формат информации в файле; это – данные в текстовом формате.

Для данных наблюдений значение NOM соответствует имени OBS (от «observation» – наблюдение), а сокращенное название соответствует имени HISTR (от «historical» – исторический).

Во всех этих файлах каждая строка соответствует узлу используемой пространственной сетки, причем последовательность узлов должна быть одинакова для всех файлов входной климатической информации.

В текущей версии системы для каждого узла пространственной сетки климат исходно характеризуется среднемесячными значениями температуры и месячными суммами осадков. Приводятся также значения среднегодовой температуры и годовой суммы осадков.

В данной работе используются следующие два источника модельной климатической информации.

Для глобальных оценок используются 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. Эта модель входит в глобальный пул моделей международного проекта CMIP – Coupled Model Intercomparison Project, на результатах которого основаны модельные оценки климата в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

В этой работе были использованы данные о модельном климате следующих периодов времени: 1990–1999 гг., 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг., соответствующие различным сценариями семейства SSP – shared socioeconomic pathways (общие пути социально-экономического развития) (см. обзор [Семенов, Гладильщикова, 2022]). 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° × 0.5°, и для системы RANGES используется уже это разрешение.

Для региональных оценок на территории России используются 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. Школьником. Эти данные также характеризуют периоды времени 1990–1999 гг., 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. Их исходное пространственное разрешение 0.25° × 0.25°. Модельные оценки для будущих периодов климата в этом случае соответствуют сценариям семейства RCP – representative concentration pathways (представительные траектории концентраций) (см. обзор [Семенов, Гладильщикова, 2022]). Эти сценарии также используются в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Следует отметить, что и семейство сценариев SSP, и семейство сценариев RCP содержат сценарии, отражающие различные уровни антропогенного воздействия на глобальный климат – от слабого до экстремального.

Глобальный модельный климат ИВМ РАН представлен одной реализацией для каждого использованного сценария SSP и лишь для сценария SSP7.0 представлено 5 реализаций (также 5 реализаций представлено для исторического периода 1990–1999 гг.). Региональный климат РКМ представлен 50 реализациями для каждого из использованных сценариев RCP.

Для выполнения расчетов климатических областей распространения 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 за 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. Это – глобальные данные, представленные для узлов регулярной пространственной сетки 0.5° × 0.5°. Значения получены путем статистической обработки данных наблюдений на сети метеорологических станций. Ниже рассмотрим причину и суть введения поправок на примере данных модели КЦР (ГГО).

При использовании современных климатических моделей невозможно начать расчеты точно с климата определенного начального периода, например, 1990–1999 годов. Начальный момент находится в более отдаленном прошлом. Поэтому результат модельной оценки климата на отрезках времени недавнего прошлого или настоящего лишь примерно соответствуют фактическому состоянию климата. Вследствие этого при сравнении климатической области распространения какого-либо явления для, например, 2030–2039 гг., основанного на модельном климате, с климатической областью распространения для, например, 1990–1999 гг., полученного расчетом, основанном на данных о фактическом климате, возникает дополнительная ошибка. Желательно ее элиминировать или хотя бы уменьшить в возможной степени. Для этого вводится такая коррекция модельной реализации климата, которая минимизирует расхождение на базовом периоде времени, в данном примере – на отрезке времени 1990–1999 гг. В данной работе это делается следующим образом.

При использовании климатических данных КЦР данные CRU, представленные на сетки 0.5° × 0.5°, предварительно интерполируются на узлы пространственной сетки КЦР 0.25° × 0.25°. Заметим, что узлы сетки CRU являются одновременно узлами сетки КЦР. Сначала интерполяция выполнялась в узлы последней сетки, принадлежащие меридианам, проходящим через узлы сетки CRU. При этом использовалось среднее взвешенное значение в двух соседних узлах сетки CRU, принадлежащих тому же меридиану. Веса выбирались

пропорциональными косинусам широт этих соседних узлов. Далее при интерполяции в узлы сетки КЦР, не принадлежащие этим меридианам, использовалось среднее арифметическое значений в двух соседних точках, принадлежащих той же параллели.

Таким образом, для точки пространства (в нашем случае – узла сетки КЦР) имеются две совокупности месячных данных о значениях температуры и суммы осадков, характеризующих I лет (например, десятилетие 1990–1999 гг.): $\{C_{ij}\}$ и $\{G_{ijl}\}$. В рассматриваемом случае C – данные массива CRU TS v. 4.04, а G – расчетные данные КЦР. Здесь i – порядковый номер года (от 1 до I, в данном случае I = 10), j – порядковый номер месяца в календарном году (от 1 до 12), l – номер модельной траектории – реализации климата (от 1 до L, в данном случае L = 50).

Для температуры: вычисляются 12 поправок для значений температуры для каждого месяца календарного года:

$$\Delta_j = [(C_{1j} - G_{1j*}) + (C_{2j} - G_{2j*}) + \ldots + (C_{Ij} - G_{Ij*})] / I, \quad j = 1, 2, \ldots, 12, \tag{2.1}$$

где (*) означает арифметическое осреднение по L траекториям модели. Затем организуется поправленный («adjusted») массив $\{G^a_{ijl}\}$, $G^a_{ijl} = G_{ijl} + \Delta_j$.

Для коррекции значений температуры, рассчитанных моделью РКМ для будущих периодов времени (например, 2030–2039 гг. или 2050–2059 гг.), используются те же 12 поправок Δ_j, j = 1, 2, … 12.

Для осадков: вычисляются 12 поправок для значений суммы осадков для каждого месяца календарного года (j = 1, 2, …, 12):

$$\delta_j = [(C_{1j} + C_{2j} + \ldots + C_{Ij}) / I\,] / [(G_{1j*} + G_{2j*} + \ldots + G_{Ij*}) / I\,], \tag{2.2}$$

где (*) означает арифметическое осреднение по L траекториям модели. Затем организуется поправленный массив $\{G^a_{ijl}\}$, $G^a_{ijl} = \delta_j \cdot G_{ijl}$.

Для коррекции значений, рассчитанных для будущих периодов времени, (например, 2030–2039 гг. или 2050–2059 гг.) используются те же 12 поправок δ_j, j = 1, 2, … 12.

Поправленные таким образом массивы климатических модельных данных используются в данной работе в качестве входной информации для системы RANGES при расчетах климатических параметров и – в конечном счете – собственно климатических областей распространения природных явлений.

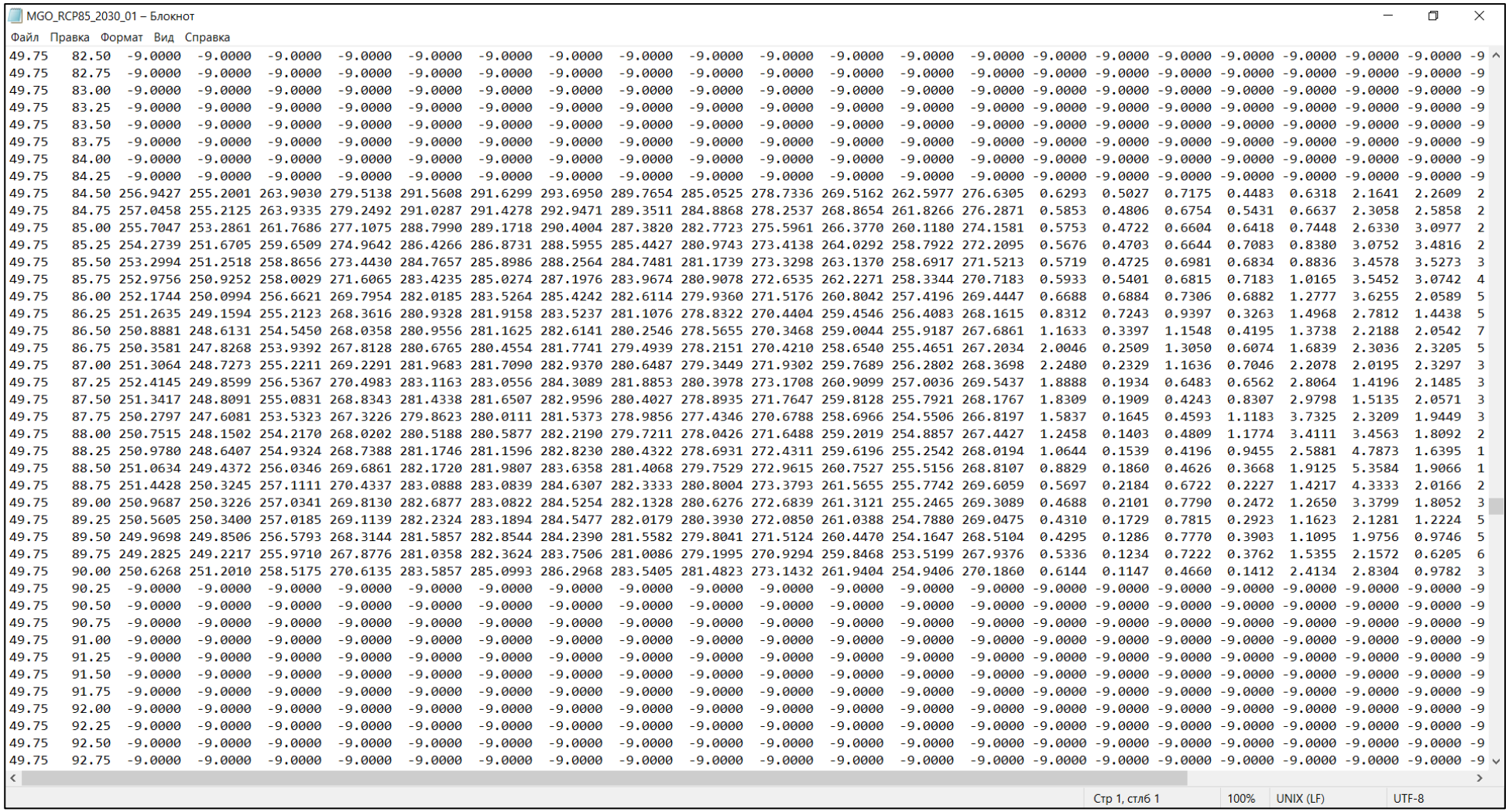
Напомним, что один текстовый файл такой скорректированной входной климатической информации содержит данные, исходно рассчитанной по конкретной модели (в данной работе – ИВМ РАН или ГГО), по определенному сценарию, для одного года и одной реализации климата (т.е. одного запуска модели).

Каждая строка такого текстового файла – информация для конкретной точки в пространстве. Первые 6 позиций занимает широта – действительное число, имеющее 2 знака после десятичного разделителя (точки). В следующих 6 позициях – долгота в том же формате. Затем идут 13 действительных чисел, каждое из которых занимает 8 позиций и имеет 4 знака после десятичного разделителя (точки). Это – значения среднемесячной температуры воздуха в приповерхностном слое для последовательных месяцев – от января до декабря – и среднегодовая температура. Значения температуры приводятся градусах Кельвина (°K).

Следующие 13 действительных чисел – значения суммы осадков для последовательных месяцев (от января до декабря) и годовая сумма осадков. Каждое из этих значений является действительным числом, занимающим также 8 позиций и имеющим 4 знака после десятичного разделителя (точки). Сумма осадков для каждого месяца и года имеет размерность мм/сут.

Между этими 28 числами оставлен пробел в качестве разделителя. Если для данной точки пространства (узла сетки) значение неизвестно, то ему присваивается значение (-9.) в соответствующем формате.

Примеры файлов с данными, форматированными описанным выше способом, которые основаны на результатах расчетов с помощью моделей ГГО и ИВМ, представлены на Рисунке 2.1 и Рисунке 2.2 соответственно.


MGO_RCP85_2030_01 – Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

```
49.75   82.50  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   82.75  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   83.00  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   83.25  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   83.50  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   83.75  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   84.00  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   84.25  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   84.50 256.9427 255.2001 263.9030 279.5138 291.5608 291.6299 293.6950 289.7654 285.0525 278.7336 269.5162 262.5977 276.6305   0.6293   0.5027   0.7175   0.4483   0.6318   2.1641   2.2609   2
49.75   84.75 257.0458 255.2125 263.9335 279.2492 291.0287 291.4278 292.9471 289.3511 284.8868 278.2537 268.8654 261.8266 276.2871   0.5853   0.4806   0.6754   0.5431   0.6637   2.3058   2.5858   2
49.75   85.00 255.7047 253.2861 261.7686 277.1075 288.7990 289.1718 290.4004 287.3820 282.7723 275.5961 266.3770 260.1180 274.1581   0.5753   0.4722   0.6604   0.6418   0.7448   2.6330   3.0977   2
49.75   85.25 254.2739 251.6705 259.6509 274.9642 286.4266 286.8731 288.5955 285.4427 280.9743 273.4138 264.0292 258.7922 272.2095   0.5676   0.4703   0.6644   0.7083   0.8380   3.0752   3.4816   2
49.75   85.50 253.2994 251.2518 258.8656 273.4430 284.7657 285.8986 288.2564 284.7481 281.1739 273.3298 263.1370 258.6917 271.5213   0.5719   0.4725   0.6981   0.6834   0.8836   3.4578   3.5273   3
49.75   85.75 252.9756 250.9252 258.0029 271.6065 283.4235 285.0274 287.1976 283.9674 280.9078 272.6535 262.2271 258.3344 270.7183   0.5933   0.5401   0.6815   0.7183   1.0165   3.5452   3.0742   4
49.75   86.00 252.1744 250.0994 256.6621 269.7954 282.0185 283.5264 285.4242 282.6114 279.9360 271.5176 260.8042 257.4196 269.4447   0.6688   0.6884   0.7306   0.6882   1.2777   3.6255   2.0589   5
49.75   86.25 251.2635 249.1594 255.2123 268.3616 280.9328 281.9158 283.5237 281.1076 278.8322 270.4404 259.4546 256.4083 268.1615   0.8312   0.7243   0.9397   0.3263   1.4968   2.7812   1.4438   5
49.75   86.50 250.8881 248.6131 254.5450 268.0358 280.9556 281.1625 282.6141 280.2546 278.5655 270.3468 259.0044 255.9187 267.6861   1.1633   0.3397   1.1548   0.4195   1.3738   2.2188   2.0542   7
49.75   86.75 250.3581 247.8268 253.9392 267.8128 280.6765 280.4554 281.7741 279.4939 278.2151 270.4210 258.6540 255.4651 267.2034   2.0046   0.2509   1.3050   0.6074   1.6839   2.3036   2.3205   5
49.75   87.00 251.3064 248.7273 255.2211 269.2291 281.9683 281.7090 282.9370 280.6487 279.3449 271.9302 259.7689 256.2802 268.3698   2.2480   0.2329   1.1636   0.7046   2.2078   2.0195   2.3297   3
49.75   87.25 252.4145 249.8599 256.5367 270.4983 283.1163 283.0556 284.3089 281.8853 280.3978 273.1708 260.9099 257.0036 269.5437   1.8888   0.1934   0.6483   0.6562   2.8064   1.4196   2.1485   3
49.75   87.50 251.3417 248.8091 255.0831 268.8343 281.4338 281.6507 282.9596 280.4027 278.8935 271.7647 259.8128 255.7921 268.1767   1.8309   0.1909   0.4243   0.8307   2.9798   1.5135   2.0571   3
49.75   87.75 250.2797 247.6081 253.5323 267.3226 279.8623 280.0111 281.5373 278.9856 277.4346 270.6788 258.6966 254.5506 266.8197   1.5837   0.1645   0.4593   1.1183   3.7325   2.3209   1.9449   3
49.75   88.00 250.7515 248.1502 254.2170 268.0202 280.5188 280.5877 282.2190 279.7211 278.0426 271.6488 259.2019 254.8857 267.4427   1.2458   0.1403   0.4809   1.1774   3.4111   3.4563   1.8092   2
49.75   88.25 250.9780 248.6407 254.9324 268.7388 281.1746 281.1596 282.8230 280.4322 278.6931 272.4311 259.6196 255.2542 268.0194   1.0644   0.1539   0.4196   0.9455   2.5881   4.7873   1.6395   1
49.75   88.50 251.0634 249.4372 256.0346 269.6861 282.1720 281.9807 283.6358 281.4068 279.7529 272.9615 260.7527 255.5156 268.8107   0.8829   0.1860   0.4626   0.3668   1.9125   5.3584   1.9066   1
49.75   88.75 251.4428 250.3245 257.1111 270.4337 283.0888 283.0839 284.6307 282.3333 280.8004 273.3793 261.5655 255.7742 269.6059   0.5697   0.2184   0.6722   0.2227   1.4217   4.3333   2.0166   2
49.75   89.00 250.9687 250.3226 257.0341 269.8130 282.6877 283.0822 284.5254 282.1328 280.6276 272.6839 261.3121 255.2465 269.3089   0.4688   0.2101   0.7790   0.2472   1.2650   3.3799   1.8052   3
49.75   89.25 250.5605 250.3400 257.0185 269.1139 282.2324 283.1894 284.5477 282.0179 280.3930 272.0850 261.0388 254.7880 269.0475   0.4310   0.1729   0.7815   0.2923   1.1623   2.1281   1.2224   5
49.75   89.50 249.9698 249.8506 256.5793 268.3144 281.5857 282.8544 284.2390 281.5582 279.8041 271.5124 260.4470 254.1647 268.5104   0.4295   0.1286   0.7770   0.3903   1.1095   1.9756   0.9746   5
49.75   89.75 249.2825 249.2217 255.9710 267.8776 281.0358 282.3624 283.7506 281.0086 279.1995 270.9294 259.8468 253.5199 267.9376   0.5336   0.1234   0.7222   0.3762   1.5355   2.1572   0.6205   6
49.75   90.00 250.6268 251.2010 258.5175 270.6135 283.5857 285.0993 286.2968 283.5405 281.4823 273.1432 261.9404 254.9406 270.1860   0.6144   0.1147   0.4660   0.1412   2.4134   2.8304   0.9782   3
49.75   90.25  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   90.50  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   90.75  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   91.00  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   91.25  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   91.50  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   91.75  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   92.00  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   92.25  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   92.50  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
49.75   92.75  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9.0000  -9
```

Стр 1, стлб 1 | 100% | UNIX (LF) | UTF-8

Рисунок 2.1 – Пример файла – элемента входной климатической информации, содержащего данные о значениях температуры и суммы осадков, которые исходно получены региональной климатической моделью ГГО для сценария RCP8.5 (2030 г., первая реализация климата)

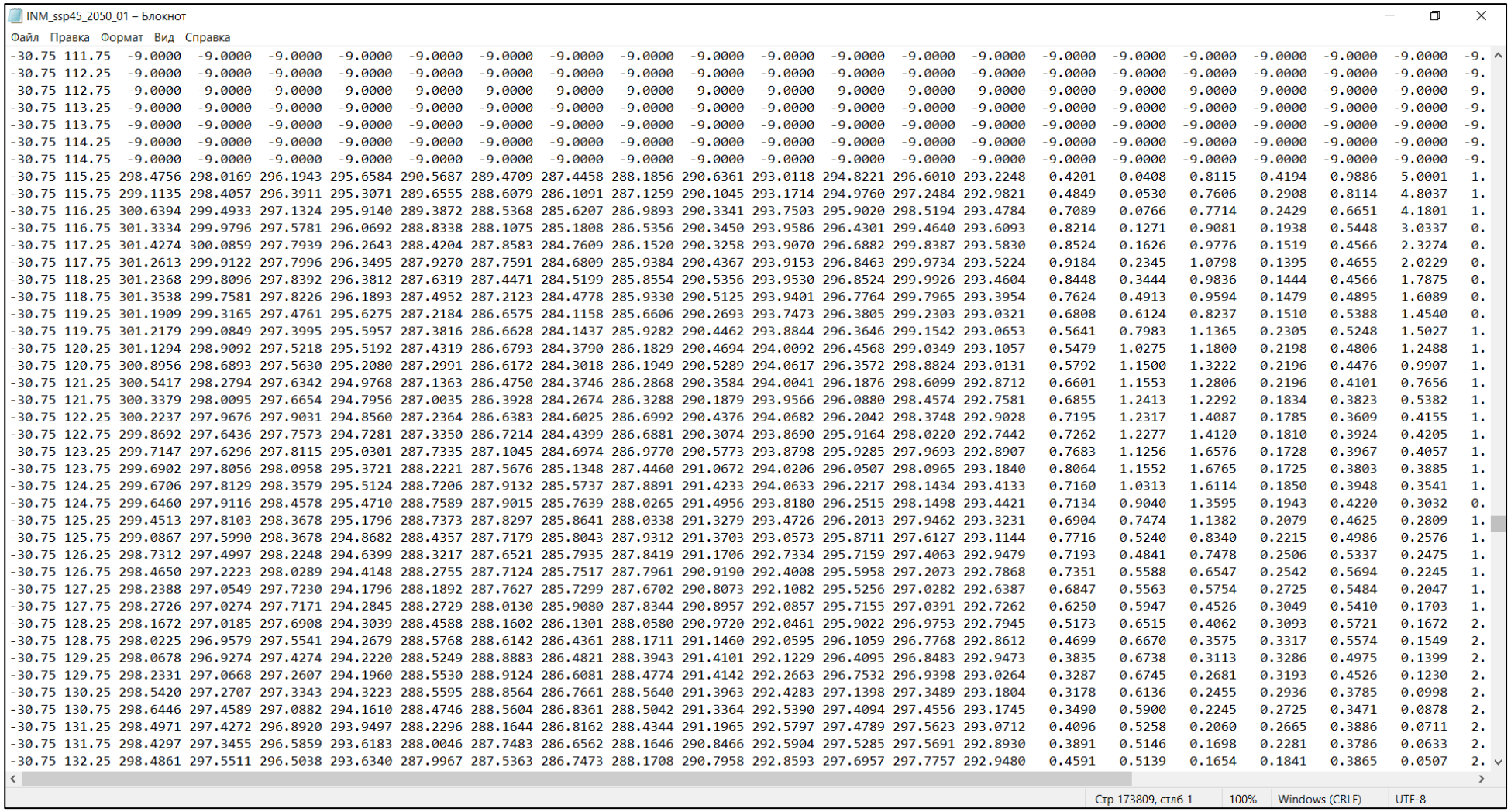


Рисунок 2.2 – Пример файла – элемента входной климатической информации, содержащего данные о значениях температуры и суммы осадков, которые исходно получены глобальной климатической моделью ИВМ РАН для сценария SSP4.5 (2050 г., единственная реализация климата)

Если для данного узла сетки в исследуемом отрезке времени для какого-то года данные неполны, то считается, что данная точка не обеспечена данными, и информация о ней в дальнейшем не обрабатывается.

2.1.2. Параметры для расчета климатической области распространения явления

Для проведения расчета климатической области распространения какого-либо природного явления с помощью системы RANGES нужно указать входные параметры двух типов: технические параметры расчета и параметры, отражающие климатические условия, соответствующие исследуемому явлению. Входные параметры указываются в текстовом файле RANGES.PAR. При необходимости в конце имени файла добавляется маркер версии, например, RANGES_B1.PAR, если это версия B1.

В файле RANGES.PAR входные параметры сгруппированы в 2 блока – технические параметры и параметры, отражающие климатические условия, соответствующие исследуемому явлению. Последний подразделяется на подблоки, а они – в ряде случаев – на сегменты. Ниже в разделах 2.1.2.1 и 2.1.2.2 охарактеризована эта структура, в том числе каждая из строк, содержащих информацию о входных параметрах. Блоки, подблоки, сегменты и строки располагаются в RANGES.PAR подряд (без пустых строк между ними).

2.1.2.1. Технические параметры расчета

Параметры первого типа охарактеризованы в Таблице 2.1. Каждый из них располагается в отдельной строке файла RANGES.PAR.

В имени выходного файла NOUT удобно указывать источник климатической информации. В данной работе указываются расчетные модели – ИВМ РАН (INM) или ГГО (MGO).

Таблица 2.1 – Технические параметры расчета

Обозначение	**Смысл**	**Формат**
NOUT	Имя файла с результатом расчета	CHARACTER*12
SCEN	Символ сценария антропогенного воздействия на климатическую систему Земли, в рамках которого получены входные исходные климатические данные	CHARACTER*5
YEAR0	Начальный год рассматриваемого климатического периода	I10
NY0	Продолжительность рассматриваемого климатического периода, годы	I10
NR0	Число реализаций модельного климата, т.е. запусков климатической модели	I10
NF	Номер старшей гармоники в сумме первых членов гармонических функций, используемой при оценке среднесуточных значений температуры, исходя из среднемесячных данных (алгоритм – см. раздел 1.1)	I10
PB0	Минимальная доля лет, в которые все заданные климатические критерии выполнены, необходимая для того, чтобы явление систематически происходило (см. раздел 1.3)	Число из интервала (0, 1), F10
LAL	Минимальное значение широты, в десятичном выражении, градусы	Число из [-90, 90], F10
LAU	Максимальное значение широты, в десятичном выражении, градусы	Число из [-90, 90], F10
LOL	Минимальное значение долготы, в десятичном выражении, градусы	Число из [0, 360], F10
LOU	Максимальное значение долготы, в десятичном выражении, градусы	Число из [0, 360], F10

Переменная SCEN маркирует тот сценарий антропогенного воздействия на климатическую систему Земли, при котором производился расчет и была получена информация о модельном климате.

Далее характеризуется рассматриваемый период времени. Указывается его начальный год YEAR0 и продолжительность в годах NY0.

Параметр NR0 указывает на число имеющихся реализаций климата (т.е. число запусков модели).

При проведении региональных расчетов иногда целесообразно ограничивать ту часть географического пространства, для которой проводится расчет, широтно-долготным прямоугольником. Параметры LAL и LAU задают соответственно минимальное и максимальное значения широты при расчете, а LOL и LOU – минимальное и максимальное значения долготы. Граничные значения для северной и южной границ широты задаются в десятичных градусах в интервале от -90.0° до 90.0°, где 0.0 соответствует экваториальной линии. Отрицательные значения соответствуют Южному полушарию, а положительные – Северному полушарию. Граничные значения для западной и восточной границ долготы вводятся в десятичных градусах в интервале от 0.0° до 360.0°, где 0.0 соответствует Гринвичскому меридиану. Значения увеличиваются к востоку.

2.1.2.2. Параметры, отражающие климатические условия, соответствующие исследуемому явлению

Как уже подробно обсуждалось в главе 1, точка географического пространства (при проведении компьютерных вычислений – узел пространственной сетки) считается принадлежащей к климатической области распространения явления с определенной вероятностью в том случае, если при климате этой точки доля лет, в которые выполнены все климатические критерии из соответствующей этому явлению совокупности климатических критериев, больше пороговой p_0 доли с этой вероятностью. Это пороговое значение в предыдущем разделе в перечне входных технических параметров обозначено как PB0. Система RANGES дает возможность при проведении расчета задавать значительную совокупность климатических критериев.

Первый блок таких критериев относится к температуре и осадкам месячного разрешения.

Для того, чтобы при проведении расчета система RANGES обрабатывала информацию о значениях среднемесячной температуры, для управляющего параметра TM (формат I1), располагающегося в первой позиции строки, следующей за техническими параметрами (см. предыдущий раздел), надо указать значение 1. При значении 0 эта информация обрабатываться не будет.

Подблок критериев, относящихся к **значениям среднемесячной температуры**, состоит из трех сегментов. Их структура одинакова, и мы, поэтому, ограничимся пояснением структуры первого из них:

– В начале в отдельной строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра TML1 (формат I1). Если значение 1, то выполнение критериев, приведенные в этом сегменте, будет проверяться, а если значение 0 – не будет.

– В последующих строках указываются соответственно номера начального MBT1 (формат I2) и конечного MET1 (формат I2) месяца отрезка времени в пределах календарного года; нумерация традиционная, от 1 до 12. Каждый номер указывается в первых двух позициях своей строки.

– В следующей строке в начале указывается значение управляющего параметра ITL1 (формат I1), который принимает значения 1 или 0, а затем, через пробел, располагается действительное число TL1 – пороговое значение температуры в °C в формате F8. Если ITL1 = 1, то при расчете будет выполняться проверка того, что средняя температура за выбранный промежуток времени в году больше заданного порога TL1. Если ITL1 = 0, то такая проверка не выполняется программой.

– В следующей строке в начале указывается значение управляющего параметра ITU1 (формат I1), который принимает значения 1 или 0, а затем, через пробел, располагается действительное число TU1 – пороговое значение температуры в °C в формате F8. Если ITU1 = 1, то при расчете будет выполняться проверка того, что средняя температура за выбранный промежуток времени в году

меньше заданного порога TU1. Если ITU1 = 0, то такая проверка не выполняется программой.

Таким образом, этот подблок задает параметры для проверки выполнения критериев, имеющих смысл сравнений средних за определенные промежутки времени календарного года значений температуры с заданными пороговыми значениями.

Последующие строки касаются обработки данных о месячных суммах осадков. В первой из них для того, чтобы при проведении расчета система RANGES обрабатывала информацию о значениях месячных сумм осадков, следует указать значение 1 для управляющего параметра PM (формат I1). При значении 0 эта информация обрабатываться не будет.

Подблок критериев, относящихся к **значениям месячных сумм осадков**, также состоит из трех сегментов. Их структура одинакова, и мы, поэтому, ограничимся пояснением структуры первого из них:

– В начале в отдельной строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра PML1 (формат I1). Если значение 1, то выполнение критериев, приведенные в этом сегменте, будет проверяться, а если значение 0 – не будет.

– В последующих строках указываются соответственно номера начального MBP1 (формат I2) и конечного MEP1 (формат I2) месяца отрезка времени в пределах календарного года; нумерация традиционная, от 1 до 12. Каждый номер указывается в первых двух позициях своей строки.

– В следующей строке в начале указывается значение управляющего параметра IPL1 (формат I1), который принимает значения 1 или 0, а затем, через пробел, располагается действительное число PL1 – пороговое значение суммы осадков в мм в формате F8. Если IPL1 = 1, то при расчете будет выполняться проверка того, что сумма осадков за выбранный промежуток времени в году больше заданного порога PL1. Если IPL1 = 0, то такая проверка не выполняется программой.

– В следующей строке в начале указывается значение управляющего параметра IPU1 (формат I1), который принимает значения 1 или 0, а затем, через пробел, располагается действительное число PU1 – пороговое значение суммы осадков в мм в формате F8. Если IPU1 = 1, то при расчете будет выполняться проверка того, что сумма осадков за выбранный промежуток времени в году меньше заданного порога PU1. Если IPU1 = 0, то такая проверка не выполняется программой.

Таким образом, этот подблок задает параметры для проверки выполнения критериев, имеющих смысл сравнений сумм осадков за определенные промежутки времени календарного года с заданными пороговыми значениями.

Следующий подблок входных данных (заказа на расчет) касается **экстремальных значений среднемесячной температуры**:

– В первой строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра IEXTM (формат I1). Если IEXTM = 1, то проверка критериев этого блока выполняется при расчете, а если IEXTM = 0, то не выполняется.

– В следующей строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра IMIM (формат I1). Далее, через пробел, располагается действительное число TTMIM (формат F8), означающее пороговое значение для температуры в °C. Далее, в той же строке, указываются номера начального и конечного месяцев – MBTMI и METMI соответственно (формат I5) для периода времени в пределах календарного года (нумерация традиционная, от 1 до 12). Если IMIM = 1, то при расчете проверяется что минимальная среднемесячная температура для месяцем выбранного периода времени не меньше порогового значения TTMIM. Если IMIM = 0, то такая проверка не проводится.

– В следующей строке указывается значение управляющего параметра IMAM (формат I1). Далее, через пробел, располагается действительное число TTMAM (формат F8), означающее пороговое значение для температуры в °C. Далее, в той же строке, указываются номера начального и конечного месяцев –

MBTMA и METMA соответственно (формат I5) – для периода времени в пределах календарного года (нумерация традиционная, от 1 до 12). Если IMAM = 1, то при расчете проверяется что максимальная среднемесячная температура для месяцев выбранного периода времени не больше порогового значения TTMAM. Если IMAM = 0, то такая проверка не проводится.

Критерии, сгруппированные во втором блоке, используют информацию о среднесуточных значениях температуры или/и суточных суммах осадков. Поскольку входная климатическая информация, используемая текущей версией системы RANGES, содержит лишь данные месячного разрешения, то данные суточного разрешения получаются с помощью интерполяции данных месячного разрешения. Процедуры указаны в главе 1 в разделе 1.1. Интерполяция проводится лишь в том случае, если предполагается использовать критерии, в которые входят данные суточного разрешения. Это указывается в первых двух строках данного блока. В первой строке в первой позиции приводится значение управляющего параметра TD (формат I1). Если TD = 1, то интерполяция значений температуры выполняется, а если TD = 0, то не выполняется. Во второй строке этого блока параметров в первой позиции приводится значение управляющего параметра PD (формат I1). Если PD = 1, то интерполяция значений осадков выполняется, а если PD = 0, то не выполняется. Далее следуют подблоки, в которых указываются параметры анализа выполнения климатических критериев для совокупности данных о температуре и осадках суточного разрешения:

Сумма активных температур:

– В первой строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISAT (формат I1). Если ISAT = 1, то дальнейшая информация этого подблока обрабатывается, а если ISAT = 0, то не обрабатывается.

– В следующей строке в первых 10 позициях располагается действительное число SATT (формат F10) – пороговое значение среднесуточной температуры (°C) для вычисления суммы активных температур SAT, °C. Далее, в

той же строке, указываются номера начального и конечного дней – DBSAT и DESAT ($1 \leq DBSAT < DESAT \leq 365$) соответственно (формат I5) – для периода времени в пределах календарного года (нумерация дней, от 1 до 365). В пределах этого заданного периода будет рассчитываться значение SAT.

– В следующей строке этого блока в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISATL (формат I1). Далее через пробел располагается действительное число SATL (формат F8), °C. Если ISATL = 1, то проверяется выполнение критерия «SAT > SATL». Если ISATL = 0, такая проверка не производится.

– В следующей, последней строке этого подблока, в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISATU (формат I1). Далее через пробел располагается действительное число SATU (формат F8), °C. Если ISATU = 1, то проверяется выполнение критерия «SAT < SATU». Если ISATU = 0, такая проверка не производится.

Сумма пассивных температур (называем ее так по аналогии с суммой активных температур):

– В первой строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISPT (формат I1). Если ISPT = 1, то дальнейшая информация этого подблока обрабатывается, а если ISPT = 0, то не обрабатывается.

– В следующей строке в первых 10 позициях располагается действительное число SPTT (формат F10) – пороговое значение среднесуточной температуры (°C) для вычисления суммы пассивных температур SPT, °C. Для суммы пассивных температур значение SPT рассчитывается для всего календарного года.

– В следующей строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISPTL (формат I1). Далее через пробел располагается действительное число SPTL (формат F8), °C. Если ISPTL = 1, то

проверяется выполнение критерия «SPT > SPTL». Если ISPTL = 0, такая проверка не производится.

– В следующей, последней строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISPTU (формат I1). Далее через пробел располагается действительное число SPTU (формат F8), °C. Если ISPTU = 1, то проверяется выполнение критерия «SPT < SPTU». Если ISPTU = 0, такая проверка не производится.

Число суток в году, для которых среднесуточная температура превышает заданное пороговое значение:

– В первой строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра INAD (формат I1). Если INAD = 1, то дальнейшая информация этого подблока обрабатывается, а если INAD = 0, то не обрабатывается.

– В следующей строке в первых 10 позициях располагается действительное число ADTT (формат F10) – пороговое значение среднесуточной температуры (°C) для вычисления числа суток в году NAD, в которые среднесуточная температура превышает пороговое значение ADTT.

