



Подготовка оценок климатических рисков для опасных водных явлений на национальном уровне

Published by:



Supported by:



Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation,
Nuclear Safety and Consumer Protection



INTERNATIONAL
CLIMATE
INITIATIVE

based on a decision of
the German Bundestag

Являясь предприятием, находящимся в федеральной собственности, GIZ поддерживает правительство Германии в достижении его целей в области международного сотрудничества для устойчивого развития.

Издатель
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Зарегистрированные офисы:
Бонн и Эшборн, Германия

Адрес:
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Köthener Str.2
10963, Берлин, Германия
т. +49 61 96 79-0
ф +49 61 96 79-11 15
info@giz.de
www.giz.de
www.giz.en

Проект
Рекомендации по выработке политики для экономического развития,
устойчивого к изменению климата

Руководитель проекта
Др. Себастьян Хомм
sebastian.homm@giz.de

Авторы
Франциска Брунделл и др. София Лютtringхаус | Дюссельдорф

Участники подготовки
Анастасия Лобанова, Кристофф Горнотт
Себастьян Хомм, Наима Абдулл, Сэмюэл Брайсон, Дана Ермолёнов

Перевод:
Дмитрий Калмыков, Караганда

Дизайн и верстка
Альвира Ертаева, Астана

Источники фото
©pexels

Данный отчет подготовлен экспертами международной консалтинговой компании EarthYield Advisors GbR в рамках глобальной программы «Рекомендации по выработке политики для экономического развития, устойчивого к изменению климата», реализуемой Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (Германским обществом по международному сотрудничеству) по поручению Федерального министерства окружающей среды, охраны природы, ядерной безопасности и защиты прав потребителей (BMUV).

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, ядерной безопасности и защиты прав потребителей Германии (BMUV)

Германия, 2025 год



ПОДГОТОВКА ОЦЕНОК КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ ДЛЯ ОПАСНЫХ ВОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА НАЦИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Июнь 2025 года



Подготовлено экспертами EarthYield
Advisories GbR в рамках задания

*«Оценка водных рисков, связанных с
изменением климата, для Грузии,
Казахстана и Монголии»*

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.1. История создания данного текста.....	5
1.2. Структура данного текста.....	6
2. ВЫБОР СТРАТЕГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКИ.....	7
2.1. Определение целей исследования.....	7
2.2. Анализ текущего состояния науки и прогнозов	7
2.3. Выбор методологии моделирования.....	8
3. ОТБОР, ПОЛУЧЕНИЕ, ОЧИСТКА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ.....	9
3.1. Анализ литературы и обмен мнениями с экспертами	9
3.2. Критерии данных.....	10
3.3. Источники данных.....	12
3.4. Переменные.....	16
3.5. Сценарии.....	16
3.6. Получение и обработка данных.....	17
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ • Методология оценки климатических рисков	18
4.1. Метеорологические засухи.....	18
4.2. Речные паводки.....	19
4.3. Тепловые волны	21
4.4. Джуты (специфично для Монголии).....	22
5. ИЗВЛЕЧЕННЫЕ УРОКИ И ВЫВОДЫ	25
6. Список использованной литературы.....	27

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель задания заключалась в сборе и обработке данных об опасностях, связанных с водой, а также в моделировании будущих водных опасностей при различных сценариях изменения климата.

Вода является одним из ключевых ресурсов для поддержания жизни и функционирования экосистем. Она обеспечивает социально-экономическую стабильность и развитие основных секторов экономики, таких как сельское хозяйство, промышленность и энергетика. Изменение климата существенно влияет на водные ресурсы по всему миру, приводя к различным рискам: изменению режимов осадков, учащению и усилению экстремальных явлений (засухи, наводнения), ухудшению качества воды и дефициту пресной воды.

Сбор и анализ данных, связанных с водой, необходимы для понимания масштабов и последствий этих опасностей и рисков, а также для разработки мер по их снижению. Такой анализ позволяет ответить на важные вопросы:

- › Какие опасные явления, связанные с водой, существуют и прогнозируются в конкретном регионе?
- › Как эти опасности отражаются на различных секторах и сообществах?
- › Какие меры адаптации могут быть предприняты для минимизации последствий данных опасностей?

Настоящее руководство может быть полезно для широкого круга заинтересованных сторон – государственных органов, научных учреждений, экологических организаций, при принятии решений и разработке стратегий климатоустойчивого экономического развития. Данные для анализа могут быть получены из различных источников: научной

литературы, климатических моделей и открытых порталов данных.

1.1. История создания данного текста

«Глобальная программа по экономическому развитию, устойчивому к изменению климата» (CRED), реализуемая GIZ, поручила научно-консалтинговой компании EarthYield Advisories провести оценку опасных явлений, связанных с водой и климатом, а также определить возможные меры адаптации в Грузии, Казахстане и Монголии. Основная цель — информировать политиков о потенциальных опасностях и вероятности их возникновения для обеспечения обоснованного принятия решений в области климатической политики. Кроме того, смоделированные опасные явления, связанные с водой, будут интегрированы в макроэкономические оценки (модель e3.kz) и в рекомендации по политике, что позволит обеспечить климатоустойчивое экономическое планирование.

Задание для EarthYield Advisories включало несколько основных задач:

- (1) Идентификация опасных климатических явлений, связанных с водой, на основе анализа литературы и интервью с экспертами;
- (2) Отбор наиболее актуальных опасностей, одинаково значимых для всех трех стран;
- (3) Моделирование развития этих опасных явлений при различных сценариях изменения климата до 2100 года;

(4) Определение соответствующих адаптационных мер.

Первые три задачи описаны в данном руководстве. Настоящий отчет о лучших практиках предназначен для предоставления рекомендаций по отбору, поиску и обработке данных о водных опасных явлениях. Кроме того, в нем рассматривается, каким образом может осуществляться моделирование для прогнозирования водных опасностей в будущем.

В рамках задания также были подготовлены отдельные публикации, посвященные конкретным опасным климатическим явлениям, связанным с водой, для каждой из стран (Грузия, Казахстан и Монголия):

› **Страновые концептуальные записи** – всесторонняя оценка опасных климатических явлений, связанных с водой, с подробным описанием методологии сбора и анализа данных, идентификацией ключевых опасных явлений (засухи, наводнения, тепловые волны), а также с предложениями по мерам адаптации для снижения данных рисков:

- [Скачать для Грузии](#)
- [Скачать для Казахстана](#)
- [Скачать для Монголии](#)

› **Профили опасных явлений** – краткое изложение основных результатов моделирования, представленных в страновых концептуальных записках:

- [Скачать для Грузии](#)
- [Скачать для Казахстана](#)
- [Скачать для Монголии](#)

› **Техническая справка** – краткое изложение методологии оценки джутов в Монголии.

