

АНАЛИЗ ОПАСНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ДЛЯ КАЗАХСТАНА

Глобальная программа «Рекомендации по выработке политики для экономического развития, устойчивого к изменению климата»

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

По поручению



Федерального министерства
охраны окружающей среды, охраны природы и
ядерной безопасности

В сотрудничестве с



Universitat
de les Illes Balears

Федеративной Республики Германия

ОТЧЕТ ОБ АНАЛИЗЕ ОПАСНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ДЛЯ КАЗАХСТАНА

Как предприятие, находящееся в федеральной собственности, GIZ поддерживает правительство Германии в достижении его целей в области международного сотрудничества для устойчивого развития.

Опубликовано:
Германское общество по
международному сотрудничеству (GIZ) GmbH

Зарегистрированные офисы:
Бонн и Эшборн, Германия

Адрес:
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Köthener Str. 2
10963, Berlin, Germany
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15
E info@giz.de
I www.giz.de/en

Описание программы/проекта:
Глобальная программа IKI
«Рекомендации по выработке политики для экономического развития,
устойчивого к изменению климата» (CRED)

Директор проекта:
Штефани Шпрингорум
stefanie.springorum@giz.de

Авторы:
Хавьер Сото Наварро, Средиземноморский институт перспективных
исследований, Испания
Габриэль Хорда, Испанский институт океанографии (IEO), Испания

Редактор:
Патрик Зуэлл, Берлин

Дизайн:
Альвира Ертаева, Нур-Султан

Источники фото:
pixabay.com

Отчет "Анализ опасных климатических явлений для Казахстана" был разработан экспертами Средиземноморского института перспективных исследований (IMEDEA, UIB-CSIC) и Испанского института океанографии (IEO) в рамках Глобальной программы IKI "Рекомендации по выработке политик экономического развития, устойчивого к изменению климата" (CRED), реализуемой Германским обществом по международному развитию (GIZ) GmbH от имени Федерального министерства окружающей среды, охраны природы и ядерной безопасности Германии (BMU).

Содержание данного отчета является исключительной ответственностью авторов и никоим образом не может отражать официальное мнение глобальной программы GIZ.

От имени
Федерального министерства окружающей среды, охраны природы и ядерной
безопасности Германии (BMU)

Германия, 2021 год

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 2. | МОДЕЛИ И СИМУЛЯЦИИ..... | 5 |
| 2.1 | Как работают климатические модели?..... | 5 |
| 2.2 | Глобальное моделирование..... | 6 |
| 2.3 | Региональное моделирование..... | 7 |
| 2.4 | Выбор и загрузка данных RCM..... | 8 |
| 2.5 | Чтение файлов..... | 11 |
| 3. | ОПАСНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ИНДИКАТОРЫ..... | 13 |
| 3.1 | Экстремальные явления..... | 13 |
| 3.2 | Индикаторы тепловых волн..... | 14 |
| 3.3 | Индикатор засух..... | 15 |
| 3.4 | Индикатор лесных/ степных пожаров..... | 15 |
| 3.5 | Среднее значение и разброс по ансамблю..... | 16 |
| 4. | РЕЗУЛЬТАТЫ..... | 18 |
| | СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 22 |
| | Приложение А:..... | 24 |

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель проекта “Рекомендации по выработке политик экономического развития, устойчивого к изменению климата” (CRED) заключается в разработке инструментов для оценки климатических рисков, вызванных изменением климата, в странах-партнерах и в предоставлении знаний, необходимых для разработки средне- и долгосрочных стратегий экономического развития с учётом новых вызовов. В частности, в проекте создаются экономические модели для конкретных стран, которые объединяют оценку ущерба, меры по адаптации и межсекторальную динамику, чтобы помочь лицам, принимающим политические решения, минимизировать воздействие изменения климата и разработать необходимые структурные и экономические меры.

На первом этапе разработки экономических моделей необходимо было составить профили рисков для опасных климатических явлений. Для того чтобы разработать такие профили рисков, необходимо было оценить текущие характеристики и будущее развитие опасных климатических явлений с помощью климатических моделей. Этот анализ проводился для различных сценариев выбросов парниковых газов (ПГ) и для различных временных горизонтов. За сбор данных и анализ эволюции опасных явлений отвечала команда по Исследованию уровня моря и климата Университета Балеарских островов (UIB) (<http://marine-climate.uib.es/>).

Процесс сбора и анализа данных осуществлялся в соответствии со следующими этапами:

- i. *Выбор моделей и симуляций.* На этом этапе из общедоступных наборов данных были извлечены имеющиеся имитационные климатические модели, область действия которых покрывает интересующие нас

страны. Загруженные файлы включали все переменные, необходимые для характеристики нужных опасных явлений.

- ii. *Выбор опасных климатических явлений.* В сотрудничестве с местными экспертами были определены наиболее значимые опасные климатические явления с точки зрения экономического воздействия, при этом использовались исторические временные ряды отчетов об опасных явлениях.
- iii. *Определение индикаторов опасных климатических явлений.* После того как были выбраны наиболее значимые опасные явления был определен набор показателей для характеристики этих явлений, подходящий для данных, используемых в модели. Определение проводилось с целью максимально упростить показатели, но при этом точно отразить эволюцию опасных явлений.
- iv. *Анализ данных и представление результатов.* Последним этапом был анализ характеристик опасных явлений в современном климате и их прогнозирование для различных временных горизонтов в XXI веке. Результаты были обобщены в виде карт, показывающих пространственную изменчивость эволюции опасных явлений для различных временных горизонтов, и в виде временных рядов годовой эволюции опасных явлений в конкретных местах для использования в экономических моделях.

В данном документе представлено подробное описание методологии, использованной для выполнения каждого из этих этапов, и результаты анализа.

2. МОДЕЛИ И СИМУЛЯЦИИ

2.1 Как работают климатические модели?

Климатические модели — это компьютерные программы, которые решают математические уравнения, описывающие перенос энергии и материалов в климатической системе. В частности, глобальные климатические модели (GCM) характеризуют взаимодействие энергии и материи в различных частях океана, атмосферы, суши, льда и т.д. в планетарном масштабе. Для этого модели делят поверхность Земли на трехмерные ячейки сетки, решая уравнения в каждой из этих ячеек на каждом временном шаге (рис. 1). Размер ячеек сетки определяет разрешение модели: чем меньше размер ячеек, тем выше уровень детализации модели (разрешение). Модели с более высоким разрешением требуют большей вычислительной мощности для решения уравнений, поэтому необходимо найти компромисс между желаемым уровнем детализации и вычислительной мощностью, доступной для запуска модели.

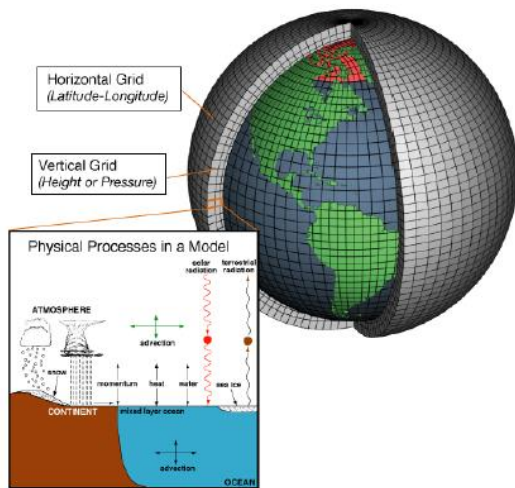


Рисунок 1. На этом рисунке показана концепция, используемая в климатических моделях. Каждая из тысяч трехмерных ячеек сетки может быть представлена математическими уравнениями, которые описывают находящиеся в ней материалы и то, как через нее движется энергия. Усовершенствованные уравнения основаны на фундаментальных законах физики, движения жидкостей и химии. Чтобы «запустить» модель, ученые задают воздействие на климат (например,

устанавливают переменные для количества парниковых газов в атмосфере) и используют мощные компьютеры для решения уравнений в каждой ячейке. Результаты из каждой ячейки сетки передаются в соседние ячейки, и уравнения решаются снова. Повторение этого процесса на многих временных шагах представляет собой течение времени. Источник изображения: NOAA.

Разрешение GCM ограничивает диапазон климатических процессов, которые они могут решать. Разрешение GCM сейчас обычно составляет 50 км, что означает, что они могут точно решать физические процессы с масштабами длины, превышающими это разрешение в два раза. Это может стать серьезным препятствием, если требуется более высокое разрешение для представления ключевых аспектов климатической системы, таких как топографические элементы. Для преодоления этого ограничения одним из решений является внедрение региональных климатических моделей (RCM). Как следует из названия, RCM не пытаются моделировать весь земной шар, а только его часть. Они решают те же физические процессы, что и GCM, используя те же математические уравнения, но в ограниченном регионе. Это пространственное ограничение означает, что разрешение может быть увеличено, что позволяет RCM точно определять региональные или даже местные процессы. С другой стороны, поскольку они не охватывают весь земной шар, на боковых границах RCM должны полагаться на данные GCM. В заключение следует отметить, что региональные модели не заменяют глобальные модели, но способны внести дополнительную ценность в моделирование, проводимое с помощью глобальных моделей, и увеличить количество климатических процессов, которые могут быть достоверно разрешены.

После создания климатической модели ее можно запустить в различных конфигурациях. Наиболее важная из них известна как «ретроспективный анализ». В этой процедуре модель запускается для максимально точного моделирования последних десятилетий. Затем результаты моделирования сравниваются с данными наблюдений, чтобы ученые могли проверить точность модели и, при необходимости, пересмотреть ее уравнения и/или параметры. Исследовательские группы по всему

миру тестируют и сравнивают результаты своих моделей с наблюдениями и результатами других моделей.

После процесса валидации предполагается, что климатические модели достаточно точны для моделирования будущего климата. Для прогнозирования климата в будущем модель настраивается так же, как и для климата в настоящем времени, но некоторые из воздействующих факторов изменяются. Как правило, модели принудительно настраиваются под различные сценарии будущего. Сценарии – это возможные изменения выбросов парниковых газов в атмосферу, которые, в свою очередь, будут зависеть от того, как быстро будет расти население, как будет использоваться земля, как будет развиваться экономика и т.д. Климатологи согласовали ряд сценариев, которые определяют различные уровни парниковых газов в атмосфере в XXI веке и в последующие годы. Один набор этих сценариев известен как Репрезентативные пути концентрации или RCPs (IPCC и др., 2014). Каждый RCP указывает величину климатического воздействия, выраженную в ваттах на квадратный метр, которое произойдет в результате определенных концентраций парниковых газов в атмосфере. Эти значения используются для того, чтобы заставить климатические модели прогнозировать будущее. Существует четыре сценария RCP, которые обычно используются: RCP 2.6 – наиболее оптимистичный, считает, что все страны применяют ограничения, принятые в Парижском соглашении, и резко сокращают выбросы парниковых газов с начала XXI века. RCP 4.5 и RCP 6.5 являются промежуточными сценариями, которые считают, что сокращение выбросов ПГ начнется с 2040 года и с 2060 года соответственно. И наконец сценарий RCP 8.5 является самым пессимистичным, который считает, что выбросы ПГ продолжают расти в XXI веке теми же темпами, что и в XX веке («бизнес как обычно»).

Стандартный протокол исследования эволюции климата с помощью климатической модели заключается в проведении трех различных типов моделирования: исторического, прогнозного и контрольного. Историческое моделирование воспроизводит климат индустриального периода, обычно охватывающего период с начала промышленной революции (середина XIX века) до начала XXI века. Важно отметить, что историческое моделирование – это свободный «прогон» модели, то есть модель не ограничена ассимиляцией каких-либо данных наблюдений. Это означает, что

хронология климатических событий не соответствует реальной хронологии климата прошлого. Историческое моделирование точно воспроизводит средние значения, межгодовую и сезонную изменчивость и многодекадные тенденции, но не конкретные события на определенную дату. То же самое относится и к прогнозным «прогнонам», которые моделируют эволюцию климата в XXI веке по определенному сценарию RCP, смотря на концовку исторического «прогона». Один и тот же исторический «прогон» обычно используется в качестве отправной точки для нескольких прогнозных «прогнозов» при различных сценариях выбросов ПГ. Наконец контрольный «прогон» – это моделирование будущего климата, в котором не рассматривается изменение ПГ. Сравнивая контрольный «прогон» и прогнозы, в результатах моделирования можно отделить любые тенденции, обусловленные числовыми смещениями в модели (например, учтенные контрольным «прогоном»), от тенденций, вызванных изменениями в концентрации ПГ («прогон» прогнозов). Эволюция климата в будущем при различных сценариях выбросов оценивается путем сравнения исторических и прогнозных «прогнозов».

2.2 Глобальное моделирование

Наиболее обширный открытый набор данных современных глобальных климатических моделей создается в рамках различных фаз Проектов по сопоставлению моделей (CMIP, <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/>), наиболее используемой в настоящее время является 5-ая фаза, и на подходе находится 6-ая фаза). Проекты CMIP – это международная инициатива, объединяющая группы по моделированию из многих организаций по всему миру. Основной целью проекта является создание большого ансамбля согласованных глобальных климатических симуляций на основе связанных моделей атмосферы и океана со схожими характеристиками, что позволяет проводить сравнение моделей и анализ изменения климата. Каждая симуляция проводится независимо различными группами моделистов с использованием различных моделей и параметризаций. Это позволяет адекватно характеризовать неопределенности, связанные с выбором модели, естественной изменчивостью и выбором сценария. Данные симуляций доступны на нескольких серверах и могут быть загружены после регистрации. Например, на узле Earth System Grid

Federation (ESFG) в Германском климатическом центре (DKRZ) (<https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/>).

Разработка экономических моделей проекта CRED требует оценки эволюции опасных климатических явлений в масштабах страны. Для этой цели глобальные модели СМР не будут идеальными из-за их низкого разрешения, ограничивающего возможности по решению процессов регионального масштаба. По этой причине анализ был проведен с использованием моделирования в RCM. Тем не менее описанная в следующих разделах методология, может быть применена к GCM, если необходимо получить более общую картину эволюции климата в обширном регионе.

2.3 Региональное моделирование

Симуляции RCM, проанализированные в данном исследовании, являются частью набора данных CORDEX (<https://cordex.org/>). CORDEX – это инициатива Всемирной программы исследования климата (WCRP), направленная на разработку, оценку и использование RCM в различных регионах мира. Эти эксперименты проводятся независимыми исследовательскими группами с использованием различных численных кодов, но со стандартизированными конфигурациями и региональными областями. Это позволяет проводить сравнительный анализ симуляций и анализировать большие ансамбли экспериментов, повышая надежность климатических прогнозов. Моделирование CORDEX было признано наилучшим вариантом для достижения целей проекта из-за его высокого разрешения и того факта, что оно будет использоваться в следующих отчетах МГЭИК (Межправительственной группы экспертов по изменению климата). Среди доменов CORDEX, домен Центральной Азии (CAS) является единственным, включающим Казахстан (рис. 2).