– В следующей строке в первой позиции указывается управляющий параметр INADL (формат I1) и далее, через пробел, натуральное число NADL (формат I8). Если INADL = 1, то проверяется выполнение условия «NAD > NADL». Если INADL = 0, эта проверка не проводится.

– В следующей строке в первой позиции указывается управляющий параметр INADU (формат I1) и далее, через пробел, натуральное число NADU (формат I8). Если INADU = 1, то проверяется выполнение условия «NAD < NADU». Если INADU = 0, эта проверка не проводится.

Число суток в году, для которых суточная сумма осадков превышает заданное пороговое значение:

– В первой строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра INPD (формат I1). Если INPD = 1, то дальнейшая информация этого подблока обрабатывается, а если INPD = 0, то не обрабатывается.

– В следующей строке в первых 10 позициях располагается действительное число PDTT (формат F10) – пороговое значение суточной суммы осадков (мм) для вычисления числа суток в году NPD, в которые суточная сумма осадков (мм) превышает пороговое значение PDTT.

– В следующей строке в первой позиции указывается управляющий параметр INPDL (формат I1) и далее, через пробел, натуральное число NPDL (формат I8). Если INPDL = 1, то проверяется выполнение условия «NPD > NPDL». Если INADL = 0, эта проверка не проводится.

– В следующей строке в первой позиции указывается управляющий параметр INPDU (формат I1) и далее, через пробел, натуральное число NPDU (формат I8). Если INPDU = 1, то проверяется выполнение условия «NPD < NPDU». Если INPDU = 0, эта проверка не проводится.

Сумма эффективных температур:

– В первой строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISET (формат I1). Если ISET = 1, то дальнейшая информация этого подблока обрабатывается, а если ISET = 0, то не обрабатывается.

– В следующей строке в первых 10 позициях располагается действительное число SETT (формат F10) – пороговое значение среднесуточной температуры (°C) для вычисления суммы эффективных температур SET, °C. Далее, в той же строке, указываются номера начального и конечного дней – DBSET и DESET ($1 \leq DBSET < DESET \leq 365$) соответственно (формат I5) – для периода времени в пределах календарного года (нумерация дней, от 1 до 365). В пределах этого заданного периода будет рассчитываться значение SET.

– В следующей строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISETL (формат I1). Далее, через пробел, располагается действительное число SETL (формат F8), °C. Если ISETL = 1, то проверяется выполнение критерия «SET > SETL». Если ISETL = 0, такая проверка не производится.

– В следующей, последней строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISETU (формат I1). Далее через пробел располагается действительное число SETU (формат F8), °C. Если ISETU = 1, то проверяется выполнение критерия «SET < SETU». Если ISETU = 0, такая проверка не производится.

Гидротермический коэффициент Селянинова:

– В первой строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISEL (формат I1). Если ISEL = 1, то дальнейшая информация этого подблока обрабатывается, а если ISEL = 0, то не обрабатывается.

– В следующей строке в первых 10 позициях располагается действительное число SELT (формат F10) – пороговое значение среднесуточной температуры (°C) для вычисления гидротермического коэффициента Селянинова SEL.

– В следующей строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISELL (формат I1). Далее, через пробел, располагается действительное число SELL (формат F8). Если ISELL = 1, то проверяется выполнение критерия «SEL > SELL». Если ISELL = 0, такая проверка не производится.

– В следующей, последней строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра ISELU (формат I1). Далее через пробел располагается действительное число SELU (формат F8). Если ISELU = 1, то проверяется выполнение критерия «SEL < SELU». Если ISELU = 0, такая проверка не производится.

Максимум и минимум среднесуточной температуры:

– В первой строке в первой позиции указывается значение управляющего параметра IEXTD (формат I1). Если IEXTD = 1, то дальнейшая информация этого подблока обрабатывается, а если IEXTD = 0, то не обрабатывается.

– В следующей строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра IMID (формат I1). Далее, после пробела, располагается в 8 позициях действительное число TTMID (формат F8) – пороговое значение для минимальной за год среднесуточной температуры на отрезке времени в пределах календарного года от суток DBTMI до суток DETMI. Эти номера суток – порядковые, считаются от 1 января, указываются в данной строке после TTMID как натуральные числа в формате F5 каждое. Если IMID = 1, то производится проверка того, что минимум среднесуточных температур на отрезке времени [DBTMI, DETMI] больше TTMID. Если IMID = 0, то такая проверка не производится.

– В следующей строке этого подблока в первой позиции указывается значение управляющего параметра IMAD (формат I1). Далее, после пробела, располагается в 8 позициях действительное число TTMAD (формат F8) – пороговое значение для максимальной за год среднесуточной температуры на отрезке времени в пределах календарного года от суток DBTMA до суток DETMA. Эти номера суток – порядковые, считаются от 1 января, указываются в данной строке после TTMAD как натуральные числа в формате F5 каждое. Если IMAD = 1, то производится проверка того, что максимум из среднесуточных температур на отрезке времени [DBTMA, DETMA] меньше TTMAD. Если IMAD = 0, то такая проверка не производится.

2.1.3. Пользовательский интерфейс

Как можно видеть в предыдущих разделах, для проведения расчета климатической области распространения явления необходимо сформировать обширный файл RANGES.PAR, указывающий параметры процесса расчета. Конечно, этот файл можно создать вручную. Однако для стороннего пользователя это весьма затруднительно.

Поэтому в Институте глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля Н.Ю. Добролюбовым был создан с помощью среды MS Visual Studio Community на зыке программирования Visual Basic .NET (VB.NET) дружественный интерфейс, который позволяет пользователю в интерактивном режиме осуществлять формирование файла RANGES.PAR. При этом осуществляется проверка ошибок ввода многих типов. Один из фрагментов этого интерфейса представлен на Рисунке 2.3.

Отметим наличие двух флажков на первой странице десктопной версии системы RANGES. Их необходимо отмечать в тех случаях, если при расчетах есть необходимость использовать информацию о среднесуточной температуре воздуха или суточной сумме осадков.

Остальные примеры фрагментов пользовательского интерфейса с заполнением параметров, отражающие климатические условия, соответствующие исследуемому явлению, а также с заполнением полей запуска программы и примера автоматически сгенерированной карты-схемы представлены в Приложении (Рисунки П1-П8).

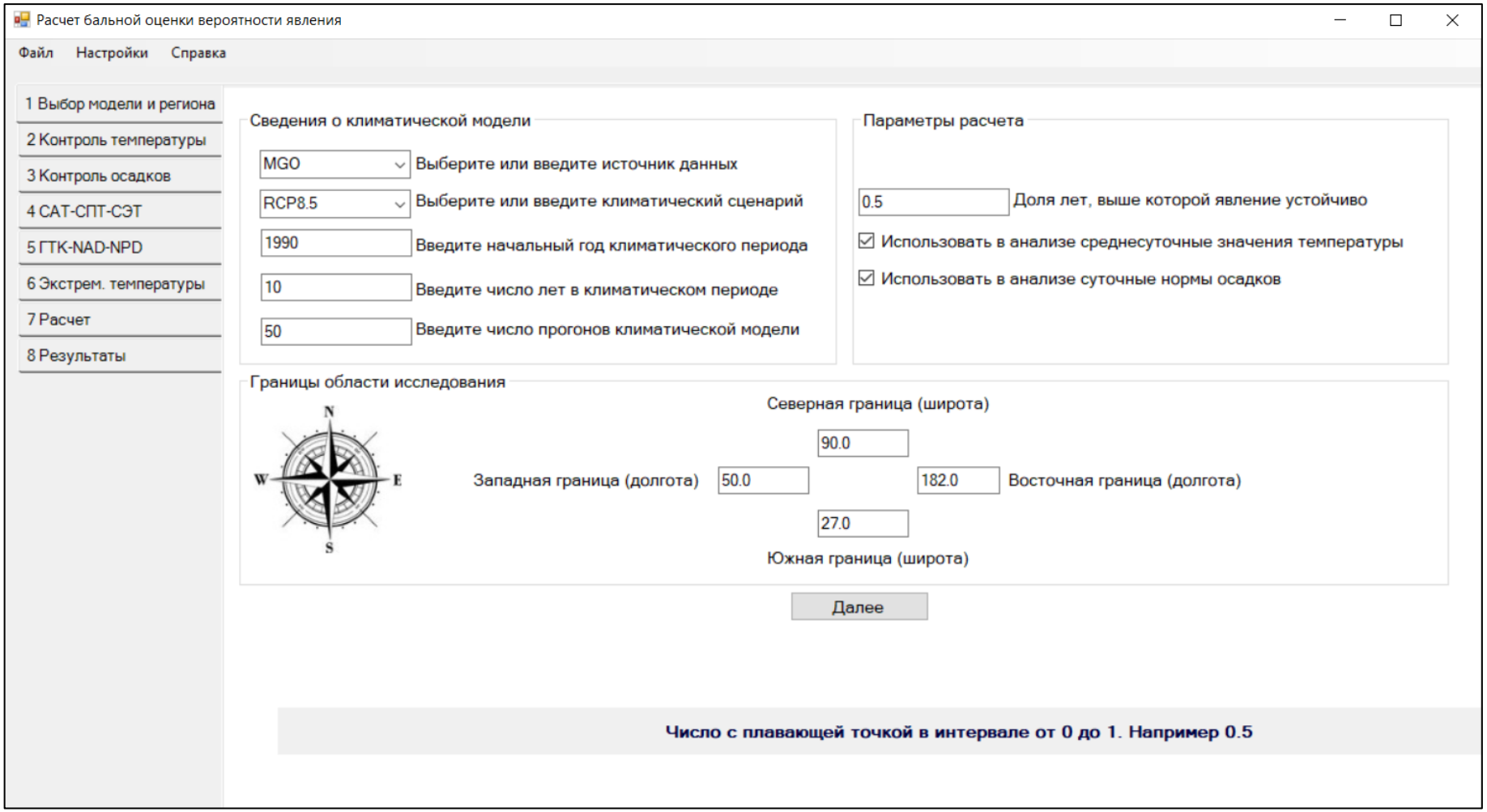


Рисунок 2.3 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Выбор технических параметров расчета: сведений о климатической модели или данных наблюдений (название источника, сценарий климата, начальный год изучаемого периода, число лет в периоде, число реализаций модели), параметров расчета (доля лет, выше которой явление устойчиво; необходимость использования при расчетах среднесуточных значений температуры или суммы осадков), границ области исследования (южная, северная, западная и восточная границы)

2.2. Порядок расчета и использование подпрограмм

Головная программа системы RANGES называется RANGES.FOR. В конце ее имени может быть добавлен маркер версии программы, например RANGES_B1.FOR. Опишем последовательность действий, выполняемых головной программой RANGES.FOR (для наглядности схема порядка действий также показана на Рисунке 2.4).

Сначала осуществляется чтение заказа – входной информации, размещенной в файле RANGES.PAR. Затем открывается файл выходной информации – его имя задано значением символьного выражения NOUT и указывается в RANGES.PAR – и в него копируются вся информация из RANGES.PAR. Это позволяет видеть, какому заказу соответствуют результаты расчета, которые впоследствии будут записаны в файл NOUT.

Далее в головной программе вычисляются две функции: целочисленных аргументов – Z(K,D) и Q(K,D). Они принимают действительные значения. Здесь K = 1, …, 12 – порядковый номер месяца в календарном году, считая с января, а D = 1, 2, …, T0 – порядковый номер суток в календарном году, считая с 1 января.

Первая из этих функций Z(K,D) при фиксированном K является суммой первых членов до гармоники с номером NF (в данной работе принято NF = 4, указано в RANGES.PAR) разложения функции в гармонические функции на {1, 2, …, T0}, T0 = 365, принимающей значение 1 для суток месяца номер K и значение 0 для остальных суток. Это вычисление проводит подпрограмма **SMD_C(YEAR,NF,X,T0,SER,Y)**.

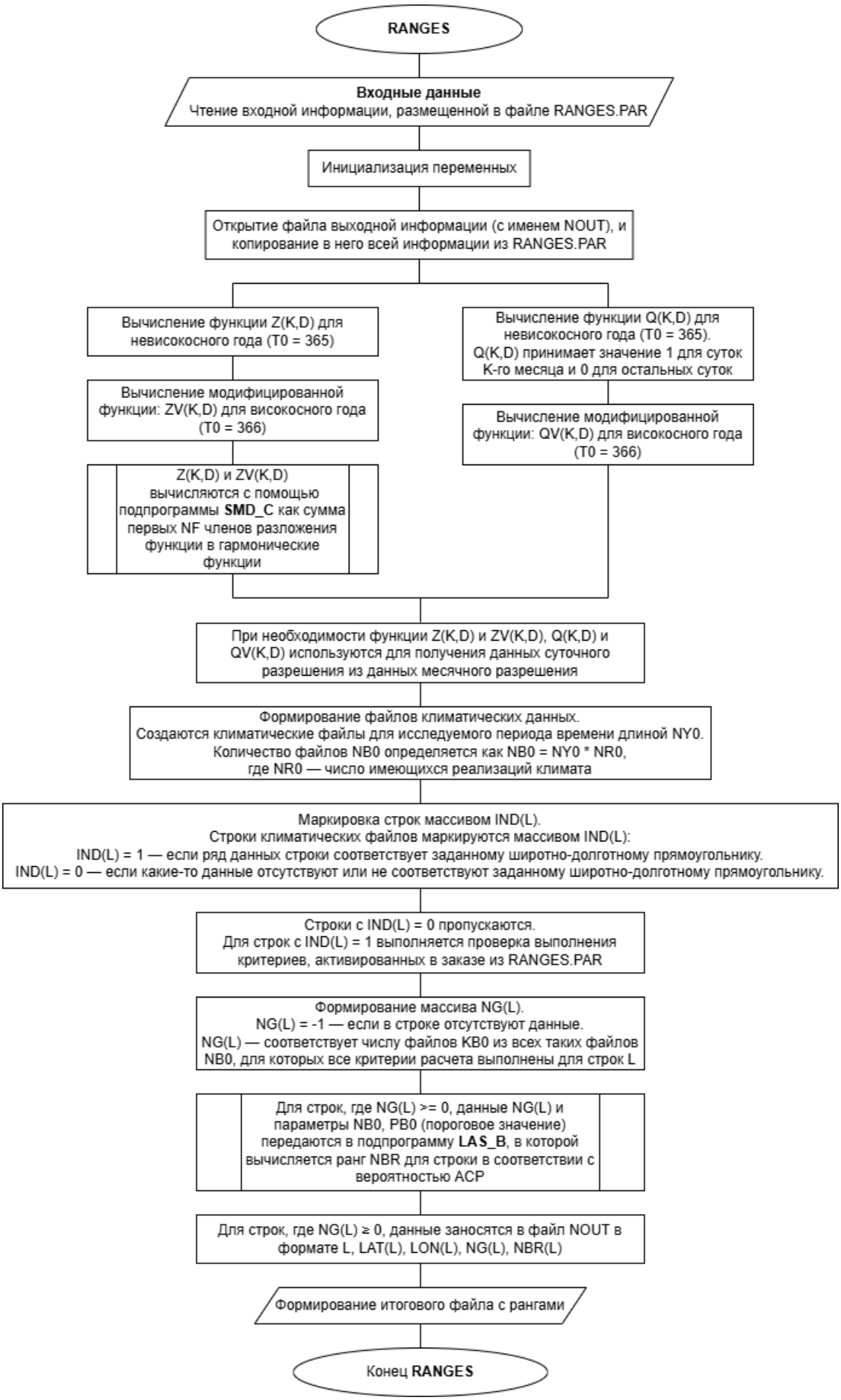


Рисунок 2.4 – Схема порядка действий в программе RANGES

Подпрограмма **SMD_C**:

– На вход этой программы поступает информация о годе YEAR, значении NF, последовательности из 12 значений среднемесячной температуры X(1), X(2), …, X(12).

– На выходе эта подпрограмма выдает значение T0 – продолжительность года YEAR в сутках (365 или 366) и последовательность значений среднесуточной температуры Y(1), Y(2), …, Y(T0).

– Эти вычисления проводятся в соответствии с формулами, приведенными в разделе 1.1 Схема порядка действий в подпрограмме SMD_C представлена на Рисунке 2.5.

– В подпрограмме SMD_C.FOR вызывается еще две подпрограммы: **MD.FOR** и **FCOEF.FOR**. Подпрограмма MD.FOR необходима для промежуточного преобразования значения года и номера дня в году в номер месяца и номер дня в пределах этого месяца. Подпрограмма FCOEF.FOR на основе известных значений количества дней в году, массива ступенчатой функции ({SER(1), SER(2), ..., SER(T0)}, имеющей соответствующие постоянные месячные значения) и номера гармоники для аппроксимации возвращает два коэффициента гармонических функций для косинуса и синуса, значения которых учитываются в подпрограмме SMD_C.FOR для получения массива среднесуточных значений {Y(1), Y(2), ..., Y(T0)}. Схема порядка действий в подпрограммах MD и FCOEF представлена на Рисунке 2.6.

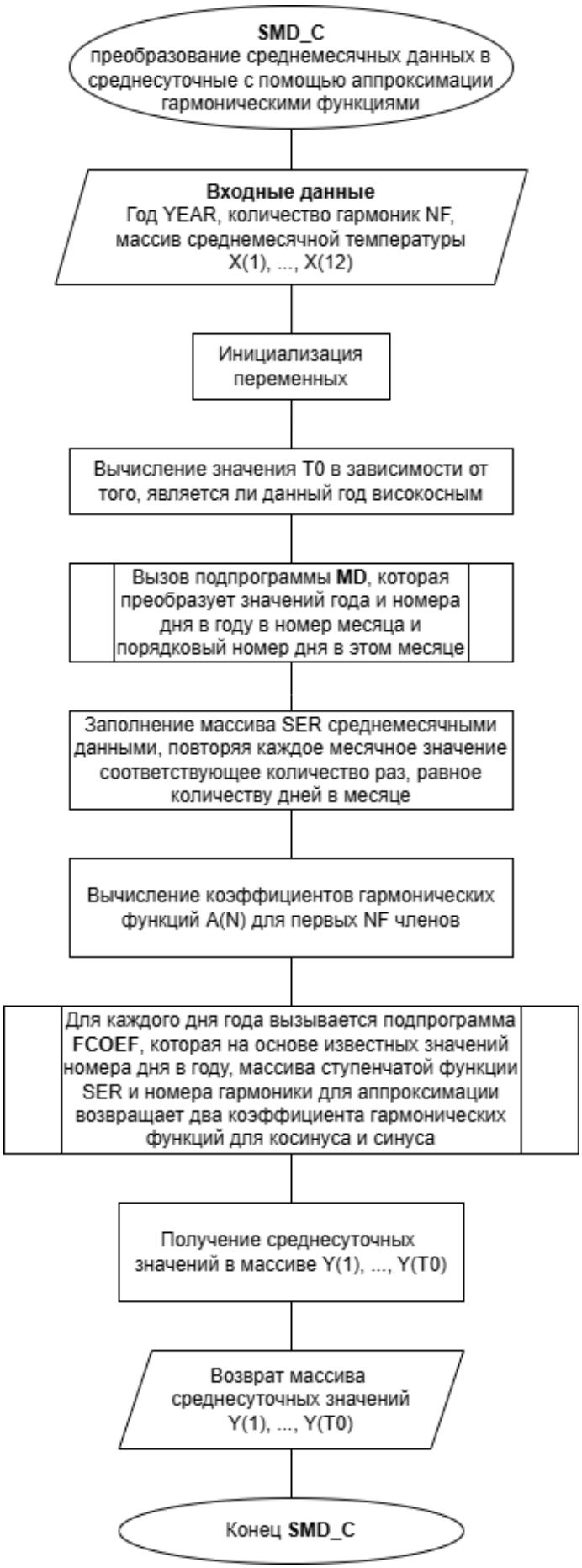


Рисунок 2.5 – Схема порядка действий в подпрограмме SMD_C

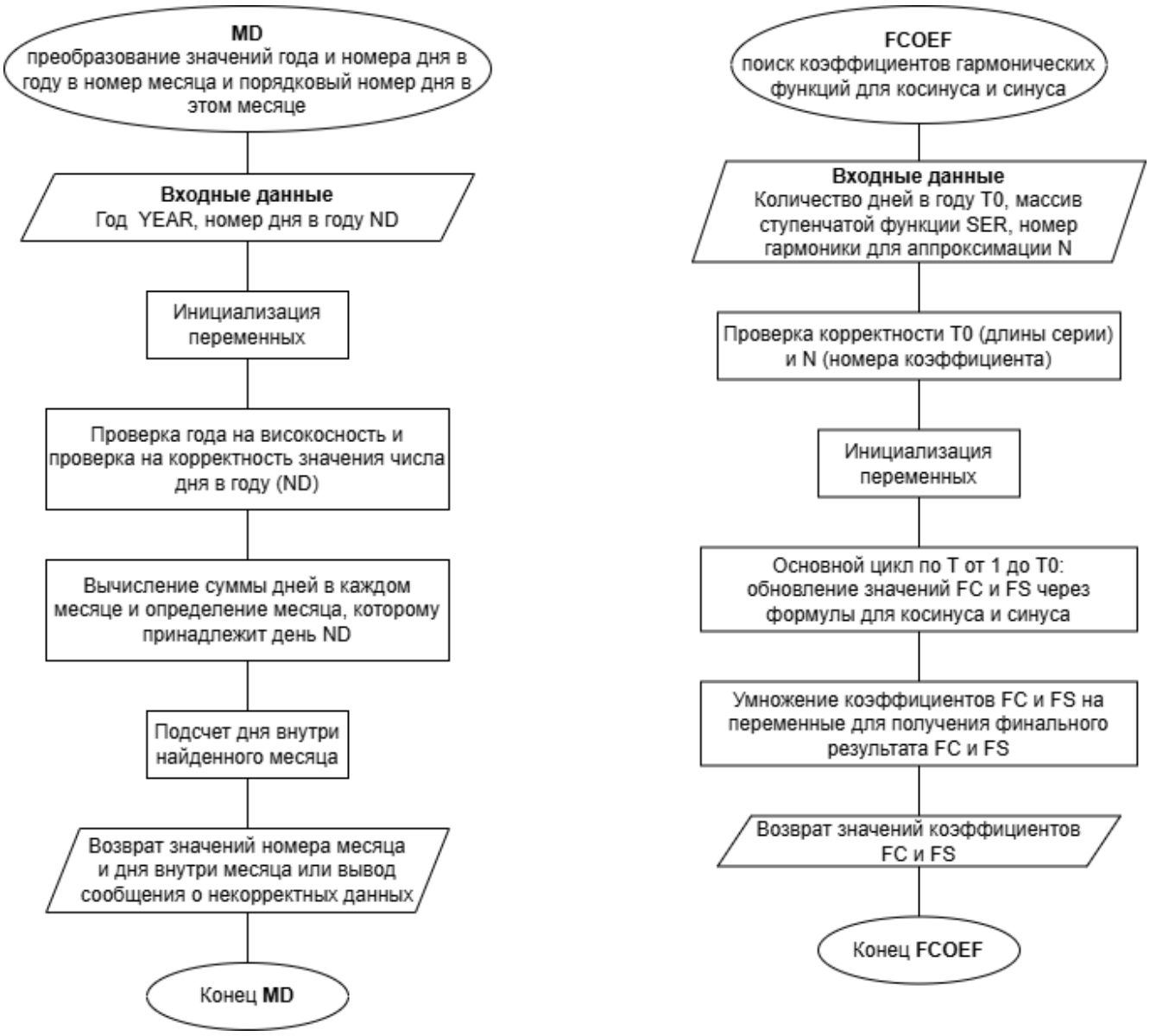


Рисунок 2.6 – Схема порядка действий в подпрограммах MD и FCOEF

Вторая из этих функций Q(K,D) при фиксированном K для суток K-го месяца принимает значение 1, а для остальных суток 0. Также вычисляются модификации этих функций для високосного года, т.е. при T0 = 366. Они обозначаются ZV(K,D) и QV(K,D).

Построенные функции впоследствии используются при необходимости для быстрого перехода от данных от температуры и осадках месячного разрешения для месяцев K = 1, 2, …, 12 к данным суточного разрешения. Это выполняется путем суммирования по K последовательности из 12 данных месячного разрешения о

температуре и осадках соответственно с Z(K,D) и Q(K,D) для невисокосного года и с ZV(K,D) и QV(K,D) для високосного.

Далее, формируется совокупность файлов с климатическими данными, которые соответствуют исследуемому периоду времени продолжительности NY0. Всего таких файлов NB0 = NY0 · NR0, где NR0 – число имеющихся реализаций модельного климата.

Затем массивом IND(L), L = 1, 2, …, L0, маркируются строки климатических файлов: L-я строка, относящаяся к точкам географического пространства (узлу пространственной сетки), принадлежащей заданному широтно-долготному прямоугольнику [LAL, LAU] × [LOL, LOU], маркируется числом 1 (IND(L) = 1), а остальные числом 0 (IND(L) = 0). Эта маркировка также учитывает наличие данных: если какое-то данное в строке отсутствует, то IND(L) = 0.

После этого в цикле по переменной L выполняется чтение последовательных строк L = 1, 2, …, L0. При этом информация тех строк, для которых IND(L) = 0, не обрабатывается. Это свойство – отсутствие данных – общее для строк всех используемых в данной работе совокупностей файлов климатической информации – и результатов расчета с помощью модели ИВМ РАН, и результатов расчета с помощью модели ГГО.

Для тех строк L каждого из файлов 1, 2, …, NB0, для которых IND(L) = 1, выполняется проверка выполнения тех критериев, которые активированы в заказе на расчет, находящемся в файле RANGES.PAR.

По результатам этого анализа формируется целочисленный массив NG(L):

– NG(L) = -1, если в L-й строке отсутствуют какие-либо данные;

– NG(L) равно числу файлов KB0 из NB0, для данных L-й строки которых все активированные в заказе критерии выполнены.

Для каждого такого L, что NG(L) ≥ 0, числа KB0 = NG(L) и NB0 вместе с заданным в файле RANGES.PAR пороговым значением PB0 поступают на вход подпрограммы **LAS_B(NB0,KB0,PB0,NBR)**.

Подпрограмма **LAS_B**:

– Эта подпрограмма в свою очередь имеет подпрограмму **BAYES**, которая в рамках байесовского подхода определяет распределение на отрезке [0, 1] параметра биномиального распределения, определяющего общее число единиц в совокупности результатов тестирования данных L-х строк NB0 анализируемых файлов на предмет выполнения всех активированных при расчете критериев. Теоретическое описание алгоритмов дано в разделе 1.3.

– Эта же подпрограмма **BAYES** выдает значение переменной ACP – вероятности того, что параметр биномиального распределения меньше порогового значения PB0.

– Исходя из значения $1 - ACP$, подпрограмма **LAS_B(NB0,KB0,PB0,NBR)** выдает значение ранга NBR. Он характеризует степень вероятности того (уверенности в том), что точка географического пространства, соответствующая L-й строке, принадлежит климатической области распространения рассматриваемого явления (см. раздел 1.3). Диапазоны вероятностей и словесные характеристики, приведенные в Таблице 2.2, соответствуют принятым в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), см. [Mastrandrea et al., 2010].

Таблица 2.2 поясняет, как в подпрограмме LAS_B определяется ранг NBR.

Схема порядка действий в подпрограмме LAS_B и BAYES представлена на Рисунке 2.7.

Таблица 2.2 – Определение ранга NBR программой LAS_B

Диапазон значений (1 – ACP)	**Ранг, NBR**	**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

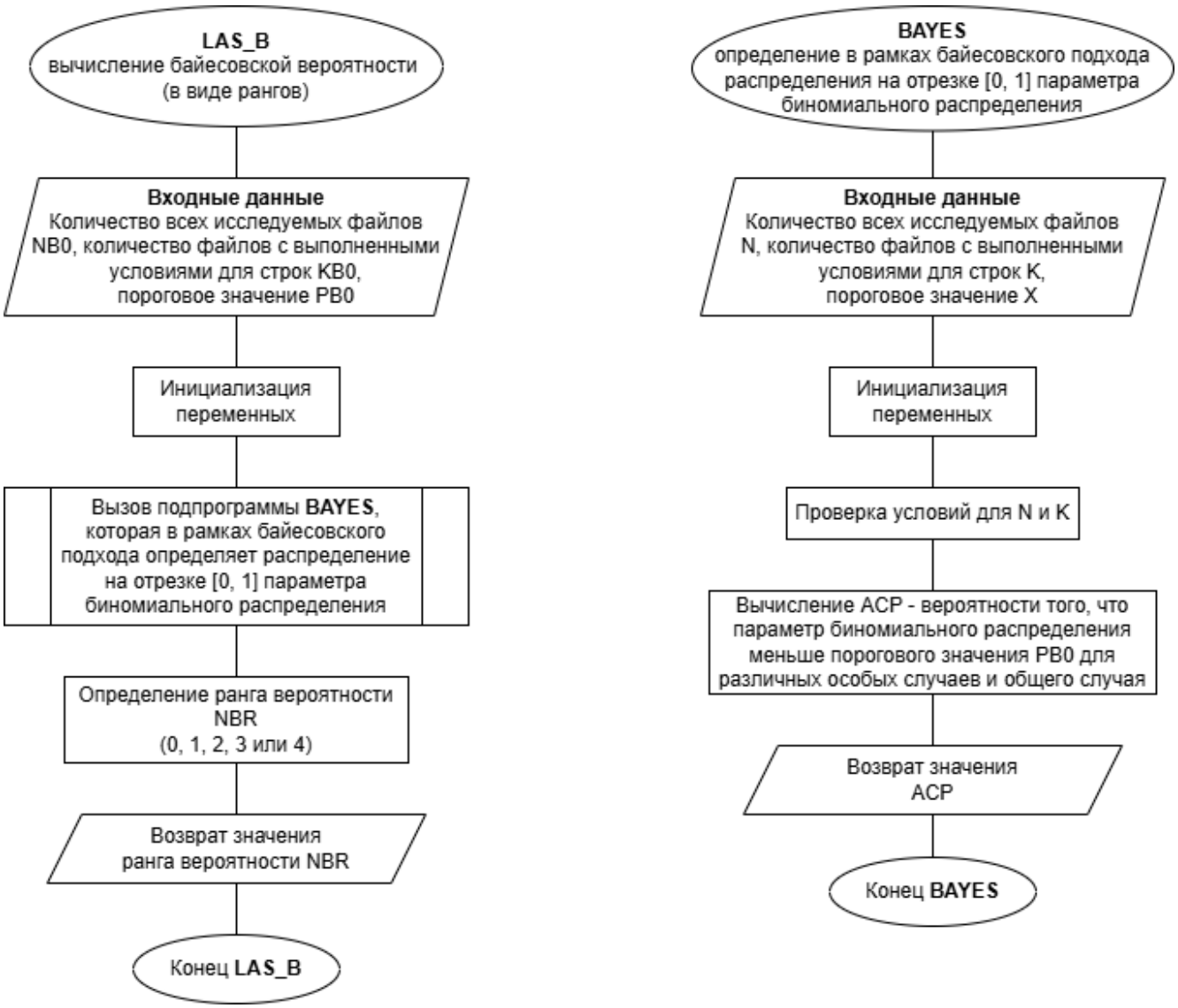


Рисунок 2.7 – Схема порядка действий в подпрограммах LAS_B и BAYES

И, наконец, результат анализа тех L-х строк NB0 файлов, в которых нет отсутствующих данных и которые характеризуют точки географического пространства (узлы пространственной сетки), входящие в заданный широтно-долготный прямоугольник, последовательно печатается в выходной файл NOUT:

L, LAT(L), LON(L), NG(L), NBR(L)

Текстовый файл NOUT поступает далее в систему для картографического представления с использованием данных (LAT(L),LON(L),NBR(L)), L = 1, 2, …, L0, NG(L) ≥ 0.

В качестве такой картографической системы используется, например, система QGIS, но может применяться и иная по выбору пользователя. Этот этап уже не выполняется системой RANGES.

Описание структуры и порядка расчета вычислительной системы RANGES представлено в работе [Богданович, 2025].

2.3. Заключение по Главе 2

Система RANGES позволяет выполнять расчетную оценку климатической области распространения природных явлений, исходя из критериев климатообусловленности и климатических данных – модельных и фактических (данных мониторинга климата).

В алгоритме системы RANGES реализован вероятностный подход – оценивается вероятность принадлежности точки географического пространства к климатической области распространения природного явления.

Общедоступность климатических данных, используемых в расчетах (открытые отечественные и зарубежные данные о результатах моделирования глобального и регионального климата), и ориентация на использование климатических критериев, представленных в научных публикациях, позволяют выполнять расчеты климатических областей распространения природных явлений широкому кругу пользователей.

Предложенные алгоритмы позволяют использовать для этого обычные персональные компьютеры. Для проведения даже глобальных расчетов в данной работе, расчетное время составляет до получаса.

Структура системы RANGES такова, что позволяет при необходимости добавлять дополнительные критерии распространения природных явлений.

Программная реализация алгоритмов системы RANGES выполнена с использованием общедоступной версии языка программирования FORTRAN.

Глава 3. Расчет климатической области распространения некоторых природных явлений

Теоретический подход к моделированию климатической области распространения природного явления с помощью совокупности климатических предикторов – гидрометеорологических величин или прикладных гидрометеорологических индексов, вычисляемые на их основе, изложен в главе 1 настоящей работы. В главе 2 представлена алгоритмическая структура системы RANGES, основанной на этом подходе и реализованной в форме комплекса вычислительных программ, снабженного пользовательским интерфейсом.

Цель данной главы – продемонстрировать эффективность разработанного подхода и построенной на его основе вычислительной системы при расчетной оценке:

– климатической области распространения в географическом пространстве (= климатических ареалов) опасных насекомых-вредителей сельскохозяйственных и лесных растений,

– территории, где частота сильных засух превышает пороговое значение, соответствующее хозяйственной целесообразности для культивирования зерновых,

– территории, где наблюдается доминирование теплой части года в календарном году,

а также продемонстрировать эффективность предложенного картографического решения для визуализации результатов расчетов.

При проведении расчетов климатической области распространения вида в географическом пространстве такая область понимается как климатический ареал, т.е. совокупность точек географического пространства, в которых климат допускает устойчивое существование видовой популяций при благоприятном сочетании остальных факторов среды.

При комментировании результатов визуализации расчетных климатических областей распространения явлений их условные границы определяются переходами вероятностных оценок от категории «маловероятно» к категории «средневероятно» или категории, соответствующей большей вероятности.

3.1. Климатический ареал средиземноморской плодовой мухи

3.1.1. Общая характеристика вида

Средиземноморская плодовая муха *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) представляет собой небольшое (3–5 мм в длину) двукрылое насекомое. Этот вид является одним из ключевых вредителей плодовых культур как в средиземноморском регионе, так и далеко за его пределами [Gabrieli, Scolari, 2016; Szyniszewska et al., 2016; Gilioli et al., 2022].

Изначально *C. capitata* имела ограниченную область распространения − в Восточной Африке к югу от Сахары [Nyamukondiwa, Terblanche, 2009]. Однако сегодня она стала обычным явлением не только в Африке, но и в тропических и субтропических районах Южной и Центральной Америки, на Ближнем Востоке, а также в Южной Европе [Магомедов, Атанов, 2012]. Более того, зарегистрированы случаи проникновения этого вида в Австралию, что свидетельствует о его высокой адаптивности и способности осваивать новые территории [FAO, 2013].

В России *C. capitata* была замечена на побережье Черного и Азовского морей, хотя устойчивые популяции пока не выявлены [Касаткин, Поушкова, 2014].