- [Скачать для Монголии](#)

1.2. Структура данного текста

Данный документ структурирован для всестороннего изложения методов обработки и моделирования данных об опасных явлениях, связанных с водой. Глава 2 посвящена выбору стратегии исследования и оценки для подготовки к оценке водных рисков, связанных с изменением климата. Глава 3 описывает процесс отбора, сбора, очистки и обработки данных. Глава 4 раскрывает методологию расчета и моделирования отобранных опасных явлений для всех трех стран (засухи, наводнения и тепловые волны), а также «джутов» – специфичных для Монголии. Глава 5 содержит выводы и обобщает уроки, извлеченные в ходе работы.

2. ВЫБОР СТРАТЕГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКИ

Перед началом сбора данных необходимо четко определить цели предполагаемой оценки. Рекомендуется заранее продумать и подробно ответить на следующие вопросы:

2.1. Определение целей исследования

Уточните, что именно вы хотите узнать:

- › Какие водные риски и опасные явления вас интересуют (например, осадки, температура, засухи, наводнения)?
- › Какая территория является объектом исследования?
- › Имеет ли выбранный регион особенности (например, топография или засушливость)?
- › Какое пространственное разрешение необходимо (например, сетка 50 км x 50 км)?
- › Какой временной интервал вас интересует (например, изменения за последний век; тенденции или прогнозы на 2030, 2050 и 2080 годы)?
- › Зачем необходимо изучать водные климатические опасности? Как будет использоваться эта информация (например, для интеграции в политику или информирования населения)?
- › Какие выходные данные требуются (например, карты, графики, текст)?

После ответа на эти вопросы их необходимо объединить в общий исследовательский вопрос, например:

- › Какие вопросы должны быть исследованы (например: «Как изменились осадки в регионе X за последний век и как они

будут изменяться в будущем в различных климатических сценариях?»).

Обратите внимание, что изложенные шаги могут потребовать итеративного подхода: возможно, потребуется вернуться к предыдущим этапам для корректировки вопросов или дизайна исследования. Это может происходить из-за нехватки или низкого качества данных, новых выводов из литературы или других причин. Рекомендуется как можно раньше определить и признать возможные ограничения данных и их применимость для целей исследования.

2.2. Анализ текущего состояния науки и прогнозов

После формулирования исследовательского вопроса необходимо собрать информацию о текущем состоянии научных знаний и прогнозов. Это позволит понять, какие исследования уже проводились, а какие еще предстоит выполнить для ответа на конкретный вопрос. Например, может оказаться, что для одного региона исследования уже существуют, а для другого нет, либо доступные прогнозы имеют недостаточное пространственное разрешение.

Рекомендуется начать с поиска по Google, Google Scholar и инструментам ИИ (например, Perplexity) – это даст общее представление о наиболее актуальной литературе. После отбора релевантных источников их следует подробно изучить. По рассматриваемой теме (водные климатические опасности) настоятельно рекомендуется ознакомиться с последним докладом ИПСС, отчетом ВМО о состоянии глобальных водных ресурсов и материалами Climate Change Knowledge Portal

Всемирного банка. Эти источники отражают текущее состояние научных знаний и считаются весьма надежными, хотя в ряде случаев могут предоставлять более общие оценки.

Еще один важный шаг – если позволяют время и условия, пообщаться с экспертами в данной области. Есть ли местные исследователи, занимающиеся этими вопросами? Беседа с ними может также привести к созданию новых сетей и исследовательских групп для расширения знаний и обмена опытом.

2.3. Выбор методологии моделирования

Необходимо выбирать соответствующие исследовательские методы и инструменты, исходя из собственного опыта и компетенций команды. Если в наличии есть специфические знания, например, программирование на Python или R, стоит использовать эти инструменты.

3. ОТБОР, ПОЛУЧЕНИЕ, ОЧИСТКА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Процесс сбора данных включает в себя определение необходимых наборов данных, выбор подходящих источников данных и обеспечение соответствия данных требованиям оценки. В этом разделе мы расскажем о потребностях в данных, возможных наборах данных и критериях выбора подходящих источников данных.

Мы составим список источников данных, использованных в этой оценке, с подробным указанием источника, доступности (открытый доступ или ограниченный), имеющихся переменных, сценариев, сетки/пространственного разрешения, а также того, как эти источники данных могут быть обновлены в будущем, например, в рамках циклов СМР.

Кроме того, мы составим список других потенциальных источников данных, которые рассматривались, но не использовались для этого задания. Для каждого источника мы предоставим комментарий о контексте, в котором он мог бы быть использован, и о причинах его исключения из нашей оценки.

В этом разделе описана последовательность шагов, которые мы рекомендуем предпринять:

- › Анализ литературы и обмен мнениями с экспертами для получения общего представления о ситуации в каждой стране.
- › Установление критериев данных для удовлетворения потребностей модели.
- › Определение возможных источников данных в рамках ограничений на данные
- › Определение необходимых и доступных переменных.
- › Определение сценариев SSP.

3.1. Анализ литературы и обмен мнениями с экспертами

На первом этапе была проведена обработка как научной, так и так называемой серой литературы – рецензируемых публикаций, отчётов международных организаций, конференционных материалов, а также документов, предоставленных GIZ. Это позволило получить общее представление о текущем состоянии исследований, выделить актуальные тенденции и проблемы, а также определить наиболее значимые водные угрозы, связанные с изменением климата в Казахстане. Кроме того, анализ литературы охватывал действующие политические рамочные документы и руководства, актуальные для страны. Отдельное внимание уделялось первичному поиску релевантных наборов данных и баз данных, пригодных для последующего моделирования климатических сценариев. Среди них данные Copernicus, Aqueduct Water Risk Atlas Института мировых ресурсов, портал Climate Knowledge Portal Всемирного банка. Научная литература подбиралась путём систематического поиска; серая литература – через институциональные архивы, правительственные сайты и международные организации.

На первоначальном этапе акцент был сделан на выявлении опасных климатических явлений и рисков: использовались поисковые запросы «опасные климатические явления Казахстан», «гидрология Казахстан», «водные риски Казахстан», «климатические опасности для воды Казахстан». Также учитывались часто используемые источники: Шестой оценочный доклад МГЭИК, материалы Всемирного банка

по климату и профили климатических рисков от Азиатского банка развития. Существенную роль сыграли материалы, предоставленные GIZ, включая внутренние отчёты, национальные данные и проектные оценки.

Кроме того, экспертные консультации позволили определить наиболее актуальные водные угрозы, уязвимые секторы экономики Казахстана и возможные адаптационные меры. Такие консультации проводились на регулярной основе с привлечением профильных специалистов, в частности, экспертов GWS.