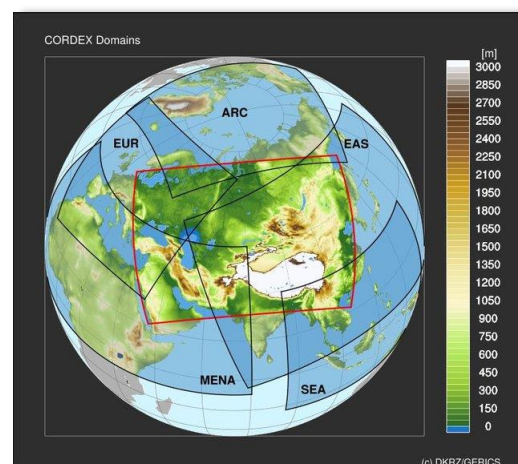


Рисунок 2. Границы некоторых региональных доменов CORDEX. Домен Центральной Азии (CAS) отмечен красным цветом.

Симуляции и переменные, выбранные из набора данных CORDEX, обобщены в таблице 1. Всего было использовано 12 симуляций, выполненных двумя различными RCM на основе 4 различных GCM. Для каждой доступной комбинации RCM-GCM были загружены исторические и прогнозные «прогоны» для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5. Процессы выбора и загрузки будут подробно описаны в следующем разделе.

Две модели РКМ, использованные в выбранных симуляциях – это модель GERICS-REMO2015 (Jacob, 2001; Jacob et al., 2012) и модель ALARO-0 (Gerard et al., 2009; Giot et al., 2016). Обе модели успешно использовались в предыдущих климатических исследованиях на других доменах CORDEX (De Troch et al., 2013; Giot et al., 2016; Hamdi et al., 2012; Pietikäinen et al., 2018; Termonia et al., 2018). Используемые здесь симуляции на домене CAS были проведены совсем недавно, между 2019 и 2020 годами, поэтому в литературе до сих пор нет климатических исследований с их анализом. Тем не менее, Tor et al. (2020) провели исчерпывающее исследование по валидации двух моделей в домене CAS. Авторы сравнили результаты двух симуляций (по одной для каждой модели), инициируемых реанализом ERA-Interim с обширным набором данных о температуре и осадках в сетке, основанных как на реанализе, так и на наблюдениях. Несмотря на то, что результаты показали некоторое смещение в суточном диапазоне температур и сезонности осадков, авторы пришли к выводу, что RCM GERICS-REMO2015 и ALARO-0 могут быть использованы для выполнения прогнозов для Центральной Азии и что полученные климатические данные могут быть применены в моделировании воздействия. Что касается целей

проекта CRED, результаты Tor et al. (2020) подтверждают, что анализируемые симуляции основаны на точных RCM и, следовательно,

результаты, полученные для эволюции климатической опасности, являются надежными и устойчивыми.

| RCM | ALARO-0 | GERICS-REM02015 | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|---|---|
| Запускающая GCM | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | MOHC-HadGEM2-ES | MPI-M-MPI-ESM-LR | NCC-NorESM1-M |
| Переменные | Осадки Температура | Осадки Температура Максимальная скорость ветра Относительная влажность | Осадки Температура Максимальная скорость ветра Относительная влажность | Осадки Температура Максимальная скорость ветра Относительная влажность |
| Частота | Ежедневно | Ежедневно | Ежедневно | Ежедневно |
| Пространственное разрешение | 0,22° (-25 км) | 0,22° (-25 км) | 0,22° (-25 км) | 0,22° (-25 км) |
| «Прогоны» | | | | |
| Исторический (1970 -2005) | ALARO-CNRM-HIST ALARO-CNRM-2.6 | REMO-MOHC-HIST | REMO-MPI-HIST | REMO-NCC-HIST |
| RCP 2.6 (2006 - 2100) | ALARO-CNRM-8.5 | REMO-MOHC-2.6 | REMO-MPI-2.6 | REMO-NCC-2.6 |
| RCP 8.5 (2006 - 2100) | | REMO-MOHC-8.5 | REMO-MPI-8.5 | REMO-NCC-8.5 |

Таблица 1. Краткое описание симуляций и переменных, использованных в исследовании.

2.4 Выбор и загрузка данных RCM

Данные CORDEX (и CMIP) размещаются на нескольких серверах, расположенных в различных учреждениях по всему миру. Earth System Grid Federation (ESFG) – это платформа, которая позволяет получить доступ к различным узлам (серверам). В нашем случае мы использовали узел Германского климатического центра (DKRZ) (<https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/>). Этот узел был выбран, потому что используемые в исследовании симуляции размещены на этом сервере, и загрузка была быстрее. Однако можно выбирать и другие узлы, поскольку все симуляции, размещенные на любом сервере, могут быть доступны со всех узлов.

Данные являются публичными и доступны для любого пользователя. Процесс загрузки происходит следующим образом:

1. Регистрация на веб-сайте узла (<https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/>). После заполнения регистрационной формы пользователю будет присвоен OpenID, имя пользователя и пароль. С этими учетными данными пользователь может получить доступ к поисковой системе.
2. Зайдя в поисковую систему платформы (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>), пользователь может перемещаться по меню для выбора различных продуктов. В случае данного исследования выбор был следующим:
 - › Домен: CAS-22
 - › Эксперимент: исторический, rcp26 и rcp85
 - › Периодичность времени: день
 - › Переменные: pr, tas, srfWindmax и hurs
 - › Длинное имя переменной: Осадки, температура воздуха у поверхности земли, ежедневная максимальная скорость ветра у

поверхности земли, относительная влажность воздуха у поверхности земли.

Обратите внимание, что для выбора переменной достаточно указать либо краткое, либо длинное

имя, не обязательно отмечать оба. Нет необходимости задавать какие-либо другие поля (проект, продукт, организация и т.д.). На Рисунке 3 показан пример поиска исторических «прогонов» суточных осадков в домене CAS.

The screenshot shows the ESGF search interface. On the left, there are filter panels for Project (CAS-22), Product, Domain (checked), Institute, Driving Model, Experiment (historical), Experiment Family, Ensemble, RCM Model, Downscaling Realisation, Time Frequency (day), Variable (pr), Variable Long Name (Precipitation), CF Standard Name, and Datanode. The search bar contains 'Enter Text:'. Search constraints are listed as 'CAS-22 | Precipitation | day | pr | historical'. The total number of results is 4. The results list shows four entries, each with details like Data Node, Version, Total Number of Files, and Full Dataset Services.

Рисунок 3. Результаты для исторических «прогонов» ежедневных данных об осадках в домене CAS CORDEX.

3. Пример на Рисунке 3 показывает, как отображаются результаты поиска. Каждый из 4 результатов соответствует историческим ежедневным результатам четырех доступных симуляций (Таблица 1). Каждый набор результатов состоит из нескольких файлов,

количество которых колеблется в зависимости от моделирования и временного разрешения. При нажатии на «list files» отображаются отдельные файлы. Именование файлов стандартизировано для всех симуляций CORDEX следующим образом:

VariableName_Domain_GCMMModelName_CMIP5ExperimentName_CMIP5EnsembleMember_
RCMModelName_RCMVersionID_Frequency_StartTime-EndTime.nc

Пример:

pr_CAS-22_NCC-NorESM1-M_historical_r1i1p1_GERICS-REM02015_v1_day_19960101-20001231.nc

VariableName: pr (осадки)

Domain: CAS-22 (Центральная Азия с разрешением 0.22°)

GCMMModelName: NCC-NorESM1-M (запускающая GCM CMIP5)

CMIP5ExperimentName: historical (тип «прогона»)

CMIP5EnsembleMember: r1i1p1 (идентификация «прогона» CMIP5)

RCMModelName: GERICS-REM02015 (используемая в домене RCM)

RCMVersionID: v1 (версия RCM)

Frequency: день (временная частота)

StartTime-EndTime: 19960101 - 20001231 (период данных в файле; ггггммдд)

На Рисунке 4 показан развернутый список файлов для первого набора выходных данных Рисунка 3, соответствующих историческим ежедневным

осадкам симуляции REMO, инициированной МОHC-HadGEM2-ES (REMO-МОHC-HIST, Таблица 1).

The screenshot shows the ESGF-Data portal interface. On the left, there is a sidebar with filters for Project (CORDEX), Product, Domain (CAS-22), Institute, Driving Model, Experiment (historical), Ensemble, RCM Model, Downscaling Realisation, Time Frequency (day), Variable (pr), Variable Long Name (Precipitation), CF Standard Name, and Datanode. The main search area shows a search bar with 'Enter Text:' and a search button. Below the search bar, there are checkboxes for 'Show All Replicas', 'Show All Versions', and 'Search Local Node Only'. The search constraints are listed as 'CAS-22 | Precipitation | day | pr | CORDEX | historical'. The total number of results is 4. The search results are displayed in a table with columns for file name, checksum, size, tracking ID, and download options (Single File Access, HTTP Download, OpenDAP Download, Globus Download). The results are numbered 1 through 5, each representing a different time slice of the precipitation data.

Рисунок 4. Развернутые файлы первого набора выходных данных модели, показанной на Рисунке 2.

Отдельные файлы можно загрузить напрямую, нажав на 'HTTP download' (рис. 4). Однако более быстрым и удобным способом получения данных является автоматическая загрузка всех наборов данных. Это можно сделать с помощью Linux-скрипта, создаваемого сервером. Для этого сначала необходимо добавить наборы данных в корзину данных, нажав на кнопку 'Add to Data Cart' (рис. 3). После того как все наборы данных выбраны,

щелкните на 'My data Cart' и выбор будет показан (рис. 5). Если отметить пункт 'select all datasets', будут выбраны все наборы данных (если нужны только некоторые наборы данных, выбор можно сделать вручную). Наконец при нажатии на 'WGET Script' (рис. 5) будет сгенерирован BASH-скрипт с определенным кодом для загрузки всех выбранных данных.

My Data Cart

About Data Carts: You have a Data Cart on every ESGF node you have logged into. This is your Data Cart on the esgf-data.dkrz.de node. The items in this cart will persist until removed.

Number of Items (4) | [Return to Last Search](#)

Collective Services for All Selected Datasets: [\[WGET Script \]](#) [\[LAS Visualization \]](#) [\[Globus Download \]](#) [\[Collection PID \]](#)

When "List Files" is clicked, or when using WGET or Globus, you may use an optional string to sub-select the filenames:

| <input checked="" type="checkbox"/> Select All Datasets | Remove All |
|--|------------|
| <p>cordex.output.CAS-22.RMIB-UGent.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.historical.r1f1p1.ALARO-0.v1.day.pr Data Node: esgf1.dkrz.de Version: 20200204 Total Number of Files (for all variables): 6 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [Globus Download]</p> | Remove |
| <p>cordex.output.CAS-22.GERIC.S.MPI-M-MPI-ESM-LR.historical.r1f1p1.REMO2015.v1.day.pr Data Node: esgf1.dkrz.de Version: 20191015 Total Number of Files (for all variables): 8 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [PID] [Globus Download]</p> | Remove |
| <p>cordex.output.CAS-22.GERIC.S.NCC-NorESM1-M.historical.r1f1p1.REMO2015.v1.day.pr Data Node: esgf1.dkrz.de Version: 20191015 Total Number of Files (for all variables): 8 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [PID] [Globus Download]</p> | Remove |
| <p>cordex.output.CAS-22.GERIC.S.MOHC-HadGEM2-ES.historical.r1f1p1.REMO2015.v1.day.pr Data Node: esgf1.dkrz.de Version: 20191015 Total Number of Files (for all variables): 8 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [PID] [Globus Download]</p> | Remove |

Рисунок 5. Пример корзины данных с выбором всех наборов данных, найденных на Рисунке 2.

- Сценарий должен быть запущен в каталоге, где будут храниться файлы. После назначения правильных прав доступа, набрав в терминале Linux `./ScriptName.sh -help`, вы получите список опций запуска. Самый простой и прямой вариант – ввести вручную учетные данные пользователя CORDEX, используя опцию `./ScriptName.sh -H` (рис. 6). Это запустит автоматическую загрузку всех файлов из всех выбранных наборов данных, включенных в сценарий. Во время работы скрипт будет также показывать ход процесса. Если при загрузке какого-либо файла произошла ошибка, его можно загрузить позже вручную или сгенерировав другой скрипт. После завершения работы сценария все файлы выбранных наборов данных появятся в запущенной папке.

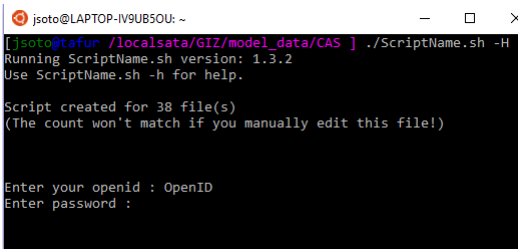


Рисунок 6. Пример запуска BASH-скрипта для автоматической загрузки файлов.

2.5 Чтение файлов

Выходные файлы моделей представлены в формате Network Common Data Format (netCDF с расширением `.nc`). NetCDF является наиболее распространенным форматом для хранения данных в сообществе моделистов, поскольку он позволяет хранить массивы и матрицы в понятной форме. Он также позволяет осуществлять частичный доступ к данным, что очень полезно, учитывая большой объем информации, обычно содержащейся в одном файле.

Структура файлов включает сетку (домен), пространственные измерения (долгота и широта) и временное измерение (время) периода, включенного в файл. Климатические переменные хранятся в виде 3D-матриц с размерами: долгота x широта x время. Информация о характеристиках сетки, точки отсчета времени и свойствах переменных включается в метаданные файла. Разработчики модели могут включить в метаданные файла множество атрибутов переменных для уточнения их свойств (размеры, имена, единицы измерения и т.д.). Информация о модели и спецификации моделирования (учреждение, GCM, RCM и т.д.) обычно также добавляется в качестве общих атрибутов файлов. Чтение метаданных очень полезно и легко осуществляется с помощью любого из распространенных инструментов чтения netCDF. Существует множество бесплатных

инструментов обработки данных для работы с файлами netCDF. С кратким описанием наиболее часто используемых можно ознакомиться на портале пользователей DKRZ (<https://www.dkrz.de/up/services/analysis/data-processing/tools>). В данном исследовании вся обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения MATLAB, которое включает инструменты обработки netCDF.