C. capitata обладает высокой степенью полифагии, поражая широкий спектр плодовых культур, что делает её особенно опасным вредителем. В рацион этой мухи входит более 200 видов фруктов и овощей. В число уязвимых культур входят пользующиеся широким спросом и востребованные на рынке груши, персики, абрикосы, сливы, алычовые, цитрусовые, а также тропические фрукты, такие как гуава, манго и грейпфрут [Магомедов, 2011; Liquido et al., 2015].

В случае инвазии *C. capitata* может быстро распространяться и вызывать существенные экономические потери. К примеру, в 1954 году она успешно

акклиматизировалась в Австрии, а к 1956 году в окрестностях Вены поражала от 90% до 100% урожая плодов. В южных регионах Германии связанный с *C. capitata* ущерб в некоторые годы достигал 80% для абрикосов и до 100% для персиков [Магомедов, 2011]. В Греции также были задокументированы значительные потери урожая груш, достигавшие 45–78% от общей площади их посадки [Papadopoulos et al., 2001]. Во Флориде (США) после проникновения *C. capitata* в 1956–1957 годах затраты на ликвидацию очага составили 11 миллионов долларов США [Васютин и др., 2002]. Уничтожение одной из вспышек в районе залива Тампа в том же штате в 1997 году обошлось уже в 25 миллионов долларов США [Szyniszewska, 2013]. В настоящее время для предотвращения завоза этого вредителя в такие штаты США, как Флорида и Калифорния, ежегодно затрачивается десятки миллионов долларов США [Szyniszewska et al., 2016].

Помимо прямых экономических убытков, связанных с утратой урожая, значительное беспокойство вызывает и косвенный ущерб. Продукция, поступающая из стран, где обитает *C. capitata*, подвергается строгим карантинным мерам во многих регионах, что осложняет её экспорт и влияет на мировые аграрные рынки [Elekcioglu, 2013].

На большей части территорий России средиземноморской плодовой мухе пока не удалось успешно акклиматизироваться из-за её неустойчивости к низким зимним температурам. Несмотря на то, что очаги её распространения на побережье Черного моря существуют, они остаются нестабильными [Магомедов, Атанов, 2012]. Однако изменение климата, в том числе потепление, может способствовать её акклиматизации, что приведет к значительным экономическим потерям в сельском хозяйстве. Предполагаемые изменения климата могут повлиять на распространение и численность *C. capitata* на юге России и сделать доступными для этого вредителя обширные территории страны.

Изложим результаты, полученные в отношении изменения расчетного климатического ареала средиземноморской плодовой мухи, следуя работе [Богданович и др., 2023а].

3.1.2. Требования к климату

Современные данные о распространении *C. capitata* получены нами из Глобального информационного фонда по биоразнообразию и материалов Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций [FAO, 2013].

Этот вид демонстрирует способность к существованию в широком диапазоне температур, что подтверждается как результатами лабораторных экспериментов [Nyamukondiwa et al., 2010], так и полевых исследований [Nyamukondiwa et al., 2013]. Потенциально зона обитания этого вида охватывает территории, расположенные в полосе от 44° до 53° северной широты [Магомедов, Атанов, 2012; Nyamukondiwa et al., 2010]. Однако климатические барьеры, ограничивающие глобальное распространение *C. capitata*, по-прежнему остаются предметом научных дискуссий [Gilioli et al., 2022].

При описании климатического ареала *C. capitata* в данной работе использовались следующие климатические критерии, определяющие пределы распространения для этого вида [Магомедов, Атанов, 2012]:

– сумма активных температур (САТ), т.е. годовая сумма среднесуточных значений температуры, превышающих 10°С, должна быть выше 2700°С; это значение соответствует северным границам фактического ареала вида; температура 10°С является пороговой для остановки развития личинок *C. capitata*;

– среднемесячные значения температуры декабря, января и февраля должны быть положительными, что обеспечивает возможность успешной зимовки куколок *C. capitata*;

– сумма осадков в каждый из месяцев с декабря по февраль должна превышать 13 мм, что является необходимым условием для поддержания жизненного цикла вида.

Следует уточнить, что в профильной научной литературе вместо САТ в ряде случаев приводится сумма эффективных температур (СЭТ) для различных регионов обитания вида. С помощью этого показателя также анализируется причинно-следственные связи между климатическими параметрами и ущербом,

нанесенным *C. capitata* сельскому хозяйству в Австрии и Германии, а также оценивается вероятность акклиматизации холодостойкой расы *C. capitata* до 53° с. ш. в России при СЭТ в диапазоне 2070–3500°С [Магомедов, Атанов, 2012]. Однако, как отмечают Попова и др. [2019], области с СЭТ ≥ 3000°С находятся южнее российской границы. В странах бывшего СССР это наблюдается только в южной части Туркменистана, в районе границы с Ираном и Афганистаном [Попова и др., 2019].

3.1.3. Расчетный климатический ареал

В данном разделе представлены результаты расчетной оценки той части современного климатического ареала средиземноморской плодовой мухи *C. capitata*, которая расположена на территории России, и ее возможного изменения в XXI веке при изменении климата. Для расчета использована система RANGES.

В качестве климатических данных на вход системы были направлены данные о климате, предоставленные Климатическим центром Росгидромета (КЦР) за периоды 1990–1999 гг. (базовый период), 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. [Школьник, Ефимов, 2015]. Эти модельные оценки климатов соответствовали сценариям RCP4.5 и RCP8.5 антропогенного воздействия на климатическую систему Земли [IPCC, 2014; Семенов, Гладильщикова, 2022]. Эти сценарии отражают соответственно средний и высокий уровни антропогенного воздействия в XXI веке.

Эти данные были откорректированы с использованием процедуры, описанной в разделе 1 главы 2. Цель корректировки – достижение максимального соответствия расчетного климата базового периода данным климатического мониторинга за 1990–1999 гг. Откорректированные массивы данных обозначены как КЦР^{a}, где «*a*» указывает на внесенные поправки («adjusted»). Каждый из климатов представлен 50 реализациями.

Для более широких, глобальных и континентальных оценок использовались данные климатической модели, разработанной Институтом вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН). Полученный массив данных

обозначается ИВМ, а после корректировки – ИВМ^a. Климат представлен пятью реализациями для исторического периода 1990–1999 гг.

На Рисунке 3.1 представлена часть расчетного климатического ареала *C. capitata*, располагающегося в Евразии и Африке к северу от 25° с. ш. При построении данной карты-схемы использовались климатические данные массива ИВМ^a. Вероятность того, что определенная точка принадлежит климатическому ареалу вида, характеризовалась при помощи категорий: от «маловероятно» (балл 0, белый цвет), до «практически достоверно» (балл 4, темно-коричневый цвет) (см. раздел 3 главы 1).

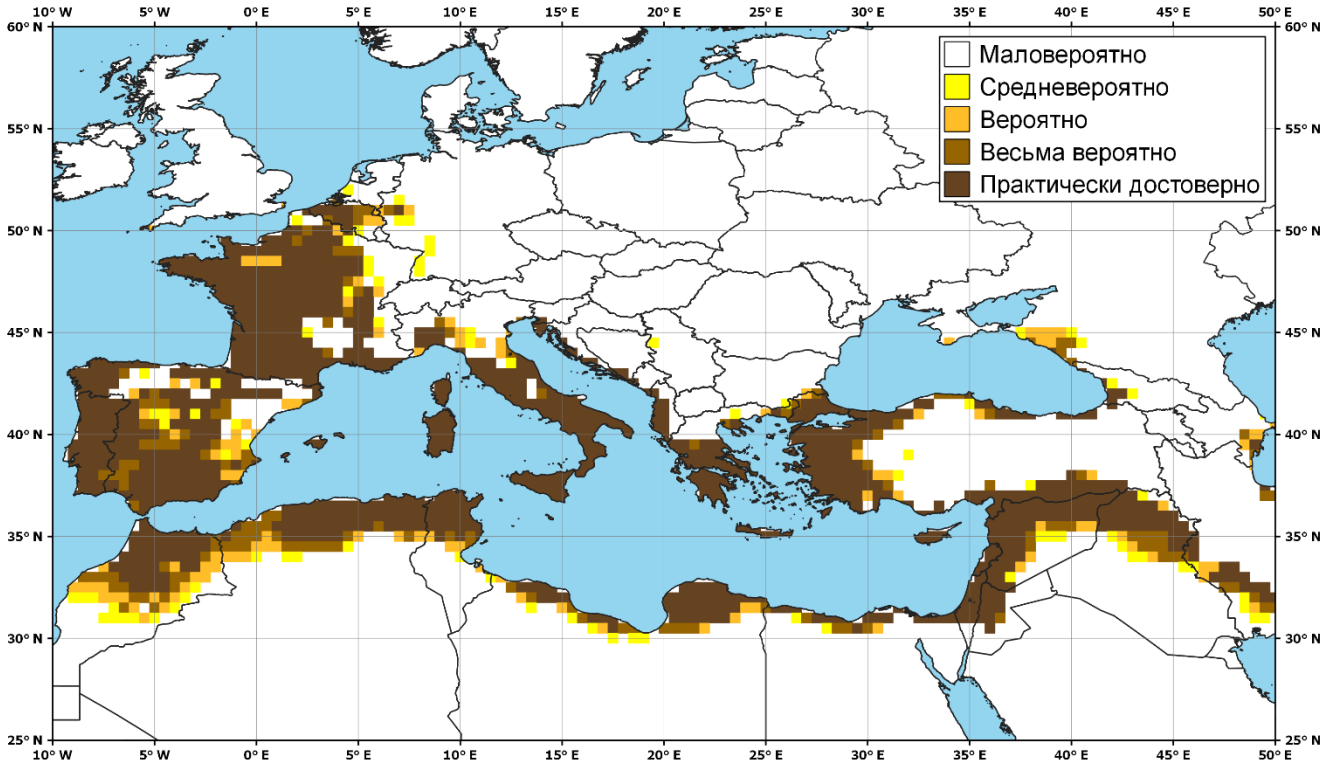


Рисунок 3.1 – Расчетный климатический ареал средиземноморской плодовой мухи в изображенной части Северного полушария в условиях климата ИВМ^a для 1990–1999 гг.

На Рисунке 3.2 показан расчетный климатический ареал средиземноморской плодовой мухи на территории России для периода 1990–1999 гг. в условиях климата КЦР^a. Для этого временного отрезка на территории России климатический

ареал *C. capitata* представлен узкой полосой вдоль побережья Черного моря и ограниченными локациями на западном побережье Каспийского моря. Для указанных областей большая часть расчетного ареала представлена категорией «практически достоверно». Лишь северная граница демонстрирует более низкие уровни вероятности того, что точка входит в климатический ареал.

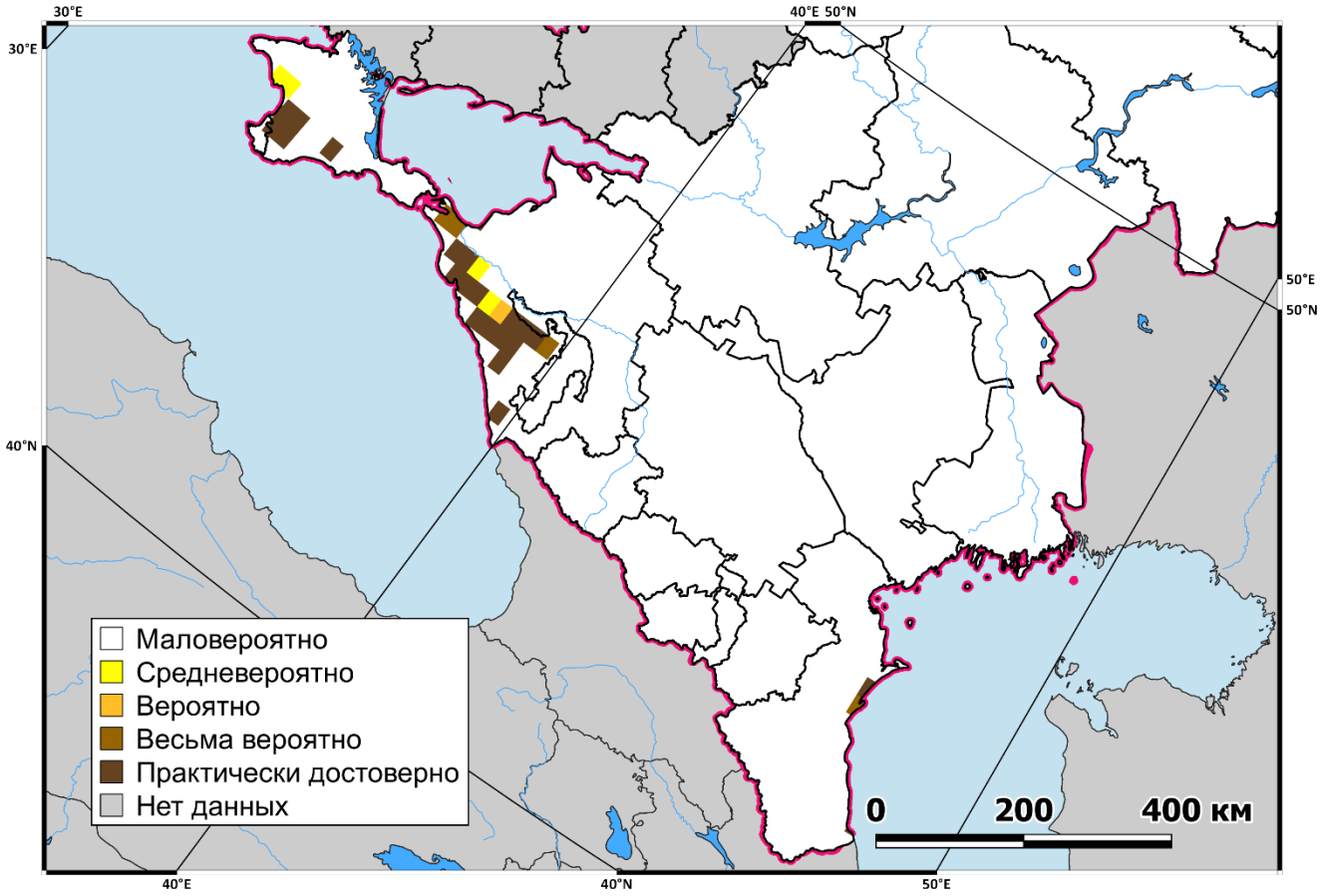


Рисунок 3.2 – Расчетный климатический ареал средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР^{a} для 1990–1999 гг.

Сравнение Рисунков 3.1 и 3.2 свидетельствует о схожести контуров климатического ареала *C. capitata* для 1990–1999 гг., рассчитанного по различным массивам климатических данных – КЦР^{a} и ИВМ^{a}. Оба ареала демонстрируют аналогичные очертания, охватывают крайне небольшую часть территории России.

На Рисунках 3.3, 3.4, 3.5 и 3.6 представлены изменения балльной оценки вероятности принадлежности точек к климатическому ареалу *C. capitata* на

территории России согласно климатическим данным массива КЦР^a в условиях сценариев RCP4.5 и RCP8.5 для климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. по сравнению с климатом базового периода 1990–1999 гг. Карты-схемы иллюстрируют изменение климатического ареала в соответствии со словесной характеристикой изменений и цветовым воплощением балльных оценок, описанных в разделе 3 главы 1.

Согласно данным, представленным на этих картах, северная граница климатического ареала может продвинуться значительно на север и вглубь материка от побережий Черного и Каспийского морей. В Краснодарском крае возможно расширение климатической области распространения *C. capitata* до границы с Ростовской областью на севере и со Ставропольским краем на востоке в условиях климата 2050–2059 гг. массива КЦР^a в условиях сценария RCP8.5. Практически на всей территории Севастополя, Республик Крым и Адыгеи ожидаются благоприятные климатические условия для заселения средиземноморской плодовой мухи к середине XXI века. Кроме этого, климатический ареал *C. capitata* также охватит значительные территории в Дагестане, расположенные вдоль западного побережья Каспийского моря.

Отметим, что для узкой полосы вдоль всего черноморского побережья России в массиве КЦР^a для всех сценариев расчетные климатические данные отсутствуют. Это связано с особенностями региональной климатической модели ГГО, что сказывается на полученных результатах расчетов. Это объясняет наличие белого фона соответствующих ячеек на Рисунках 3.2–3.6. Однако другое исследование Богдановича и др. [2021б] показывает, что благоприятные климатические условия для обитания средиземноморской плодовой мухи распространяются вдоль побережья от Анапы до Геленджика.

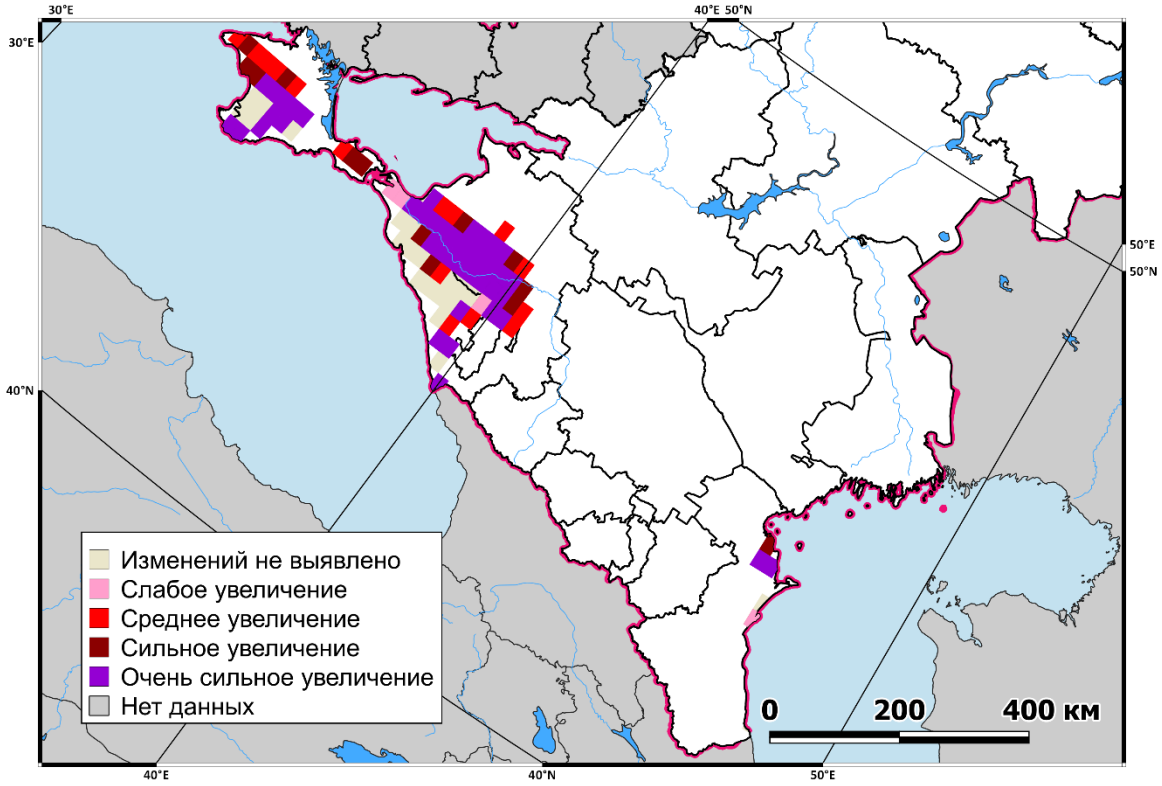


Рисунок 3.3 – Изменение климатического ареала средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР[a] при сценарии RCP4.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

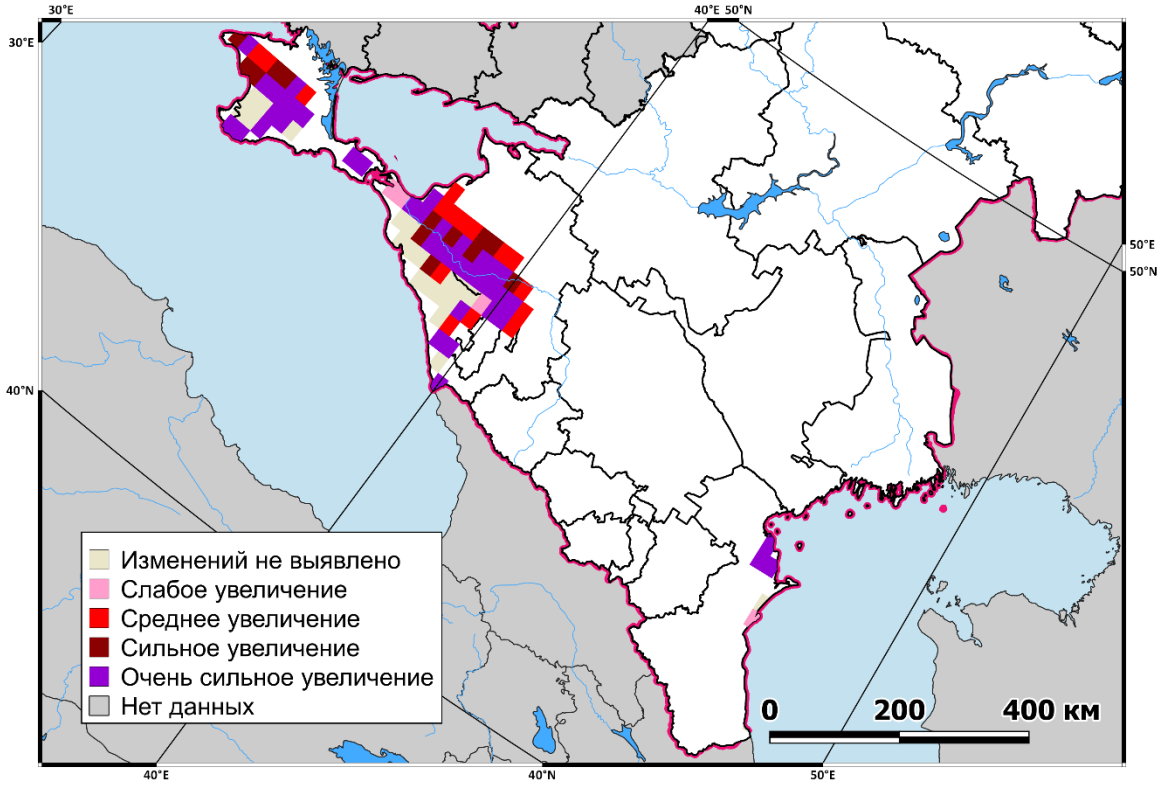


Рисунок 3.4 – Изменение климатического ареала средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР[a] при сценарии RCP4.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

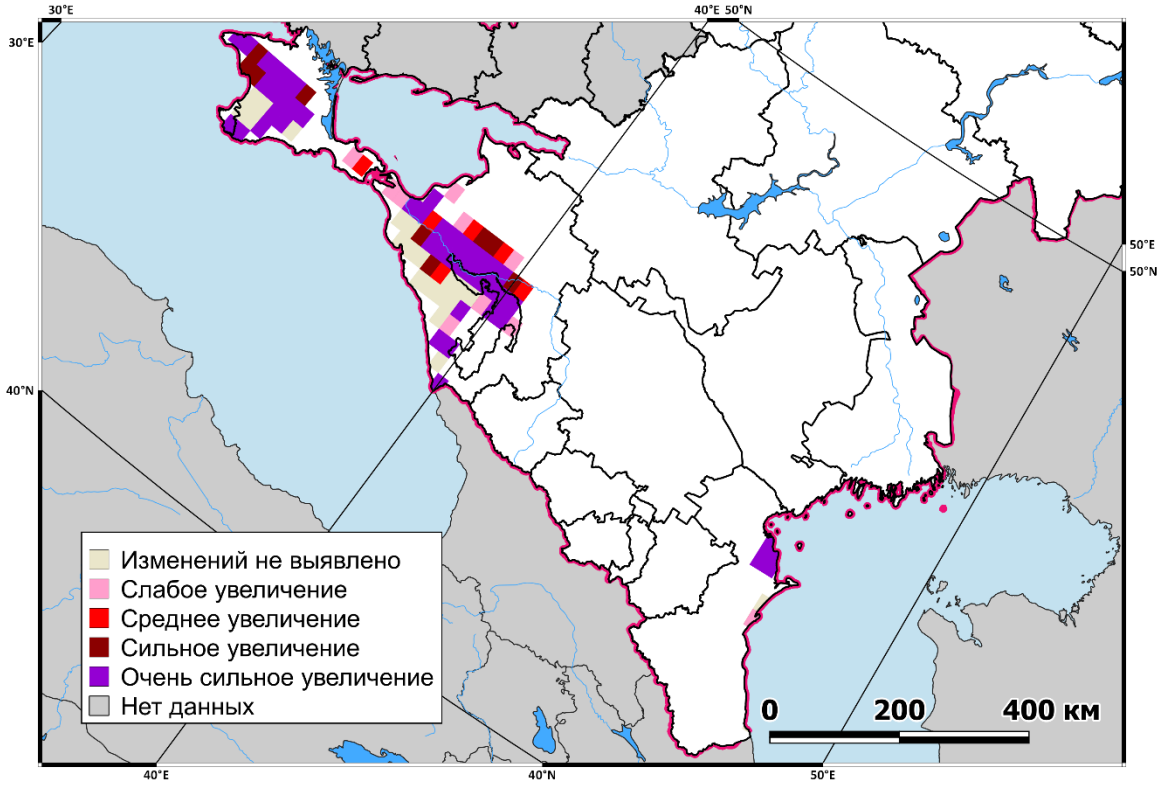


Рисунок 3.5 – Изменение климатического ареала средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР[a] при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

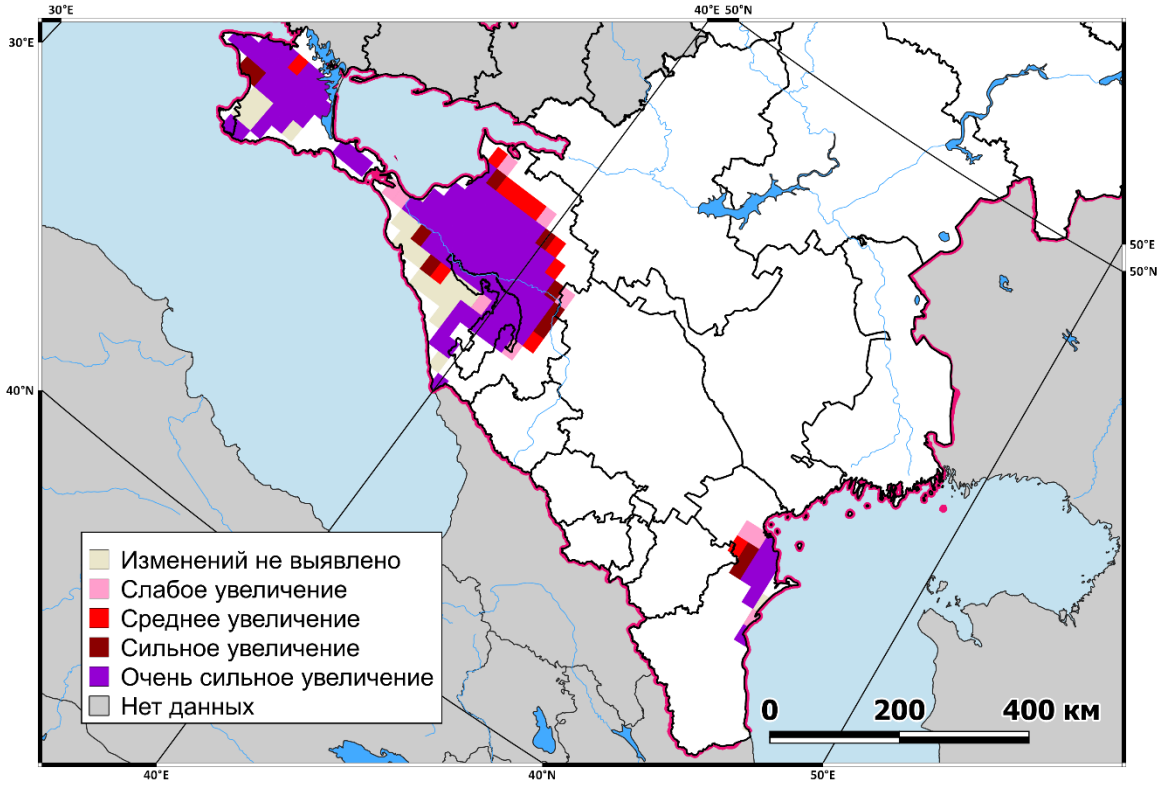


Рисунок 3.6 – Изменение климатического ареала средиземноморской плодовой мухи на территории России в условиях климата КЦР[a] при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

Другие исследования, например Gilioli et al. [2022], кроме климатических ареалов акцентируют внимание также на изменении плотности популяций *C. capitata*. Климат, соответствующий периоду 2016–2025 гг. в условиях сценария RCP4.5, был принят в качестве базы сравнения с климатами, соответствующими периодам 2026–2035 гг. и 2046–2055 гг., рассчитанными в условиях сценария RCP8.5. Результаты расчетов с помощью региональных моделей проекта CIMIP5 использовались для описания будущих климатов для Европы. Настройка моделей базировалась на современных данных о распространении вида, предоставленных Глобальным информационным фондом по биоразнообразию. Несмотря на различия в методологии, модельные прогнозные ареалы этого исследования (см. Рисунок 3.7) оказались сходными с полученными в нашем исследовании.

Таким образом, современный климатический ареал *C. capitata* занимает весьма ограниченную часть территории России. Климатические ареалы этого вида на территории России, рассчитанные для периода 1990–1999 гг. на основе климатических данных массивов КЦР^{a} и ИВМ^{a}, имеют сходные контуры. Фактические находки *C. capitata* на территории России приурочены к этим расчетным климатическим областям распространения вида [Касаткин, Поушкова, 2014; Миносян и др., 2018].

Расчетные изменения климатического ареала *C. capitata* в условиях климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг., соответствующих массивам КЦР^{a}4.5 и КЦР^{a}8.5, по сравнению с 1990–1999 гг. свидетельствуют о расширении подходящих для этого вида областей пространства. Ожидается, что климатическим ареалом будут охвачены практически весь Краснодарский край, территория Крыма и Республика Адыгея. Это представляет особо серьезную проблему, так как в этих регионах страны выращивается значительное количество плодовых культур.

Агроклиматический анализ, проведенный в рамках данного исследования, подчеркивает необходимость усиления карантинных мер уже в текущей ситуации. Также рекомендуется заблаговременная подготовка средств и программ борьбы со средиземноморской плодовой мухой, что позволит избежать существенных потерь в производстве плодоводческой продукции в будущем.

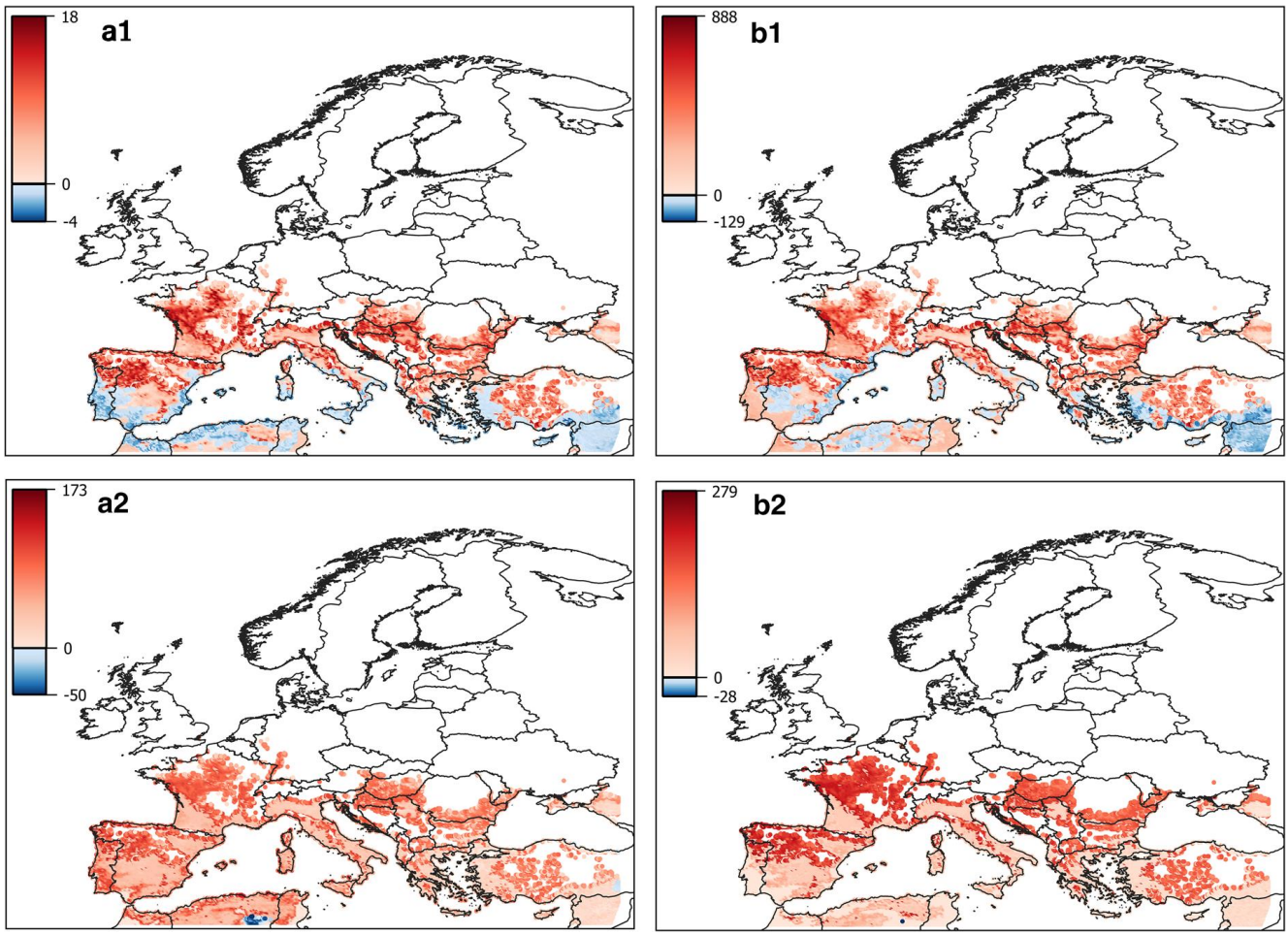


Рисунок 3.7 – «Тепловые» карты, показывающие прогнозируемые изменения между будущим (2046–2055 гг., сценарий RCP8.5) и базовым (2016–2025 гг., сценарий RCP4.5) климатическими периодами. Рисунки a1 и b1 показывают изменение средней численности (выраженной в виде среднего числа особей на единицу пространства) взрослых особей *C. capitata* и личинок соответственно. Рисунки a2 и b2 показывают изменение активности, выраженную количеством дней, в течение которых число взрослых особей равно или превышает одну особь на единицу пространства, а число личинок равно или превышает 30 особей на единицу пространства, соответственно. [Gilioli et al., 2022]

3.2. Климатический ареал хлопковой совки

3.2.1. Общая характеристика вида

Хлопковая совка *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808), (Lepidoptera: Noctuidae) является одним из опаснейших насекомых-вредителей сельскохозяйственных культур в мировом масштабе [Lammers, MacLeod, 2007; Sharma et al., 2010; Haile et al., 2021; Riaz et al., 2021; Yadav, 2022]. В России и соседних странах она повреждает широкий спектр как культурных растений (например, томатов, нута, гороха, хлопчатника, табака, сорго и других), так и дикорастущих (канатник Теофраста, щирица, конопля, паслен, дурман, лебеда и др.) [Богачев, 1954; Полоскина, 1962; Фефелова, Фролов, 2007; Афонин и др., 2008; Матов, Кононенко, 2012; Черкашин и др., 2014; Артохин и др., 2017]. Ежегодный ущерб от её деятельности оценивается более чем в 5 миллиардов долларов США [Tay et al., 2013].