3.2. Критерии данных

Анализ литературы и беседы с экспертами, а также требования экономической модели позволили выработать несколько критериев для сбора данных. Ограничения проекта включали в себя конкретные временные рамки для изучения, заранее выбранные сценарии изменения климата, интеграцию в экономическую модель и наличие времени. Обратите внимание, что приведенные ниже критерии очень специфичны для описанного задания и, следовательно, являются примером того, какие критерии могут быть необходимы. Кроме того, обратите внимание, что в климатических прогнозах обычно не указываются годовые значения, а приводятся средние значения или тенденции за несколько десятилетий, чтобы показать, как, скорее всего, изменится климат в 2030, 2050, 2080 и 2100 годах. Несмотря на ускоряющиеся темпы, изменение климата - это долгосрочный процесс, поэтому более длительные временные интервалы позволяют избежать больших межгодовых колебаний, которые размывают общую картину. Таким образом, данные должны были соответствовать следующим критериям:

Анализ литературы и консультации с экспертами, а также требования экономической модели привели к формированию ряда критериев для отбора данных. Ограничения проекта включали заданный временной период для анализа, заранее определённые сценарии изменения климата, необходимость интеграции в экономическую модель и ограниченное время выполнения задания. Следует отметить, что приведённые ниже критерии являются специфичными именно для данного задания и служат примером того, какие критерии могут потребоваться.

Кроме того, необходимо учитывать, что климатические прогнозы, как правило, не представляют собой данные по отдельным годам; вместо этого даются средние значения или тенденции за несколько десятилетий, чтобы показать, как климат, скорее всего, изменится к 2030, 2050, 2080 и 2100 годам. Несмотря на ускорение изменений, изменение климата остаётся долгосрочным процессом, поэтому более длинные временные интервалы позволяют избежать значительных межгодовых колебаний, которые могут искажать общую картину.

Таким образом, данные должны были соответствовать следующим критериям:

- › Данные по опасным явлениям для речных паводков, метеорологических засух и тепловых волн, которые были определены как наиболее значимые по ожидаемым экономическим потерям для всех трёх стран.
- › Создание классификаций опасностей (низкий, средний, высокий уровень) для отражения различной степени тяжести.
- › Наличие годовых данных по каждой классификации опасностей, необходимых для расчётов в экономической модели с целью определения вероятности возникновения; для этого требовались ежедневные или месячные данные для вычисления годовой вероятности.

- › Полные прогнозы для следующих сценариев, которые представляют собой комбинации сценариев социальных и экономических путей развития (SSP), отражающих изменения в экономическом росте, демографии, технологическом прогрессе и реализации политики, а также путей концентрации парниковых газов (RCP), представляющих различные сценарии выбросов:
 - SSP 1-RCP 2.6 (Устойчивое развитие – низкие выбросы, Парижское соглашение),
 - SSP 2-RCP 4.5 (Средний путь – промежуточные выбросы),
 - SSP 5-RCP 8.5 (Развитие на основе ископаемого топлива – высокие выбросы).
- › Предпочтение отдавалось открытым источникам данных (open-source) для обеспечения воспроизводимости и снижения затрат.
- › Отдавалось предпочтение данным, скорректированным по смещениям и уточнённым по разрешению (bias-corrected и downscaled), с учётом ограниченного времени на выполнение задания.
- › Наличие прогнозных данных (2024-2080 и далее) и интерпретация исторических данных по тепловым волнам, метеорологическим засухам и речным паводкам.
- › Разделение пространственных сеток с достаточным разрешением для избежания усреднения по всей территории страны, то есть наличие пространственного разрешения, позволяющего учитывать различные субрегионы или топографические особенности в выбранных регионах исследования.

Что касается первого критерия – отбора переменных опасных явлений, другие важные водные опасности, которые также

представляли интерес, такие как обширные наводнения, гидрологические засухи и общее истощение водных ресурсов, пришлось исключить. Это решение было обусловлено рядом причин:

- › Общие наводнения требуют значительных объёмов данных, полноценного гидрологического моделирования и применимы в основном к небольшим территориям или отдельным водоёмам. Если предметом анализа является конкретный речной бассейн или столица страны, расчёты должны проводиться исключительно для этой конкретной территории.
- › Гидрологические засухи сложнее поддаются анализу по сравнению с метеорологическими засухами, которые преимущественно зависят от осадков и температуры. Эти две переменные являются стандартными при оценке климатических изменений и широко доступны. В то время как для анализа гидрологических засух необходимы дополнительные данные о запасах подземных вод, водопользовании, влажности почвы и показателях испарения.
- › Кроме того, гидрологические засухи проявляются в более длительной временной перспективе и характеризуются запаздывающей реакцией.
- › Аналогично, для оценки истощения водных ресурсов требуется большой объём данных, включая нередко неопределенную информацию о влиянии деятельности человека.

Дополнительно, для комплексного понимания воздействия экстремальных явлений на экономику и население необходимо объединять данные об инфраструктуре и другие факторы, такие как топография, с прогнозами опасных явлений. Такое сочетание обеспечивает более точную оценку

рисков, поскольку последствия, например, наводнения существенно различаются в зависимости от того, происходит оно на равнинной незастроенной местности или в крутой долине с населёнными пунктами.

3.3. Источники данных

В данном разделе представлен обзор источников данных, которые были рассмотрены в рамках описанного задания. Они различаются по способу представления данных (обработанные данные и исходные данные), вариантам доступа, пространственному разрешению, временной детализации и доступным сценариям изменения климата.

В настоящее время основным источником научного моделирования климатических рисков является Шестая фаза Проекта по сравнению объединенных климатических моделей (CMIP6) (Lange & Büchner, 2021; Lange, 2019). Эти данные уточняются и корректируются по смещению, например, в рамках Межсекторального проекта по сравнению моделей воздействия (ISIMIP) 3b и Координированного эксперимента по уточнению региональных климатических моделей (CORDEX). Другие открытые источники включают Copernicus Climate Data Store (CDS) и иные источники, описанные ниже. Следует учитывать, что все базы данных подвержены изменениям и обновлениям. Это означает, что на момент начала расчетов могут быть доступны более новые версии, дополнительные переменные, временные горизонты, сценарии или другие параметры, чем те, которые описаны ниже. Поэтому мы не приводим полный перечень переменных, а предоставляем обобщённый обзор, демонстрирующий уникальные особенности каждого источника.

CMIP6 – это собрание около 100 современных климатических моделей из 49

исследовательских групп по всему миру, предоставляющее комплексный набор симуляций для построения будущих климатических сценариев и оценки потенциальных опасностей. Это шестая фаза проекта CMIP (2025). Данный ансамбль моделей ценен для моделирования климатических опасных явлений, поскольку позволяет сравнивать результаты различных моделей, анализировать широкий спектр возможных исходов и лучше понимать неопределенности климатических прогнозов, что, в свою очередь, способствует принятию политических решений и проведению оценок последствий. Эти модели также используются в отчетах IPCC шестого цикла (IPCC, 2023). Для региональных климатических прогнозов CMIP6 предоставляет ансамбли мульти-моделей, повышающие точность за счет учета различных SSP-сценариев и климатических переменных. При использовании этих данных рекомендуется ознакомиться с их [руководством для пользователей](#).