CAS является одним из более крупных доменов CORDEX. Он простирается приблизительно между 11° E и 140° E по долготе и между 18° N и 60° N по широте (границы могут немного отличаться в зависимости от конкретной сетки RCM). Такая протяженность приводит к тому, что файлы netCDF для каждого из полей модели очень большие и включают информацию о регионах, не имеющих отношения к данному исследованию. Обработка

таких больших файлов может вызвать проблемы с хранением и вычислительной мощностью. Чтобы избежать этих проблем, было выбрано подмножество данных файлов, включающих регион Казахстана, что позволило уменьшить размер обрабатываемой информации. Пределы этого подмножества следующие:

- Долгота: [46° E - 88° E]
- Широта; [40° N - 56° N]

Выбор подмножества данных достаточно прост – можно использовать любой из вышеупомянутых инструментов обработки данных netCDF. Все вычислительные процедуры, описанные в следующих разделах, проводились с использованием подмножества полей модели в этих пределах.

3. ОПАСНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ИНДИКАТОРЫ

Выбор опасных климатических явлений для анализа осуществлялся в сотрудничестве с местными партнерами, которые предоставили исторические данные об опасных климатических явлениях, оказавших существенное воздействие на страну (например, гибель людей, воздействие на инфраструктуру, экономические потери). В ходе нескольких встреч с местными партнерами были определены наиболее значимые опасные явления. Ключевым моментом в этом процессе была оценка способности моделей правильно характеризовать эти события. После рассмотрения нескольких вариантов было решено сосредоточиться на шести различных климатических угрозах: экстремальные осадки, экстремальные температуры, экстремальные ветровые явления, тепловые волны, засухи и лесные/ степные пожары. Затем был определен набор показателей для характеристики и количественной оценки этих явлений в настоящем и будущем климате. Эти показатели можно разделить на два типа:

- › Экстремальные явления: определяются как количество дней, когда значение переменной, характеризующей опасное явление, превышает 99-й квантиль, рассчитанный по историческому периоду. Эти показатели были определены для осадков, температуры и максимальной скорости ветра. Для тепловых волн в определении показателя используется комбинация экстремальной температуры и продолжительности.
- › Эмпирические индексы: индикаторы, специально разработанные для описания довольно сложного опасного явления, которое зависит от нескольких климатических переменных. Такого рода индикаторы использовались при характеристике засух и лесных/ степных пожаров. Значения индекса выше заданного порога означают высокий риск опасного явления.

В Таблице 2 приведены опасные явления и соответствующий им индикатор.

| Опасные явления | Индикатор |
|---------------------------|-----------------|
| Экстремальные осадки | Дни с $P > q99$ |
| Экстремальная температура | Дни с $T > q99$ |

| | |
|------------------------|--|
| Экстремальный ветер | Дни с максимальной скоростью $W > q99$ |
| Тепловые волны | 5 или более дней с $T > q99$ |
| Засухи | Индекс SPEI < -2 |
| Лесные/ степные пожары | Индекс KBDI > 150 |

Таблица 2. Краткое описание опасных явлений и индикаторов, определенных для каждого из них.

3.1 Экстремальные явления

Показатели экстремальных явлений были определены для ежедневной температуры, осадков и максимальной скорости ветра. Они рассчитываются как количество дней в году, когда переменная превышает 99-й квантиль исторического периода. Исторический период определяется как 30-летний период каждой исторической симуляции до начала прогнозирования, например, период между 1976 и 2005 годами («прогон» прогноза начинается в 2006 году; Таблица 1). 99-й квантиль соответствует порогу, ниже которого находится 99% данных. Другими словами, он определяет предел, выше которого находится самый высокий 1% значений за исторический период.

На Рисунке 7 показан пример того, как эволюция экстремальных температур характеризуется в точке сетки модели вблизи Алматы. Исторический период представлен синим цветом, а прогноз RCP 8.5 – зеленым. Черная горизонтальная линия отмечает порог $q99$ исторического периода. Желтые точки – это экстремальные температурные явления, превышающие этот порог в историческом периоде, а оранжевые точки – явления, превышающие порог в прогнозе. Способ обобщения этого результата заключается в вычислении разницы между количеством дней в году, превышающих пороговое значение в будущем (оранжевые точки) и настоящем (желтые точки). Три вертикальные красные линии делят прогноз на три 30-летних периода: начало века (2011 - 2040), середина века (2041 - 2070) и конец века (2071 - 2100). Эти периоды используются в качестве эталонных для оценки эволюции опасных явлений (см. раздел 4).

Та же методология, описанная в примере, применяется ко всем индикаторам опасных явлений, за исключением тепловых волн, для которых

определяются и оцениваются две взаимодополняющие величины.

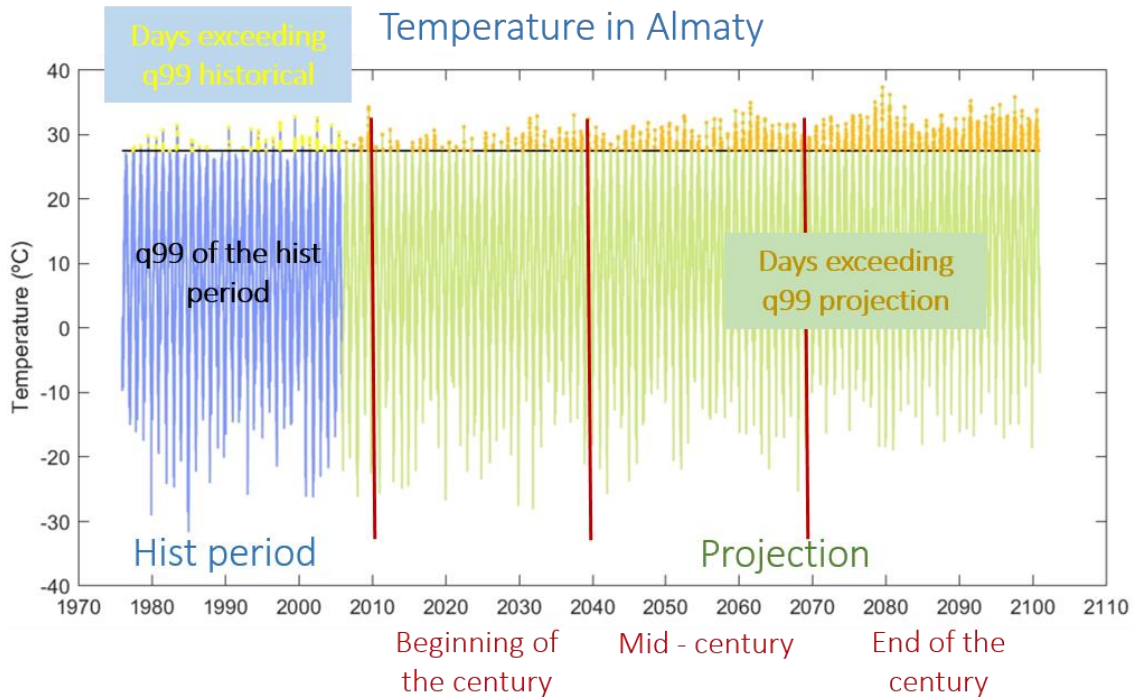


Рисунок 7. Временной ряд температуры в точке сетки вблизи Алматы. Синяя линия соответствует историческому периоду, а зеленая – прогнозу RCP 8.5. Черная горизонтальная линия - порог q99 для исторического периода. Желтые точки указывают на значения экстремальных температур в исторический период, а оранжевые – в прогнозируемый. Три вертикальные красные линии обозначают границы трех рассматриваемых временных горизонтов: начало века (2011-2040), середина века (2041-2070) и конец века (2071-2100).

3.2 Индикаторы тепловых волн

Тепловые волны – это особый случай экстремальных явлений. Они определяются как возникновение экстремальных температур, продолжительное по времени. В литературе существует множество определений тепловых волн, которые различаются по температурному порогу и минимальной продолжительности и характеризуют явление как тепловую волну (Xu et al., 2016). В данном исследовании мы приняли следующее определение: тепловая волна возникает, когда экстремальные температуры, превышающие 99-й квантиль исторического периода, сохраняются в течение как минимум пяти дней. Используя это определение, были выявлены и охарактеризованы тепловые волны в историческом и прогнозном периодах.

Для характеристики тепловой волны определены три величины: возникновение, продолжительность и интенсивность.

- Эти данные используются для подсчета количества тепловых волн в различные периоды, таким же образом как считаются остальные экстремальные явления.
- Продолжительность – это количество дней подряд, в течение которых температура превышает пороговое значение. Минимальная продолжительность по определению составляет 5 дней.
- Интенсивность определяется следующим уравнением:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} (T - T_{thr}) dt \quad (1)$$

Где t_0/t_1 – время в начале и конце тепловой волны, T – температура, а T_{thr} - температурный

порог (q_{99} исторического периода). Интенсивность измеряет суровость конкретной тепловой волны. Чем выше достигнутые температуры и чем больше продолжительность, тем интенсивнее тепловая волна.

Эти три величины используются в качестве индикаторов для характеристики тепловых волн в настоящем и будущем климате. Другими словами, для тепловых волн будет оцениваться не только изменение количества явлений в год, но и эволюция продолжительности и интенсивности этих явлений.

3.3 Индикатор засух

Для анализа засух используется индикатор стандартизированного индекса эвапотранспирации осадков (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010). SPEI основан на данных об осадках, температуре и влажности, и его преимущество заключается в том, что он сочетает в себе многошкальный характер (может быть рассчитан с использованием различных временных окон) и способность учитывать влияние изменчивости температуры на оценку засухи. Процедура расчета индекса учитывает климатический водный баланс, накопление дефицита/избытка на разных временных шкалах и подгонку под лог-логистическое распределение вероятности. Полный обзор свойств индекса и его преимуществ по сравнению с другими индикаторами можно найти в цитируемой ссылке и на сайте <https://spei.csic.es/>, где собрано множество исследований о валидации индекса и глобальный набор данных SPEI. С этого сайта также можно загрузить инструментарий для расчета SPEI.

В данном исследовании SPEI был рассчитан с помощью Climate Data Toolbox для MATLAB (Greene et al., 2019), который включает специальные функции для расчета индекса. Помимо сведений о характеристиках региона исследования (географические координаты, солнечная радиация) при расчете SPEI используются поля месячных температур и осадков. Поэтому перед расчетом ежедневные выходные данные модели были усреднены по месяцам. Согласно значениям SPEI условия анализируемого региона можно разделить на пять классов засухи (Paulo et al., 2012): незасушливый ($SPEI > -0,5$), слабозасушливый ($-1 < SPEI < -0,5$), умеренный ($-1,5 < SPEI < -1$), сильный ($-2 < SPEI < -1,5$) и экстремальный ($SPEI < -2$).

Засухи в данном исследовании были определены как явления, включенные в классификацию экстремальных, например, явления с SPEI ниже -2 . Используя этот критерий, явления засухи были определены в исторических и прогнозных «прогонах», а их развитие оценивалось как увеличение/уменьшение количества явлений в год между будущим и настоящим климатом.

3.4 Индикатор лесных/ степных пожаров

Несмотря на то, что в возникновении лесных/ степных пожаров играют роль многие природные и антропогенные факторы, было установлено, что ежедневные погодные условия имеют особое значение (Bessie and Johnson, 1995). Соответственно, были предприняты значительные усилия для того, чтобы понять, как предсказать возникновение и поведение пожара. Исследования были сосредоточены на описании погодных условий пожара и интеграции различных метеорологических переменных в пожарные индексы. Эти усилия привели к созданию широкого спектра систем категоризации пожарной опасности и индексов, которые можно использовать для оценки опасности лесных/ степных пожаров. Такие пожарные индексы могут различаться по многим аспектам. Некоторые из них включают не только взаимосвязь между погодными условиями и пожарной активностью, но и между пожарной активностью и влажностью почвы и свойствами топлива. Например, некоторые очень простые индексы, предназначенные для оценки вероятности возникновения пожара, учитывают только погодные условия в течение дня. Другие более сложные индексы являются кумулятивными и учитывают содержание воды в почве или топливе в течение более длительных периодов времени, поэтому они подходят для прогнозирования интенсивности или распространения пожара. Подробный обзор наиболее используемых пожарных индексов и справочные исследования можно найти на сайте <https://wikifire.wsl.ch/>.

Для того чтобы выбрать подходящий индекс лесных/ степных пожаров, необходимо было найти компромисс между сложностью индекса и доступными климатическими переменными. В результате был выбран индекс засухи Китча-Брайана (KBDI) (Китч и Байрам, 1968). Использование KBDI в исследованиях по

прогнозированию лесных/ степных пожаров показывает удовлетворительные результаты, когда невозможно рассчитать другие более сложные индексы (Brown et al., 2020).

KBDI рассчитывается с использованием ежедневной максимальной температуры, ежедневных осадков и годовых накопленных осадков (Keetch and Byram, 1968). Вместо показателя наличия топлива на территории KBDI использует накопленные годовые осадки и предполагает, что большее количество годовых осадков соответствует большему количеству растительности и, следовательно, большему количеству топлива, доступного для горения. Формула KBDI аппроксимирует количество эвапотранспирации в

$$KBDI_t = Q + \frac{(203.2 - Q) \cdot (0.968 \cdot e^{0.0875 \cdot T + 1.5552} - 8.30) \cdot \Delta t}{1 + 10.88 \cdot e^{-0.00174 \cdot P}} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Где $KBDI_t$ – индекс в момент времени t , Q – дефицит влаги (в мм), T – максимальная дневная температура (в °C) и P – среднегодовое количество осадков (в мм). Q рассчитывается путем вычитания чистого количества осадков, P_{net} , из значения индекса на предыдущем временном шаге, $KBDI_{t-1}$. Чистые осадки оцениваются как максимум между 0 и разницей между осадками в момент времени t , P_t , и 5,1 (в мм).