Хлопковая совка сегодня считается одним из самых широко распространённых насекомых по всему миру. Её ареал охватывает Африку, Азию, Европу и Австралию, а в последние десятилетия она проникла также в Южную и Центральную Америку, где расширила своё распространение [Murúa et al., 2014; Kriticos et al., 2015; Jones et al., 2019; *Helicoverpa armigera* (cotton bollworm), 2021; EPPO, 2024].

Благодаря своей высокой миграционной способности, этот вид регулярно обнаруживается за пределами зон, где он может полноценно развиваться. Например, летом бабочки *H. armigera* встречаются на севере Европы вплоть до 59º с. ш., хотя для полного цикла развития им подходят более южные районы. Ещё в середине XX века северная граница обитания в Европе находилась на уровне 40° с. ш., но с потеплением климата она сдвинулась более чем на 500 км на север, преодолев отметку в 45° с. ш. [Lammers, MacLeod, 2007].

Основные зоны вредоносности хлопковой совки на территории бывшего СССР включают Закавказье (Азербайджан), Северный Кавказ, степные и лесостепные регионы Восточно-Европейской равнины, орошаемые низменности и предгорья Средней Азии, а также южную часть Дальнего Востока. На территории

современной России в последние десятилетия ареал хлопковой совки существенно расширился. По сравнению с первой половиной XX века [Алфераки, 1907; Кожанчиков, 1941; Горышин, 1958], зона её вредоносности продвинулась примерно на 700 км к северу, захватив территории от степных зон до южных областей тайги и северной лесостепи [Говоров и др., 2013; Ченикалова, Коломыцева, 2021].

Исследования отечественных и зарубежных специалистов подтверждают ключевую роль условий среды, особенно климатических факторов, в распространении и развитии хлопковой совки [Кожанчиков, 1938; Горышин, 1958; Казанок, 2009; Хромова, 2011; Maelzer, Zalucki, 1999; Liu et al., 2006; Dalal, Arora, 2016; Huang, 2021; Bapatla et al., 2022 и др.]. На жизненный цикл насекомого особое влияние оказывает температура, что делает решающими некоторые критические периоды, такие как начало питания гусениц, завершение их развития осенью, зимовка куколок и вылет имаго весной [Фефелова, 2007].

Ниже излагаются результаты расчета климатического ареала хлопковой совки на территории России и его изменения при изменении климата в XXI веке, полученные с применением методологии, описанной в главе 1, и опубликованные в работах [Ясюкевич, Богданович, 2021; Богданович и др., 2025]. Расчет производился с использованием системы RANGES, описанной в главе 2.

3.2.2. Требования к климату

Развитие хлопковой совки *H. armigera* определяется гидротермическими условиями и реакцией на фотопериод [Mironidis, Savopoulou-Soultani, 2012; Mironidis, 2014]. Многие исследования, посвящённые термическим требованиям этого вида, основываются на расчёте сумм эффективных температур (СЭТ). Существуют также публикации, отражающие результаты исследований, выполненных в лабораторных условиях. Однако данные, полученные в естественных условиях, более универсальны для использования при моделировании.

В Узбекистане было установлено, что для развития хлопковой совки требуется СЭТ 550°C при температурном пороге 11°C. Это значение остаётся

стабильным даже при изменении влажности (40–85%) [Ларченко, 1968]. Исследования в Краснодарском крае подтвердили, что эти параметры позволяют точно прогнозировать развитие популяции [Фефелова, 2007]. Для луганской популяции СЭТ для одного поколения составила примерно 500°C при температурном пороге 10°C, однако методика расчётов в данном исследовании не уточняется [Кузьминский, Федоренко, 2014].

Для построения климатического ареала хлопковой совки с помощью системы RANGES в данной работе использовались предложенные К.И. Ларченко [1968] значения СЭТ (550°C) и температурного порога (11°C). Эти параметры неоднократно верифицировались в различных природно-климатических условиях и упоминаются в исследованиях как значимые экологические параметры вредителя [Ли, 1998; Фефелова, 2007; Церковная, Черная, 2017; Чумаков, Кузнецова, 2008].

При расчете, результаты которого представлены в следующем разделе, использовались климаты, соответствующие массиву КЦР^{a} для 1990–1999 гг. (базовый период), 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. в условиях сценария RCP4.5 и RCP8.5.

3.2.3. Расчетный климатический ареал

На Рисунке 3.8 представлен результат расчета климатического ареала хлопковой совки для климата 1990–1999 гг.

На Рисунке 3.8 видно, что большая часть расчетного климатического ареала характеризуется уровнем «практически достоверно», тогда как меньшая уверенность имеет место вдоль северной границы ареала.

Сравнение наших результатов (Рисунок 3.8) с данными из «Агроатласа...» [Афонин и др., 2008, раздел [Чумаков, Кузнецова, 2008]] (Рисунок 3.9) показывает их значительное сходство. Главное отличие заключается в подходах: наша оценка основывается на вероятностных характеристиках вхождения точки в климатический ареал, тогда как в «Агроатласе...» представлены зоны фактически зарегистрированной вредоносности, основанные на данных научных публикаций.

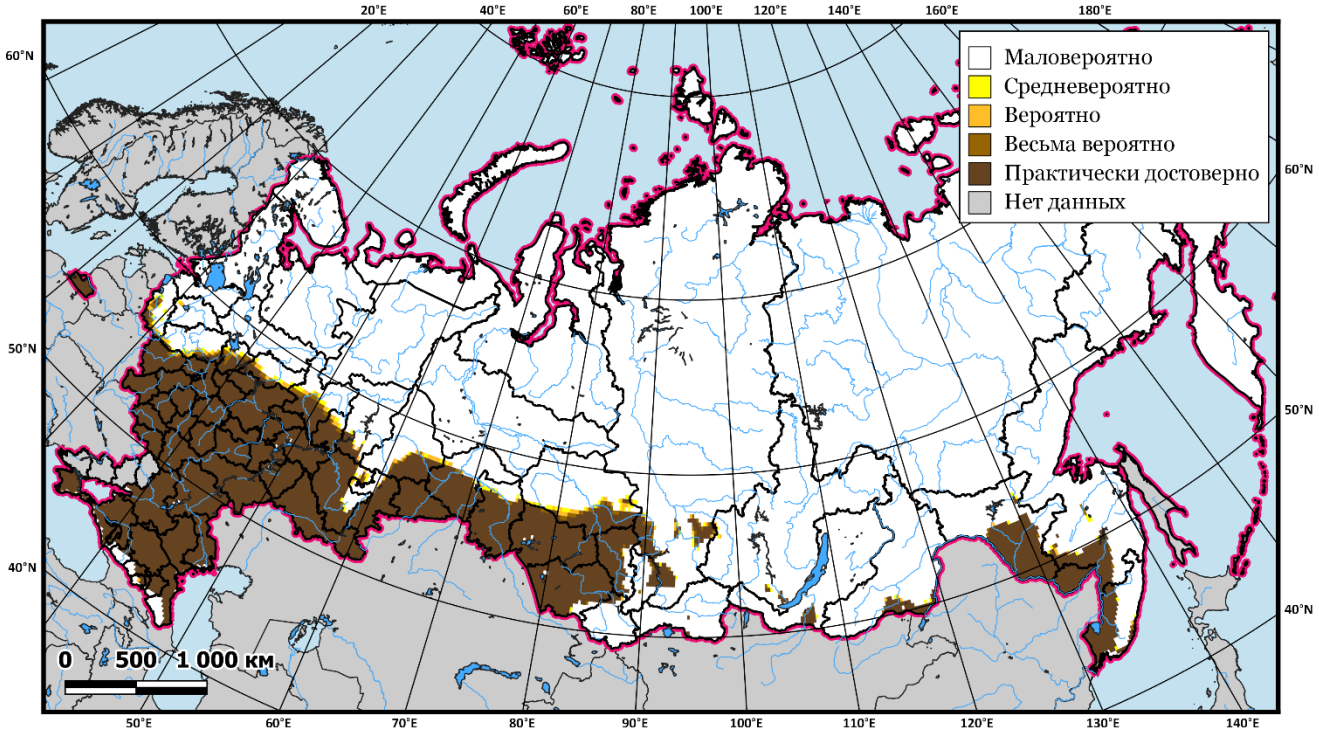


Рисунок 3.8 – Расчетный климатический ареал хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР[a] для 1990–1999 гг.

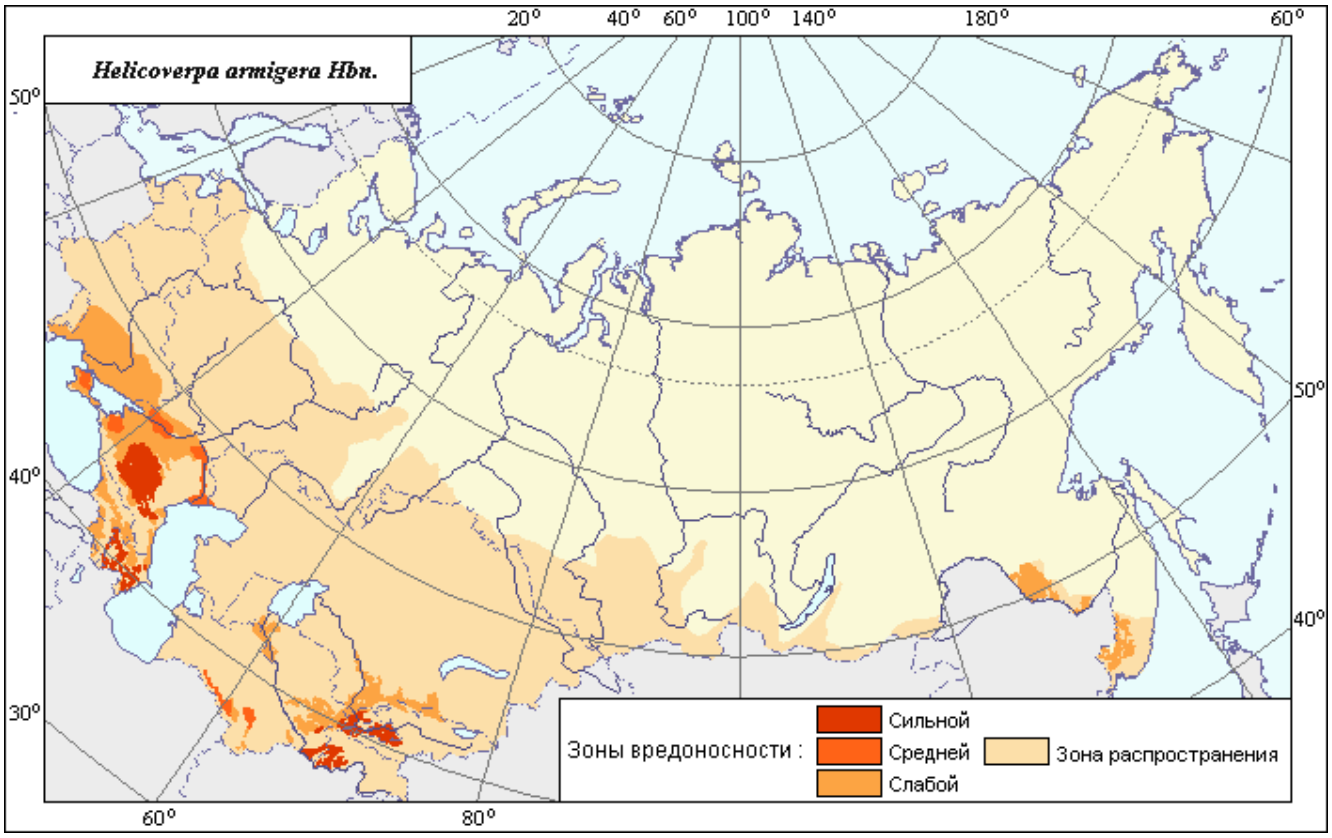


Рисунок 3.9 – Ареал хлопковой совки, приводимой в «Агроатласе…» [Афонин и др., 2008, раздел [Чумаков., Кузнецова, 2008]]

Количественную степень сходства между двумя ареалами можно оценить, используя, в частности, коэффициент флористической общности – бинарную метрику сходства Жаккара [Jaccard, 1901]. Для расчета этого коэффициента необходимо знать количество видов, присутствующих на двух изучаемых участках, а также количество видов, общих для обоих участков.

По аналогии с метрикой Жаккара можно ввести следующий коэффициент сходства:

$$K = \frac{S_{12}}{S_1 + S_2 - S_{12}}, \quad (3.1)$$

где, S_1 – количество ячеек сетки размером 0.5° × 0.5° по данным первого источника (в данном случае – расчет модели КЦР^a);

S_2 – количество ячеек сетки размером 0.5° × 0.5° по данным второго источника (в данном случае – данные из «Агроатласа…» [Афонин и др., 2008, раздел [Чумаков., Кузнецова, 2008]]);

S_{12} – количество ячеек, общих для двух наборов данных.

После предварительной обработки, включавшей приведение данных из двух источников к единой картографической проекции и их разделение на ячейки размером 0.5° × 0.5°, коэффициент сходства был рассчитан и составил 0.61. Этот результат можно считать приемлемым, учитывая различия в климатических периодах исследований, а также тот факт, что в первом случае представлена климатическая, а не фактическая область распространения, как во втором случае.

Согласно нашим результатам, климатический ареал хлопковой совки не охватывает высокогорья Северного Кавказа и территории севернее 59° с. ш. Это не соответствует данным наблюдений. Такое расхождение может объясняться высокой миграционной способностью этого насекомого, особи которого способны временно появляться в регионах с неподходящими климатическими условиями. В то же время климатический ареал на юге Дальнего Востока оказывается шире фактического: он захватывает юг Хабаровского края, тогда как в «Агроатласе...»

учтены лишь Приморский край, Амурская область и Еврейская автономная область. Как уже отмечалось ранее, фактический ареал может быть у́же климатического ареала, рассчитанного по определенной совокупности гидрометеорологических переменных.

Рисунки 3.10 и 3.11 демонстрируют изменения в оценках вероятности принадлежности точки географического пространства климатическому ареалу *H. armigera* для климатов массива КЦР^{a}, соответствующих 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг. (базовый период) в условиях сценариев RCP4.5 и RCP8.5. Эти данные указывают на то, что на Европейской части России и в Западной Сибири климатический ареал хлопковой совки может продвинуться севернее 60° с. ш., а также охватить более обширные южные районы Восточной Сибири и Дальнего Востока, чего не наблюдалось в базовый период.

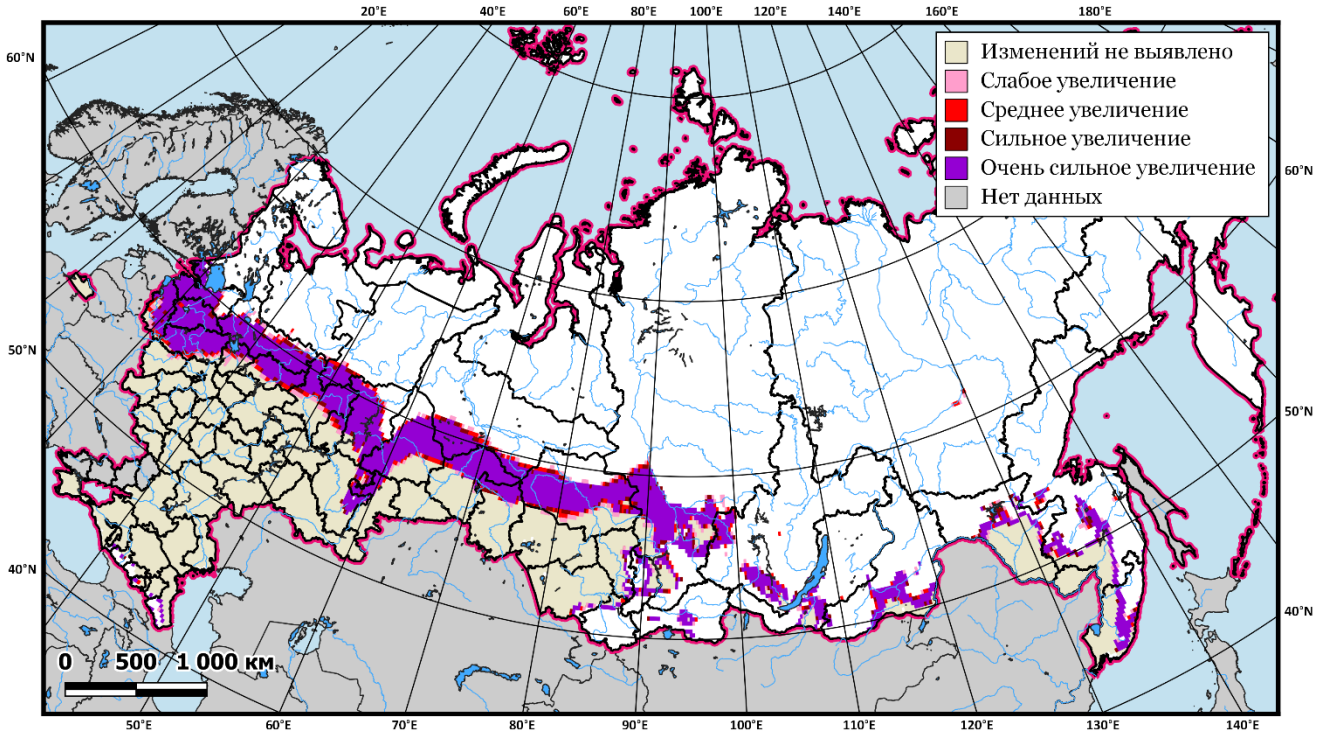


Рисунок 3.10 – Изменение расчетного климатического ареала хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP4.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

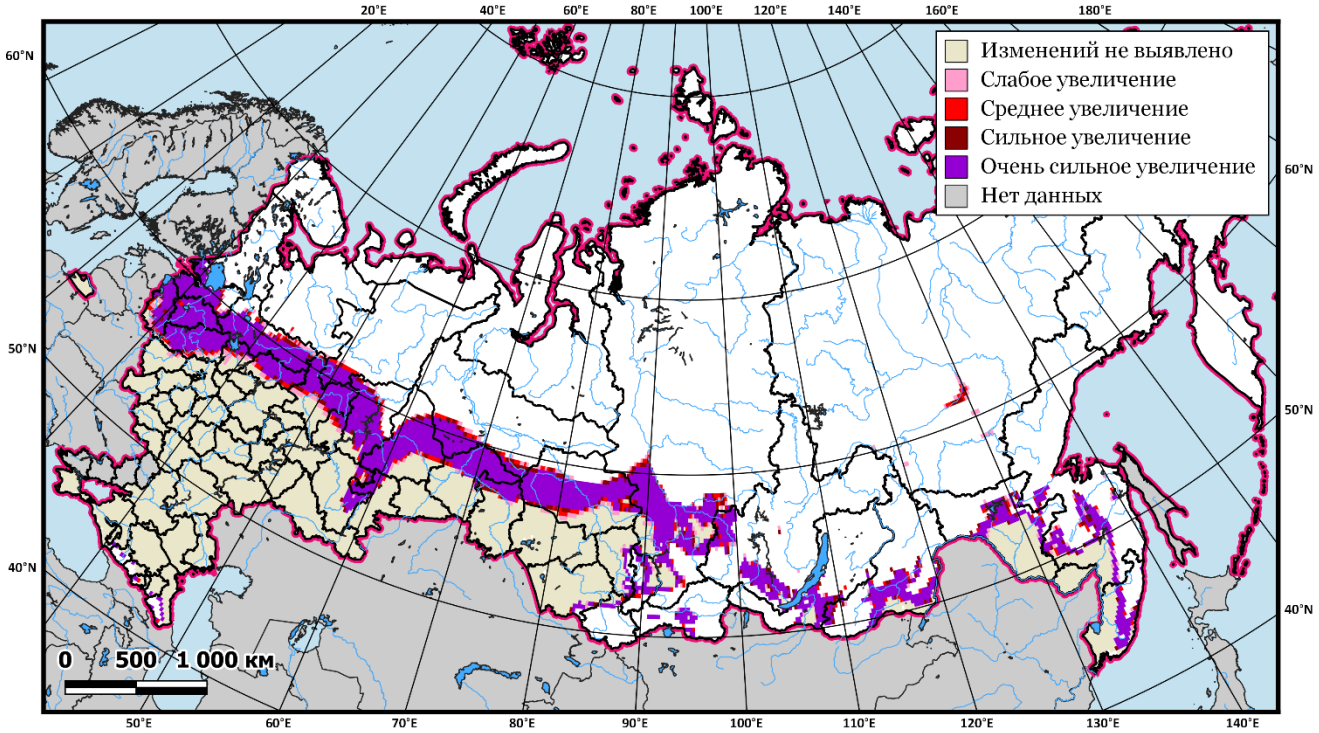


Рисунок 3.11 – Изменение расчетного климатического ареала хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР[a] при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

На Рисунках 3.12 и 3.13 показаны изменения климатического ареала вредителя в условиях климатов 2050–2059 гг., соответствующих сценариям RCP4.5 и RCP8.5. При сценарии RCP8.5 ареал может включить южные районы Республики Коми, Архангельской области, Республики Карелия, значительную часть Томской области, а также южные части Ханты-Мансийского АО и в целом юга Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. В ареале также может появиться отдельная область на юго-востоке Республики Саха (Якутия), но суровые зимы и удалённость этой территории от основной части ареала вызывают сомнения относительно её освоения и успешной перезимовки хлопковой совкой.

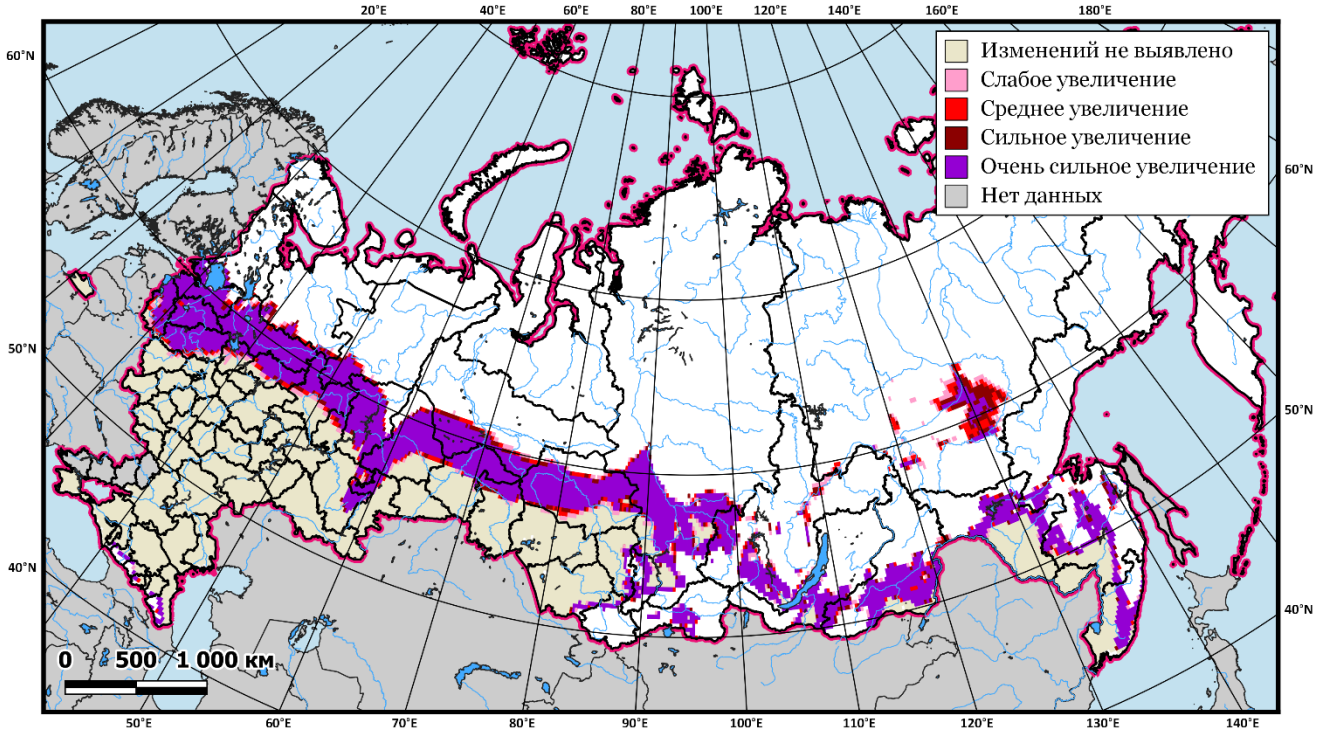


Рисунок 3.12 – Изменение расчетного климатического ареала хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP4.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

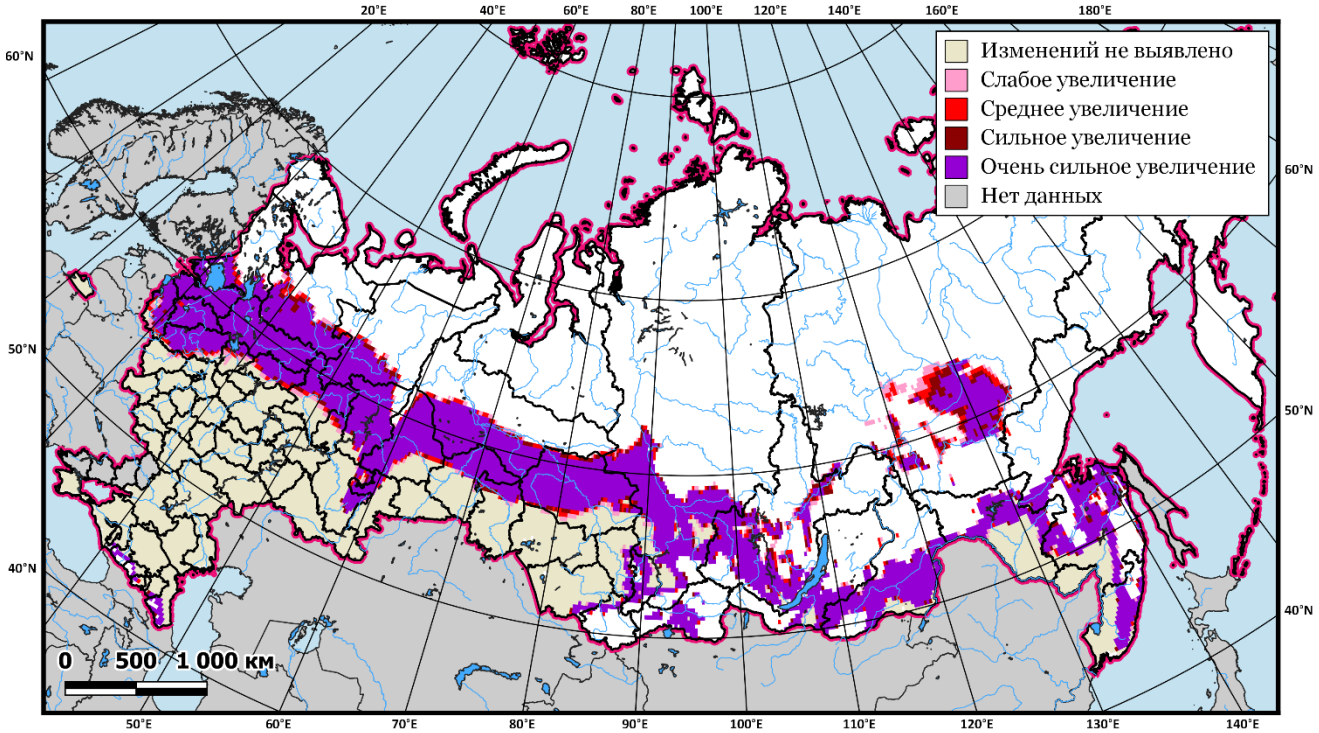


Рисунок 3.13 – Изменение расчетного климатического ареала хлопковой совки на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

В заключение этого раздела подчеркнем следующее. Приведенные выше результаты расчетов показали, что в условиях рассмотренных выше сценариев семейства RCP антропогенного воздействия на климатическую систему Земли в XXI веке вследствие изменения климата климатический ареал хлопковой совки на значительной территории России продвинется существенно на север – севернее 60° с. ш. Однако фактическое распространение этого вида будет возможно лишь там, где и если будут культивироваться сельскохозяйственные растения, которым способен наносить ущерб этот фитофаг. В настоящее время большинство поражаемых хлопковой совкой сельскохозяйственно-значимых культур возделываются преимущественно южнее этих широт. Однако, возможно, это препятствие будет преодолеваться хлопковой совкой за счет широкой полифагии и высокого адаптационного потенциала, в том числе в отношении растения-хозяина.

3.3. Климатический ареал непарного шелкопряда

3.3.1. Общая характеристика вида

Непарный шелкопряд *Lymantria dispar* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera, Erebidae) – вид насекомых-фитофагов, способный к значительным вспышкам массового размножения. Расхожее название вида по-английски – gypsy moth (буквально – «цыганская моль») – недавно было признано «дегуманитарным» [Lancette, 2021] и изменено Американским энтомологическим обществом на spongy moth – «губчатая моль» [Osborne, 2022].

Данное насекомое проходит полный цикл метаморфоза, который включает стадии яйца, гусеницы, куколки и имаго. Имаго – крупная бабочка. Бабочки не питаются, и вред растениям наносят исключительно гусеницы [Pogue, Schaefer, 2007].

Список кормовых растений для непарного шелкопряда превышает 500 видов. Непарный шелкопряд дает лишь одно поколение в год, и особенности его биологии адаптированы к климатическим условиям ареала.

Только в одном субъекте Российской Федерации площади очагов его размножения могут варьировать от нескольких десятков до более чем полумиллиона гектаров [Колтунов, 2006; Пономарев и др., 2012; Лямцев, 2018]. Ущерб для лесного хозяйства может быть весьма значительным. Например, в 2011 г. в США ущерб от непарного шелкопряда оценивался в 250 млн долларов США, а уже через пять лет эта цифра выросла до 3.2 млрд долларов в год [Aukema et al., 2011; Bradshaw et al., 2016]. Численность популяций этого вида, как и его способность расширять ареал, определяется множеством факторов, среди которых климатические условия играют одну из ключевых ролей [Лямцев, 2013, 2018]. Этот вид внесен в списки карантинных организмов большинства стран мира [Lowe et al., 2000].

В Евразии современная фактическая область распространения – географический ареал – непарного шелкопряда включает обширные территории Европы, Малой Азии, гор Средней Азии, Кавказа, южной Сибири, российского Дальнего Востока, северо-восточного Китая, Кореи и Японии. В Северную Америку, а именно в США, непарный шелкопряд был непреднамеренно интродуцирован в 1869 году из Франции [Liebhold et al., 1989]. В настоящее время он широко распространен в восточной части Соединенных Штатов, охватывая обширные регионы от Великих озер до Флориды, а также в четырёх провинциях на востоке Канады [Liebhold et al., 1992; Tobin, Blackburn, 2007]. Географический ареал в Голарктике охватывает широкое разнообразие природных зон, включая степи и таёжные леса, что подчёркивает его высокую экологическую пластичность [Гричанов и др., 2008].

В формировании географического ареала непарного шелкопряда 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].

Приведенная выше информация о современном распространении и вредоносности непарного шелкопряда свидетельствует о важности изучения роли

факторов среды в динамике численности этого вида, в том числе изучения роли климата в формировании его климатической области распространения в географическом пространстве. Однако, как уже отмечалось выше, многие вопросы, касающиеся деталей динамики численности популяций непарного шелкопряда, все еще остаются недостаточно изученными. Высокая полифакторность динамики численности этого вида пока затрудняет создание точных моделей для описания его фактического, географического ареала. Поэтому в настоящее время уместен более обобщенный подход на основе концепции климатического ареала.

В данной работе рассмотрен климатический ареал непарного шелкопряда. Анализ проведен с помощью специальной совокупности климатических предикторов, опираясь на методологию, изложенную в главе 1. Расчеты произведены с помощью системы RANGES. Изложим полученные результаты, следуя работе [Богданович и др., 2023б].

3.3.2. Требования к климату

Отечественная литература предоставляет следующие данные о климатических условиях, благоприятных для распространения *L. dispar* в России. Средние месячные температуры в приповерхностном слое воздуха варьируют от +15 до +27°C в июле и от -18 до +12°C в январе [Клобуков и др., 2018]. Яйца вида способны выживать при температурах от -25 до -30°C, в то время как верхний предел температуры для имаго составляет +32°C [Рудых и др., 2018]. Для полноценного развития особей в течение генерации требуется, чтобы сумма эффективных среднесуточных температур за год превышала 500°C при пороговом значении +10.4°C [Vanhanen et al., 2007]. Также используется критерий с суммой эффективных температур выше 300°C при пороге +7°C за август-сентябрь [Рудых и др., 2018]. Вид может обитать в степной зоне, но не переносит пустынную [Vanhanen et al., 2007].

Исходя из представленных выше данных, для модельного расчета климатического ареала были выбраны следующие два ключевых критерия:

– сумма эффективных среднесуточных температур (СЭТ) за календарный год должна превышать 500°C при пороговом значении +10.4°C [Vanhanen et al., 2007];

– средняя месячная температура в самый теплый месяц года не должна превышать +27°C [Клобуков и др., 2018].

Расчет климатического ареала *L. dispar* для климата, соответствующего наблюдаемому в 1990–1999 гг. осуществлялся с использованием выбранных выше двух климатических предикторов. Данные о климате – массив CRU TS v. 4.04, организованный Отделом исследования климата (Climatic Research Unit, CRU) Университета Восточной Англии, Великобритания (University of East Anglia). Массив описан в работе [Harris et al., 2020] и находится в свободном доступе на сайте [Сайт данных CRU]. Результаты расчета климатического ареала *L. dispar* представлены на Рисунке 3.14, а на Рисунке 3.15 представлена оценка потенциальной климатической пригодности территорий для этого насекомого из [Paini et al., 2018].