ISIMIP3b – это последняя фаза проекта, в котором применяются несколько климатических моделей CMIP6 и моделей воздействия для оценки климатических опасностей в различных секторах и на различных масштабах при различных сценариях глобального потепления и социально-экономического развития (ISIMIP, 2025). Окончание «3b» обозначает вторую часть третьего раунда симуляций. Такой комплексный подход ценен, поскольку предоставляет согласованные прогнозы воздействия изменения климата, что позволяет разрабатывать стратегии адаптации и политические решения с учетом широкого спектра будущих исходов. Эти данные особенно полезны для построения климатических профилей опасных явлений. Они требуют меньшие последующей обработки и моделирования по сравнению с необработанными данными CMIP6, так как уже были уточнены и скорректированы экспертами. Поэтому использование ISIMIP3b

экономит время на моделирование, загрузку и вычислительные ресурсы. Ансамбль ISIMIP включает 10 глобальных циркуляционных моделей CMIP6 (GCMs), охватывающих широкий спектр неопределенностей. Репозиторий ISIMIP предоставляется Потсдамским институтом исследований воздействия на климат (PIK).

CORDEX (Координированный эксперимент по уточнению региональных климатических моделей) – это рамочная инициатива, которая предоставляет данные региональных климатических моделей высокого разрешения для различных регионов мира с пространственным разрешением от 10 до 50 км (CORDEX, 2025). Благодаря своей региональной направленности данные CORDEX позволяют более точно, чем глобальные модели, учитывать локальные особенности климата и экстремальные явления, что делает их особенно ценными для моделирования климатических рисков в отдельных регионах, например, в конкретных странах, а также для разработки местных адаптационных стратегий. Высокое пространственное разрешение обеспечивает более точное отражение локальных климатических особенностей. Однако такие данные менее пригодны для одновременного анализа нескольких регионов, как это требуется в рамках данного задания. Для упрощения моделирования и интерпретации результатов рекомендуется использовать данные ISIMIP или Copernicus. В настоящее время доступны уточнённые модели CMIP5, а доступ к данным по моделям CMIP6 находится в процессе разработки (по состоянию на март 2025 года).

Copernicus Climate Data Store (CDS) предоставляет доступ к обширной коллекции климатических данных, включая глобальные и региональные прогнозы CMIP5, CMIP6 и CORDEX (Copernicus Climate Change Service, 2025). Платформа предлагает проверенные наборы данных, которые позволяют

количественно оценивать неопределённости, связанные с разными сценариями выбросов, особенностями моделей и естественной изменчивостью климата. CDS особенно полезен для моделирования климатических опасных явлений, поскольку предоставляет:

- › Доступ к историческим симуляциям и будущим прогнозам;
- › Данные по широкому набору климатических переменных и индикаторов;
- › Инструменты для анализа и визуализации данных;
- › Регулярные обновления наборов данных и функциональности.

CDS является важным ресурсом для исследователей, политиков и специалистов, занимающихся оценкой климатических опасных явлений и разработкой адаптационных стратегий. В рамках рассматриваемого задания климатические прогнозы получались из CDS. Например, для Монголии были загружены данные модели Метеорологического исследовательского института (MRI) Earth System Model (ESM) версии 2 (MRI-ESM2) (Yukimoto et al. 2019) – современной модели земной системы, которая ценна для региональных климатических прогнозов, поскольку она:

- › Моделирует взаимодействие атмосферы, океанов, суши и криосферы;
- › Обеспечивает климатические прогнозы высокого разрешения для конкретных регионов;
- › Включает широкий набор климатических переменных и сценариев;
- › Может использоваться для оценки воздействия изменения климата на различные сектора.

NASA EarthData – это ведущий источник бесплатных спутниковых данных научного уровня для исследований климата, суши, океанов и атмосферы (NASA, 2025). Он предоставляет доступ к обширной коллекции

спутниковых данных NASA по наблюдению за Землёй. Основные преимущества NASA EarthData для оценки климатических опасных явлений и рисков:

- › Глобальный охват с многолетними историческими данными;
- › Высокая временная и пространственная детализация;
- › Доступ к различным категориям данных (климат, суша, океаны, атмосфера);
- › Частые обновления и долгосрочные спутниковые ряды наблюдений.

NASA EarthData особенно полезен для анализа изменений окружающей среды во времени, мониторинга труднодоступных регионов и изучения долгосрочных климатических трендов.

Climate Change Knowledge Portal (ССКР) Всемирного банка – это онлайн-платформа, предоставляющая комплексную информацию, данные и инструменты по вопросам климата и развития на глобальном, региональном и страновом уровнях (World Bank, 2021). Портал ССКР полезен для моделирования климатических опасных явлений благодаря:

- › Наличию экологических, социально-экономических и данных по рискам стихийных бедствий;
- › Обобщённым материалам, таким как страновые профили адаптации;
- › Пространственным визуализациям на основе Google Maps;
- › Доступу к информации о климатической уязвимости, рисках и мерах по конкретным регионам.

ССКР особенно востребован среди специалистов в области развития, интегрирующих вопросы климатической устойчивости в процессы планирования и управления. Для скачивания данных требуется бесплатная регистрация.

Атлас водных рисков Aqueduct (Aqueduct Water Risk Atlas), разработанный World Resources Institute представляет собой глобальный инструмент оценки водных рисков, помогающий пользователям анализировать риски и возможности, связанные с водными ресурсами, по всему миру (World Resources Institute, 2025). Основные преимущества Aqueduct для моделирования климатических опасных явлений:

- › Высокодетализированные настраиваемые глобальные карты водных рисков;
- › Двенадцать глобальных индикаторов в системе оценки водных рисков;
- › Индикаторы по водному стрессу, изменчивости, качеству воды и социальным конфликтам;
- › Сводный индекс, основанный на современных геостатистических моделях.

Aqueduct Water Risk Atlas особенно полезен для компаний, инвесторов, правительств и сообществ при оценке водных рисков в своей деятельности и инвестициях.

В следующем разделе описывается выбор источника данных для рассматриваемого задания с более подробным изложением аспектов, которые необходимо было учитывать.

Изначальный план выполнения задания (см. введение) предусматривал использование репозитория данных Aqueduct, содержащего предварительно рассчитанные прогнозы засух и наводнений, а также соответствующего водного атласа (Water Atlas). К сожалению, данные были доступны только с шагом в 30 лет, что сделало невозможным точную оценку вероятности возникновения опасных явлений для каждого отдельного года. Это было необходимо, так как экономическая модель, в которую должны были быть интегрированы данные по водным рискам, требует годовых данных. Тем не менее, для большинства климатических прогнозов интервалы в 30 лет

являются приемлемыми, так как они дают хорошее и понятное представление об изменениях климата. Аналогично, Climate Change Knowledge Portal (ССКР), предоставляющий предварительно обработанные данные, также пришлось исключить, поскольку переменные в нем доступны только в агрегированном виде по всей стране и не детализированы. Тем не менее, оба источника использовались в качестве хорошей отправной точки для проверки и анализа начальных тенденций.