Поскольку вычисление индекса является рекурсивным, его необходимо инициализировать. В идеале, KBDI может быть установлен на ноль после периода, когда за одну неделю выпадает 15,24-20,32 см осадков или более. Однако это требование трудновыполнимо для очень засушливых районов изучаемой территории. Поэтому необходимо выполнить процедуру инициализации (Brown et al., 2020). Сначала мы определили неделю с максимальным количеством осадков для первого года данных и установили KBDI на нулевое значение для этой недели. Используя его в качестве начальной точки, KBDI рассчитывается на основе значения KBDI за предыдущий день. На этапе инициализации (или подготовки к запуску) данные KBDI за первый год используются в цикле для повторения ежедневных расчетов KBDI. Когда разница между ежедневными KBDI, рассчитанными в цикле (n) и цикле ($n-1$), становится меньше порогового значения, в нашем случае 8 мм, ежедневные KBDI считаются стабильными, как наиболее близкие к «реальным» KBDI первого года. На этом инициализация KBDI завершена. KBDI в последний день первого года, который

качестве косвенного показателя для учета сухости верхних слоев почвы и воспламеняемости органических веществ. Рассчитанные значения KBDI находятся в диапазоне от 0 до 203,2, что эквивалентно количеству воды (в мм), необходимому для доведения почвы до предполагаемого полного насыщения на 0,2 м. Например, значение KBDI 0 указывает на то, что почва полностью насыщена, и вероятность лесного/ степного пожара низка; в то время как значение KBDI 203,2 указывает на экстремальную засуху и риск пожара. KBDI рассчитывается на ежедневной основе в соответствии с уравнениями (Alexander, 1990):

$$Q = KBDI_{t-1} - P_{net} \quad (3)$$

$$P_{net} = \max(0, P_t - 5.1) \quad (4)$$

рассчитывается в цикле (n), затем используется для оценки KBDI в первый день следующего года, и так далее для последующих периодов времени.

Значения KBDI между 150 и 200 соответствуют суровым сухим условиям и экстремальному риску пожара (Keetch and Byram, 1968). После расчета индекса в каждой точке сетки для исторического и прогнозного периодов всех симуляций, явления экстремального пожарного риска рассчитываются как дни с KBDI выше 150. С помощью этого критерия эволюция опасности лесных/ степных пожаров в период между настоящим и будущим климатом оценивается как увеличение/уменьшение количества явлений между будущим и настоящим климатом.

3.5 Среднее значение и разброс по ансамблю

Индикаторы опасных явлений были рассчитаны для всех симуляций по описанной методологии. В соответствии с переменными каждой модели (Таблица 1) невозможно было рассчитать индикаторы экстремальных ветров и засух (SPEI) для симуляций ALARO-0, поскольку не было данных по скорости ветра и относительной влажности. Для симуляций GERICS-REMO2015 были рассчитаны все показатели. В результате был создан ансамбль с информацией о характеристиках опасных явлений, состоящий из 4 или 3

исторических симуляций и 8 или 6 прогнозных симуляций (по одной для каждого сценария RCP 2.6 и 8.5) для каждого индикатора.

Для интеграции информации, полученной в результате различных симуляций, окончательные результаты эволюции опасных явлений представлены с использованием усредненного ансамбля. Результаты всех исторических симуляций и прогнозов по одним и тем же сценариям RCP для каждого опасного явления усредняются, и это усреднение считается наиболее точным представлением нынешних и будущих опасных явлений. Чтобы оценить точность усредненного ансамбля, неопределенность прогноза для каждого

сценария определяется как доля между разбросом ансамбля (разница между более высокими и более низкими значениями среди прогнозов различных симуляций), деленная на среднее значение ансамбля. По определению, если разброс меньше среднего по ансамблю, то неопределенность будет меньше 1, и результаты по этому индикатору можно считать надежными. И наоборот, если разброс больше, чем среднее по ансамблю, неопределенность будет больше 1, и результаты будут менее надежными. Эта методология широко используется в климатических исследованиях для получения информации о согласованности между моделями.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Информация о текущих характеристиках и будущем развитии опасных явлений на территории всей страны была объединена в рисунки и временные ряды. Были получены два типа рисунков, которые включены в Приложение А. Первый тип представляет характеристики опасных явлений в текущем климате и неопределенность распространения. Второй тип показывает будущую эволюцию опасных явлений. Для каждого индикатора имеется следующая информация, обобщенная в рисунках и временных рядах:

- Рисунок с тремя панелями. На верхней панели представлена карта со значениями,

определяющими опасное явление в современном климате (см. рис. 8 в качестве примера). Современный климат или исторический период – это 1976-2005 годы. Карты показывают 99-й процентиль для осадков, температуры и максимальной скорости ветра. Для тепловых волн представлены карты среднего количества явлений в год, интенсивности и продолжительности в нынешнем климате. Для SPEI и KBDI представлены карты среднего числа явлений в год. На второй и третьей панели представлены карты с ансамблевой неопределенностью для прогнозов сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5.

Example of the present climate and model uncertainty figures

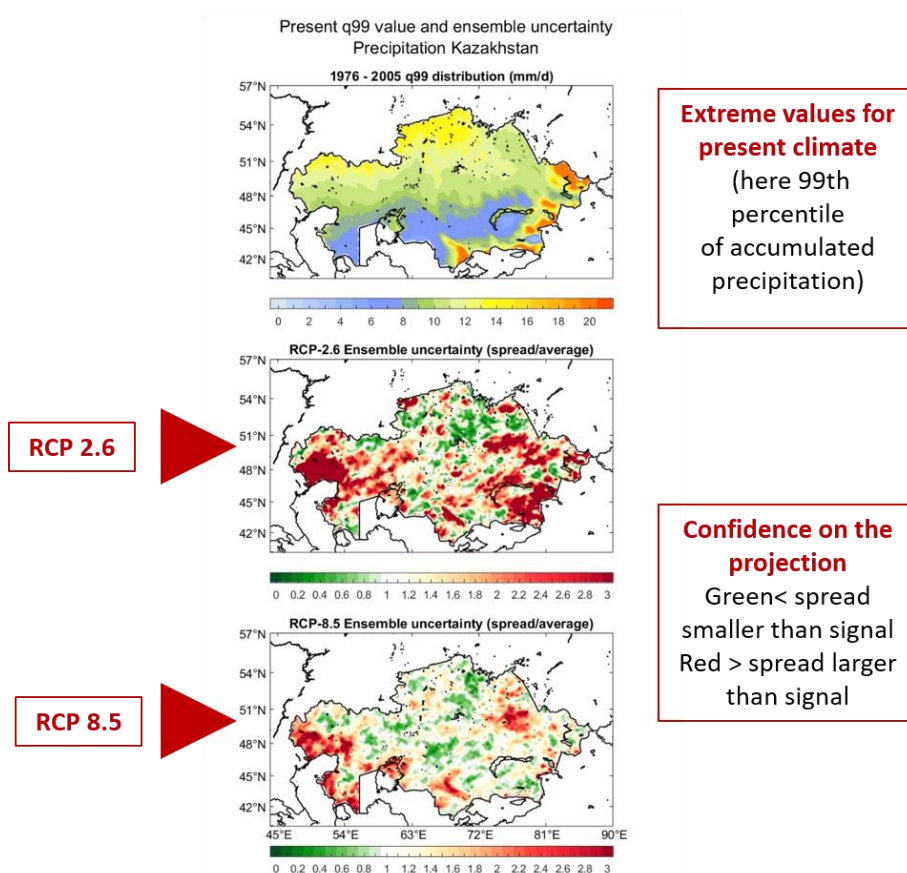


Рисунок 8. Пример карт, суммирующих современный климат и неопределенность модели. На верхней панели показаны средние экстремальные значения осадков за исторический период. На центральной и нижней панелях – неопределенность ансамбля для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

- Рисунок с картами, представляющими временную эволюцию всех индикаторов (см. рис. 9 в качестве примера). Показано для сценариев выбросов RCP 8.5 и RCP 2.6 по отношению к историческому периоду (1976 - 2005) для трех 30-летних временных горизонтов: начало XXI века (2011 - 2040), середина XXI века (2041 - 2070) и конец XXI века (2071 - 2100) (см. рис. 7). Эти карты показывают увеличение/уменьшение

индикаторов по отношению к историческому периоду в количестве явлений в год или в процентах, в зависимости от индикатора (для некоторых индикаторов, таких как тепловые волны, количество явлений в настоящее время равно нулю, поэтому невозможно выразить увеличение в процентах). Для тепловых волн также указывается увеличение/уменьшение продолжительности и интенсивности.

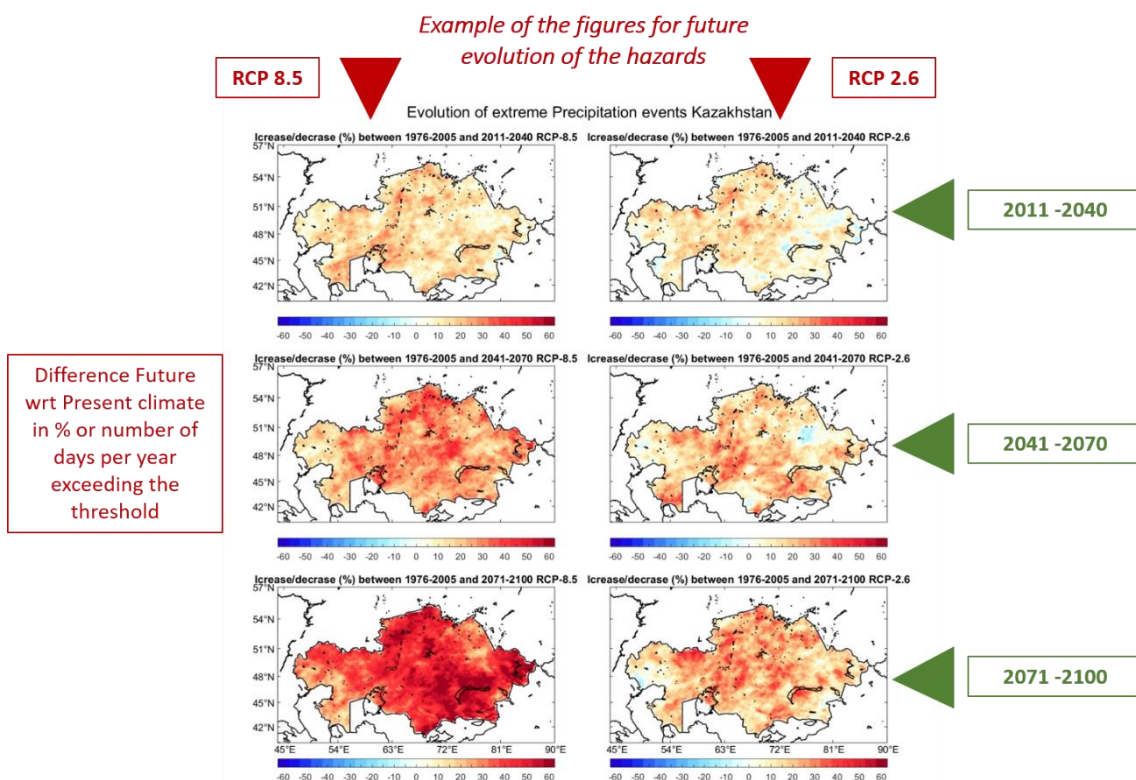


Рисунок 9. Пример карт, суммирующих временную эволюцию экстремальных осадков в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение (в %) количества явлений в год по отношению к историческому периоду к началу века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

- Годовые временные ряды всех индикаторов в формате Excel для конкретных локаций. Вместо того, чтобы показывать непосредственно выходные данные модели, мы показываем сглаженную версию, более удобную для экономических моделей. А именно, временные ряды получают путем подгонки полинома второй степени к среднему

количеству явлений в год для индикаторов за исторический период и три временных горизонта прогнозирования (рис. 10). Карта с расположением городов/регионов, где рассчитываются ряды, и значения пороговых значений в этих местах также включены в файлы (рис. 11).

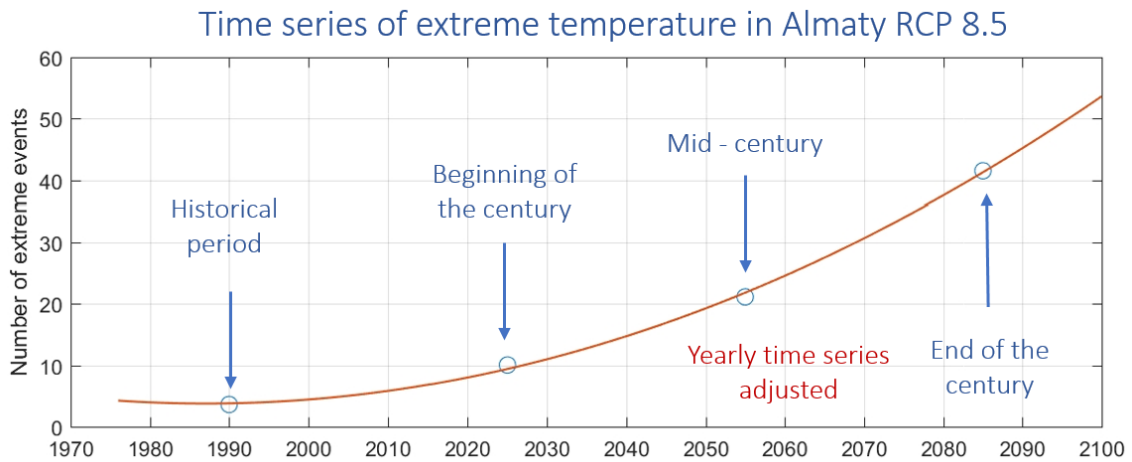


Рисунок 10. Пример расчета годового временного ряда экстремальных температур в Алматы для прогноза RCP 8.5. Синие круги представляют среднее количество явлений в год за исторический период и три временных горизонта, определенных для XXI века. Красная линия – это временной ряд, полученный в результате подгонки четырех 30-летних средних значений к полиномиальной функции второй степени.