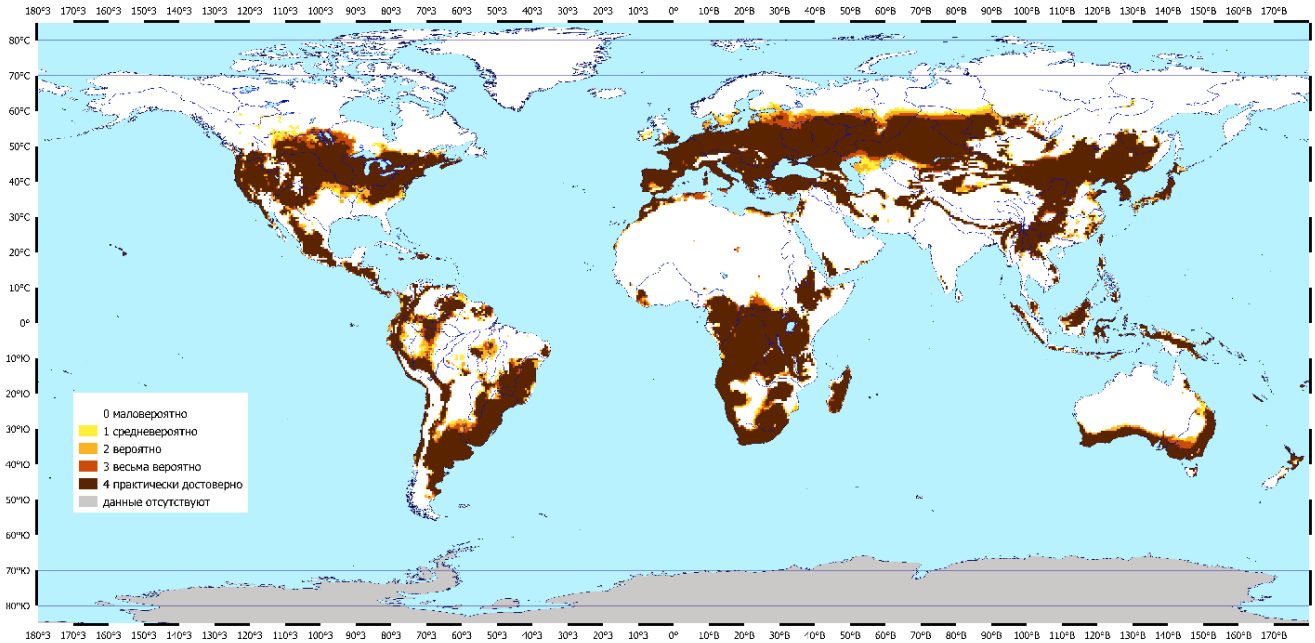


Рисунок 3.14 – Расчетный климатический ареал непарного шелкопряда, соответствующий климату 1990–1999 гг.; климатические данные – CRU TS v. 4.04 [Harris et al., 2020]

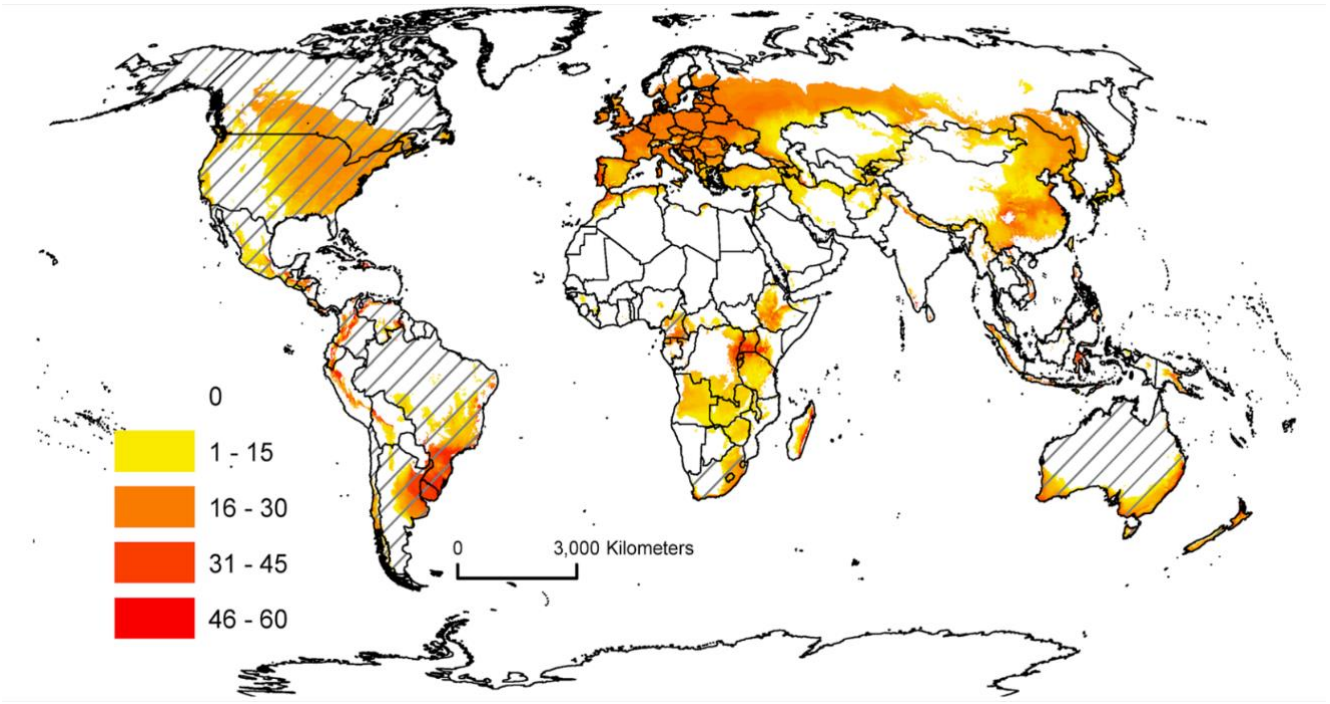


Рисунок 3.15 – Глобальная оценка из [Paini et al., 2018] потенциальной климатической пригодности территорий для непарного шелкопряда (*L. d. asiatica* & *L. d. japonica*), полученная с помощью экоклиматического индекса (Ecoclimatic Index – EI) модели CLIMEX; в легенде указаны диапазоны значений EI; страны, указанные штриховкой, обладают портами, через которые может осуществляться вселение *L. dispar* в процессе морских перевозок

Вероятность принадлежности точек географического пространства расчетному климатическому ареалу *L. dispar* на Рисунке 3.14 визуализирована в соответствии принятой в данной работе методике (см. раздел 3 главы 1).

Сравнение Рисунка 3.14 с Рисунком 3.15, содержащим информацию о потенциально пригодных для *L. dispar* зонах обитания [Paini et al., 2018], указывает на их хорошее соответствие.

3.3.3. Расчетный климатический ареал

На Рисунке 3.16 представлены результаты расчета климатического ареала *L. dispar* для климата, соответствующего данным массива КЦР^{a} для периода 1990–1999 гг.

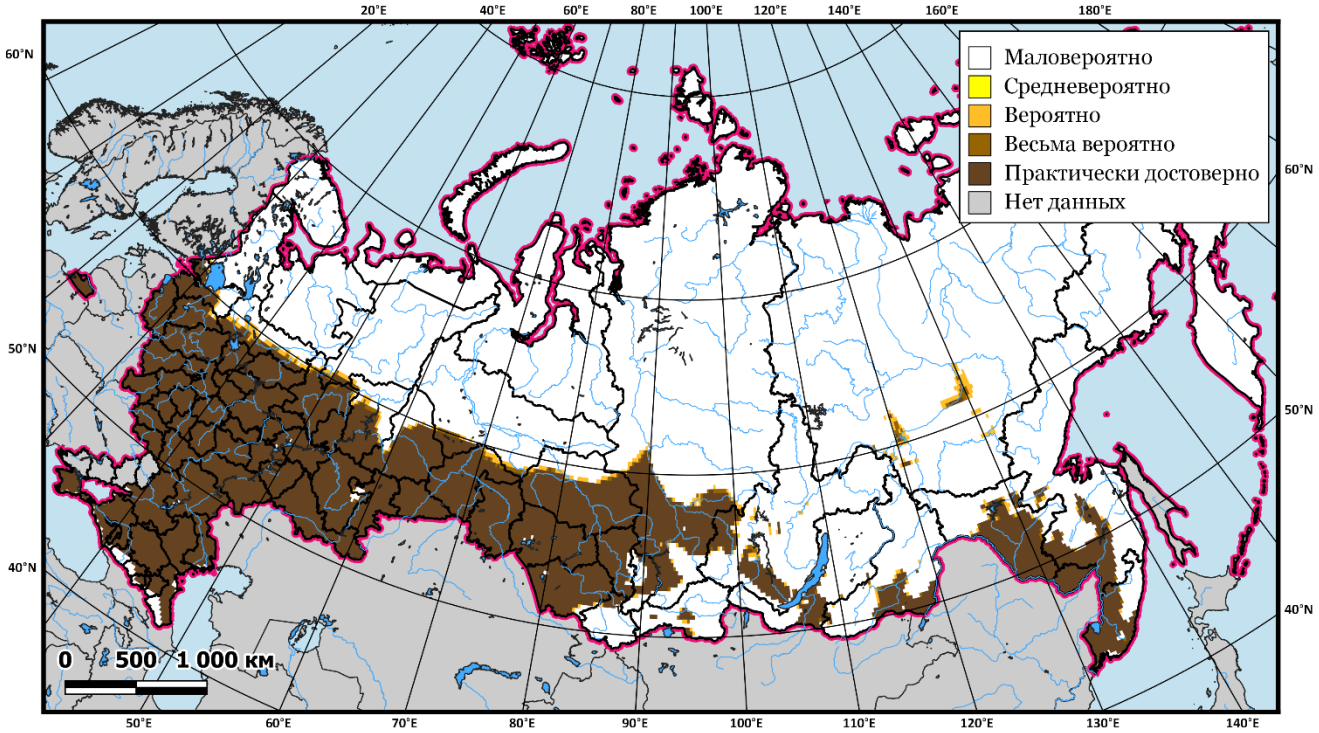


Рисунок 3.16 – Расчетный климатический ареал непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^{a} для 1990–1999 гг.

На Рисунке 3.16 видно, что в России климатический ареал охватывает обширные территории от южных границ до примерно 60° с. ш. за исключением дальневосточных регионов страны. На Дальнем Востоке ареал охватывает территорию Еврейской автономной области, южные части Амурской области, Хабаровского и Забайкальского краев, Республики Бурятия, а также юг и запад Приморского края. В некоторых регионах имеются небольшие участки ареала, например, в Республике Саха (Якутия).

Напомним, что эта оценка основана на расчетах с использованием массива климатических модельных данных КЦР^{a}. Фактические данные наблюдений по непарному шелкопряду не указывают на его присутствие в Якутии [Аверенский, Исаев, 2013]. Также есть некоторое региональное несоответствие на территории Республики Тыва, где расчеты показывают только два небольших участка климатического ареала, в то время как в работе Фомина и его коллег [2022] указываются более значительные территории.

Полученный результат (Рисунок 3.16) был сопоставлен с наблюдениями для непарного шелкопряда из «Агроатласа...» [Афонин и др., 2008, раздел [Гричанов и др., 2008]]. Несмотря на разницу в подходах исследований и различие изучаемых периодов, сравнение показало значительное сходство двух ареалов. Коэффициент сходства (см. формулу (3.1) из раздела 3.2.3), введенный по аналогии с метрикой Жаккара [Jaccard, 1901], в этом случае составил 0.60. Для сравнения климатической области распространения *L. dispar* (Рисунок 3.16) с его фактической областью из «Агроатласа…» результат, так же, как и в случае с хлопковой совкой (см. раздел 3.2.3), можно считать приемлемым.

На Рисунках 3.17–3.20 представлены изменения вероятности принадлежности точек географического пространства климатическому ареалу *L. dispar* в 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. в условиях сценариев RCP4.5 и RCP8.5. Период 1990–1999 гг. использован в качестве базового для сравнения. Используемая методика расчета и визуализации результатов представлены в главе 1.

Изменение вероятности принадлежности точек географического пространства климатическому ареалу *L. dispar* на Рисунках 3.17–3.20 на большей части территории оценивается как «практически достоверно». Это есть следствие значительного числа реализаций климата – 50 –, представленных в массиве КЦР^{a}. Исключение – территории, прилегающие к северной границе климатического ареала, где вероятности несколько снижаются.

Согласно полученным результатам, при дальнейшем изменении климата в Европейской части России ожидается расширение климатического ареала 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 восточном направлениях. Эти изменения особенно выражены при сценарии RCP8.5, что согласуется с результатами исследований других авторов.

Например, в работе [Ясюкевич и др., 2019] указывается на расчетное расширение ареала *L. dispar* в 29 субъектах РФ в период 2011–2030 гг. и в 40 субъектах в 2080–2099 гг. При этом сокращения климатического ареала выявлено не было.

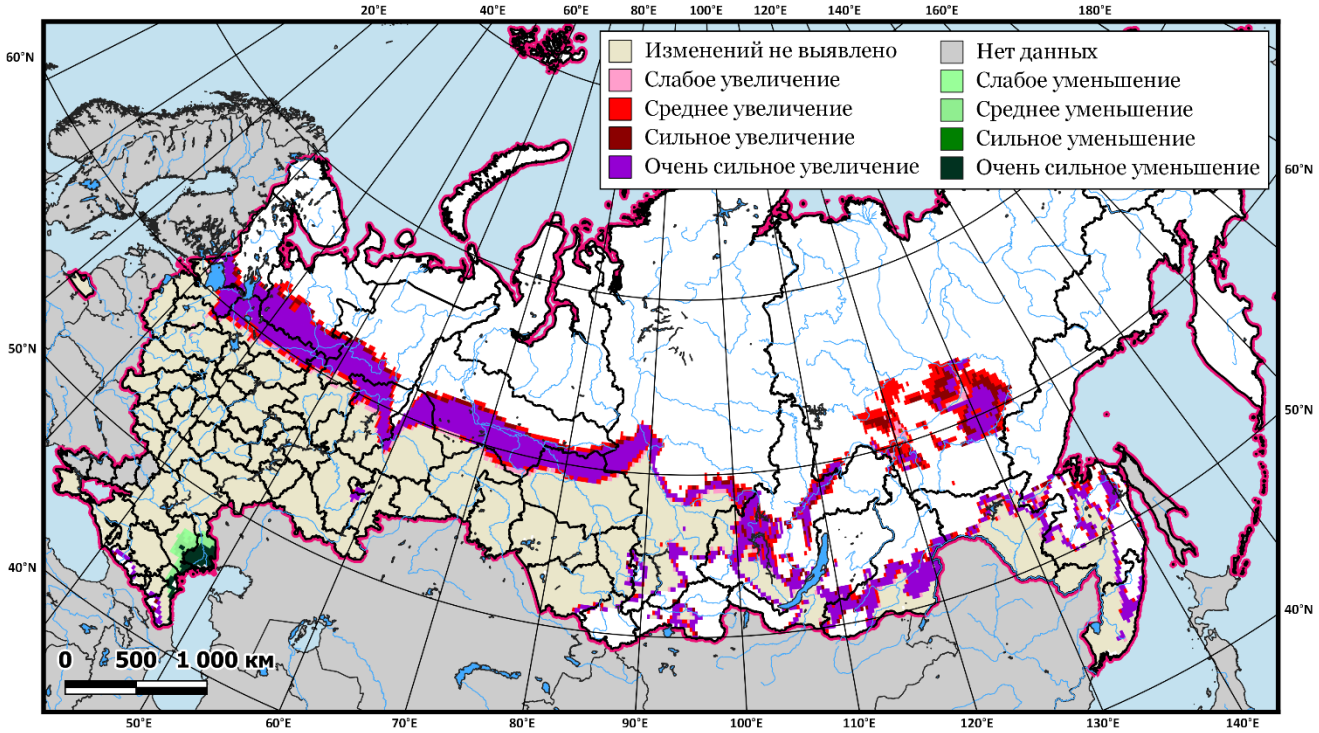


Рисунок 3.17 – Изменение расчетного климатического ареала непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP4.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

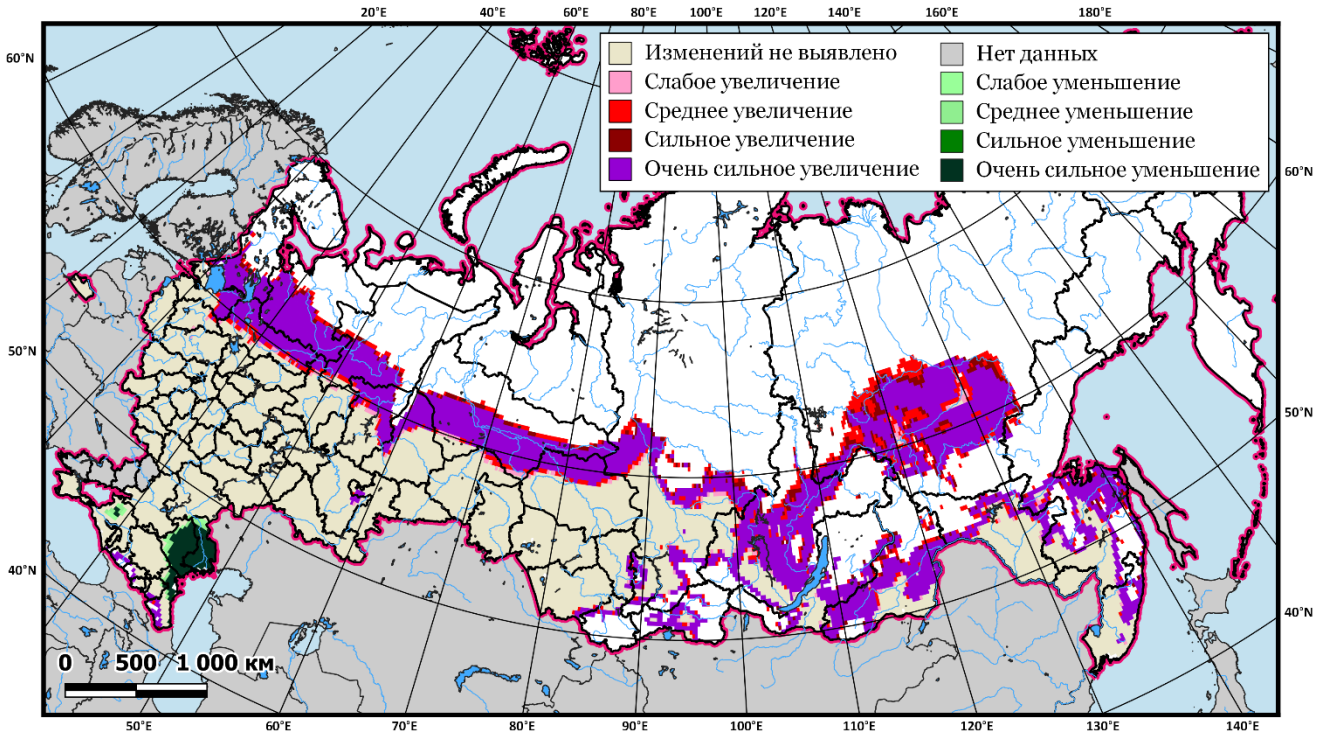


Рисунок 3.18 – Изменение расчетного климатического ареала непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP4.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

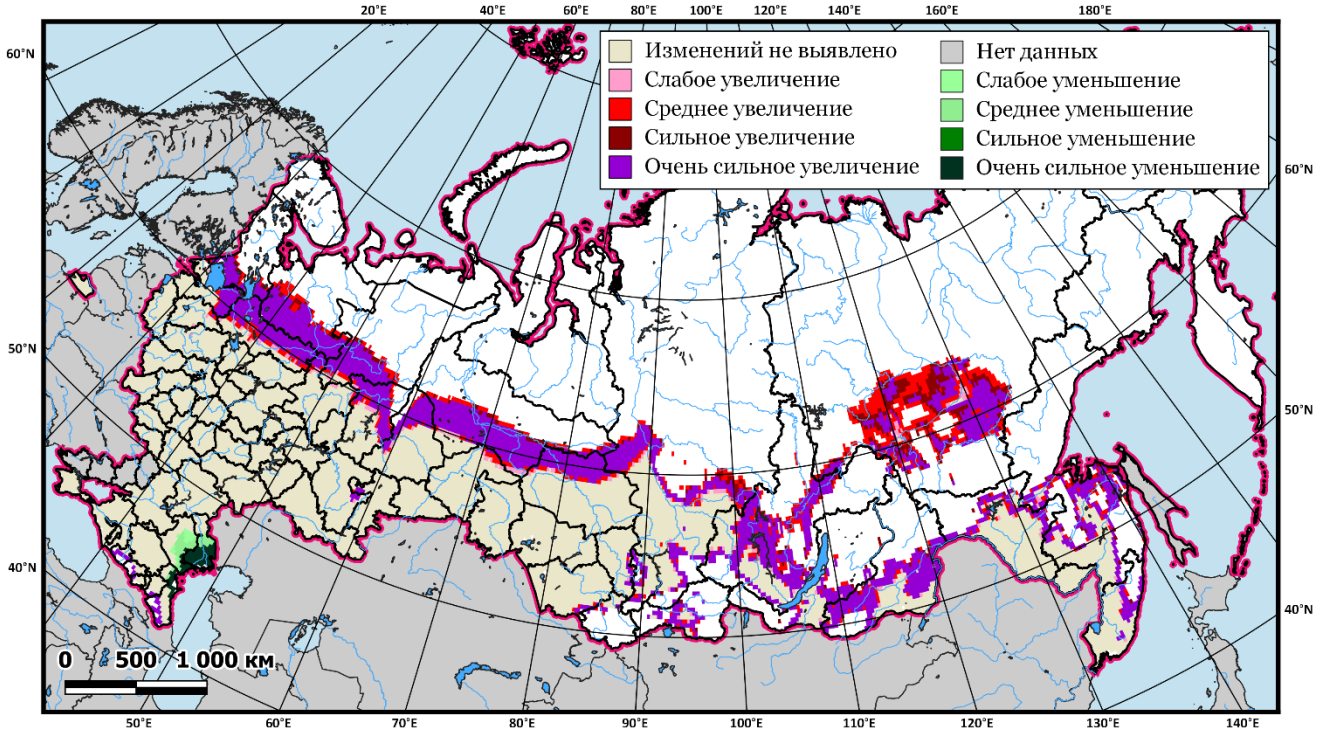


Рисунок 3.19 – Изменение расчетного климатического ареала непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

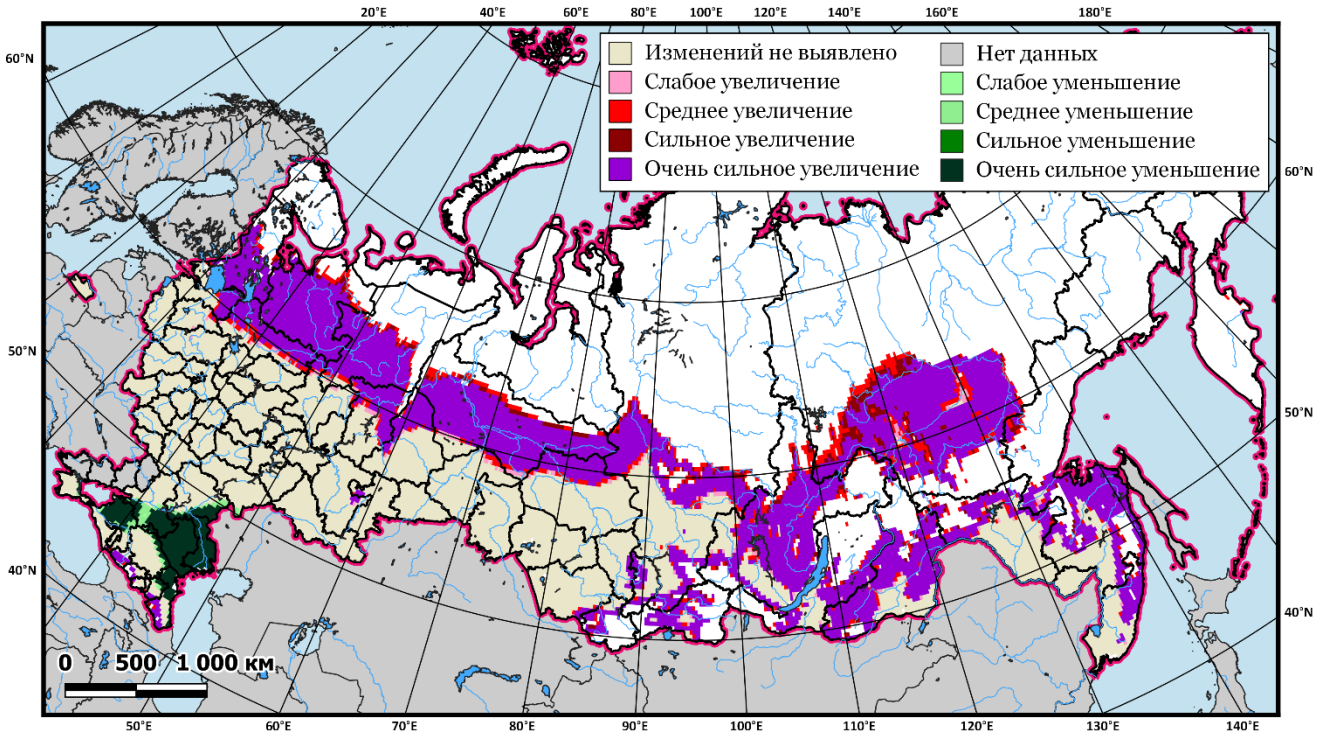


Рисунок 3.20 – Изменение расчетного климатического ареала непарного шелкопряда на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

Отметим, что согласно оценкам, представленным на Рисунках 3.17–3.20, ожидается сокращение ареала на юге Европейской части России, особенно к 2050–2059 гг. в условиях обоих сценариев RCP4.5 и RCP8.5. Это расхождение с результатами работы [Ясюкевич и др., 2019] обусловлено использованием различных совокупностей климатических предикторов.

В заключение этого раздела отметим, что некоторые региональные исследования также подчеркивают потенциальные изменения ареала непарного шелкопряда. Например, в Бурятии ожидается возможное смещение к северу ареала непарного шелкопряда на 450 км и его подъем на 150 м по высоте в горах. До последнего времени северная граница распространения непарного шелкопряда в Бурятии ограничивалась примерно 52° с. ш. При дальнейшем потеплении климата непарный шелкопряд может распространиться на север, или выше в горы, заняв участки, подходящие по лесорастительным и климатическим условиям [Рудых и др., 2018].

3.4. Сильные засухи и пригодность территории для культивирования зерновых

3.4.1. Общая характеристика явления сильной засухи

Одним из наиболее опасных гидрометеорологических явлений, с которыми сталкиваются многие регионы, является засуха. Длительное отсутствие осадков в сочетании с повышенными уровнями температуры воздуха у поверхности земли приводит к ряду негативных последствий, проявляющихся на различных временных масштабах. Эти последствия оказывают существенное воздействие на природные экосистемы, хозяйственные системы и здоровье населения. В сезоны засух часто увеличивается число лесных и степных пожаров, происходит горение торфяников. Засуха может приводить к массовому усыханию посевов сельскохозяйственных культур и значительным потерям урожая. Помимо этого, может происходить массовое размножение некоторых видов вредителей сельскохозяйственных культур. Волны аномальной жары, в сочетании с

повышенным загрязнением воздуха продуктами горения, создают дополнительные риски для здоровья людей, особенно для уязвимых групп населения, таких как дети, пожилые люди, сельскохозяйственные рабочие и некоторые другие.

Засухи порождают серьёзные угрозы, в том числе продовольственной безопасности. В Таблице 3.1 представлены драматические данные, иллюстрирующие число жертв от сильных засух по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) [Сайт хранилища знаний ФАО (FAO)].

Таблица 3.1 – Экстремальные засухи, 1900–2011 гг.*

Страна	**Год**	**Число жертв, тыс. человек**
Эфиопия	1983–1985	300
Судан	1982–1984	150
Эфиопия	1973	100
Индия	1965	1 500
Бангладеш	1943	1 900
Индия	1942	1 500
Китайская Народная Республика	1928	3 000
Советский Союз	1921	1 200
Китайская Народная Республика	1920	500
Индия	1900	1 250

* Источник: «EM-DAT: OFDA/CRED Международная база данных по стихийным бедствиям», Католический университет Лувена, Брюссель, Бельгия [Сайт EM-DAT]

В современной России засухи также представляют собой значительную проблему для агропромышленного комплекса. К примеру, в 2020 году режим чрезвычайной ситуации вследствие засухи был официально объявлен в Алтайском

крае и во многих районах Новосибирской и Челябинской областей. Проблемы, связанные с засухой, также затронули Республику Башкортостан, Омскую, Волгоградскую и Ростовскую области, а также Ставропольский и Краснодарский края. Наблюдаемое и ожидаемое потепление глобального климата в XXI веке может привести к усилению засушливых условий [IPCC, 2019]. Негативные тенденции в засушливости фиксируются в том числе и на территории России [Черенкова, 2017; Черенкова и др., 2020].

Ниже излагаются результаты расчетной оценки части территории России, непригодной для культивирования зерновых по критерию частоты сильных засух. Эта часть территории рассчитана для конца XX века, а также приведены изменения ее границ при изменении климата в XXI веке. При расчете применялась методология, описанная в главе 1. Расчет производился с использованием системы RANGES, описанной в главе 2. При изложении результатов мы следуем работам [Павлова и др., 2020; Богданович и др., 2021а].

3.4.2. Частота сильных засух и пригодность территории для культивирования зерновых

Для количественной оценки уровня засушливости вегетационного периода конкретного года в данном разделе применяется гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) [Селянинов, 1958]. Засуха, оказывающая значительное влияние на сельскохозяйственное производство, типична для южных и центральных регионов России. В этом контексте расчёт ГТК осуществляется с использованием следующей упрощённой формулы:

$$\text{ГТК}_{\text{май}-\text{август}} = \frac{(\text{сумма осадков, мм})}{0.1 \cdot (\text{сумма среднесуточных значений температуры, } ℃)}, \quad (3.2)$$

т.е. ГТК в наших расчетах вычисляется на основе месячных сумм осадков. При этом среднесуточные значения температуры оцениваются системой RANGES на основе интерполяции, исходя из среднемесячных значений.

Месячные суммы осадков и среднемесячные значения температуры непосредственно берутся из данных климатического массива КЦР^a, сценарий RCP8.5. Там представлены средние за месяц суточные суммы осадков (мм/сут) и собственно среднемесячные значения температуры (°K).

Считается, что вегетационный период данного года характеризуется сильной засухой, если значение гидротермического коэффициента оказывается менее 0.6 [Павлова и др., 2020]. Частота 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 0.5. Вероятностная оценка p была рассчитана с применением системы RANGES.

Далее на картах-схемах в этом разделе для различных точек географического пространства представлена оценка степени уверенности в том (вероятности того), что частота возникновения сильных засух p превышает пороговое значение 0.5. Базовая, исходная оценка для 1990–1999 гг. соответствует климату КЦР^a. Если $p > 0.5$, согласно существующим правилам, это определяет территорию (при расчете по сетке – точку географического пространства) как непригодную для культивирования зерновых культур. Далее в следующем разделе на каратах-схемах приведены также изменения степени уверенности в этом (вероятности этого) в 2030–2039 гг. и в 2050–2059 гг. по отношению к базовому периоду. Методология такой оценки изложена в разделе 3 главы 1.

3.4.3. Результаты расчета

На Рисунке 3.21 представлено пространственное распределение оценки уверенности в том (вероятности того), что точка географического пространства непригодна для культивирования зерновых (частота сильных засух $p > 0.5$). Климат соответствует климату КЦР^a для базового периода 1990–1999 гг.

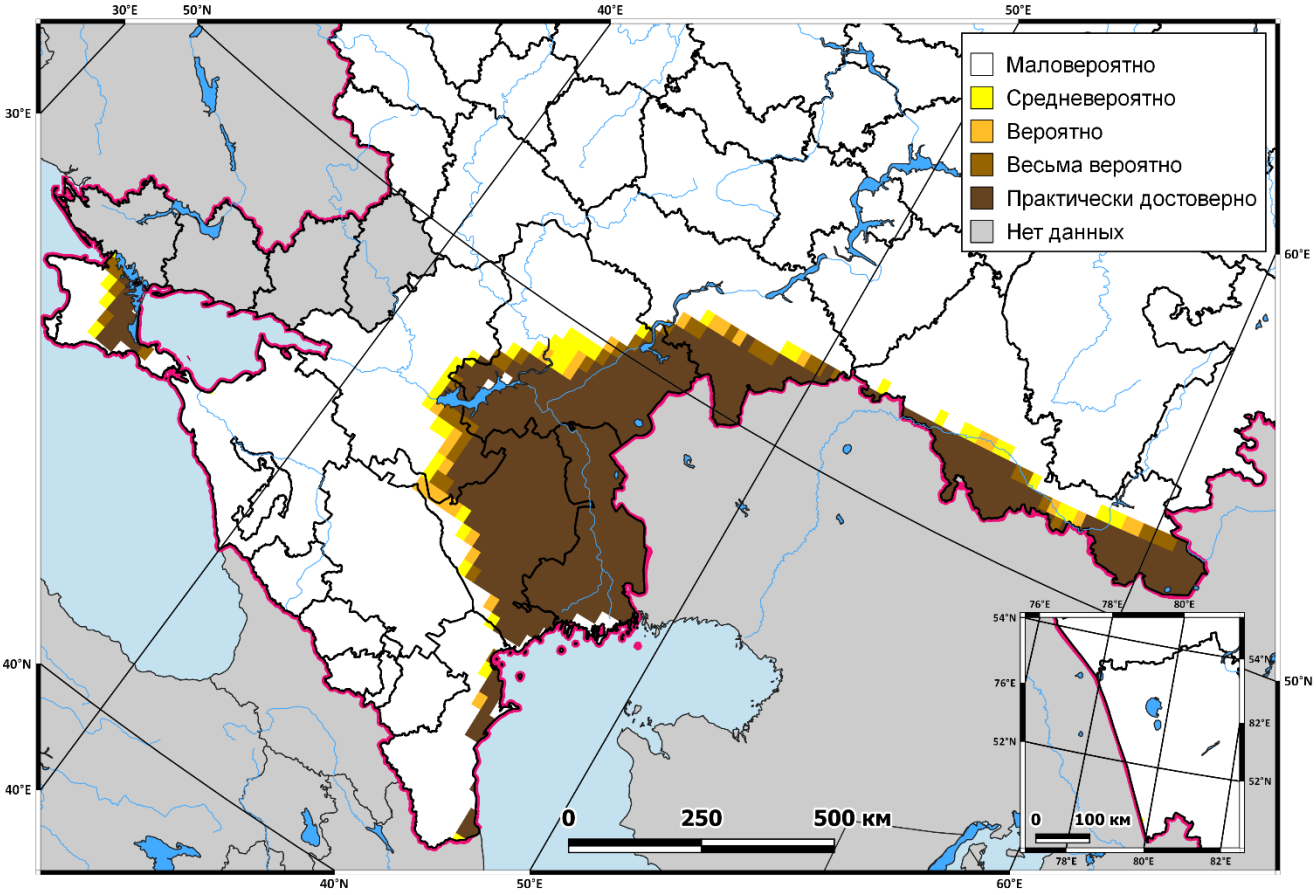


Рисунок 3.21 – Расчетная КОР сильной засухи, частота которой превосходила порог целесообразности для культивирования зерновых, на территории России в условиях климата КЦР^{a} для 1990–1999 гг.

Как видно на Рисунке 3.21, в условиях расчета в конце XX века на части территории ряда субъектов Российской Федерации наблюдались неблагоприятные для культивирования зерновых условия по засухе – частота возникновения сильных засух превышала пороговую 0.5 («практически достоверно»). В частности, это имело место почти на всей территории Астраханской области и Республике Калмыкия. На востоке Республики Дагестан и Ростовской области, юге и востоке Волгоградской области, а также в южных частях Саратовской и Оренбургской областей наблюдались аналогичные условия. Обращает на себя внимание ситуация и на северо-востоке Крымского полуострова, где вероятность сильных засух также крайне высока.

Для анализа тенденций были построены карты-схемы изменения степени уверенности (вероятности) в превышении частотой сильных засух *p* порогового значения 0.5. Оценка выполнена для климата КЦР^{a} в условиях сценария RCP8.5 для периодов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. по сравнению с базовым периодом 1990–1999 гг. Результаты представлены на Рисунках 3.22 и 3.23.