Целью данного задания было полное использование необработанных данных из широко используемой международной климатической модели. Была выбрана модель Meteorological Research Institute Earth System Model version 2 (MRI-ESM2-0), разработанная Японским метеорологическим институтом (MRI) (Yukimoto et al., 2019). Эта модель является частью Проекта межсравнения сопряжённых моделей, фаза 6 (СМИР6) – глобальной инициативы по построению климатических прогнозов по различным будущим сценариям (см. выше).

MRI-ESM2-0 включает продвинутые симуляции атмосферных, океанических и наземных процессов, что делает её особенно подходящей для изучения региональных климатических паттернов в Центральной и Западной Азии, включая Казахстан, Монголию и Грузию. Эта модель была выбрана за её способность точно воспроизводить погодные процессы средних широт и учитывать изменения температуры и осадков в континентальном и полузасушливом климате. Эти характеристики делают её ценным инструментом для оценки потенциального воздействия изменения климата на сельское хозяйство, водные ресурсы и экосистемы в указанных регионах. Кроме того, многие другие модели пришлось исключить из-за ограниченной доступности данных, особенно по пространственным

сеткам, переменным или отсутствию прогнозных сценариев.

Модель MRI-ESM2-0 имеет пространственное разрешение примерно 110 км × 110 км. В качестве исторического базового периода для анализа использовался интервал 1981-2010 гг. Хотя в настоящее время чаще применяются базовые периоды 1991-2020 гг., для модели MRI-ESM2-0 это было невозможно, поскольку доступные данные охватывают только период до 2014 года. Базовый период 1981-2010 гг. был выбран, так как он обеспечивает как климатическую релевантность, так и достаточный объём данных для анализа.

Данные были получены из Хранилища климатических данных Copernicus (Copernicus Climate Data Store, CDS) (Copernicus Climate Change Service, 2025). CDS предоставляет бесплатный и открытый доступ к климатическим данным, располагает обширной коллекцией климатической информации, имеет удобный интерфейс и обеспечивает доступ к разнообразным климатическим прогнозам СМИР6, опубликованным в 2021 году. Кроме того, CDS регулярно обновляется и может быть адаптирован под различные задачи. Наконец, возможность применения пространственных и временных фильтров при запросе данных сделала процесс загрузки более эффективным.

Первоначальные рамки проекта предусматривали использование данных, уже скорректированных по смещению и подготовленных для последующего анализа (например, как в Aqueduct и ССКР), а также отсутствие необходимости в навыках программирования. Однако это оказалось невозможным с учетом пространственных и временных требований, а также учитывая, что целью исследования является идентификация экстремальных событий и оценка вероятности их возникновения. Для выполнения такого рода годовых прогнозов необходимы как использование международных

климатических данных, так и навыки работы с Python.

Процесс отбора и получения данных для данного задания:

В связи с этим для получения необходимых наборов данных потребовалось выполнить следующие шаги:

- › Идентификация релевантных наборов данных на основе установленных критериев (см. предыдущий раздел *Источники данных*) и временных ограничений проекта;
- › Оценка доступных источников климатических данных;
- › Исключение предварительно обработанных источников данных, таких как Aqueduct Water Atlas и ССКР, из-за ограничений по временной детализации и пространственной агрегации;
- › Выбор подходящей международной климатической модели для последующей обработки данных;
- › Обоснование выбранной модели на основе её пространственного разрешения и исторического базового периода, обеспечивающих баланс между доступностью данных и климатической релевантностью;
- › Получение исходных данных из CDS, выбранного за его открытый доступ, широкий спектр климатических прогнозов, удобный интерфейс и возможность применения пространственных и временных фильтров для оптимизации загрузки данных;
- › Признание необходимости наличия навыков программирования.

3.4. Переменные

В зависимости от того, какие опасные явления планируется моделировать, для их расчёта и прогнозирования требуются различные

переменные. За более подробным описанием методов расчета см. главу 4.

На основе критериев к данным, необходимых для выявления и анализа трёх водных опасных явлений в рамках рассматриваемого задания (тепловые волны, засухи и речные паводки; см. предыдущий раздел *Источники данных*), а также с учетом ограничений по доступности данных для соответствующих стран, сценариев и временного горизонта, были выбраны следующие переменные с разрешением 110 км × 110 км для всей территории трёх стран:

- › Суточные осадки,
- › Месячные осадки,
- › Суточная средняя температура воздуха у поверхности,
- › Суточная максимальная температура воздуха у поверхности,
- › Месячная средняя температура воздуха у поверхности,
- › Продолжительность светового дня,
- › Месячный суммарный сток,
- › Месячная влажность верхнего слоя почвы.

Дополнительно были выбраны переменные для оценки джетов в Монголии. Поскольку это касается только одной страны, данный случай будет описан отдельно ниже.

3.5. Сценарии

В проекте были использованы наиболее распространённые сценарии шестого поколения SSP (SSP1-2.6, SSP2-RCP 4.5 и SSP5-RCP 8.5), обеспечивающие бесшовную интеграцию в экономическую модель. Эти сценарии были выбраны вместо более ранних, поскольку они предлагают более комплексную рамку, объединяющую социально-экономические условия с климатическими прогнозами.

Сценарии шестого поколения, известные как SSP (Shared Socioeconomic Pathways), объединяют траектории социально-

экономического развития с уровнями радиационного воздействия, что позволяет более глубоко исследовать возможные климатические будущие и связанные с ними социальные вызовы. В отличие от RCP (Representative Concentration Pathways), которые отражают только траектории концентрации парниковых газов, SSP включают экономический рост, демографические изменения, технологический прогресс и реализацию политик.

Такое объединение позволяет SSP моделировать взаимосвязь между социально-экономическими факторами и климатическими последствиями, предлагая более широкий контекст для понимания будущих рисков. SSP работают в связке с RCP, соединяя климатические результаты с реалистичными социально-экономическими условиями, что даёт возможность исследователям разрабатывать более широкий спектр адаптационных и смягчающих стратегий. Эта гибкость делает SSP более предпочтительным инструментом для оценки климатических рисков и способности общества к их преодолению при различных сценариях развития, обеспечивая комплексный подход к политически значимым исследованиям в области климата.

3.6. Получение и обработка данных

Для использования выбранных климатических данных в оценке опасных явлений необходимо их скачать. Следует учитывать, что этот процесс может занять несколько дней в зависимости от объёма загружаемых данных и доступных вычислительных ресурсов.

Ниже описан процесс, применённый в рамках рассматриваемого задания. Окончательные

необходимые данные из CDS были загружены 16 октября 2024 года, а для джутов 19 ноября 2024 года. Впоследствии они были обработаны, и были смоделированы соответствующие показатели опасных явлений. Эти процессы описаны ниже в данном разделе, а также в главе 4 отдельно по каждому явлению. Доступ к данным осуществляется вручную и не требует специальной программы, то есть интерфейса прикладного программирования (API). Можно вручную выбирать любые подпараметры данных, например временные периоды или географические местоположения.