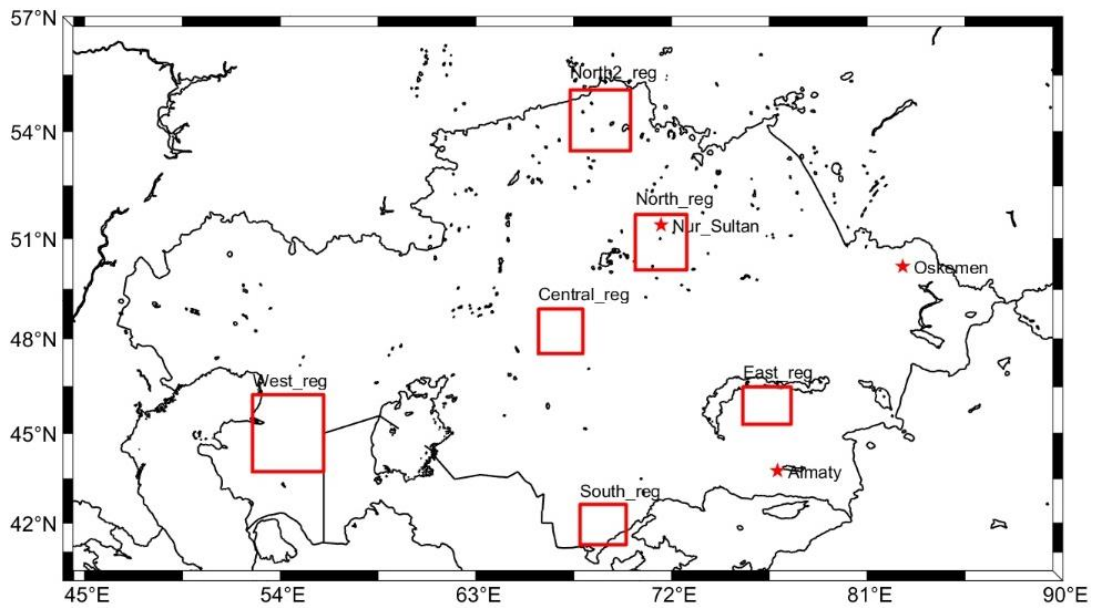


Рисунок 11. Расположение точек/регионов, в которых рассчитываются годовые временные ряды индикаторов.

| Опасные явления | Казахстан |
|---------------------------|---|
| Экстремальные осадки | 2 файла с рисунками (формат jpg), 1 файл Excel с 2 временными рядами |
| Экстремальная температура | 2 файла с рисунками (формат jpg), 1 файл Excel с 2 временными рядами |
| Экстремальный ветер | 2 файла с рисунками (формат jpg), 1 файл Excel с 2 временными рядами |
| Тепловые волны | 6 файлов с рисунками (формат jpg), 1 файл Excel с 2 временными рядами |
| Засухи | 2 файла с рисунками (формат jpg), 1 файл Excel с 2 временными рядами |
| Лесные/ степные пожары | 2 файла с рисунками (формат jpg), 1 файл Excel с 2 временными рядами |
| Всего файлов | 22 файла |

Таблица 3. Цифры и файлы временных рядов для каждой страны-партнера, включенные в набор данных.

Цифры и файлы временных рядов, включенные в набор данных по Казахстану, обобщены в Таблице 3.

Цифры по всем индикаторам (Таблица 3) приведены в Приложении А. Кроме того, все рисунки и файлы Excel с временными рядами доступны в онлайн-репозитории <https://zenodo.org/record/4506374#.YEEdhHp1KhPZ> (doi: 10.5281/zenodo.4506374).

Дополнительно были созданы файлы netCDF с годовой динамикой всех индикаторов, которые находятся в том же хранилище. Файлы содержат трехмерные матрицы (размеры: долгота x широта x время) и включают общее количество явлений для каждого опасного явления в каждый год с 1976 по 2100 год. Для тепловых волн файлы также включают усредненные за год индикаторы интенсивности и продолжительности. Файлы были созданы для всего домена CORDEX CAS. Один файл был создан для каждого опасного явления, каждой симуляции и каждого сценария выбросов, в результате чего общее количество файлов составило 44. В соответствии с соглашением netCDF файлы включают информацию об их содержании.

В Таблице 4 приведены файлы, созданные для каждого индикатора. Формат именования файлов следующий:

VariableName_Domain_GCMMModel_
RCPscenario_RCMMModel_Frequency_StartTime-
EndTime.nc

Пример:
xtrmpr_CAS-22_NCC-NorESM1-M_rcp26_GERICS-
REM02015_yr_1976-2100.nc

VairableName: xtrmpr (экстремальные осадки)
Domain: CAS-22 (Центральная Азия с
разрешением 0.22°)

GCMMModel: NCC-NorESM1-M (запускающая GCM
CMIP5)

RCPscenario: rcp26 (исторический + прогноз)
RCMMModel: GERICS-REM02015 (RCM,
используемая в домене)

Frequency: yr (годовая временная частота)
StartTime-EndTime: 1976 - 2100 (период данных
в файле; гggg)

| Опасные явления | Имя переменной в файле | Количество файлов | |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Экстремальные осадки | xtrmpr | 4 симуляции, 2 сценария RCP | 8 |
| Экстремальная температура | xtrmtemp | 4 симуляции, 2 сценария RCP | 8 |
| Экстремальный ветер | xtrmwnd | 3 симуляции, 2 сценария RCP | 6 |
| Тепловые волны | hw | 4 симуляции, 2 сценария RCP | 8 |
| Засухи | drght_risk | 3 симуляции, 2 сценария RCP | 6 |
| Лесные/ степные пожары | wildfr_risk | 4 симуляции, 2 сценария RCP | 8 |
| | | Всего файлов | 44 файла |

Таблица 4. Сводка переменных и файлов, созданных для каждого опасного явления.

Цитирование набора данных: Soto-Navarro, Javier, & Jordá, Gabriel. (2021). База данных по климатическим угрозам в Центральной Азии проекта «Рекомендации по выработке политик

экономического развития, устойчивого к изменению климата» (CRED) [Набор данных]. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4506374>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Alexander, M.E., 1990. Computer Calculation of the Keetch-Byram Drought Index-Programmers Beware! *Fire Manag. Notes* 51, 23–25.
- Bessie, W., Johnson, E., 1995. The Relative Importance of Fuels and Weather on Fire Behavior in Subalpine Forests Author (s): W . C . Bessie and E . A . Johnson Published by: Wiley Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/1939341> REFERENCES Linked references are available on JSTOR f. *Ecology* 76, 747–762.
- Brown, E.K., Wang, J., Feng, Y., 2020. U.S. wildfire potential: a historical view and future projection using high-resolution climate data. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba868>
- De Troch, R., Hamdi, R., Van de Vyver, H., Geleyn, J.F., Termonia, P., 2013. Multiscale performance of the ALARO-0 model for simulating extreme summer precipitation climatology in Belgium. *J. Clim.* 26, 8895–8915. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00844.1>
- Gerard, L., Piriou, J.M., Brožková, R., Geleyn, J.F., Banciu, D., 2009. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma-scale operational weather prediction model. *Mon. Weather Rev.* 137, 3960–3977. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2750.1>
- Giot, O., Termonia, P., Degrauwe, D., De Troch, R., Caluwaerts, S., Smet, G., Berckmans, J., Deckmyn, A., De Cruz, L., De Meutter, P., Duerinckx, A., Gerard, L., Hamdi, R., Van Den Bergh, J., Van Genderachter, M., Van Schaeybroeck, B., 2016. Validation of the ALARO-0 model within the EURO-CORDEX framework. *Geosci. Model Dev.* 9, 1143–1152. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1143-2016>
- Greene, C.A., Thirumalai, K., Kearney, K.A., Delgado, J.M., Schwanghart, W., Wolfenbarger, N.S., Thyng, K.M., Gwyther, D.E., Gardner, A.S., Blankenship, D.D., 2019. The Climate Data Toolbox for MATLAB. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 20, 3774–3781. <https://doi.org/10.1029/2019GC008392>
- Hamdi, R., Van de Vyver, H., Termonia, P., 2012. New cloud and microphysics parameterisation for use in high-resolution dynamical downscaling: Application for summer extreme temperature over Belgium. *Int. J. Climatol.* 32, 2051–2065. <https://doi.org/10.1002/joc.2409>
- IPCC, Core writing team, Pachauri, R.K., Meyer (eds.), L., 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* Title. Geneva, Switzerland.
- Jacob, D., 2001. A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.* 77, 61–73. <https://doi.org/10.1007/s007030170017>
- Jacob, D., Elizalde, A., Haensler, A., Hagemann, S., Kumar, P., Podzun, R., Rechid, D., Remedio, A.R., Saeed, F., Sieck, K., Teichmann, C., Wilhelm, C., 2012. Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. *Atmosphere (Basel)*. 3, 181–199. <https://doi.org/10.3390/atmos3010181>
- Keetch, J.J., Byram, G.M., 1968. A Drought Index for Forest Fire Control. SE-38. Asheville, NC U.S. Dep. Agric. For. Serv. Southeast. For. Res. Pap., 35p.
- Paulo, A.A., Rosa, R.D., Pereira, L.S., 2012. Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 1481–1491. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1481-2012>
- Pietikäinen, J.P., Markkanen, T., Sieck, K., Jacob, D., Korhonen, J., Räisänen, P., Gao, Y., Ahola, J., Korhonen, H., Laaksonen, A., Kaurola, J., 2018. The regional climate model REMO (v2015) coupled with the 1-D freshwater lake model FLake (v1): Fenno-Scandinavian climate and lakes. *Geosci. Model Dev.* 11, 1321–1342. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1321-2018>
- Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., Joly, A., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY4IT1 and ALARO CY4OT1. *Geosci. Model Dev.* 11, 257–281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>
- Top, S., Kotova, L., De Cruz, L., Aniskevich, S., Bobylev, L., De Troch, R., Gnatiuk, N., Gobin, A., Hamdi, R., Kriegsmann, A., Remedio, A.R., Sakalli, A., Van De Vyver, H., Van Schaeybroeck, B., Zandersons, V., De Maeyer, P., Termonia, P., Caluwaerts, S., 2020. Evaluation of regional climate models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° resolution over the CORDEX Central Asia domain. *Geosci. Model Dev. Discuss.* 1–38. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-368>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Xu, Z., FitzGerald, G., Guo, Y., Jalaludin, B., Tong, S., 2016. Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis. *Environ. Int.* 89–90, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.007>

Приложение А:

Рисунки современных характеристик и будущей эволюции опасных климатических явлений в Казахстане, проанализированных в рамках проекта CRED

В этом приложении собраны рисунки, которые объединяют информацию о характеристиках опасных климатических явлений в современном климате и их будущей эволюции, прогнозируемой ансамблевым моделированием по сценариям RCP 2.6 и RCP 8.5.

1. Экстремальные осадки

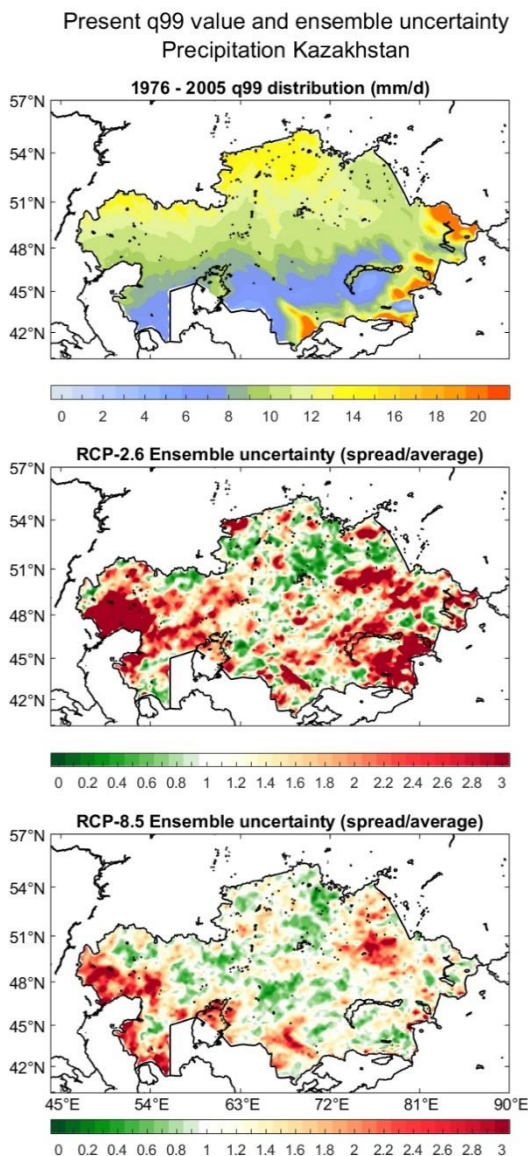


Рисунок А1. На верхней панели показаны средние экстремальные значения осадков за исторический период (мм/сут). На центральной и нижней панелях показана ансамблевая неопределенность для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of extreme Precipitation events Kazakhstan

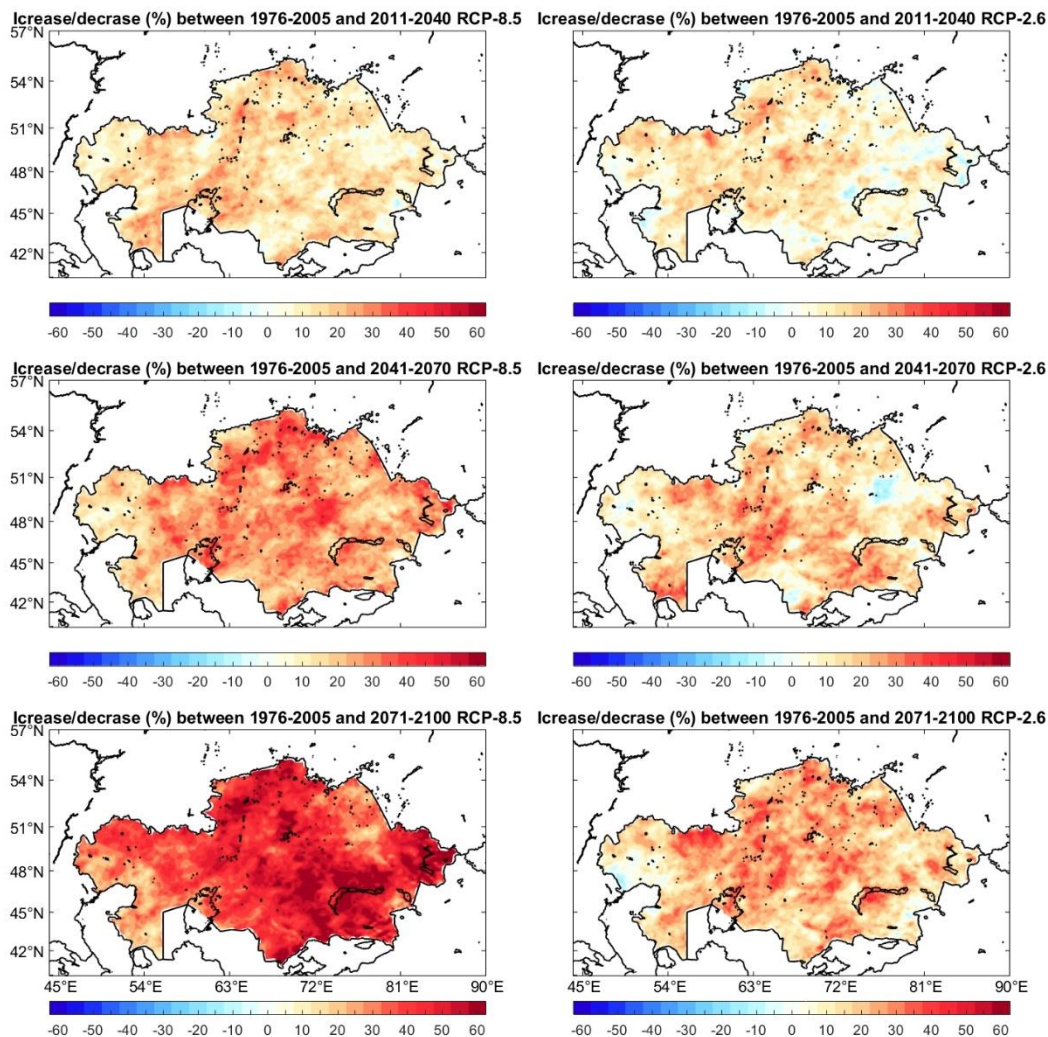


Рисунок А2. Эволюция экстремальных осадков в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение (в %) количества явлений в год по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века соответственно.