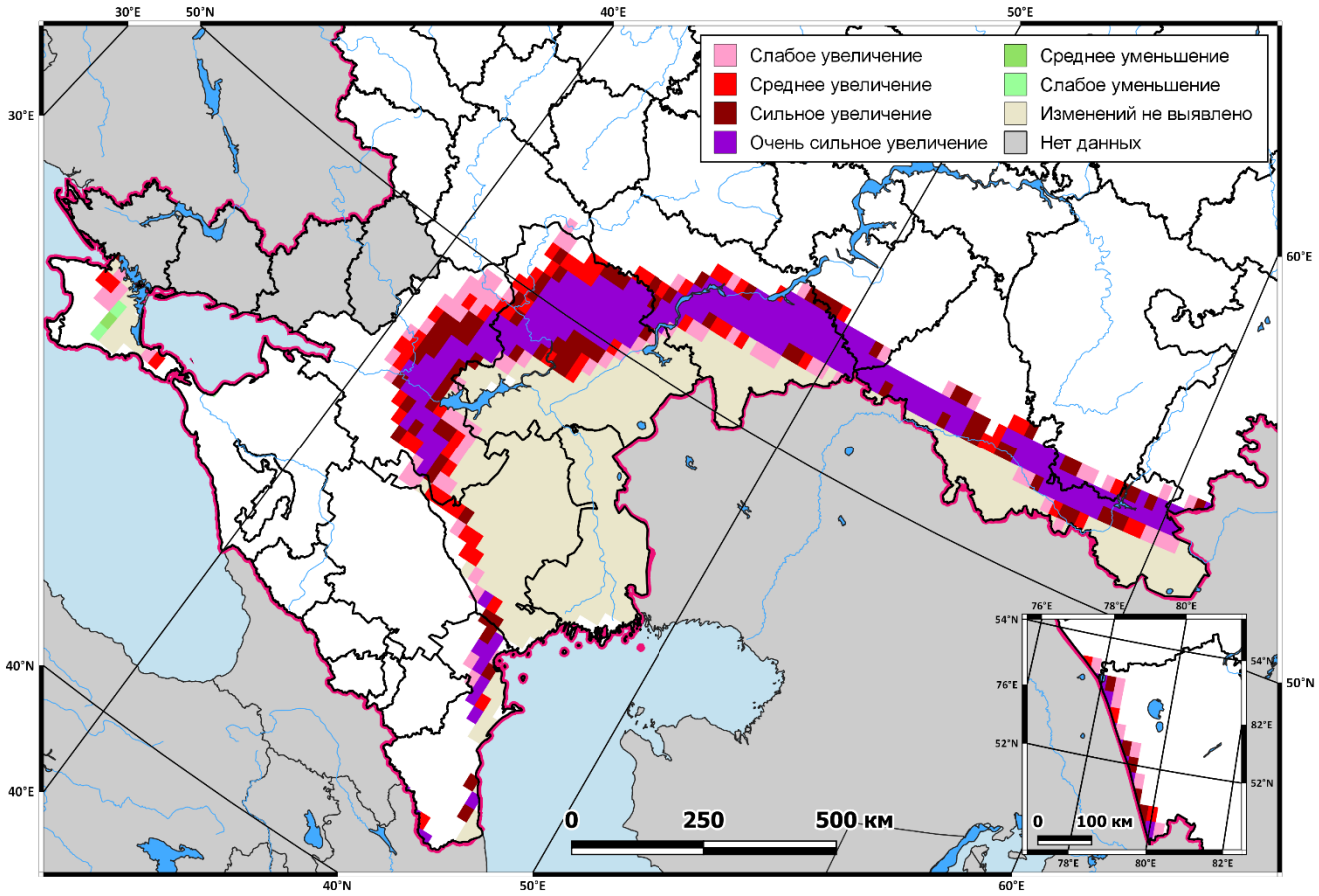


Рисунок 3.22 – Изменение расчетной КОР сильной засухи, частота которой превосходит порог целесообразности для культивирования зерновых, на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

Согласно полученным оценкам, в 2030–2039 гг. (Рисунок 3.22) ожидается ухудшение ситуации по сильной засухе как в ранее явно подверженных этой угрозе локациях, так и в тех, где ситуация была более благоприятна. Особенно заметно расширение зон с высокой частотой сильных засух в северном направлении в Оренбургской и Саратовской областях, вплоть до южных частей Челябинской и

Самарской областей, Республики Башкортостан. Значительное увеличение неблагоприятного явления ожидается в Волгоградской и Ростовской областях в сторону северо-запада и запада, вплоть до восточной границы Воронежской области. Незначительное увеличение территории с этой же тенденцией также ожидается в Республиках Калмыкия и Дагестан. Эта неблагоприятная тенденция распространяется в последнем случае до границы с Чеченской Республикой. Кроме того, в Азиатской части России проявление этой тенденции ожидается на юге Западной Сибири, в частности, в Алтайском крае и Новосибирской области. На Крымском полуострове тенденции к ухудшению проявляются на севере и востоке; небольшое улучшение ожидается в центральной части полуострова.

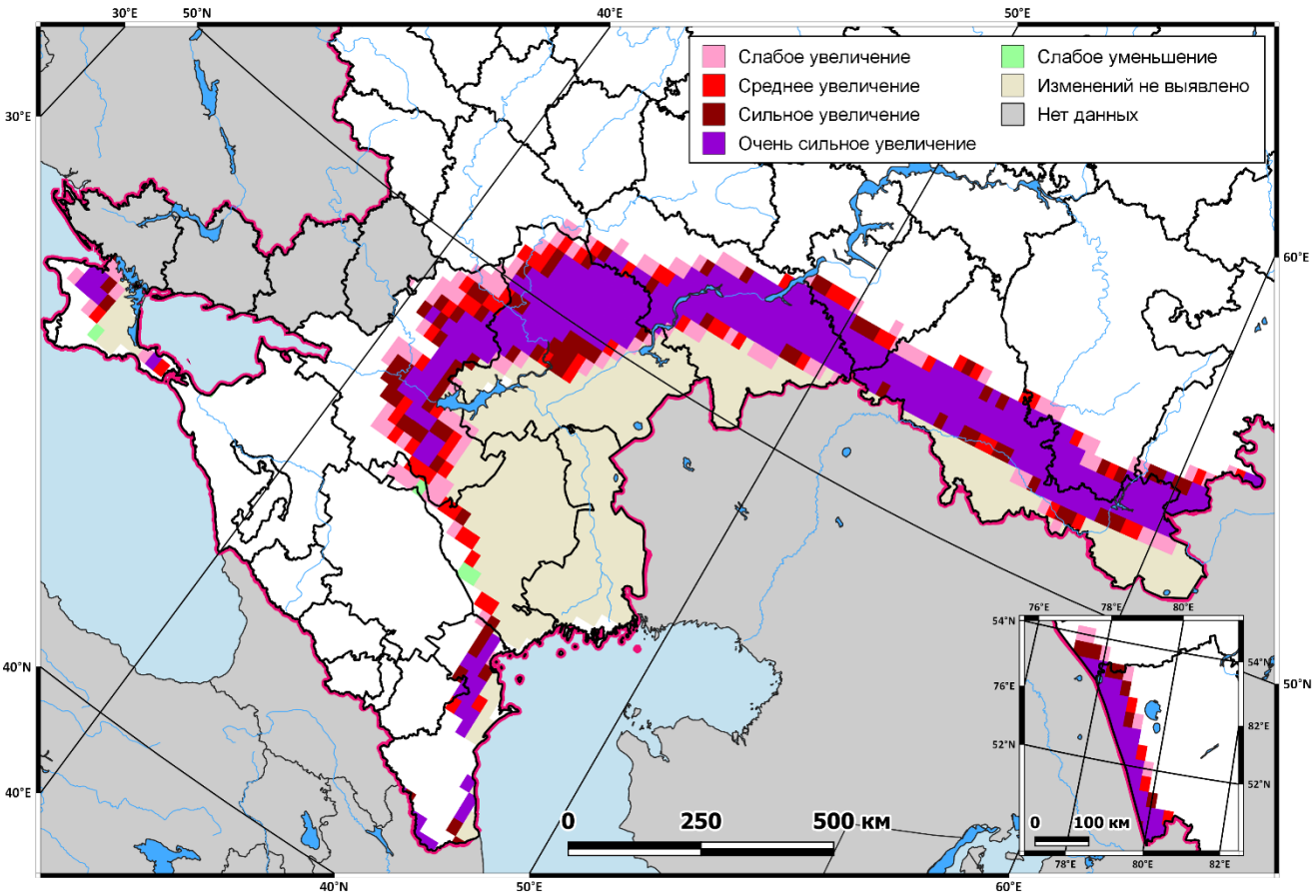


Рисунок 3.23 – Изменение расчетной КОР сильной засухи, частота которой превосходит порог целесообразности для культивирования зерновых, на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

Расчеты для периода 2050–2059 гг. (Рисунок 3.23) указывают на схожие изменения, однако степень их выраженности становится ещё более значительной для всех упомянутых регионов.

3.5. Доминирование теплой части года в календарном году

3.5.1. Общая характеристика явления

В условиях умеренного и холодного климата продолжительность теплой части года – важная характеристика. В данной работе это та часть года, в течение которой среднесуточная температура воздуха стабильно превышает 0°C. Ее продолжительность существенно варьирует в зависимости от географической широты, высоты над уровнем моря, близости к морским акваториям и некоторых других физико-географических факторов.

Значение среднесуточной температуры 0°C служит естественной границей, разделяющей периоды с положительными и отрицательными температурами. Соотношение продолжительности этих периодов отражает фундаментальные процессы энергобаланса атмосферы и теплового обмена между атмосферой и поверхностью Земли.

Географическая широта существенно влияет на продолжительность теплой части года, поскольку с ней непосредственно связано поступление солнечной энергии на верхнюю границу атмосферы и в значительной мере – на земную поверхность. В субтропических и тропических зонах продолжительность теплой части года может достигать 100% продолжительности года, тогда как в полярных регионах эта часть может ограничиваться всего несколькими десятками суток в году [IPCC, 2021]. В Северном полушарии в целом продолжительность теплой части года уменьшается к северу, а в Южном полушарии – к югу.

Высота над уровнем моря также оказывает значительное влияние на продолжительность теплой части года. При меньших высотах на равнинах в тех же широтах теплая часть года значительно длиннее [Хромов, Петросянц, 2012].

Близость к крупным морским акваториям значительно влияет на продолжительность теплой части года. Например, в Европе побережье Атлантического океана и Северного моря характеризуется значительно более длительной теплой частью года в сравнении с континентальными территориями на той же широте [IPCC, 2021].

Другие физико-географические факторы также играют важную роль в формировании теплой части года. Среди них выделяются:

– Покров растительности, который может создавать локальный микроклимат. Плотные лесные массивы, например, могут способствовать сохранению тепла в ночное время, что приводит к увеличению числа суток с положительными температурами [Hansen et al., 2000].

– Почвенный покров и тип подстилающей поверхности. Например, темные почвы поглощают больше солнечной энергии, чем светлые, и это может влиять на микроклиматические условия на локальном уровне [Национальный атлас России, 2007].

Продолжительная теплая часть года является одним из благоприятных факторов для сельского хозяйства, в том числе для увеличения продуктивности аграрного сектора [Ковтун, Ковтун, 2013].

Современные климатические изменения оказывают влияние на увеличение продолжительности теплой части года в большинстве регионов Земли. В следующем разделе это будет продемонстрировано расчетным путем для территории России. Опишем полученные результаты, следуя, в том числе, работе [Богданович, 2025].

3.5.2. Расчет климатической области распространения доминирования теплой части года в календарном году

В данном разделе область доминирования теплой части года в календарном году определяется как совокупность точек географического пространства, где

число суток с положительной среднесуточной температурой воздуха превышает 182 (половина невисокосного года).

Расчеты климатической области распространения (КОР) этого явления (т.е. доминирования) выполнялись с использованием системы RANGES в условиях климата КЦР^a. В качестве базового периода рассматривался период 1990–1999 гг. Тенденции изменения КОР рассчитывались для 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. в условиях сценариев RCP4.5 и RCP8.5.

Для получения значений среднесуточной температуры данные о среднемесячных значениях, представленные в массиве КЦР^a, интерполировались с помощью встроенной в систему процедуры (см. раздел 1 главы 1). Далее рассчитывалось общее число дней в году, для которых среднесуточная температура положительна. Если указанное число превышает пороговое значение 182 (то есть больше половины продолжительности невисокосного года), теплая часть года считается доминирующей в данном году. Такой расчет проводится для каждого года в изучаемом периоде времени и для всех реализаций климата, если таких несколько.

Для данной точки географического пространства частота события, обозначенная как p, отражает долю лет, в которых теплая часть года доминирует в исследуемом промежутке времени.

С помощью системы RANGES был выполнен расчет той области географического пространства, где $p > 0.5$. Такие области трактуются как зоны с доминирующей теплой частью года.

Для представления оценок на картах-схемах применяется шкала, которая отображает балльную оценку вероятности того, что точка географического пространства входит в КОР доминирования теплой части года. Цветовые обозначения и метод визуализации соответствуют описанию, данному в разделе 3 главы 1.

На Рисунках 3.24 и 3.25 соответственно представлены результаты расчета КОР доминирования теплой части года (данные КЦР^a) и положительной

среднегодовой температуры воздуха (данные ИВМ[a]) для базового, исходного периода 1990–1999 гг.

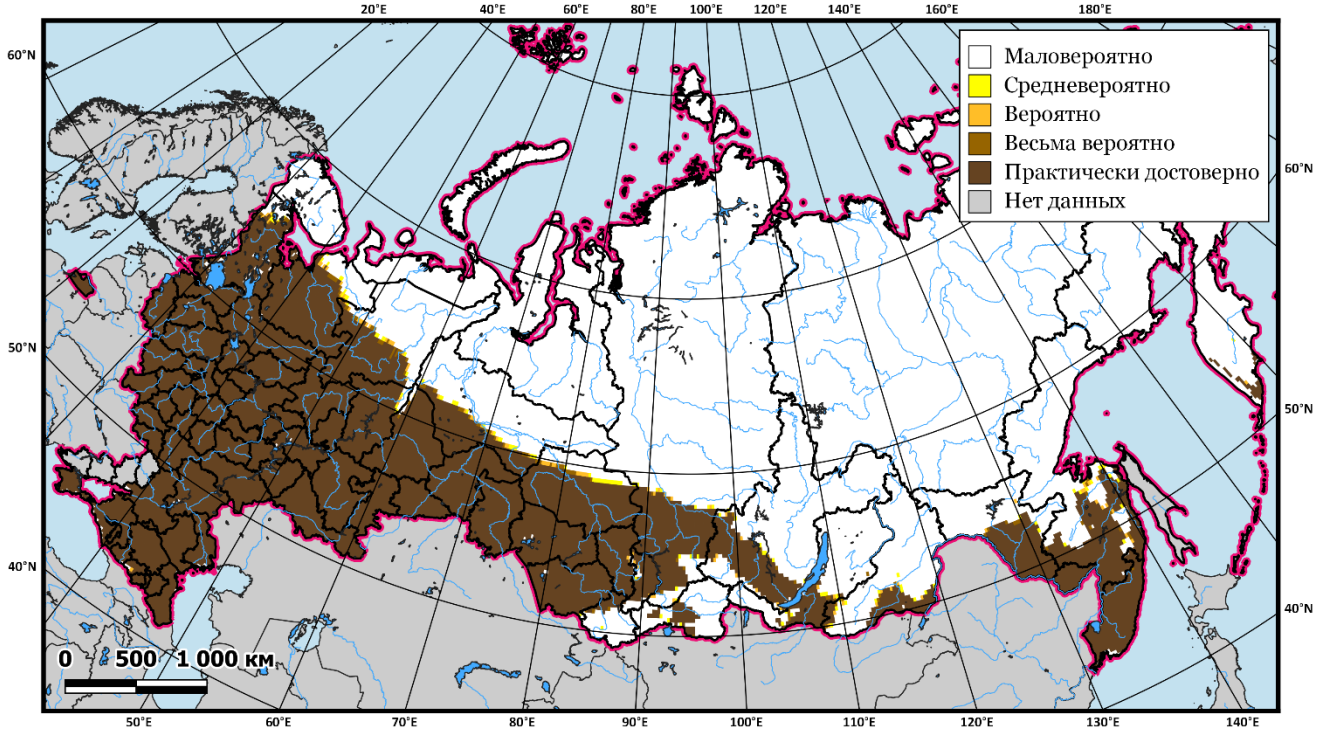


Рисунок 3.24 – Расчетная КОР доминирования теплой части года в календарном году на территории России в условиях климата КЦР[a] для 1990–1999 гг.

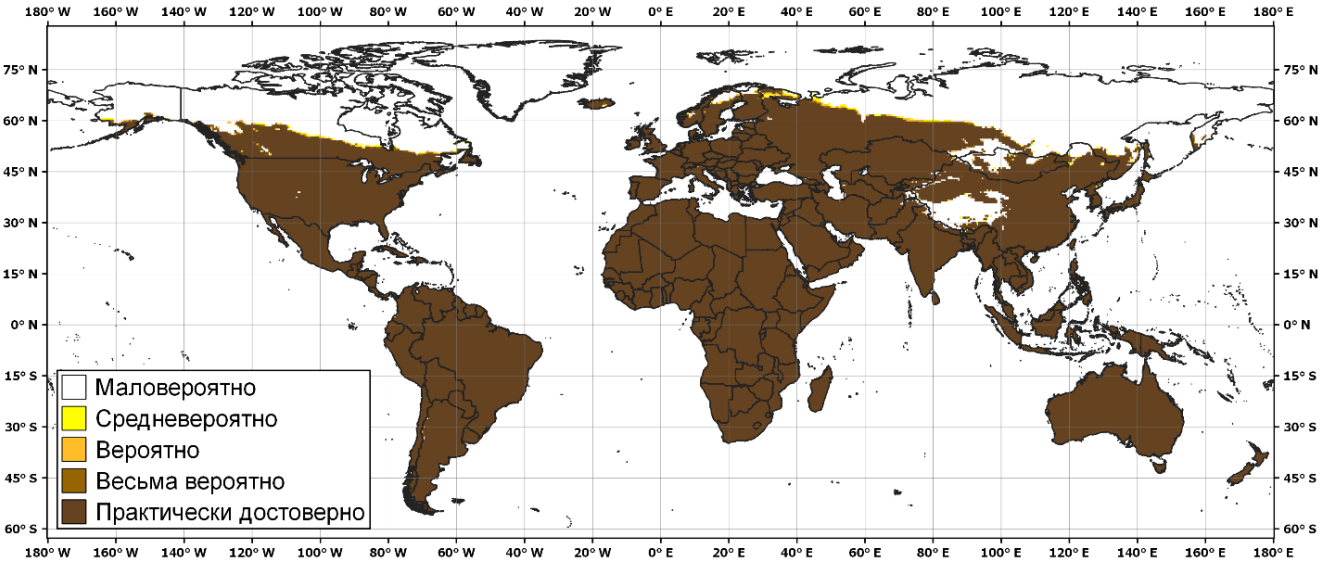


Рисунок 3.25 – Расчетная КОР положительной среднегодовой температуры воздуха в условиях климата ИВМ[a] для 1990–1999 гг.

Сравнение двух карт, представленных на Рисунке 3.24 и Рисунке 3.25, демонстрирует их удовлетворительное соответствие на территории России.

Для территории России граница КОР доминирования теплой части года практически совпадает с нулевой изотермой среднегодовой температуры воздуха.

Ниже на Рисунках 3.26–3.29 представлены карты-схемы изменений КОР доминирования теплой части года для климатов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. для климата КЦР^{a} в условиях сценариев RCP4.5 и RCP8.5 по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

В условиях обоих сценариев и для обоих будущих периодов времени граница КОР доминирования теплой части года сместится на север. При жестком сценарии RCP8.5 к 2050–2059 гг. на Европейской части России доминирование теплой части года будет иметь место практически везде, включая такие регионы, как Мурманская область, Архангельская область, почти вся Республика Коми и значительная часть Ненецкого автономного округа.

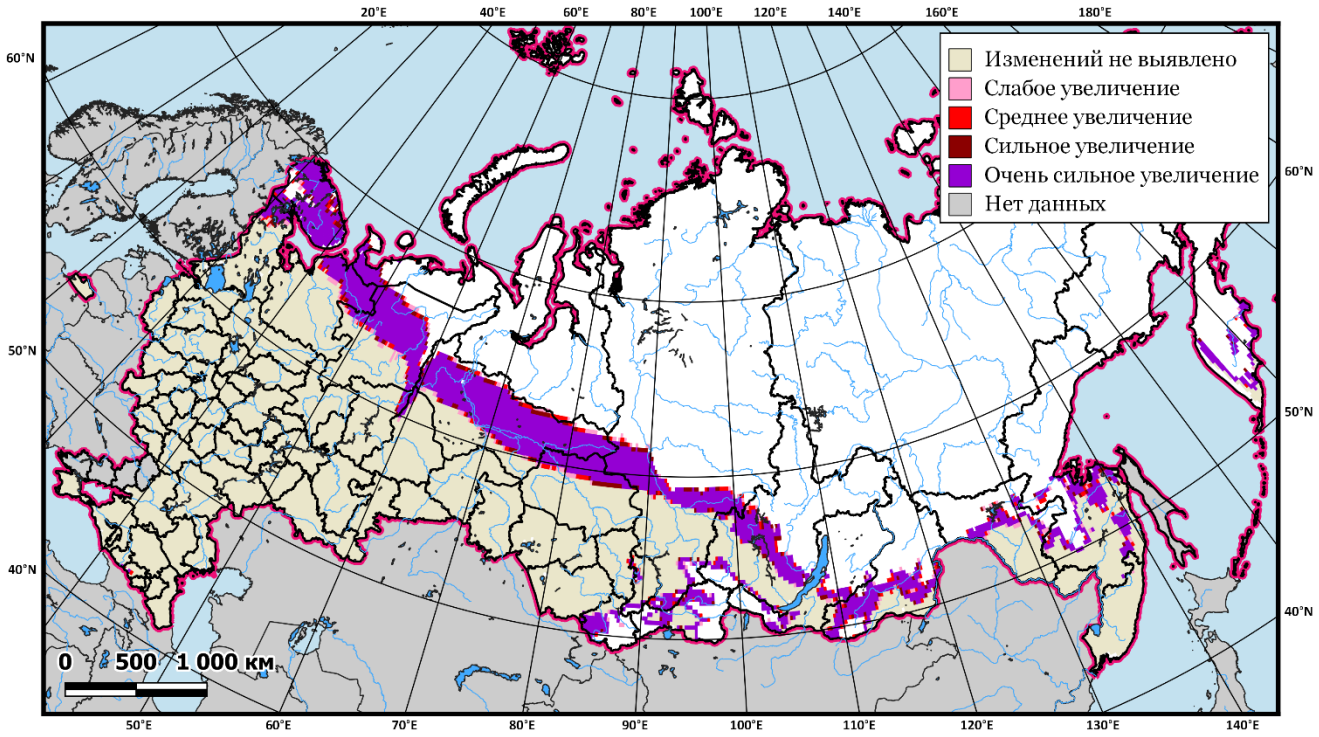


Рисунок 3.26 – Изменение расчетной КОР доминирования теплой части года в календарном году на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP4.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

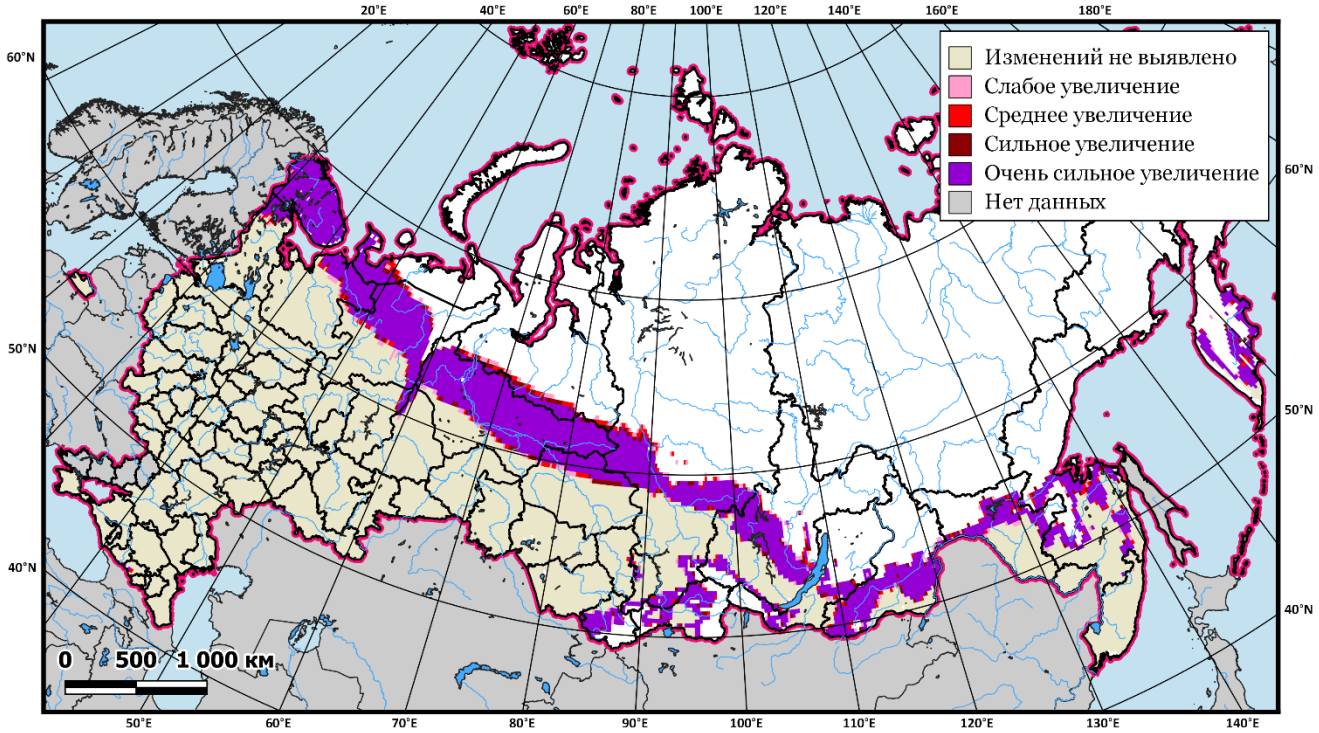


Рисунок 3.27 – Изменение расчетной КОР доминирования теплой части года в календарном году на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP4.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

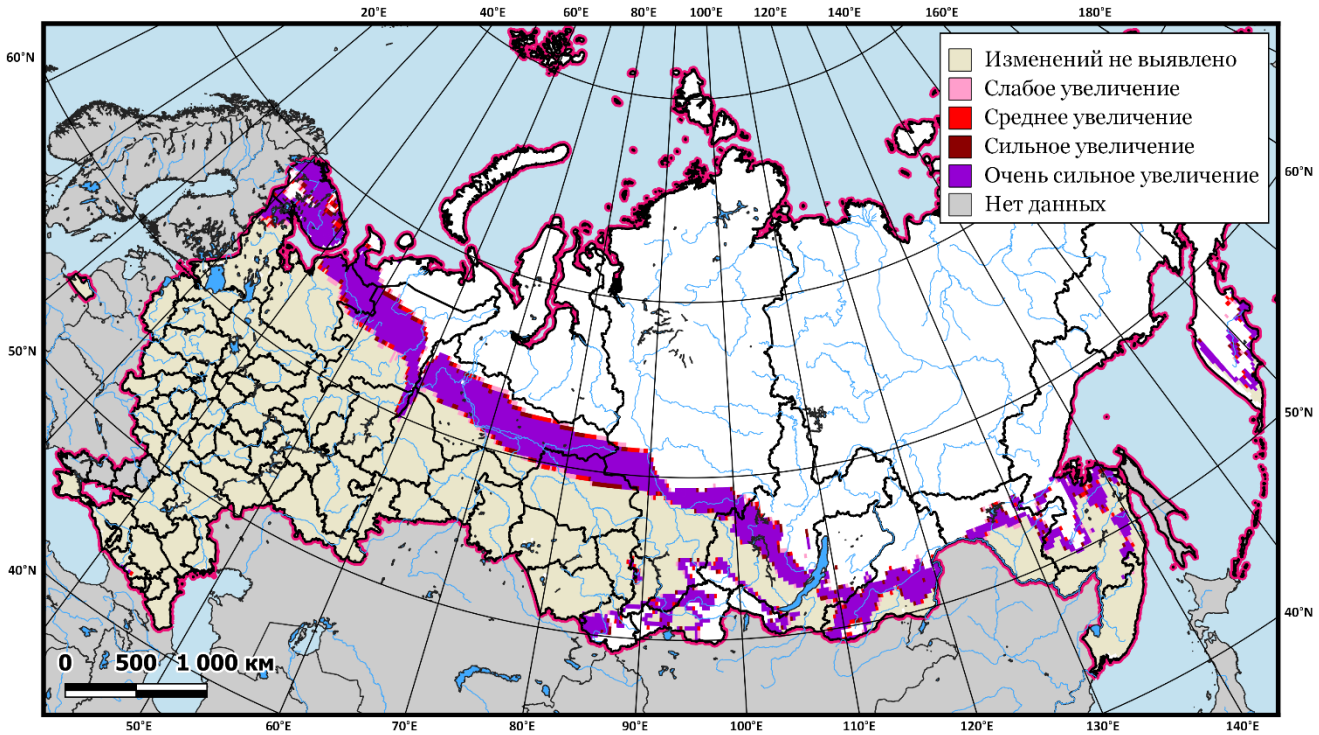


Рисунок 3.28 – Изменение расчетной КОР доминирования теплой части года в календарном году на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP8.5 для 2030–2039 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

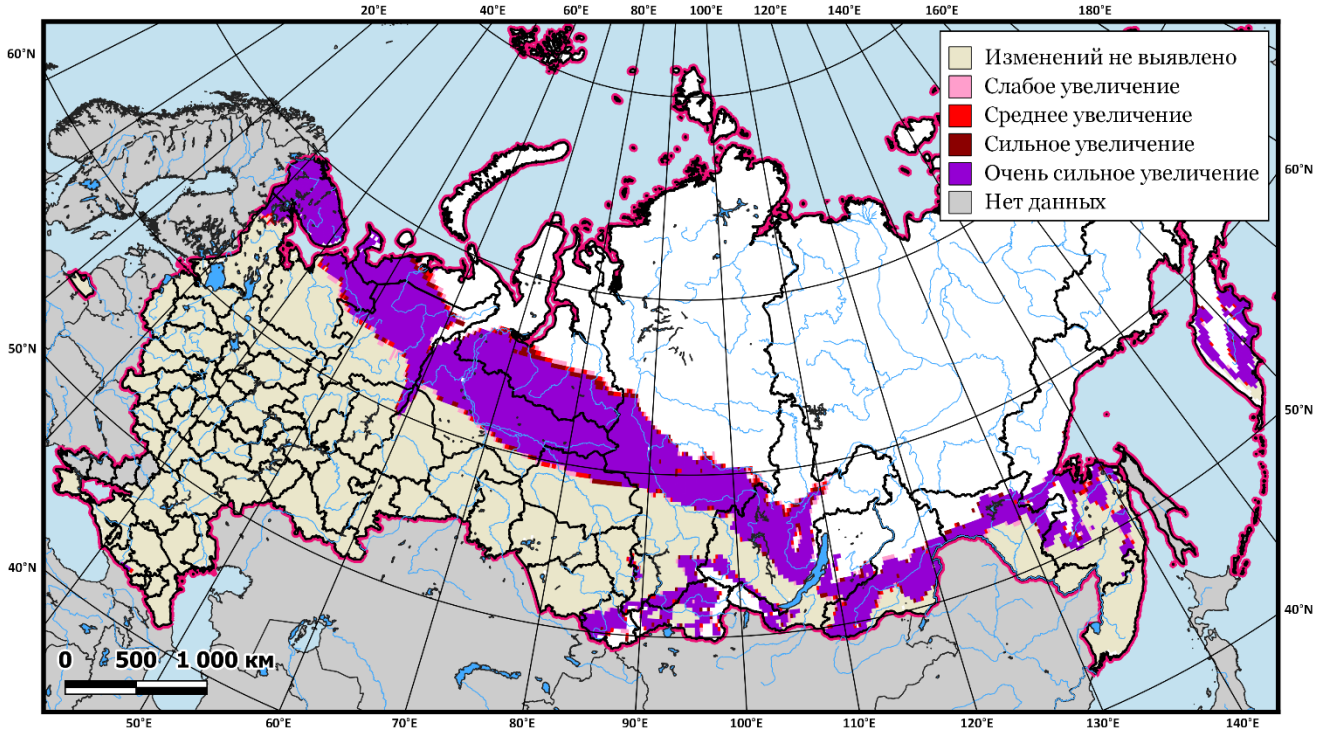


Рисунок 3.29 – Изменение расчетной КОР доминирования теплой части года в календарном году на территории России в условиях климата КЦР^{a} при сценарии RCP8.5 для 2050–2059 гг. по сравнению с климатом 1990–1999 гг.

Существенное продвижение границы КОР на север ожидается также в Западной Сибири. Здесь теплая часть, возможно, будет доминировать на всей территории Ханты-Мансийского автономного округа и значительной части Ямало-Ненецкого автономного округа. Кроме того, увеличение балльной оценки вероятности точек географического пространства принадлежать КОР регистрируется в горных областях, в частности на территории Алтая в его традиционно холодных и высокогорных районах. В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке также отмечается смещение границы КОР на север.

Изложенные результаты расчетов изменения границы КОР доминирования теплой части года значимы как с научной, так и с практической точки зрения. Во-первых, изучение вероятностных оценок КОР доминирования теплой части года позволяет более детально идентифицировать зоны риска или, наоборот, потенциально благоприятные зоны, которые могут существенно расшириться в будущем. Это важно для долгосрочного планирования в различных сферах, в том

числе в сельском хозяйстве, инфраструктурном строительстве, территориальном развитии и энергетике. Во-вторых, расчет и анализ изменений КОР доминирования теплой части года важно для формирования общей картины того, как глобальное изменение климата влияет на региональные климатические процессы.

3.6. Заключение по Главе 3

Продемонстрирована эффективность разработанной системы математико-модельных блоков, соответствующих предложенных алгоритмов и их программной реализации в форме системы RANGES при расчетах климатической области распространения природных явлений. А именно, проведены расчеты климатических ареалов ряда насекомых-вредителей сельскохозяйственных и лесных растений, климатической области распространения (КОР) явления сильной засухи, частота которой превышает пороговое значение, соответствующее целесообразности культивирования зерновых по существующим хозяйственным правилам, а также КОР доминирования теплой части года в календарном году.

Эти расчеты проводились для базового периода 1990–1999 гг. и двух периодов XXI века: 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. При этом использовались расчетные климаты, полученные с использованием региональной климатической модели Климатического центра Росгидромета, а также с использованием глобальной климатической модели Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Привлекались также климатические данные массива CRU TS v. 4.04 Отдела исследования климата Университета Восточной Англии. Расчетные климаты соответствовали сценариям RCP4.5 и RCP8.5 антропогенного воздействия на климатическую систему.

С помощью системы RANGES выполнены расчеты КОР явлений сильной засухи и доминирования теплой части года, а также климатических ареалов видов насекомых-вредителей (средиземноморской плодовой мухи, хлопковой совки и непарного шелкопряда), соответствующие климату 1990–1999 гг., и их климатообусловленных изменений в 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. относительно климата 1990–1999 гг. в условиях указанных выше сценариев.

В самом общем виде результаты расчетов можно сформулировать следующим образом.

На территории России в XXI веке климатический ареал хлопковой совки на территории до примерно 95° в. д. будет расширяться к северу. Восточнее этой линии ожидается расширение имеющихся локаций, а также образование новых в более северных районах. В условиях сценария более сильного антропогенного воздействия на климатическую систему эти тенденции будут проявляться сильнее.

Сходные процессы будут наблюдаться в отношении климатического ареала непарного шелкопряда с тем отличием, что на юге Европейской части России его ареал сократится.

Климатический ареал средиземноморской плодовой мухи для климата 1990–1999 гг. на территории России весьма невелик – ограниченные локации в Краснодарском крае, Республике Адыгея и Республике Крым, а также задатки в Республике Дагестан. В XXI веке ожидается расширение этих локаций, а также появление новых на западном побережье Каспия. При этом масштабы расширения для обоих рассматриваемых сценариев RCP4.5 и RCP8.5 отличаются незначительно.