После загрузки данных для выполнения всех расчётов и визуализаций использовался язык программирования Python (открытый доступ). Для выполнения различных задач с помощью Python необходимы различные индивидуальные пакеты и библиотеки, которые устанавливаются по мере необходимости. Наиболее важные из них: *xarray*, *pandas*, *netCDF4* и *matplotlib*. *Xarray* упрощает работу с большими многомерными наборами данных (например, температура и осадки во времени и пространстве) за счёт использования маркированных измерений. *Pandas* позволяет обрабатывать пропущенные значения, фильтровать и агрегировать данные в климатических временных рядах. *netCDF4* необходим для чтения файлов формата .nc (NetCDF), в котором представлены большинство климатических данных. *matplotlib* используется для визуализации климатических данных, построения графиков и карт.

Все расчёты и моделирование, представленные в данном исследовании, могут быть выполнены и воспроизведены с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом, но требуют навыков программирования и знаний в области анализа данных.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Методология оценки климатических рисков

4.1. Метеорологические засухи

В качестве основного параметра для расчёта засух был выбран стандартизованный индекс эвапотранспирации осадков (SPEI), поскольку он предлагает комплексный подход к оценке водного баланса, что делает его эффективным инструментом для анализа условий засухи. В отличие от индексов, основанных только на осадках, SPEI учитывает как осадки, так и потенциальную испаряемость, позволяя учитывать влияние температуры и других климатических факторов на доступность воды. Такая чувствительность к нескольким климатическим переменным, особенно к температурным колебаниям, повышает точность оценки засух в условиях изменяющегося климата.

Кроме того, мульти-масштабная природа SPEI особенно ценна, поскольку позволяет проводить анализ на различных временных интервалах – от краткосрочных месячных засух до многолетних периодов. Эта универсальность делает SPEI идеальным выбором для сравнения степени тяжести засух в регионах с различными климатическими условиями. В данном исследовании был выбран 12-месячный масштаб, поскольку он отражает баланс между поступлением влаги и атмосферным спросом за полный годовой цикл. Этот масштаб хорошо подходит для выявления продолжительных периодов дефицита или избытка влаги. Поскольку он отражает накопленный водный стресс за год, 12-месячный SPEI позволяет выявлять тренды и аномалии в годовом гидрологическом балансе, что имеет решающее значение для планирования в водозависимых регионах и управления долгосрочными экологическими и

экономическими последствиями климатической изменчивости.

Для расчёта индекса SPEI, а затем и вероятности наступления засухи, использовались суточная температура, суточные осадки и продолжительность светового дня. В качестве первого шага потенциальная испаряемость (PET) была рассчитана с использованием уравнения Торнгвэйта. На его основе рассчитывался водный баланс с осадками по месяцам; данные о продолжительности светового дня были получены из исходных данных (Aschonitis et al., 2021), что позволило создать индекс SPEI. Затем индекс SPEI рассчитывался для каждой точки сетки на карте.

Для повышения точности анализа степени тяжести засух каждое событие классифицировалось по значению SPEI. Засушливые события были распределены по трём уровням опасности: низкий уровень – значение ниже -1, средний уровень – значение ниже -1,5, высокий уровень – значение ниже -2.

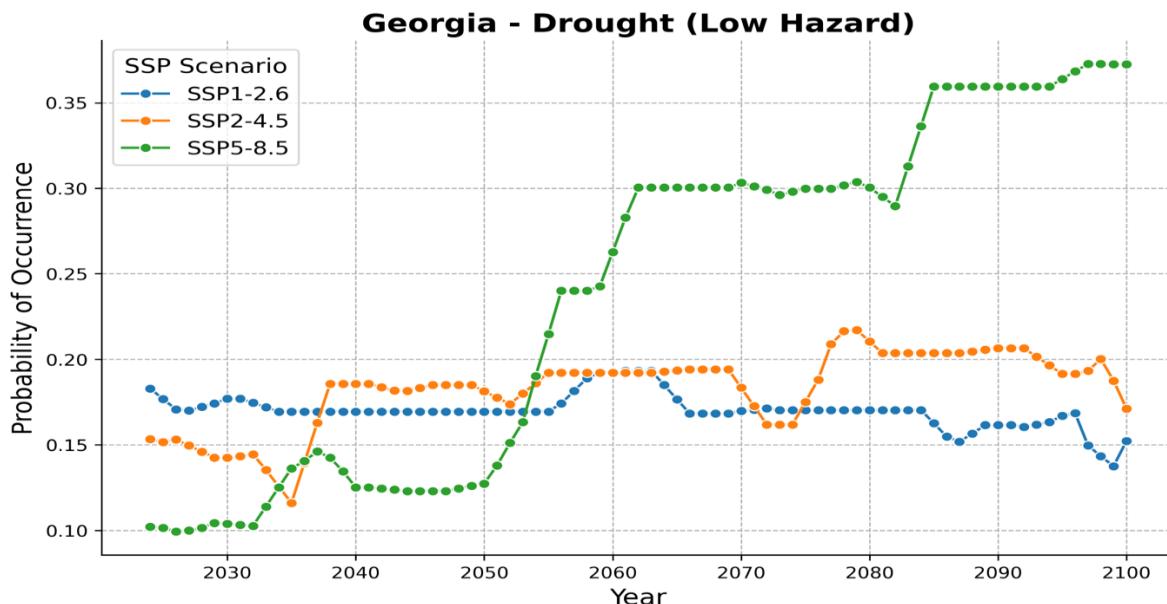
Для определения вероятности наступления каждого уровня опасности, а также средней вероятности наступления в исторический базовый период, был использован метод градиентного бустинга для регрессии. Этот метод выдаёт непрерывный результат, который можно напрямую интерпретировать как вероятность наступления события. Проект требовал финального представления данных в формате Microsoft Excel. Поэтому на заключительном этапе данные были сохранены в формате NetCDF, затем выделены по странам и экспортаны в CSV-файл.

Ограничением данного подхода к прогнозированию засух является использование уравнения Торнтивэйта, так как существуют более точные уравнения, требующие большего объема климатических данных, которые не были доступны в рамках проекта.

На рисунке 1 приведён пример оценки засух для Грузии. Как видно из графика, финальный результат – это годовой прогноз вероятности

по каждому уровню опасности. Отдельные годы показывают высокую волатильность и, в некоторых случаях, кажущиеся нелогичными результаты. Это связано с тем, что климатические прогнозы обычно отображаются в тридцатилетних интервалах, чтобы продемонстрировать значимые изменения. Однако при добавлении трендовой линии результаты становятся более понятными и отражают ожидаемые изменения.