2. Экстремальная температура

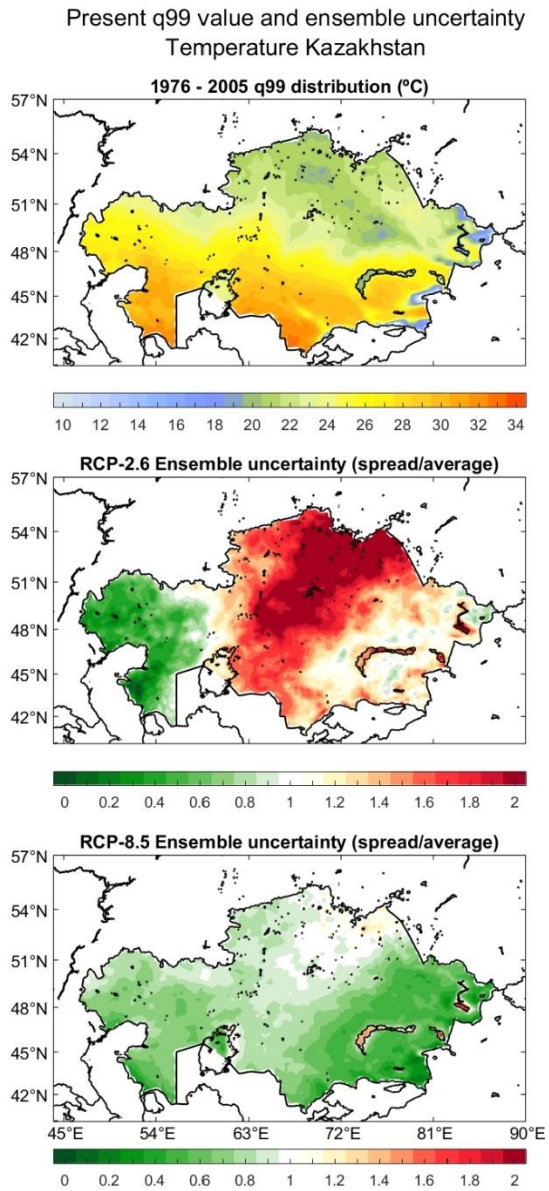


Рисунок А3. На верхней панели показаны средние экстремальные значения температуры за исторический период (°C). На центральной и нижней панелях показана ансамблевая неопределенность для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of extreme Temperature events Kazakhstan

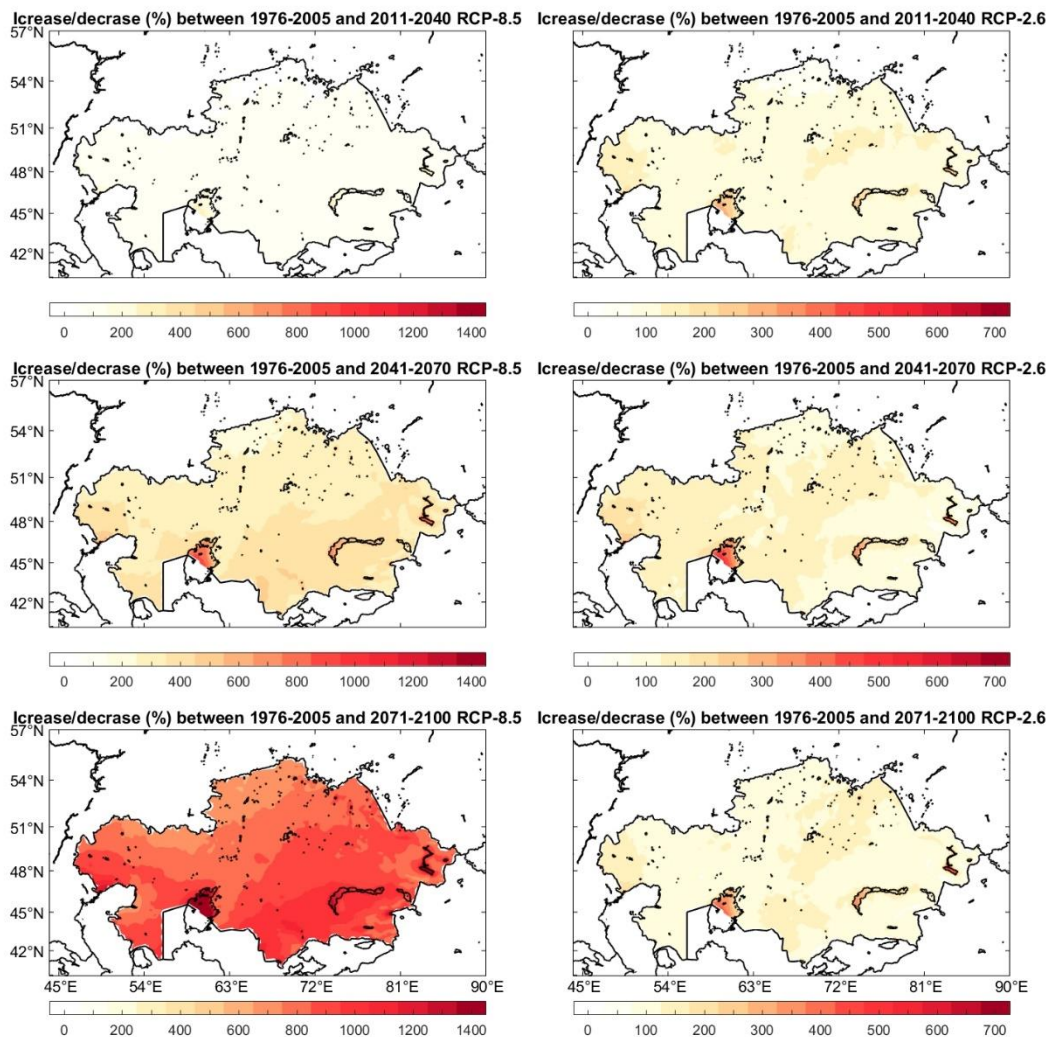


Рисунок А4. Эволюция экстремальных температур в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение (в %) количества явлений в год по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

3 Экстремальные ветровые явления

Present q99 value and ensemble uncertainty
Wind Kazakhstan

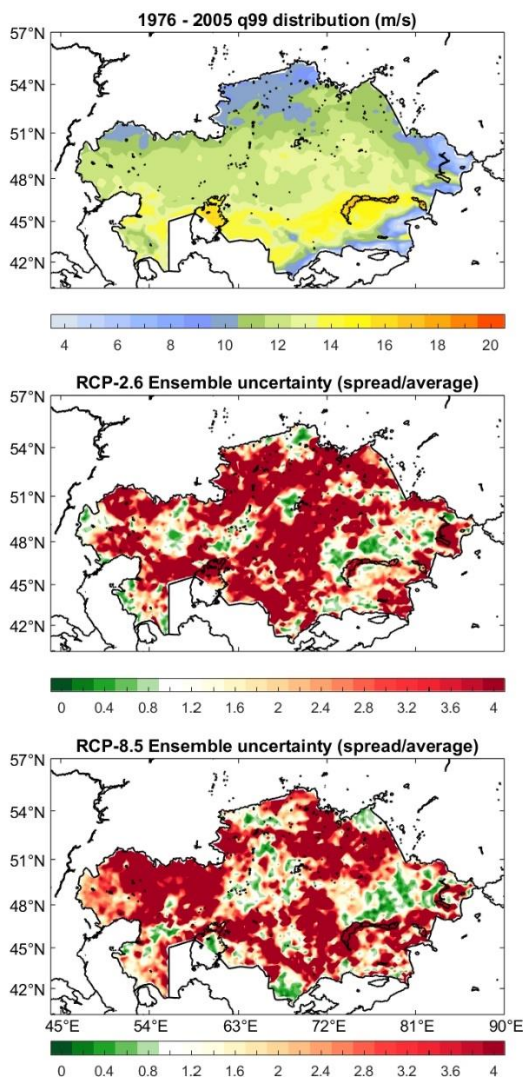


Рисунок А5. На верхней панели показаны средние экстремальные значения скорости ветра за исторический период (м/с). На центральной и нижней панелях показана неопределенность ансамбля для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of extreme Wind events Kazakhstan

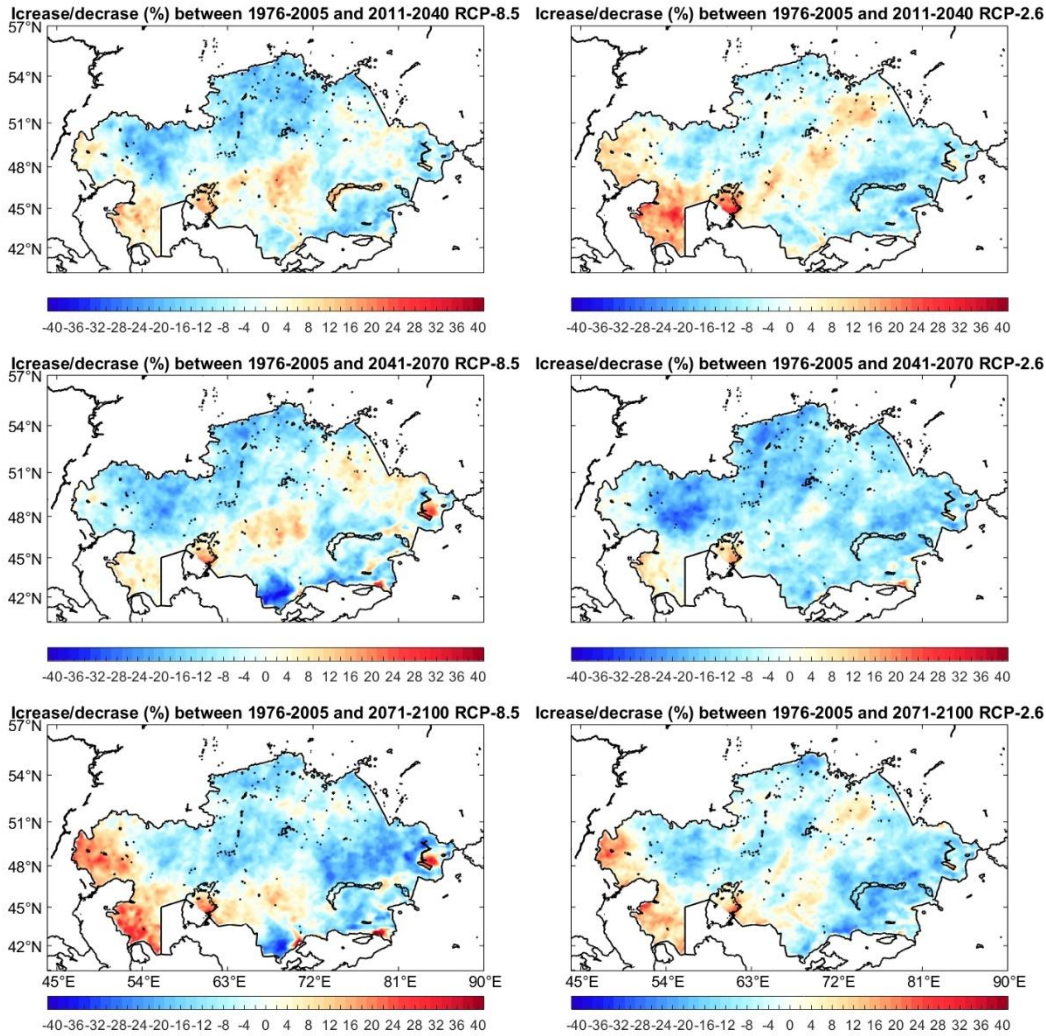


Рисунок А6. Эволюция экстремальной скорости ветра в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые панели – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение (в %) количества событий в год по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

4. ТЕПЛОВЫЕ ВОЛНЫ

4.1 Количество тепловых волн

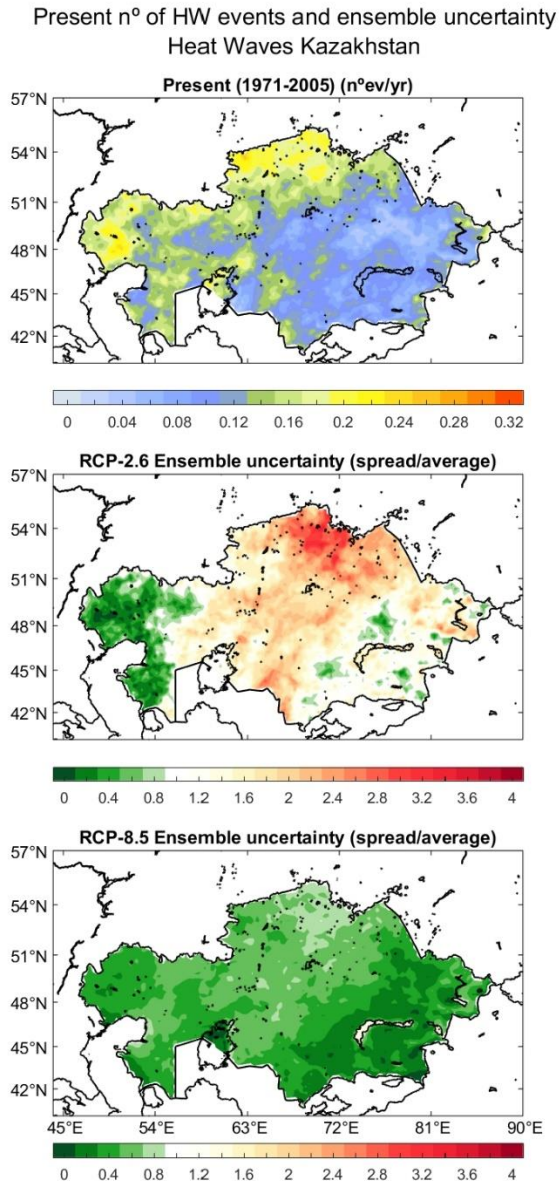


Рисунок А7. На верхней панели показано среднее количество тепловых волн в год в исторический период. На центральной и нижней панелях показана ансамблевая неопределенность для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of the number of Heat Waves Kazakhstan