Расчет территории в России, на которой частота сильной засухи в условиях климата 1990–1999 гг. превышала пороговое значение, установленное хозяйственными правилами целесообразности для культивирования зерновых, указал на некоторые части Астраханской области, Республики Калмыкия, Республики Дагестан, Ростовской области, Волгоградской области, Саратовской и Оренбургской областей, Республики Крым. В условиях сценария RCP8.5 эта территория в XXI веке будет расширяться к северу и западу, причем в 2050–2059 гг. ее расширение к северу будет заметно больше, чем в 2030–2039 гг.

Построена карта-схема КОР доминирования теплой части года на территории России в условиях климата КЦР^{a} для периода 1990–1999 гг. Карты изменений КОР для будущих периодов 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. в условиях климата КЦР^{a} и сценариев RCP4.5 и RCP8.5 показывают значительное расширение КОР, особенно на север и в горные районы.

Используемые в данной работе средства визуализации результатов расчетов эффективно способствовали оценке моделируемых климатических областей распространения природных явлений, в том числе их сравнению для разных периодов времени и в условиях различных сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему.

Заключение

Гидрометеорологические факторы играют заметную роль в формировании многих природных явлений. Они определяют климатическую область распространения (КОР) явления в пространстве, т.е. ту его часть, где в условиях, соответствующих климату исследуемого климатически значимого промежутка времени данное явление систематически наблюдается при способствующем сочетании остальных факторов среды. При изменении климата такая область распространения будет, вообще говоря, меняться.

КОР природного явления возможно описывать с использованием специфической совокупности гидрометеорологических переменных – собственно гидрометеорологических величин или/и индексов, вычисляемых на их основе. Для каждого из них устанавливается определенный диапазон, и если для всех этих переменных их значения заданного временного разрешения находятся в пределах таких своих диапазонов, то климатическая ситуация является способствующей рассматриваемому явлению.

Заключение о принадлежности данной точки географического пространства КОР природного явления, соответствующей климату заданного отрезка времени (в данной работе – десятилетия) можно делать на основе климатических средних соответствующих гидрометеорологических переменных и на основе совокупности их оценок для каждого года рассматриваемого отрезка времени. Второй подход позволяет делать оценку вероятности того (уверенности в том), что данная точка географического пространства принадлежит КОР. В работе развит вероятностный подход и приведены расчетные алгоритмы его реализации.

В работе описана вычислительная система RANGES, которая позволяет устанавливать 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 климатически значимого промежутка времени. Программная реализация алгоритмов системы

RANGES выполнена с использованием общедоступной версии языка программирования FORTRAN.

Продемонстрирована эффективность разработанной системы математико-модельных блоков, соответствующих предложенных алгоритмов и их программной реализация в форме системы RANGES при расчетах КОР некоторых природных явлений. А именно, проведены расчеты КОР для явления доминирования теплой части года (разделения года на теплую и холодную части) и явления сильной засухи, а также распространения опасных насекомых-вредителей растений.

Эти расчеты проводились для базового периода 1990–1999 гг. и двух периодов XXI века: 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. При этом использовались расчетные климаты Климатического центра Росгидромета и Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, а также массив фактических климатических данных CRU TS v. 4.04 Отдела исследования климата Университета Восточной Англии (Великобритания). Расчетные климаты соответствовали сценариям RCP4.5 и RCP8.5 антропогенного воздействия на климатическую систему. Расчеты показали, что в условиях этих сценариев КОР рассматриваемых явлений будет в основном расширяться. Для визуализации результатов расчетов использовалась общедоступная версия картографической системы QGIS.

Список используемых источников и литературы

1. Аверенский, А.И. Насекомые – главнейшие вредители лесов Якутии / А.И. Аверенский, А.П. Исаев; отв. ред. Н.Н. Винокуров. – Новосибирск: Наука, 2013. – 164 с.

2. Алфераки, С.Н. К фауне чешуекрылых Северного Кавказа (исправления и добавления) / С.Н. Алфераки // Русское энтомологическое обозрение. – 1907 [1908]. – Т.7. – №.4. – С.203-205.

3. Артохин, К.С. Совкообразные – вредители сельскохозяйственных культур и лесных насаждений / К.С. Артохин, А.Н. Полтавский, А.Ю. Матов, В.И. Щуров. – Ростов-на-Дону: Foundation, 2017. – 376 с.

4. Афонин, А.Н. Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения, [Интернет-версия 2.0] [Электронный ресурс] / А.Н. Афонин, С.Л. Грин, Н.И. Дзюбенко, А.Н. Фролов (ред.). – 2008. Режим доступа: http://www.agroatlas.ru (дата обращения: 21.02.2025).

5. Беклемишев, В.Н. Биоценологические основы сравнительной паразитологии / В.Н. Беклемишев. – М.: Наука, 1970. – 502 с.

6. Богачев, А.В. Хлопковая совка и меры борьбы с ней / А.В. Богачев. – Симферополь: Крымиздат, 1954. – 52 с.

7. Богданович, А.Ю. Влияние изменений засушливости в Росси в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур / А.Ю. Богданович, В.Н. Павлова, Э.Я. Ранькова, С.М. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021а. – №.1. – С.20-35.

8. Богданович, А.Ю. Возможное расширение на юге России климатического ареала средиземноморской плодовой мухи – опасного вредителя плодовых культур / А.Ю. Богданович, А.П. Андреева, Н.Ю. Добролюбов, С.В. Крыленко, О.Н. Липка, С.М. Семенов // Метеорология и гидрология. – 2023а. – №.1. – С.103-111.

9. Богданович, А.Ю. Климатические угрозы на Северо-Западе Черноморского побережья Кавказа: современные тренды / А.Ю. Богданович, О.Н. Липка, М.В. Крыленко, А.П. Андреева, К.О. Добролюбова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021б. – Т.7. – №.4. – С.44-70.

10. Богданович, А.Ю. Климатический ареал непарного шелкопряда на территории России, соответствующий климатам конца XX века и XXI века / А.Ю. Богданович, Н.Ю. Добролюбов, С.В. Крыленко, Ю.Н. Баранчиков, О.Н. Липка, С.М. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2023б. – Т.9. – №.1. – С.65-88.

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

12. Богданович, А.Ю. Система RANGES: структура, порядок расчета и пример применения / А.Ю. Богданович // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2025. – №.1(395). – С.37-50.

13. Богданович, А.Ю. Современный климатический ареал хлопковой совки и его трансформация в XXI веке вследствие изменения климата / А.Ю. Богданович, А.Н. Фролов, С.М. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2025. – Т.11. – №.1. – С.8-54.

14. Васютин, А.С. Карантин растений: учеб. для вузов по агр. спец. / А.С. Васютин, М.К. Каюмов, В.Ф. Мальцев; под общ. ред. А.С. Васютина. – М., 2002. – 164 с.

15. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова. – М., Росгидромет, 2014. – 1009 с.

16. Говоров, Д.Н. Хлопковая совка – периодическая угроза сельскохозяйственным посевам / Д.Н. Говоров, А.В. Живых, М.Ю. Проскурякова // Защита и карантин растений. – 2013. – №.5. – С.18-20.

17. Горышин, Н.И. Экологический анализ сезонного цикла развития хлопковой совки (*Chloridea obsoleta* F.) в северных районах ее распространения /

Н.И. Горышин // Ученые записки Ленинградского государственного университета. – 1958. – Вып.46. – №.240. – С.3-20.

18. Гричанов, И.Я. Ареал и зоны вредоносности непарного шелкопряда (*Lymantria dispar* L.) / И.Я. Гричанов, Е.И. Овсянникова, М.И. Саулич // Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения. [Интернет-версия 2.0] [Электронный ресурс]; А.Н. Афонин, С.Л. Грин, Н.И. Дзюбенко, А.Н. Фролов (ред). – 2008. Режим доступа: http://www.agroatlas.ru/ru/content/pests/Ocneria_dispar/map/index.html (дата обращения: 21.02.2025).

19. Дгебуадзе, Ю.Ю. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / Ю.Ю. Дгебуадзе, В.Г. Петросян, Л.А. Хляп (ред.). – М.: Т-во научных изданий КМК, 2018. – 688 с.

20. Добролюбов, Н.Ю. Алгебраический алгоритм статистической оценки параметра биномиального распределения и пример его применения в одной глобальной геоинформационной задаче прикладной климатологии / Н.Ю. Добролюбов, С.М. Семенов, Е.М. Володин, А.Ю. Богданович // Метеорология и гидрология. – 2023. – №.10. – С.16-24.

21. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. – Москва, 2024. – 104 с.

22. Казанок, Т.С. Биоэкологические особенности хлопковой совки в агроценозе сахарной кукурузы и меры борьбы с ней в условиях Западного Предкавказья: автореф. дис. … канд. сельскохозяйственных наук / Казанок Татьяна Сергеевна. – Воронеж, 2009. – 25 с.

23. Касаткин, Д.Г. Новое обнаружение средиземноморской плодовой мухи на территории РФ / Д.Г. Касаткин, С.В. Поушкова // Карантин растений. Наука и практика. – 2014. – №.4. – С.4-5.

24. Кат, А.Л. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды / А.Л. Кат, В.Л. Гусев, Т.А. Шубинина. – М.: Гидрометеоиздат. – 1975. –15 с.

25. Керчев И.А. Экология полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) в Западно-Сибирском регионе инвазии / И.А. Керчев // Российский журнал биологических инвазий. – 2014. – Т.7. – №.2. – С.80-95.

26. Клобуков, Г.И. Адаптационные популяционные особенности эмбриональной стадии непарного шелкопряда *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera: Erebidae) разного широтного происхождения / Г.И. Клобуков, В.И. Пономарёв, В.В. Напалкова // X чтения памяти О.А. Катаева. – 2018. – С.48-49.

27. Ковтун, В.И. Технология выращивания высококачественного зерна озимой пшеницы на юге России / В.И. Ковтун, Л.Н. Ковтун // Земледелие. – 2013. – №.3. – С.19-21.

28. Кожанчиков, И.В. О некоторых типах ареала распространения вредных насекомых / И.В. Кожанчиков // Известия Высших курсов прикладной зоологии и фитопатологии. –1941. – №.12. – С.222-234.

29. Кожанчиков, И.В. Эксперименты и наблюдения по влиянию тепла на развитие куколок хлопковой совки *Heliothis obsoleta* F. / И.В. Кожанчиков // Защита растений. – 1938. – №.16. – С.27-34.

30. Колтунов, Е.В. Экология непарного шелкопряда в лесах Евразии / Е.В. Колтунов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 259 с.

31. Кузьминский, А.В. Особенности развития хлопковой совки в северной Степи Украины / А.В. Кузьминский, В.П. Федоренко // Защита и карантин растений. – 2014. – №.11. – С.36-37.

32. Ларченко, К.И. Экология хлопковой совки и сроки борьбы с ней / К.И. Ларченко. – Ташкент: ФАН, 1968. – 192 с.

33. Ли, Х. Экология и прогноз появления хлопковой совки в северо-западном Китае / Х. Ли // Известия Харьковского энтомологического общества. – 1998. – Т. 6. – №.2. – С.147-149.

34. Литтл, Р.Дж.А. Статистический анализ данных с пропусками / Р.Дж.А. Литтл, Д.Б. Рубин. – М.: «Финансы и статистика», 1991. – 336 с.

35. Лямцев, Н.И. Динамика численности непарного шелкопряда в лесостепных дубравах Европейской России / Н.И. Лямцев. – ВНИИЛМ: Пушкино, 2013. – 97 с.

36. Лямцев, Н.И. Паразитические насекомые-регуляторы численности непарного шелкопряда (*Lymantria dispar* L.) в дубравах лесостепи / Н.И. Лямцев // Лесной вестник. – 2003. – №.2. – С.116-124.

37. Лямцев, Н.И. Прогнозирование массовых размножений непарного шелкопряда, угрозы повреждения дубрав и необходимости защитных мероприятий / Н.И. Лямцев. – ВНИИЛМ: Пушкино, 2018. – 84 с.

38. Магомедов, К.У. Потенциальный экономический ущерб от средиземноморской мухи в регионах ее возможной акклиматизации в Российской Федерации / К.У. Магомедов // Вопросы экономики и права. – 2011. – №.42. – С.157-160.

39. Магомедов, У.Ш. Средиземноморская плодовая муха *Ceratitis capitata* (Wied.). Возможности акклиматизации / У.Ш. Магомедов, Н.М. Атанов // Карантин растений. Наука и практика. – 2012. – №.2. – С.46-50.

40. Матов, А.Ю. Трофические связи гусениц совкообразных чешуекрылых фауны России (Lepidoptera, Noctuoidea: Nolidae, Erebidae, Euteliidae, Noctuidae) / А.Ю. Матов, В.С. Кононенко. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 346 с.

41. Миносян, А.Э. К распространению средиземноморской плодовой мухи на территории Краснодарского края / А.Э. Миносян, Н.Д. Петрова, И.Б. Попов. // Вестник научно-технического творчества молодежи Кубанского ГАУ. – 2018. – С.40-43.

42. Монин, А.С. Климат как проблема физики / А.С. Монин, Ю.А. Шишков // Успехи физических наук. – 2000. – Т.170. – №.4. – С.419-445.

43. Мюллер, П. Таблицы по математической статистике / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм. – М., Финансы и статистика, 1982. – 271 с.

44. Национальный атлас России в четырех томах. Том 2 «Природа. Экология». – М.: Роскартография, 2007. – 496 с.

45. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года. Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р. [Электронный ресурс]. – 2019. Режим доступа: http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf (дата обращения: 07.03.2025).

46. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Последствия изменений климата / Под ред. С.М. Семенова. – М., 2008. – 288 с.

47. Павлова, В.Н. Об оценке благоприятности климата для культивирования зерновых, исходя из частоты сильных засух / В.Н. Павлова, А.Ю. Богданович, С.М. Семенов // Метеорология и гидрология. – 2020. – №.12. – С.95-101.

48. Полоскина, Ф.М. Особенности развития и вредоносность хлопковой совки на кукурузе в Азербайджане / Ф.М. Полоскина // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. – 1962. – Вып.87. – С.119-123.

49. Пономарев, В.И. Непарный шелкопряд в Зауралье и Западной Сибири / В.И. Пономарев, А.В. Ильиных, Ю.И. Гниненко, Г.И. Соколов, Е.М. Андреева. – Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – 320 с.

50. Попов, И.О. Климатические причины современного расширения ареала итальянского пруса на территории России и соседних стран / И.О. Попов, Е.Н. Попова // Доклады Академии наук. – 2019. – Т.488. – №.6. – С.658-660.

51. Попов, И.О. Оценка климатогенной угрозы распространения таежного клеща *Ixodes persulcatus* на территории России и соседних стран в начале XXI века / И.О. Попов, С.М. Семенов, Е.Н. Попова // Известия РАН. Серия географическая. – 2021. – Т.85. – №.2. – С.231-237.

52. Попова, Е.Н. Возрастание саранчовой угрозы вслед за потеплением климата в России: расчетные оценки / Е.Н. Попова // Агро XXI. – 2014. – №.7-9. – С.12-15.

53. Попова, Е.Н. Применение картографического метода для оценки различий прикладных климатических индексов САТ и СЭТ / Е.Н. Попова, В.В. Ясюкевич, И.О. Попов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2019. – Т.30. – №.3-4. – С.11-27.

54. Правила отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции территориям. Постановление Правительства РФ от 27.01.2015 № 51 [Электронный ресурс]. – 2015. Режим доступа: http://base.garant.ru/70853938/ (дата обращения: 07.03.2025).

55. Рудых, С.Г. Полувековая (1963–2017 гг.) динамика численности и распространения непарного шелкопряда (Lepidoptera, Lymantriidae) в Бурятии / С.Г. Рудых, А.В. Филиппов, Юшань, Дуала // Природа Внутренней Азии. – 2018. – №.4(9). – С.44-53.

56. Селянинов, Г.Т. Принципы агроклиматического районирования территории СССР / Г.Т. Селянинов // В кн.: Вопросы агроклиматического районирования СССР. – М., Изд. Минсельхоза СССР. – 1958. – С.7-14.

57. Семенов, С.М. Выявление климатогенных изменений / С.М. Семенов, В.В. Ясюкевич, Е.С. Гельвер. – М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология», 2006. – 324 с.

58. Семенов, С.М. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке / С.М. Семенов, Е.С. Гельвер // Доклады Академии наук. Геофизика. – 2002. – Т.386. – №.3. – С.389-394.

59. Семенов, С.М. Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата / С.М. Семенов, И.О. Попов, В.В. Ясюкевич // Метеорология и гидрология. – 2020. – №.5. – С.59-65.

60. Семенов, С.М. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке / С.М. Семенов, А.А. Гладильщикова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2022. – Т.8. – №.1. – С.75-106.

61. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 676 с.

62. Фефелова, Ю.А. Факторы сезонной динамики численности хлопковой совки на Северо-Западном Кавказе в период низкой численности: автореф. дис. … канд. биол. наук / Фефелова Юлия Александровна. – Санкт-Петербург – Пушкин, 2007. – 19 с.

63. Фефелова, Ю.А. Факторы сезонной динамики численности хлопковой совки *Helicoverpa armigera* в Краснодарском крае / Ю.А. Фефелова, А.Н. Фролов // Вестник защиты растений. – 2007. – №.1. – С.47-52.

64. Фомин, С.Н. Вспышки массового размножения непарного шелкопряда *Lymantria dispar* (L.) в Республике Тыва, история исследований / С.Н. Фомин, В.В. Баринов, В.С. Мыглан // Журн. СФУ. Биология. – 2022. – Т.15. – №.1. – С.48–71.

65. Хромов, С.П. Метеорология и климатология: Учебник. – 8-е издание / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – М.: Издательство Московского университета, 2012. – 584 с.

66. Хромова, Л.М. Влияние некоторых синоптических показателей на вредоносность хлопковой совки в Кабардино-Балкарии / Л.М. Хромова // Аграрный вестник Урала. – 2011. – №.8(87). – С.12.

67. Церковная, В.С. Хлопковая совка в Приднестровье / В.С. Церковная, В.П. Черная // В кн.: Овощеводство и бахчеводство: исторические аспекты, современное состояние, проблемы и перспективы развития. Материалы III Международной научно-практической конференции (в рамках II научного форума «Неделя науки в Крутах – 2017», 13-14 марта 2017 г., с. Круты, Черниговская обл., Украина), в двух томах. – 2017. – Т.2. – С.337-342.

68. Ченикалова, Е.В. Хлопковая совка продвигается на север. Проблемы прогноза численности / Е.В. Ченикалова, В.А. Коломыцева // Защита и карантин растений. – 2021. – №.2. – С.31-33.

69. Черенкова, Е.А. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины / Е.А. Черенкова, М.Ю. Бардин, Т.В. Платова, В.А. Семёнов // Метеорология и гидрология. – 2020. – №.12. – С.5-19.

70. Черенкова, Е.А. Опасная атмосферная засуха на Европейской части России в условиях современного летнего потепления / Е.А. Черенкова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т.2. – С.130-143.

71. Черкашин, В.Н. Хлопковая совка на полевых культурах / В.Н. Черкашин, А.Н. Малыхина, Г.В. Черкашин // Земледелие. – 2014. – №.5. – С.35-36.

72. Чумаков, М.А. *Helicoverpa armigera* Hbn. − Хлопковая совка / М.А. Чумаков, Т.Л. Кузнецова // Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения. [Интернет-версия 2.0] [Электронный ресурс]; А.Н. Афонин, С.Л. Грин, Н.И. Дзюбенко, А.Н. Фролов (ред). – 2008. Режим доступа: http://www.agroatlas.ru/ru/content/pests/Helicoverpa_armigera/index.html (дата обращения: 21.02.2025).

73. Шерстюков, Б.Г. Метеорологические факторы горимости леса, засушливости погоды во второй половине XX века и экстремальные условия 2002 года в Московском регионе. Анализ климатической изменчивости и оценки возможных изменений климата / Б. Г. Шерстюков // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2003. – Вып.171. – С.79-88.

74. Школьник, И.М. Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии / И.М. Школьник, С.В. Ефимов // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2015. – №.576. – С.201-211.

75. Ясюкевич, В.В. Климатические предикторы для модельного описания климатических ареалов некоторых биологических видов и их изменений в условиях будущего климата / В.В. Ясюкевич, А.Ю. Богданович // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т.7. – №.1. – С.117-137.

76. Ясюкевич, В.В. Оценки региональной уязвимости лесного хозяйства субъектов Российской Федерации под влиянием ожидаемого в XXI веке изменения климата в отношении непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки (*Lymantria dispar* L. и *Lymantria monacha* L., Erebidae, Lepidoptera) / В.В. Ясюкевич, С.Н. Титкина, И.О. Попов, Н.В. Ясюкевич // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2019. – Т.30. – №.1-2. – С.15-32.

77. Aukema, J.E. Economic Impacts of Non-Native Forest Insects in the Continental United States / J.E. Aukema, B. Leung, K. Kovacs, C. Chivers, K.O. Britton, J. Jeffrey Englin, S.J. Frankel, R.G. Haight, T.P. Holmes, A.M. Liebhold, D.G. McCullough, B. Von Holle // PLoS ONE. – 2011. – Vol.6. – №.9. – P.e24587.

78. Bapatla, K.G. Impact of climate change on *Helicoverpa armigera* voltinism in different agro-climatic zones of India / K.G. Bapatla, A.D. Singh, V. Sengottaiyan, R.R. Korada, S. Yeddula // Journal of Thermal Biology. – 2022. – Vol.106. – P.103229.

79. Barros, A.M. Contrasting the role of human-and lightning-caused wildfires on future fire regimes on a Central Oregon landscape / A.M. Barros, M.A. Day, H.K. Preisler, J.T. Abatzoglou, M.A. Krawchuk, R. Houtman, A.A. Ager, // Environmental Research Letters. – 2021. – Vol.16. – №.6. – P.064081.

80. Bochenek, B. Machine learning in weather prediction and climate analyses – applications and perspectives / B. Bochenek, Z. Ustrnul // Atmosphere. – 2022. – Vol.13. – №.2. – P.180(1-16).

81. Bradshaw, C.J.A. Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects / C.J.A. Bradshaw, B. Leroy, C. Bellard, D. Roiz, C. Albert, A. Fournier, M. Barbet-Massin, J.M. Salles, F. Simard, F. Courchamp // Nature Communications. – 2016. – Vol.7. – P.12986.

82. Byeon, D.H. Prediction of global geographic distribution of *Metcalfa pruinosa* using CLIMEX / D.H. Byeon, J.M. Jung, S. Jung, W.H. Lee // Entomological Research. – 2018. – Vol.48. – №.2. – P.99-107.

83. Dalal, P.K. Impact of temperature on food consumption and nutritional indices of tomato fruit borer, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Noctuidae: Lepidoptera) / P.K. Dalal, R. Arora // Journal of Agrometeorology. – 2016. – Vol.18. – №.1. – P.62-67.

84. Danandeh Mehr, A. A novel intelligent deep learning predictive model for meteorological drought forecasting / A. Danandeh Mehr, A. Rikhtehgar Ghiasi, Z.M. Yaseen, A.U. Sorman, L. Abualigah, // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2023. – Vol.14. – №.8. – P.10441-10455.

85. Early, R. Comparing, evaluating and combining statistical species distribution models and CLIMEX to forecast the distributions of emerging crop pests / R.

Early, I. Rwomushana, G. Chipabika, R. Day // Pest Management Science. – 2022. – Vol.78. – №.2. – P.671-683.

86. Elekcioglu, N.Z. Fruit flies of economic importance in Turkey, with special reference to Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wied.) / N.Z. Elekcioglu // Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi. – 2013. – Vol.6. – №.2. – P.33-37.

87. EPPO, 2024. *Helicoverpa armigera*. Last updated: 2024-04-15. EPPO datasheets on pests recommended for regulation [Electronic resource]. – 2024. URL: https://gd.eppo.int/taxon/HELIAR (accessed 2025-03-07).

88. FAO, 2013. Geographical distribution map of the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* (Wiedemann). – FAO/IAEA, 2013.

89. Gabrieli, P. Delivery of nucleic acids through embryo microinjection in the worldwide agricultural pest insect, *Ceratitis capitata* / P. Gabrieli, F. Scolari // Journal of Visualized Experiments. – 2016. – №.116. – P.e54528.

90. Gilioli, G. Non-linear physiological responses to climate change: the case of *Ceratitis capitata* distribution and abundance in Europe / G. Gilioli, G. Sperandio, M. Colturato, S. Pasquali, P. Gervasio, A. Wilstermann, A.R. Dominic, G. Schrader // Biological Invasions. – 2022. – Vol.24. – №.1. – P.261-279.

91. Glagolev, V. Web system of fire danger evaluation and forecast according to the global climate model global forecast system / V. Glagolev, O. Dolmatova, E. Gafiatulina, D. Zhuravlev, V. Masyagin, R. Bazhenov // In AIP Conference Proceedings. AIP Publishing. – 2024. – Vol.3021. – №.1. – P.030029.

92. Grishin, A.M. A deterministic-probabilistic system for predicting forest fire hazard / A.M. Grishin, A.I. Filkov // Fire Safety Journal. – 2011. – Vol.46. – №.1-2. – P.56-62.

93. Haile, F. Overview of pest status, potential risk, and management considerations of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) for U.S. Soybean Production / F. Haile, T. Nowatzki, N. Storer // Journal of Integrated Pest Management. – 2021. – Vol.12. – №.1. – P.3(1-10).

94. Hansen, M.C. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach / M.C. Hansen, R.S. DeFries, J.R. Townshend, R.

Sohlberg // International journal of remote sensing. – 2000. – Vol.21. – №.6-7. – P.1331-1364.

95. Harris, I. Updated high resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset / I. Harris, P. Jones, T. Osborn, D. Lister // Int. J. Climatology. – 2014. – Vol.34. – P.623-642.

96. Harris, I. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset / I. Harris, T.J. Osborn, P.D. Jones, D. Lister // Scientific Data. – 2020. – Vol.7. – P.109(1-18).

97. Hayat, U. Which SDM Model, CLIMEX vs. MaxEnt, Best Forecasts *Aeolesthes sarta* Distribution at a Global Scale under Climate Change Scenarios? / U. Hayat, J. Shi, Z. Wu, M. Rizwan, M.S. Haider // Insects. – 2024. – Vol.15. – №.5. – P.324(1-20).

98. *Helicoverpa armigera* (cotton bollworm), 2021. CABI Compendium, 16 November 2021 [Electronic resource] / CABI Head Office, Wallingford, UK. – 2021. URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.1079/cabicompendium.26757 (accessed 2025-03-07).

99. Huang, J. Effects of climate change on different geographical populations of the cotton bollworm *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera, Noctuidae) / J. Huang // Ecology and Evolution. – 2021. – Vol.11. – №.24. – P.18357-18368.

100. IPCC, 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment / eds J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums. – Cambridge Univ. Press, 1990.

101. IPCC, 1995. Second Assessment: Climate Change 1995. A Synthesis Report. – WMO, 1995.

102. IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / edited by J.T. Houghton et al. – Cambridge Univ. Press, New York, 2001. – 881 pp.

103. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / edited by S. Solomon et al. – Cambridge Univ. Press, New York, 2007.

104. IPCC, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of the intergovernmental panel on climate change / C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi et al. (Ed.). – Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.

105. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). – IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. – 151 pp.

106. IPCC, 2019. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers [Electronic resource]. – 2019. – 41 pp. URL: https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/ (accessed 2025-03-07).

107. IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R.Yu, and B. Zhou (Eds.). – Cambridge University Press – Cambridge – United Kingdom and New York – NY – USA, 2021. – 2391 pp.

108. IPCC, 2022a. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022a. – 3056 pp.

109. IPCC, 2022b. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M.

Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022b. – 2029 pp.

110. Jaccard, P. Distribution de la flore alpine dans le bassin des Dranses et dans quelques régions voisines / P. Jaccard // Bulletin de la Societe Vaudoise des Sciences Naturelles. – 1901. – Vol.37. – P.241-272.

111. Jones, C.M. Movement ecology of pest *Helicoverpa*: implications for ongoing spread / C.M. Jones, H. Parry, W.T. Tay, D.R. Reynolds, J.W. Chapman // Annual Review of Entomology. – 2019. – Vol.64. – P.277-295.

112. Jung, J.-M. Model-based prediction of potential distribution of the inxasixe insect pest, spotted lanternfly *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoridae), by using CLIMEX / J.-M. Jung, S. Jung, D. Byeon, W.-H. Wang-Hee Lee // Journal of Asia-Pacific Biodixersity. – 2017. – Vol.10. – №.4. – P.532-538.

113. Kharuk, V.I. Wildfires in the Siberian taiga / V.I. Kharuk, E.I. Ponomarev, G.A. Ivanova, M.L. Dvinskaya, S.C. Coogan, M.D. Flannigan // Ambio. – 2021. –Vol.50. – №.11. – P.1953-1974.

114. Kriticos, D.J. The potential distribution of invading *Helicoverpa armigera* in North America: is it just a matter of time? / D.J. Kriticos, N. Ota, W.D. Hutchison, J. Beddow, T. Walsh, W.T. Tay, D.M. Borchert, S.V. Paula-Moreas, C. Czepak, M.P. Zalucki // PloS One. – 2015. – Vol.10. – №.3. – P.e0119618.

115. Lammers, J.W. Report of a pest risk analysis: *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) [Electronic resource] / J.W. Lammers, A. MacLeod // Plant Protection Service (NL) and Central Science Laboratory (UK). – 2007. – 18 pp. URL: https://pra.eppo.int/getfile/81ff20f2-652c-4bd6-a76c-4201e9eff214 (accessed 2025-03-07).

116. Lancette, J. Breaking Barriers in Entomology: The Better Common Names Project / J. Lancette // American Entomologist. – 2021. – Vol.67. – №.4. – P.10-11.

117. Liebhold, A.M. Gypsy moth invasion in North America: A quantitative analysis / A.M. Liebhold, J.A. Halverson, G.A. Elmes // Journal of Biogeography. – 1992. – Vol.19. – №.5. – P.513-520.

118. Liebhold, A.M. Learning from the legacy of Léopold Trouvelot / A.M. Liebhold, V. Mastro, P.W. Schaefer // Bull. Entomol. Soc. Am. – 1989. – Vol.35. – №.2. – P.20-22.

119. Liquido, N.J. MEDHOST: An encyclopedic bibliography of the host plants of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann), version 3.0 [Electronic resource] / N.J. Liquido, G.T. McQuate, K.A. Suiter // USDA CPHST Online Database. – 2015. URL: https://coffhi.cphst.org/ (accessed 2025-03-07).

120. Liu, Z. A true summer diapause induced by high temperatures in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) / Z. Liu, P. Gong, K. Wu, J. Sun, D. Li // Journal of Insect Physiology. – 2006. – Vol.52. – №.10. – P.1012-1020.

121. Lowe, S. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A Selection from the Global Invasive Species Database / S. Lowe, M. Brone, S. Boudjelas, M. De Poorter. – Hollands Printing Ltd.: Auckland, New Zealand, 2000. – 12 pp.

122. Maelzer, D.A. Analysis of long-term light-trap data for *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: the effect of climate and crop host plants / D.A. Maelzer, M.P. Zalucki // Bulletin of Entomological Research. – 1999. – Vol.89. – №.5. – P.455-463.

123. Mastrandrea, M.D. IPCC Fifth Assessment Guidance Note for Lead Authors IPCC Cross-Working Group for Uncertainties [Electronic resource] / M.D. Mastrandrea, C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe, F.W. Zwiers (Core Writing Team), C.A. Jasper Ridge (Ed.) // USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – 2010. URL: http://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/uncertainty-guidance-note.pdf (accessed 2025-03-07).

124. Mironidis, G.K. Development, survivorship and reproduction of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) under fluctuating temperatures / G.K. Mironidis // Bulletin of Entomological Research. – 2014. – Vol.104. – №.6. – P.751-764.

125. Mironidis, G.K. Effects of thermophotoperiod on growth parameters of *Helicoverpa armigera* / G.K. Mironidis, M. Savopoulou-Soultani // Entomologia Experimentalis et Applicata. – 2012. – Vol.142. – №.1. – P.60-70.

126. Murúa, M.G. First record of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Argentina / M.G. Murúa, F.S. Scalora, F.R. Navarro, L.E. Cazado, A. Casmuz, M.E. Villagrán, E. Lobos, G. Gastaminza // Florida Entomologist. – 2014. – Vol.97. – №.2. – P.854-856.

127. Nkiruka, O. Prediction of malaria incidence using climate variability and machine learning / O. Nkiruka, R. Prasad, O. Clement // Informatics in medicine Unlocked. – 2021. – Vol.22. – P.100508.

128. Nyamukondiwa, C. Phenotypic plasticity of thermal tolerance contributes to the invasion potential of Mediterranean fruit flies (*Ceratitis capitata*) / C. Nyamukondiwa, E. Kleynhans, J.S. Terblanche // Ecological Entomology. – 2010. – Vol.35. – №.5. – P.565-575.

129. Nyamukondiwa, C. Thermal biology, population fluctuations and implications of temperature extremes for the management of two globally significant insect pests / C. Nyamukondiwa, C.W. Weldon, S.L. Chown, P.C. le Roux, J.S. Terblanche // Journal of Insect Physiology. – 2013. – Vol.59. – №.12. – P.1199-1211.

130. Nyamukondiwa, C. Thermal tolerance in adult Mediterranean and Natal fruit flies (*Ceratitis capitata* and *Ceratitis rosa*): effects of age, gender and feeding status / C. Nyamukondiwa, J.S. Terblanche // Journal of Thermal Biology. – 2009. – Vol.34. – №.8. – P.406-414.

131. Osborne, M. Invasive insect gets a new name: spongy moth [Electronic resource] / M. Osborne // Smithsonian Magazine. – 2022. URL: https://www.smithsonianmag.com/smart-news/invasive-moth-gets-a-new-name-spongy-moth-180979680/ (accessed 2025-03-07).

132. Paini, D.R. Global establishment threat from a major forest pest via international shipping: *Lymantria dispar* / D.R. Paini, P. Mwebaze, P.M. Kuhnert, D.J. Kriticos // Scientific reports. – 2018. – Vol.8. – №.1. – P.1-7.

133. Papadopoulos, N.T. Early detection and population monitoring of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in a mixed-fruit orchard in northern Greece / N.T. Papadopoulos, B.I. Katsoyannos, N.A. Kouloussis, J. Hendrichs, J.R. Carey, R.R. Heath // Journal of Economic Entomology. – 2001. – Vol.94. – №.4. – P.971-978.

134. Parvar, Z. Integrating meteorological and geospatial data for forest fire risk assessment / Z. Parvar, S. Saeidi, S. Mirkarimi // Journal of environmental management. – 2024. – Vol.358. – P.120925.

135. Perevedentsev, Y. Climate-induced fire hazard in forests in the Volga federal district of European Russia during 1992–2020 / Y. Perevedentsev, B. Sherstyukov, A. Gusarov, T. Aukhadeev, N. Mirsaeva // Climate. – 2022. – Vol.10. – №.7. – P.110(1-12).

136. Pogue, M.C. A review of selected species of *Lymantria* (Hubner 1819) (Lepidoptera: Noctuidae: Lymantrunae) from subtropical and temperate regions of Asia including the description of three new species, some potentially invasive to North America / M.C. Pogue, P.W. Schaefer // Publication FHTET-2006-2007. USDA. Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team, Fort Collins. Colorado. – 2007. – 221 pp.

137. Raposo, V.D.M.B. A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors / V.D.M.B. Raposo, V.A.F. Costa, A.F. Rodrigues // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol.898. – P.165550.