Рисунок 1: Вероятность наступления метеорологических засух для событий с низким уровнем опасности (Источник: Иллюстрация EarthYield Advisories GbR)



4.2. Речные паводки

Для оценки риска речных паводков в каждой из стран необходимо было учитывать несколько переменных. Из-за метеорологической сложности паводков различные гидрологические факторы, такие как пористость почвы, растительность, землепользование и уклон местности, желательно принимать во внимание, но это практически невозможно сделать при крупномасштабных оценках. Кроме того, из-за внезапного характера ливневых паводков и необходимости оперативных данных в режиме реального времени речные паводки сложно

предсказать (Perrera et al., 2020). Нехватка и ограничения в доступных данных также сузили выбор используемых переменных. Были выбраны следующие переменные, которые затем объединялись в составной индекс риска для прогнозирования возможных будущих паводков в каждой точке сетки:

- **Совокупный месячный сток:** представляет собой объём воды, стекающей по поверхности в реки после выпадения осадков. Совокупный сток признан ключевым фактором риска паводков. Уровни стока могут значительно увеличиваться из-за сильных осадков,

таяния снега, насыщенности почвы или продолжительных дождей, что может привести к превышению пропускной способности рек и их разливу. В силу разнообразных причин, вызывающих сток, эта переменная служит прокси при нехватке данных и особенно полезна для оценки речных паводков, поскольку объединяет влияние осадков, насыщенности почвы и характеристик водосборов – всех факторов, влияющих на скорость и интенсивность паводков (IPCC, 2014).

- › **Осадки за 5 дней:** Суточные осадки не являются хорошим показателем паводков, так как продолжительность, интенсивность и общее увлажнение сложно оценить только по средним значениям. Совокупные осадки за 5 дней лучше отражают отражаю экстремальные погодные явления и соответствующим образом влияют на риск паводков. Статистически, речные паводки чаще происходят после продолжительных осадков (EEA, 2021).
- › **Количество дней с осадками выше 95-го перцентиля:** часто используется переменная «количество дней с осадками выше 50 мм», однако она не подходит для исследуемых регионов, которые в основном засушливые или полузасушливые. Использование 95-го перцентиля исторического периода позволяет точнее выделить экстремальные осадки. Вспышечные и речные паводки часто происходят вследствие таких осадков, когда системы водоотведения и русла рек не справляются с нагрузкой (Cotterill et al., 2021; Tamm et al., 2023).
- › **Суточная температура:** Температура поверхности не связана напрямую с наводнениями, но обычно используется в качестве косвенного показателя таяния снега и испарения. Эта переменная особенно полезна в горных регионах с

повышенным снеготаянием в определенные сезоны, когда таяние снега увеличивает объём воды в реках. Кроме того, в тёплых регионах высокая температура снижает влажность почвы и может усиливать интенсивность ливней (UNEP, 2020).

- › **Влажность почвы:** Влажность почвы напрямую влияет на то, сколько осадков впитывается в почву, а сколько станет поверхностным стоком и попадёт в реки. Высокая влажность указывает на насыщенность почвы, что означает ограниченную способность впитывать дополнительные осадки и, соответственно, увеличение стока. Если почва уже насыщена из-за предыдущих осадков или таяния снега, даже умеренные осадки могут привести к быстрому превышению уровня воды в реках и, как следствие, к паводкам (Yu et al., 2023; Ran et al., 2022).

В составном индексе риска все переменные были взвешены поровну, за исключением температуры, которой было присвоено 50% веса в период с января по май (из-за риска паводков, вызванных таянием снега в горах) и 0% с июня по декабрь. %. Затем индекс рассчитывался для базового и прогнозного периодов, после чего месячные значения агрегировались в годовой индекс риска.

Для уточнения оценки степени опасности паводков каждое событие классифицировалось по перцентилю относительно исторического базового периода. Паводки были распределены по трём уровням опасности: низкий риск для 80-го перцентиля, средний риск для 90-го перцентиля, высокий риск для 98-го перцентиля.

Для оценки вероятности наступления каждого уровня риска, а также средней вероятности для исторического базового периода, использовался градиентный бустинг для

регрессии, позволяющий получить непрерывные значения, интерпретируемые как вероятность события.

Финальные данные должны были быть представлены в формате Microsoft Excel, поэтому на заключительном этапе они были сохранены в формате NetCDF, разделены по странам и экспортированы в CSV.

Ограничения данного подхода включают отсутствие гидрологической модели, которая могла бы улучшить результаты, но не входила в рамки проекта. Гидрологические модели часто могут учитывать землепользование, рельеф, динамику рек и соотношение осадки-сток. Кроме того, индекс риска – это модельная оценка, а не фактическое значение. Также паводки зависят от множества факторов, включая локальную географию, землепользование, динамику речного стока и другие параметры, что делает их нелинейными и сложными явлениями, требующими анализа на более локальном уровне.

4.3. Тепловые волны

В рамках данного исследования для определения тепловых волн потребовался адаптированный подход, обусловленный разнообразием температурных норм в трёх рассматриваемых странах, а также внутри отдельных регионов каждой из них. Использование единого температурного порога оказалось недостаточным для корректной идентификации экстремальных температур, поскольку температура, считающаяся аномальной в одном регионе, может быть обычной в другом. Для учета региональной специфики была принята методология, разработанная предыдущим партнёром проекта – Университетом Балеарских островов (GIZ, 2021a), которая соответствует существующим научным подходам и при этом позволяет учитывать климатические различия между регионами.

Согласно данному определению, тепловая волна фиксируется, если максимальная дневная температура превышает 99-й перцентиль исторических температурных значений для конкретного местоположения и сохраняется на этом уровне более пяти последовательных дней. Такой перцентильный подход обеспечивает более гибкую и локализованную идентификацию тепловых волн, привязывая их к экстремальным значениям температуры в конкретной точке, а не к фиксированному абсолютному значению.

После определения периодов тепловых волн по этому критерию, соответствующие события были извлечены как из исторических данных базового периода, так и из климатических проекций на будущее по различным сценариям изменения климата. На первом этапе был рассчитан 99-й перцентиль температурных значений для каждой ячейки сетки за исторический базовый период, после чего были рассчитаны случаи его превышения для каждого сценария SSP. Затем случаи тепловых волн агрегировались на ежемесячной основе с целью количественной оценки частоты возникновения этих явлений во времени как по месяцам, так и по годам. Такая агрегация позволила отслеживать изменения в сезонном и годовом распределении тепловых волн, предоставляя представление о возможных сдвигах во времени их появления и частоте в условиях изменяющегося климата. Для углублённого анализа степени тяжести тепловых волн каждое событие классифицировалось по продолжительности следующим образом: низкий уровень опасности – события продолжительностью не менее 5 дней; средний уровень опасности – события продолжительностью не менее 8 дней; высокий уровень опасности – события продолжительностью более 10 дней.

Для оценки вероятности наступления опасного явления каждой категории, а также

для расчета средней вероятности за исторический базовый период, был использован метод градиентного бустинга для регрессии. Этот метод выдает непрерывный числовой результат, который может быть напрямую интерпретирован как вероятность наступления соответствующего события. В отличие от методов классификации, градиентный бустинг для регрессии позволяет оценить не просто факт наступления события, но и вероятность его появления в конкретной точке, а также выявить территориальные зоны с возрастающим или снижающимся риском, что делает его особенно подходящим для анализа долгосрочных климатических тенденций.