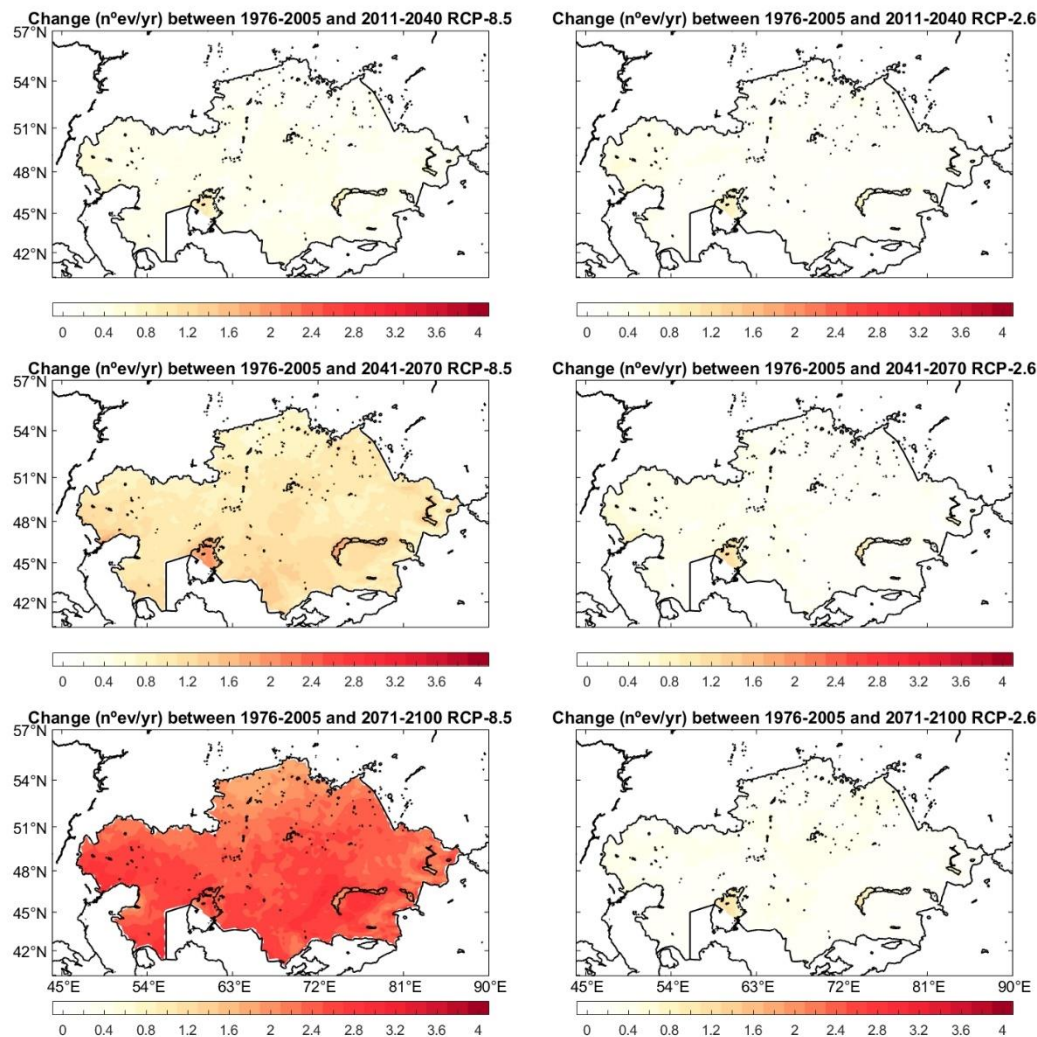


Рисунок А8. Эволюция количества тепловых волн в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые панели – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение количества событий в год по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

4.2 Интенсивность тепловых волн

Present HWs Intensity and ensemble uncertainty
Heat Waves Kazakhstan

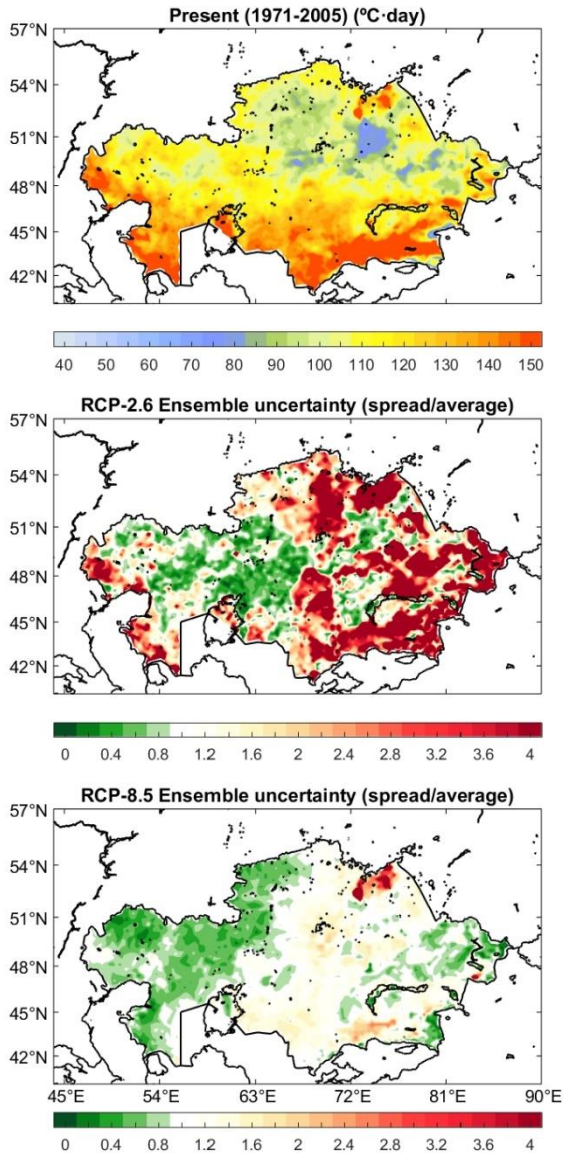


Рисунок А9. На верхней панели показана средняя интенсивность тепловых волн в исторический период (°С·день). На центральной и нижней панелях показана ансамблевая неопределенность для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of the Heat Waves Intensity Kazakhstan

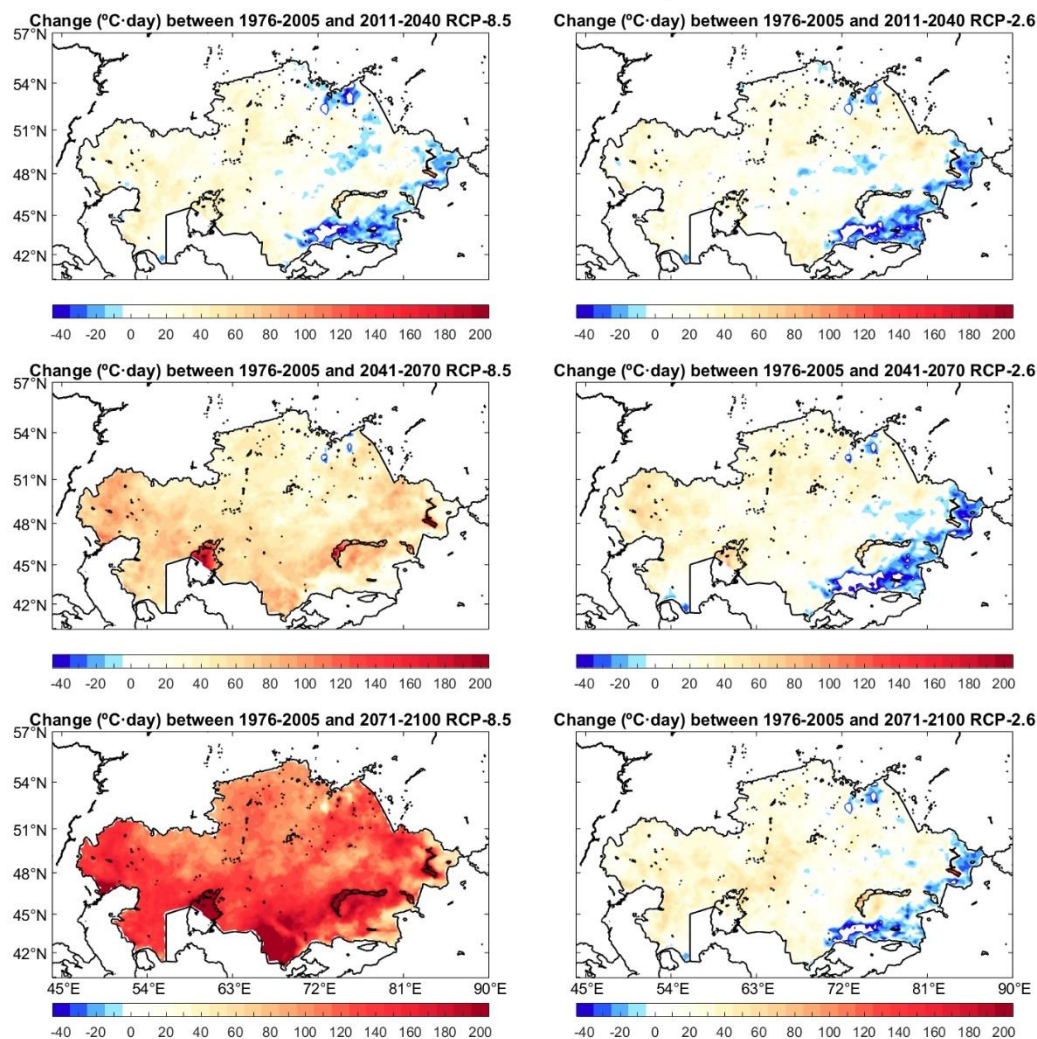


Рисунок А10. Эволюция интенсивности тепловых волн в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые панели – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение интенсивности (°C день) по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

4.3. Продолжительность тепловых волн

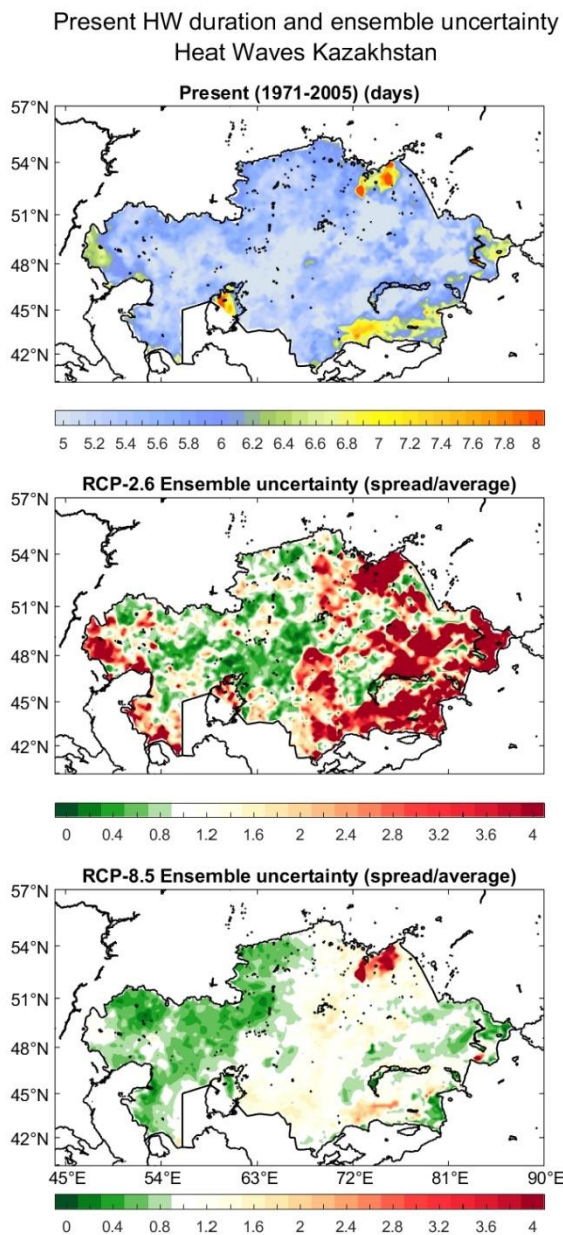


Рисунок А11. На верхней панели показана средняя продолжительность тепловых волн в историческом периоде (дни). На центральной и нижней панелях показана ансамблевая неопределенность для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of the Heat Waves Duration Kazakhstan

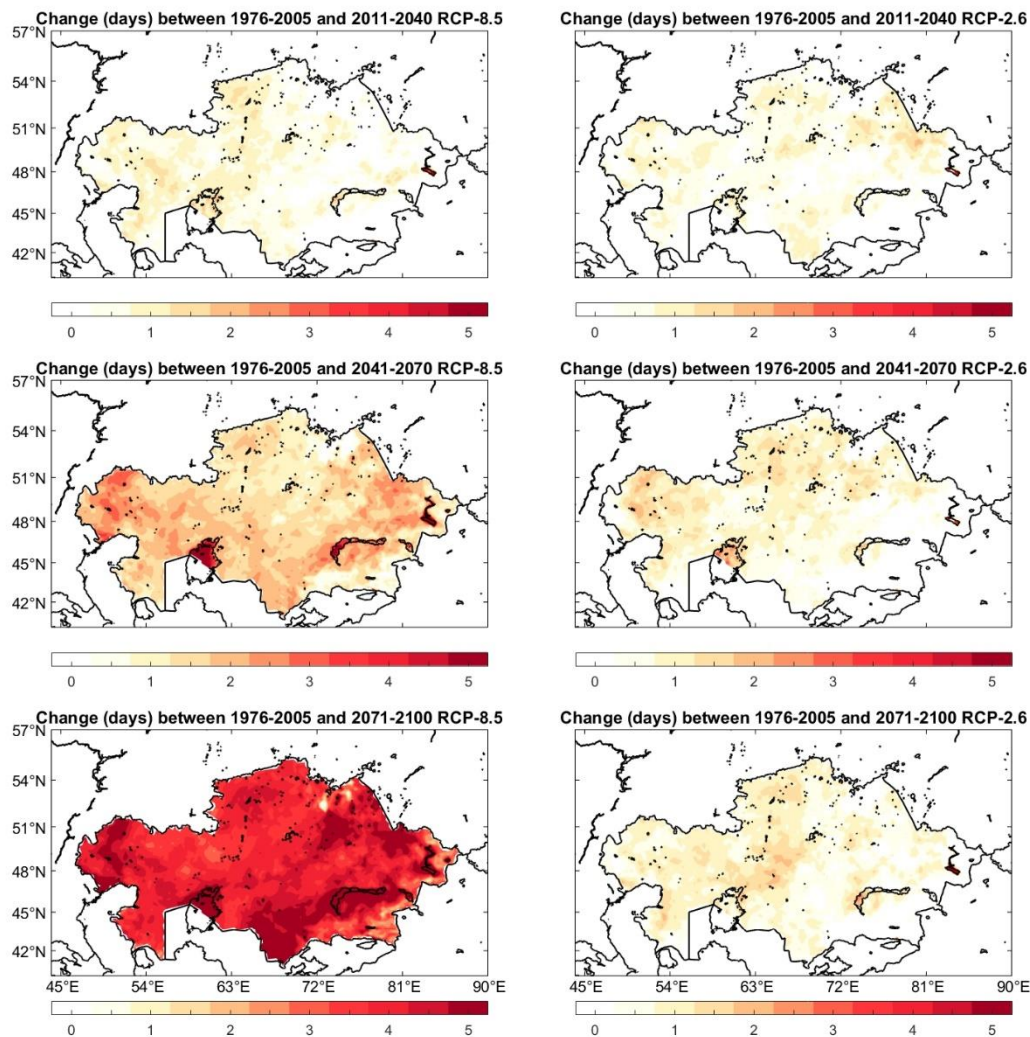


Рисунок А12. Эволюция продолжительности тепловых волн в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение продолжительности (дни) по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