138. Riaz, S. A review on biological interactions and management of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) / S. Riaz, J.B. Johnson, M. Ahmad, G.P. Fitt, M. Naiker // Journal of Applied Entomology. – 2021. – Vol.145. – №.6. – P.467-498.

139. Sharma, H.C. Pest management in grain legumes and climate change / H.C. Sharma, C.P. Srivastava, C. Durairaj, C.L.L. Gowda // In: Climate change and management of cool season grain legume crops. S.S. Yadav, D.L. McNeil, R. Redden, S.A. Patil (eds). – Dordrecht, Netherlands: Springer Science, 2010. – P.115-140.

140. Shi, X. Prediction of the potentially suitable areas of *Litsea cubeba* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model / X. Shi, J. Wang, L. Zhang, S. Chen, A. Zhao, X. Ning, Z. Wang // Ecological Indicators. – 2023. – Vol.148. – P.110093.

141. Slater, L.J. Hybrid forecasting: blending climate predictions with AI models / L.J. Slater, L. Arnal, M.A. Boucher, A.Y.Y. Chang, S. Moulds, C. Murphy, M. Zappa // Hydrology and earth system sciences. – 2023. – Vol.27. – №.9. – P.1865-1889.

142. Souza, P.G. *Tamarixia radiata* global distribution to current and future climate using the climate change experiment (CLIMEX) model / P.G. Souza, O.F. Aidoo, P.K. Farnezi, W.K. Heve, P.A. Júnior, M.C. Picanço, R.S. Silva // Scientific Reports. – 2023. – Vol.13. – №.1. – P.1823.

143. Szyniszewska, A.M. Analysis of seasonal risk for importation of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae), via air passenger traffic arriving in Florida and California / A.M. Szyniszewska, N.C. Leppla, Z. Huang, A.J. Tatem // Journal of economic entomology. – 2016. – Vol.109. – №.6. – P.2317-2328.

144. Szyniszewska, A.M. Analyzing seasonal risk indicators of Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* (Medfly) importation into Florida via commodity imports and passenger traffic / A.M. Szyniszewska // Dissertation, University of Florida. – 2013.

145. Tay, W.T. A brave new world for an old world pest: *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil / W.T. Tay, M.F. Soria, T. Walsh, D. Thomazoni, P. Silvie, G.T. Behere, C. Anderson, S. Downes // PloS One. – 2013. – Vol.8. – №.11. – P.e80134.

146. Tobin, P. Slow the Spread: A National Program to Manage the Gypsy Moth / P. Tobin, L.M. Blackburn (Eds.) // General Technical Reports NRS-6. USDA, Forest Service, Northern Research Station: Newton Square, PA, USA. – 2007. – 109 pp.

147. UNFCCC, 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change, Rio de Janeiro, Brazil. – 1992.

148. UNFCCC, 2015. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Paris, France. – 2015.

149. Vanhanen, H. Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth-a model study / H. Vanhanen, T.O. Veteli, S. Paivinen, S. Kellomaki, P. Niemela // Silva Fennica. – 2007. – Vol.41. – №.4. – P.621-638.

150. Yadav, S.P.S. A review on the biology, ecology, and management tactics of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) / S.P.S. Yadav, V. Lahutiya, P. Paudel // Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology. – 2022. – Vol.10. – №.12. – P.2467-2476.

151. Zacharakis, I. Environmental forest fire danger rating systems and indices around the globe: a review / I. Zacharakis, V.A. Tsihrintzis // Land. – 2023. – Vol.12. – №.1. – P.194(1-35).

152. Zargar, A. A review of drought indices / A. Zargar, R. Sadiq, B. Naser, F.I. Khan // Environmental Reviews. – 2011. – Vol.19. – P.333-349.

153. Сайт ВНИИГМИ-МЦД // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: http://meteo.ru (дата обращения: 07.03.2025).

154. Сайт данных CRU // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg (дата обращения: 07.03.2025).

155. Сайт модели CLIMEX // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: https://www.climex-project.org (дата обращения: 07.03.2025).

156. Сайт хранилища знаний ФАО (FAO) // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: http://www.fao.org/3/mb738r/mb738r.pdf (дата обращения: 07.03.2025).

157. Сайт Copernicus // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: https://cds.climate.copernicus.eu (дата обращения: 07.03.2025).

158. Сайт CORDEX // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: https://cordex.org (дата обращения: 07.03.2025).

159. Сайт EM-DAT // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: https://www.emdat.be (дата обращения: 07.03.2025).

160. Сайт ESGF // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: https://esgf.llnl.gov (дата обращения: 07.03.2025).

161. Сайт NCEI // Официальный сайт: [сайт]. – 2025. – Режим доступа: https://www.ncei.noaa.gov (дата обращения: 07.03.2025).

Приложение

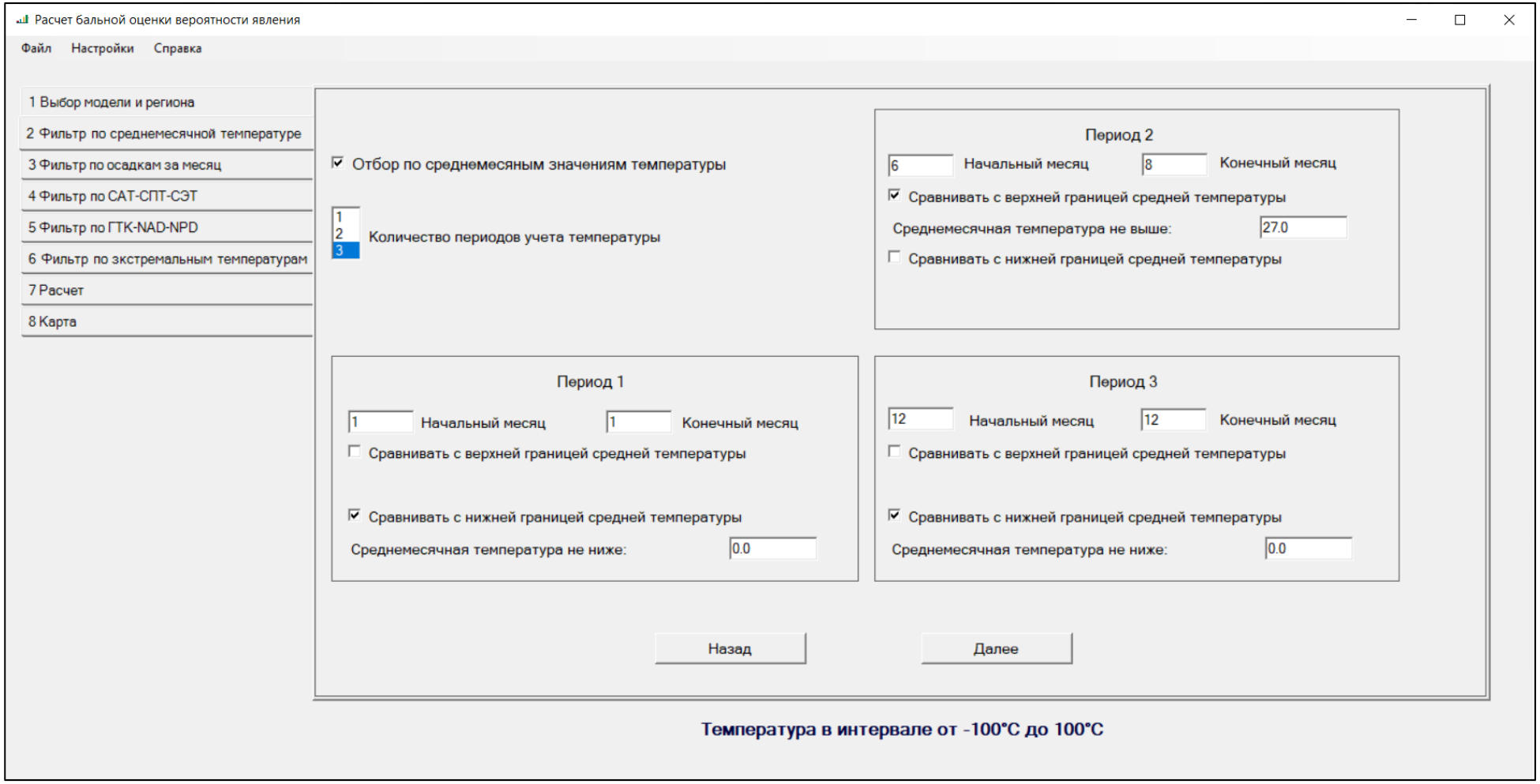


Рисунок П.1 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Выбор климатических параметров расчета: сведений о значениях среднемесячной температуры

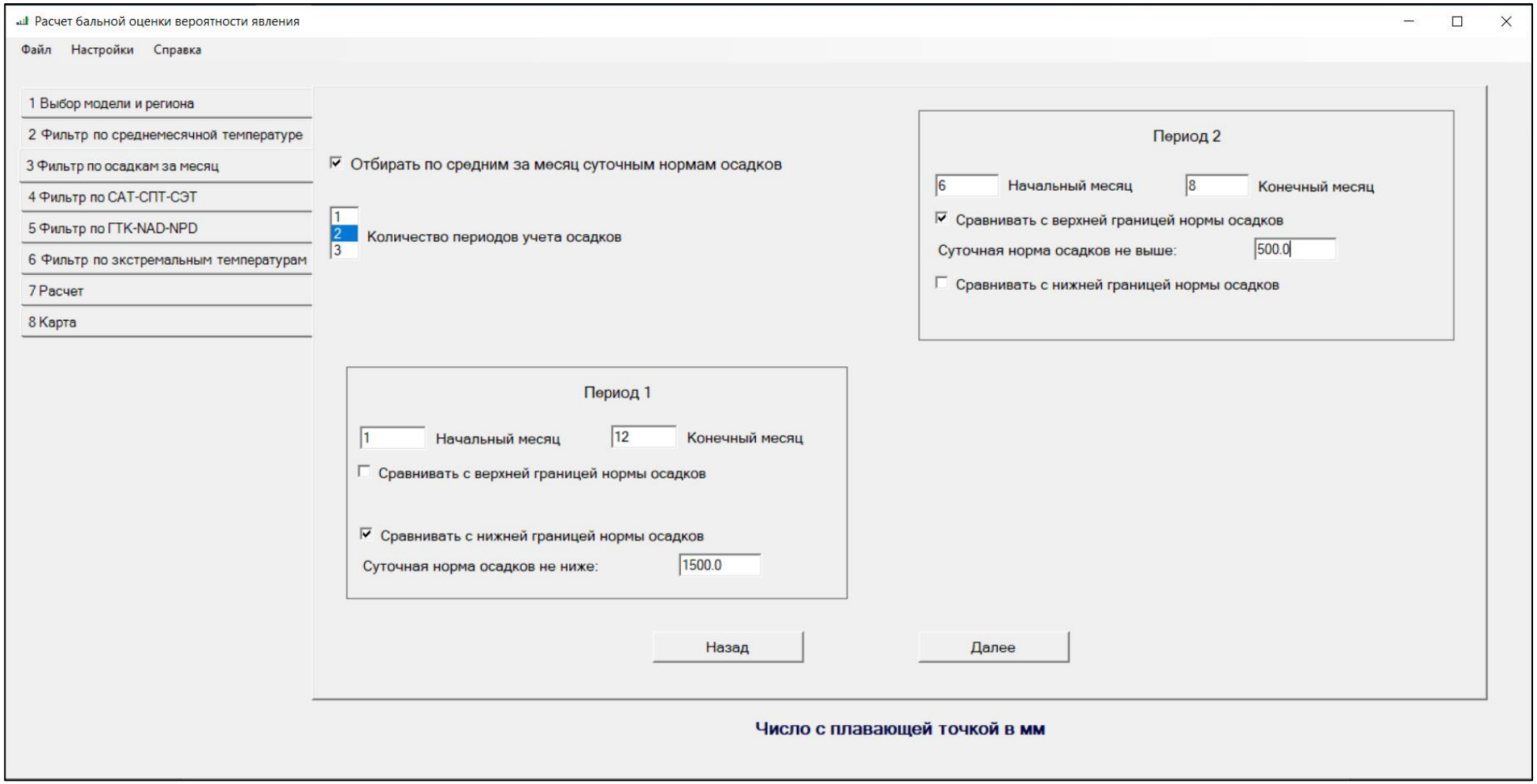


Рисунок П.2 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Выбор климатических параметров расчета: сведений о значениях месячных сумм осадков

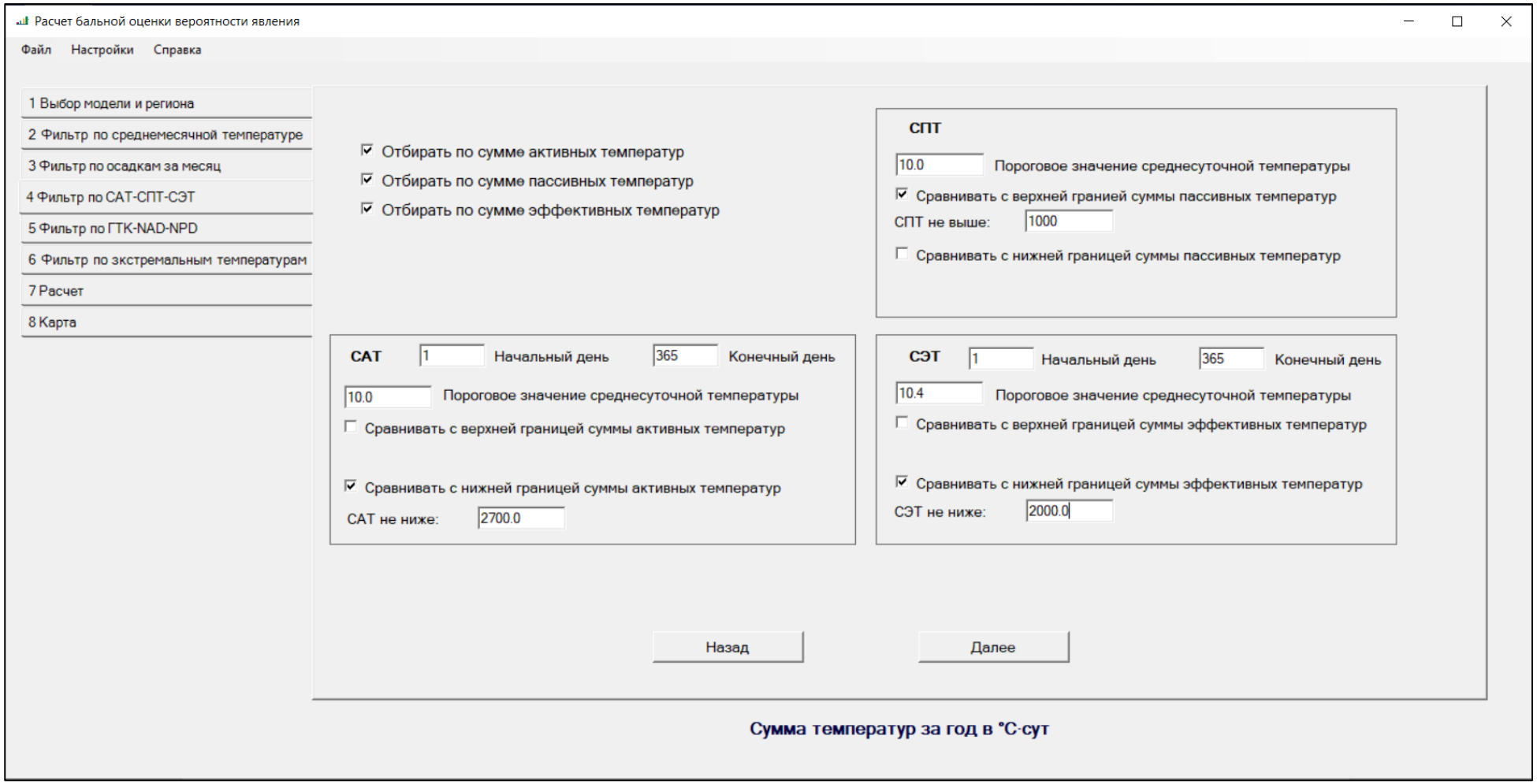


Рисунок П.3 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Выбор климатических параметров расчета: сведений о значениях суммы активных (САТ), пассивных (СПТ) и эффективных температур (СЭТ)

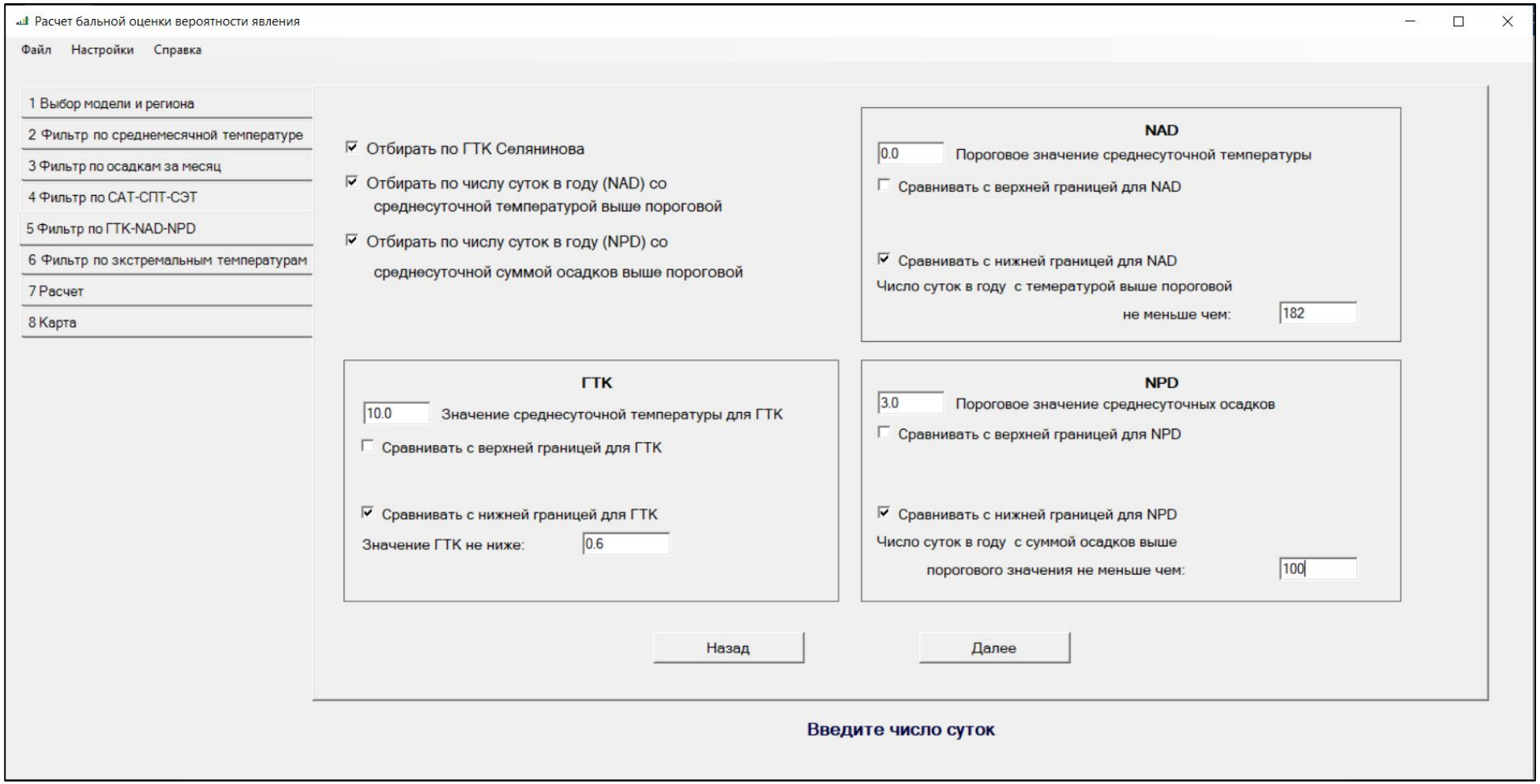


Рисунок П.4 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Выбор климатических параметров расчета: сведений о значениях гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), числа суток в году, для которых среднесуточная температура превышает заданное пороговое значение, и числа суток в году, для которых суточная сумма осадков превышает заданное пороговое значение

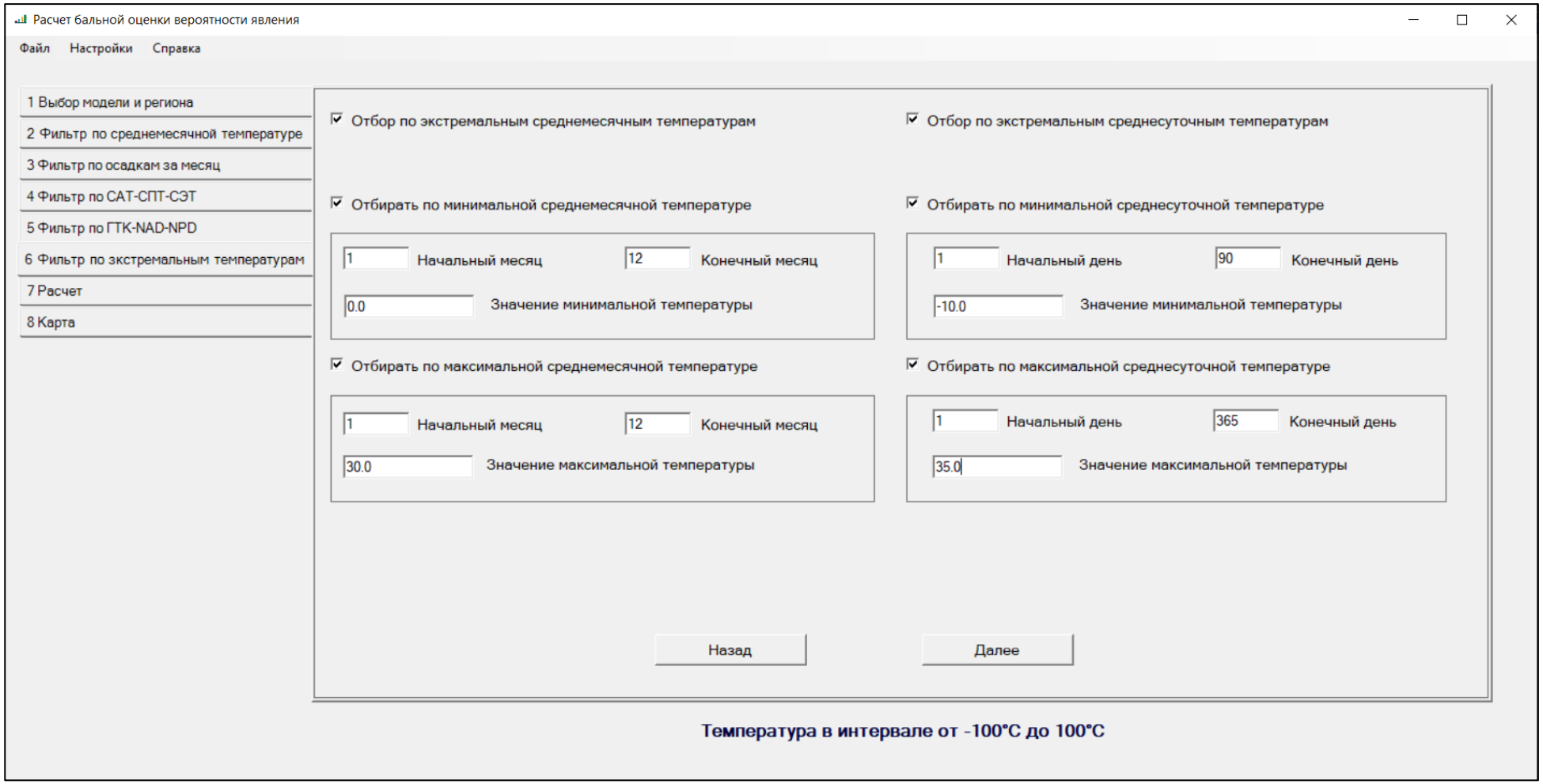


Рисунок П.5 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Выбор климатических параметров расчета: сведений об экстремальных значениях среднемесячной температуры, максимума и минимума среднесуточных температур

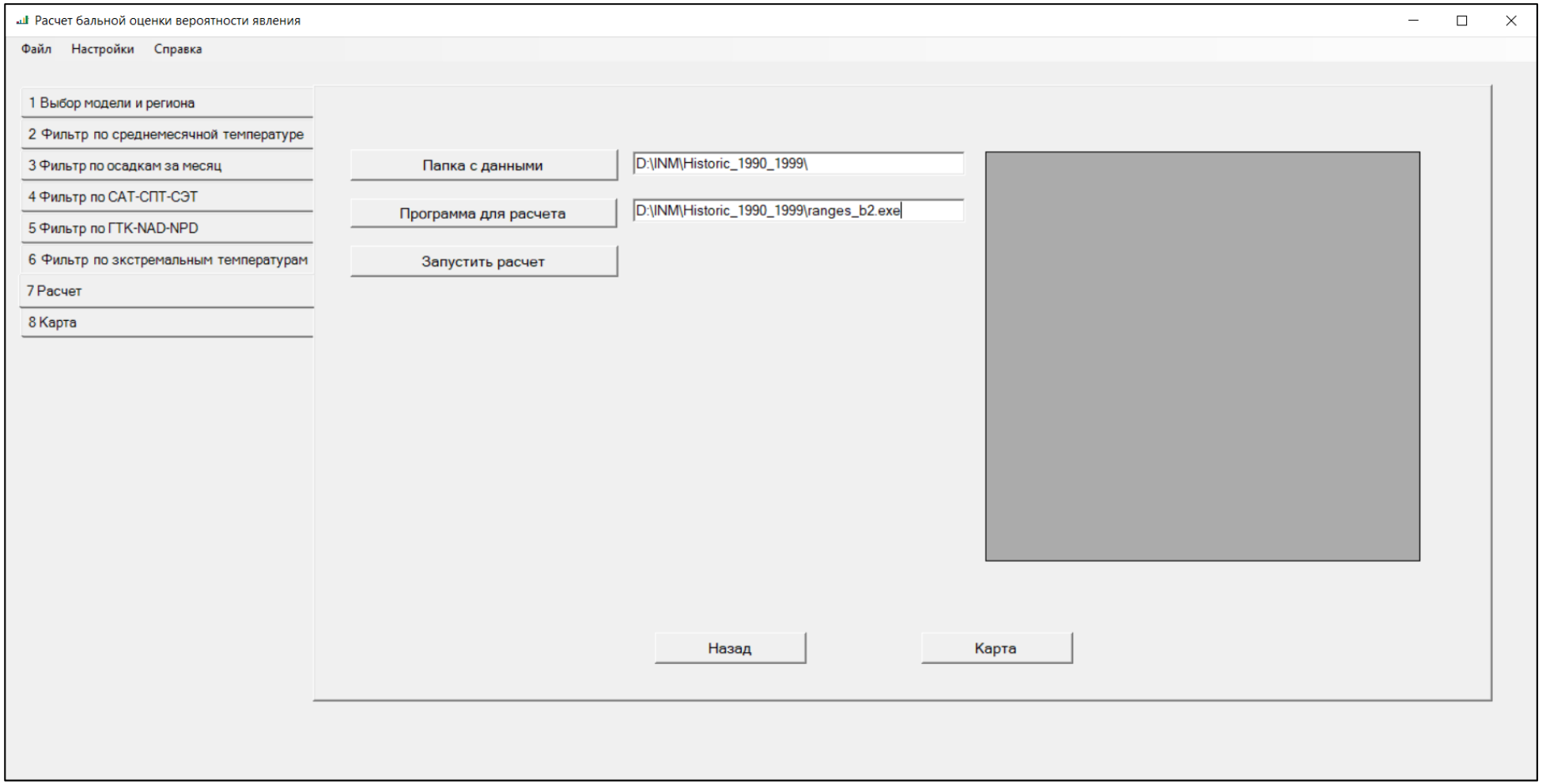


Рисунок П.6 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Пример заполнения полей перед запуском программы

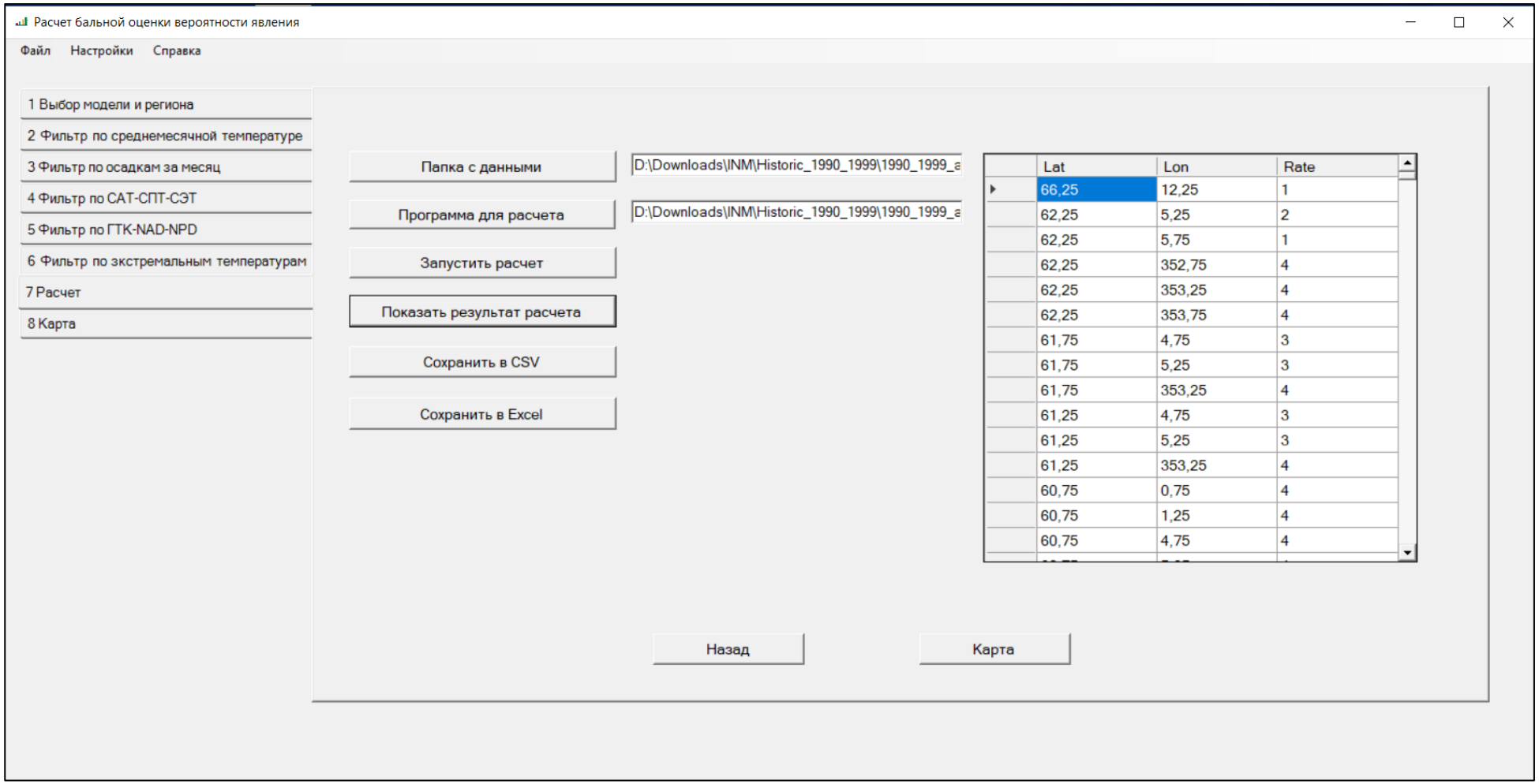


Рисунок П.7 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Пример полученного результата после запуска и отработки программы

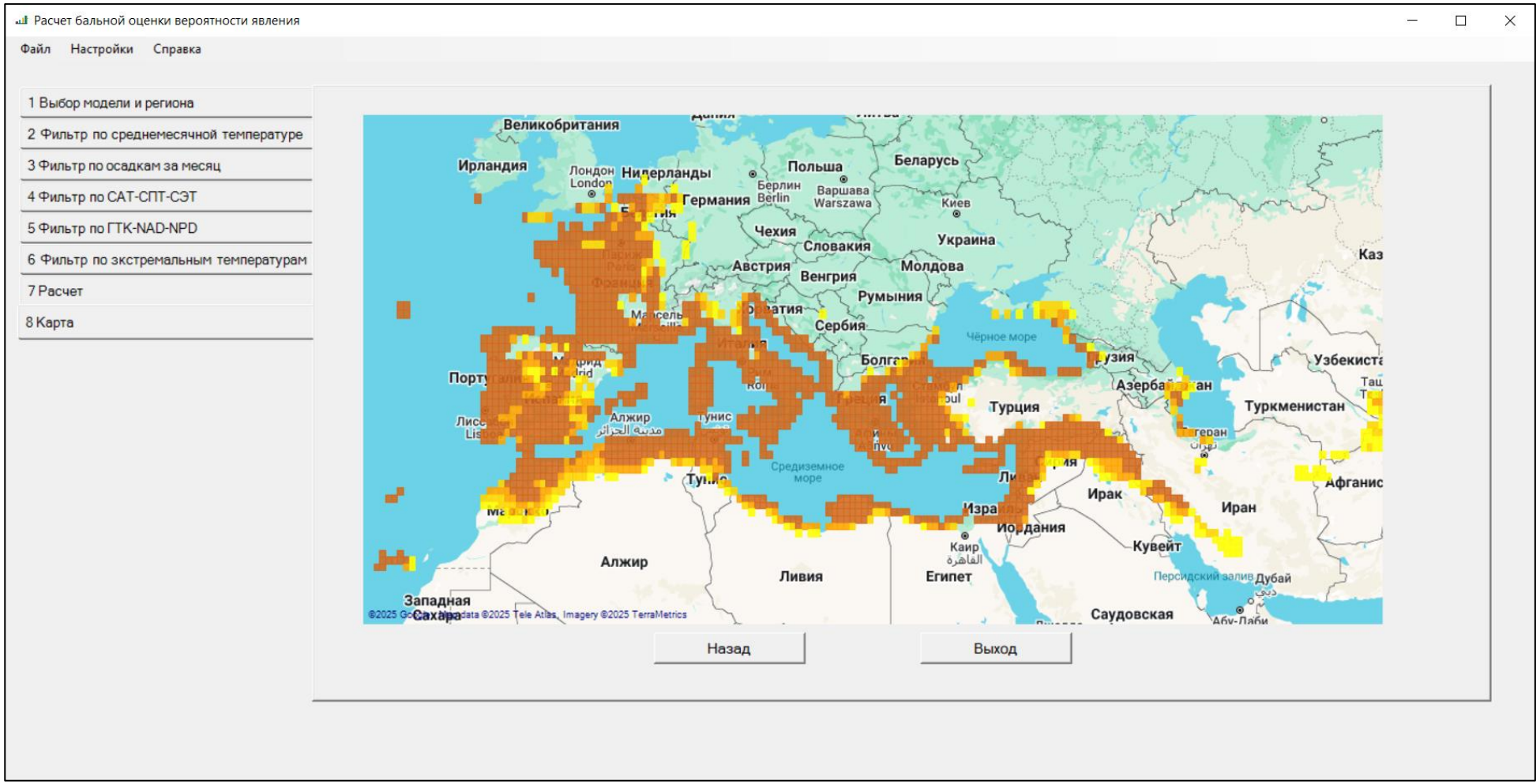


Рисунок П.8 – Фрагмент пользовательского интерфейса в десктопной версии системы RANGES. Пример автоматически сгенерированной карты-схемы (на примере КОР средиземноморской плодовой мухи *C. capitata* в изображенной части Северного полушария)