5 Засухи (SPEI)

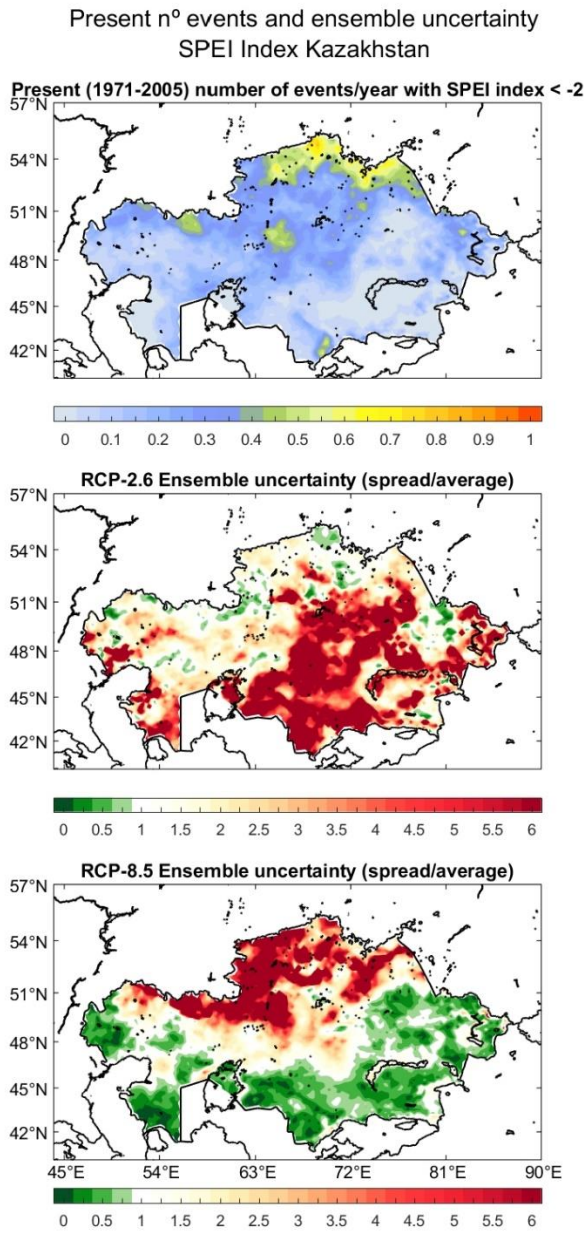


Рисунок А13. На верхней панели показано среднее количество засух в год (SPEI < -2) в исторический период. На центральной и нижней панелях показана ансамблевая неопределенность для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of Droughts SPEI index < -2 events Kazakhstan

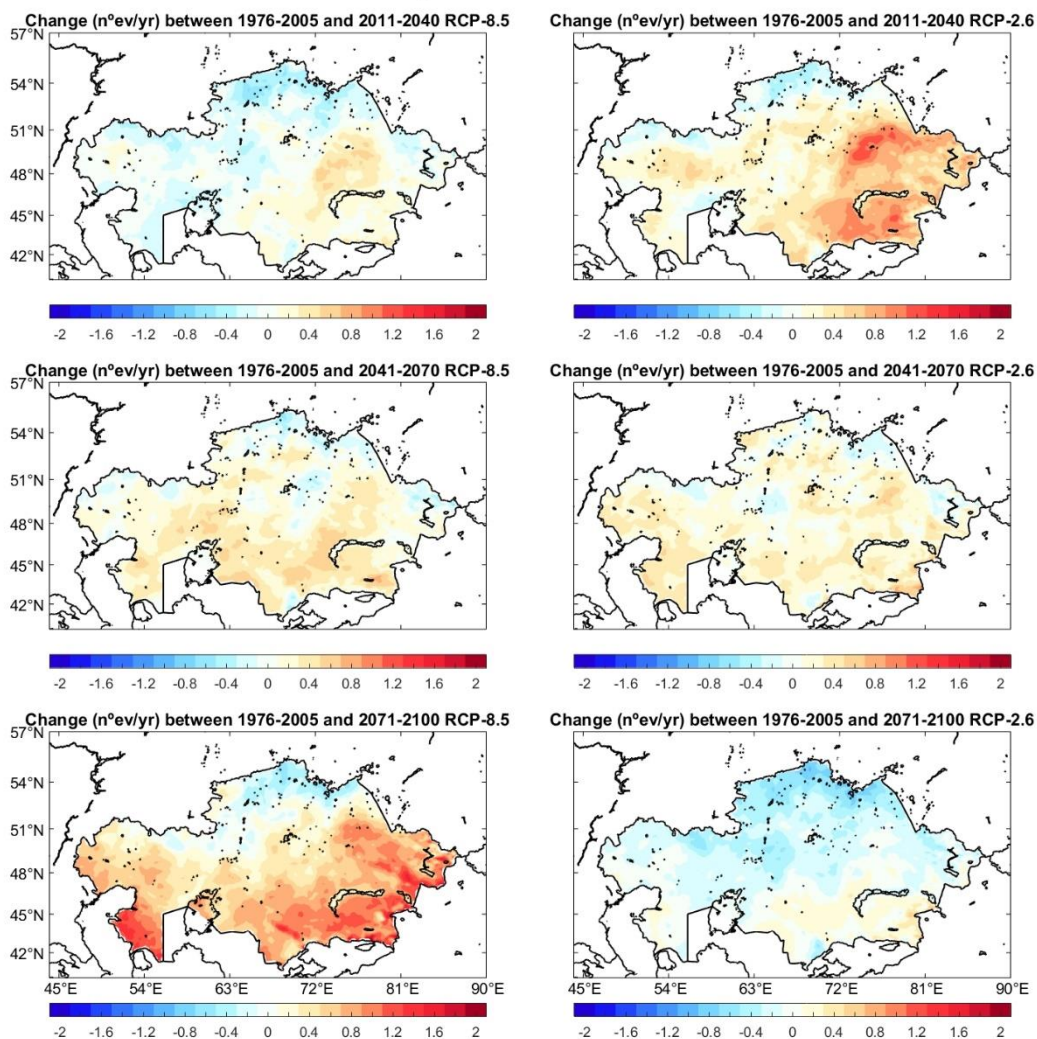


Рисунок А14. Динамика количества засух в год в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение количества засух в год по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

6. Лесные/ степные пожары (КВДІ)

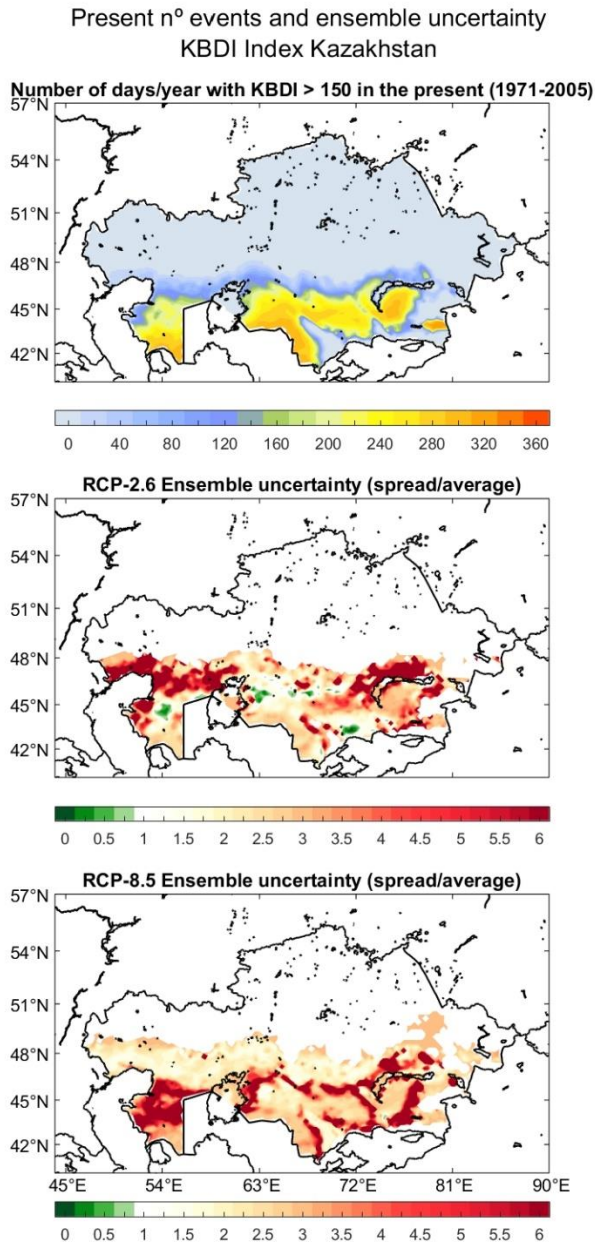


Рисунок А15. На верхней панели показано среднее количество дней в году с экстремальным риском пожара (КВДІ > 150) в исторический период. На центральной и нижней панелях показана ансамблевая неопределенность для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 соответственно.

Evolution of Wilfire Risk KBDI > 150 events Kazakhstan

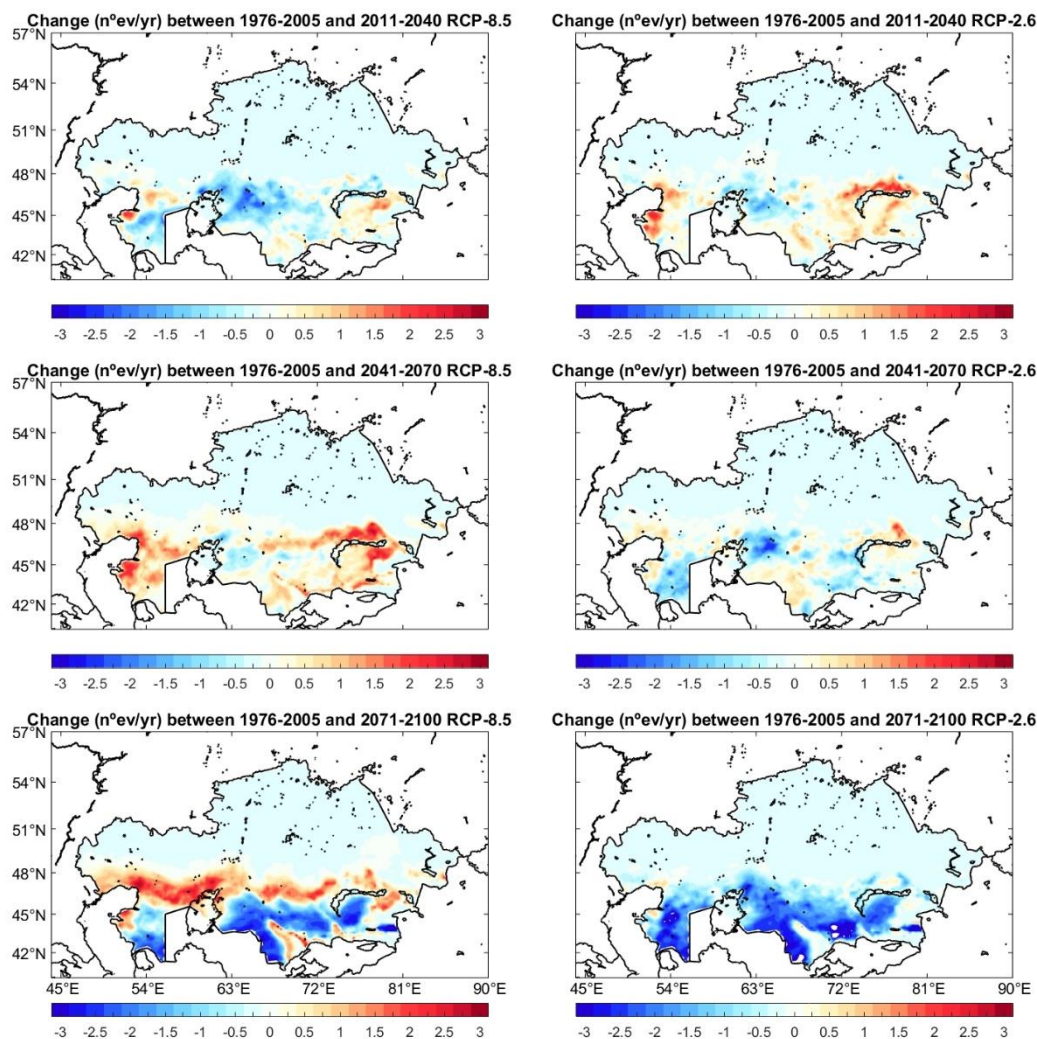


Рисунок А16. Динамика количества дней с экстремальным риском пожара в год в XXI веке. Левые панели показывают эволюцию по сценарию RCP 8.5, а правые панели – по сценарию RCP 2.6. Верхние панели показывают среднее увеличение/уменьшение количества дней с экстремальным риском пожара в год по отношению к историческому периоду в начале века, центральные панели – к середине века и нижние панели – к концу века.