Согласно техническому заданию проекта, итоговые данные должны были быть представлены в формате Microsoft Excel. Поэтому на завершающем этапе данные были сохранены в формате NetCDF, затем разбиты по странам и экспортаны в CSV-файл.

Ограничения данного подхода заключаются в том, что в модель не были включены дополнительные климатические переменные, которые также оказывают влияние на формирование тепловых волн, такие как влажность воздуха, влажность почвы и скорость ветра, ввиду ограниченности доступных данных. Включение этих факторов позволило бы повысить точность модели за счёт более полного учета условий, способствующих возникновению тепловых волн. Кроме того, дальнейшее развитие подхода может предусматривать интеграцию с физическими климатическими моделями, что обеспечит более глубокую интерпретацию результатов и повысит научную обоснованность прогнозов.

4.4. **Джуты** (специфично для Монголии)

Опасное природное явление джут было смоделировано специально для странового пакета Монголии, в то время как

вышеописанные опасности рассчитывались для всех стран. Джуты представляют собой суровые зимние погодные условия в Монголии, характеризующиеся экстремальными холодами, обильными снегопадами и сильными ветрами. Эти суровые условия могут привести к массовой гибели скота, поскольку животным сложно найти корм и укрытие. Джуты представляют собой серьезную угрозу для скотоводов и сельской экономики, поскольку вызывают масштабную потерю скота и подрывают источники средств к существованию. Поэтому они были включены в анализ по Монголии для получения более комплексной картины.

Для моделирования возможных джутов в Монголии необходимо было учитывать ряд переменных, чтобы полноценно отразить риск возникновения наиболее распространённых типов джута. В силу сложности данного явления, необходимо принимать во внимание различные факторы, такие как характеристики скота, землепользование и растительность, а также социально-экономические условия – кочевые практики, доступ к ветеринарной помощи и экономическая устойчивость, поскольку джуты связаны не только с климатом. Однако учесть всё это на крупномасштабном уровне практически невозможно. Кроме того, ограничения в доступности данных позволили использовать лишь ограниченное число переменных. Были выбраны следующие переменные, которые были объединены в интегральный риск-индекс, отражающий возможные джуты в каждом территориальном узле:

- › **Количество дней с буранами за зиму:** Базовой переменной, используемой для этого расчета, является ежедневная скорость приземного ветра, при этом количество дней с бурей рассчитывается путем установления порогового значения скорости ветра (10 м/с), чтобы дать представление о том, как часто происходят

сильные ветровые явления в течение зимы. Бураны могут вызывать образование снежных заносов, затрудняющих передвижение скота и доступ к пастбищам (Sayed 2010; Fernández-Giménez 2012).

- › **Экстремально холодные дни:** В качестве базовой переменной использовалась ежедневная минимальная температура воздуха у поверхности. Количество экстремально холодных дней рассчитывалось при температуре ниже -30°C – это порог, при котором холод становится смертельно опасным для скота. Это общепринятое значение как для Монголии, так и в глобальной практике (WHO 2024; GIZ 2023).
- › **Среднемесячная глубина снежного покрова:** Глубина снежного покрова – часто используемая переменная при изучении джутов. Глубокий снег затрудняет доступ к корму, снижает мобильность животных, увеличивает расход энергии и связан с повышенным риском гибели (Nandintsetseg et al. 2018).
- › **Среднее значение летнего индекса SPEI:** Стандартизованный индекс эвапотранспирации осадков (SPEI) выбран как основной показатель для расчетов засухи в рамках данного проекта, поскольку он предлагает комплексный подход к оценке водного баланса и является высокоэффективным инструментом для определения условий засухи. В отличие от индексов, которые учитывают только осадки, SPEI включает как количество осадков, так и потенциальную испаряемость, что позволяет учитывать влияние температуры и других климатических факторов на вододоступность. Засухи являются одной из основных причин возникновения джутов в Монголии, так как они ухудшают состояние пастбищ, снижают продуктивность кормов и ослабляют скот.

Джут после засухливого лета, как правило, протекает тяжелее (Haraguchi et al. 2022).

- › **Ощущаемая температура (Wind chill):** Основными переменными для расчета этого показателя являются средняя суточная температура воздуха у поверхности и скорость приземного ветра. Показатель ощущаемой температуры был выбран, поскольку он отражает субъективное снижение температуры воздуха из-за воздействия ветра. Высокая скорость ветра в сочетании с низкой температурой значительно увеличивает стресс у скота и расход энергии. Расчет ощущаемой температуры имеет значение только при температуре ниже 10°C и скорости ветра выше 4,8 км/ч. Затем рассчитывается среднее значение ощущаемой температуры за зимний сезон (Fernández-Giménez, 2012).
- › **Количество циклов замерзания-оттаивания за зиму:** Основными переменными для расчета являются минимальная и максимальная температура воздуха у поверхности, а также суточные осадки. За каждый зимний сезон подсчитывалось количество дней, когда максимальная температура превышала 0°C , а минимальная опускалась ниже 0°C . Циклы учитывались только в те дни, когда наблюдались осадки, так как процесс замерзания и оттаивания имеет значение только при наличии влаги. Этот расчет является основным индикатором так называемого «железного джута», одного из типов джута (UNDRR, 2024).
- › **Самое продолжительное похолодание за зиму:** Основной переменной служила минимальная температура воздуха у поверхности. Подсчитывалось наибольшее количество последовательных дней с температурой ниже -30°C за каждый зимний сезон, чтобы учитывать длительность

экстремально холодных условий. Длительные периоды экстремального холода ограничивают способность скота к восстановлению. Это помогает отличить зимы с короткими, но суровыми холодами от зим с затяжным сильным похолоданием (Wignaraja, 2024; IFRC, 2022).

- › **Общее количество зимних осадков:** Основной переменной служили суточные осадки в период с ноября по март. Обильные снегопады способствуют риску джута, создавая плотный снежный покров, который ограничивает доступ к пастбищам. Учет зимних осадков позволяет лучше понять формирование снежного покрова и в сочетании с данными о средней глубине снега дает представление как о глубине, так и о скорости накопления снега (FAO, 2018).

В совокупной шкале оценки риска были учтены четыре основных фактора: осадки, засуха, ветер и температура. Эти четыре фактора были преобразованы в отдельные переменные риска для формирования итоговой оценки. Логика заключалась в том, чтобы присвоить каждому фактору приблизительно равный вес на основе анализа исторических событий. Веса для переменных были распределены следующим образом:

- › Общее количество зимних осадков: 15% (0,15)
- › Самое продолжительное похолодание за зиму: 5% (0,05)
- › Количество циклов замерзания-оттаивания: 5% (0,05)
- › Ощущаемая температура: 5% (0,05)
- › Среднее летнее значение SPEI: 30% (0,30)
- › Среднемесячная глубина снежного покрова: 10% (0,10)
- › Количество экстремально холодных дней: 15% (0,15)
- › Количество дней с буроном: 15% (0,15)

Категоризация переменных оценки риска по факторам:

- › Температура: экстремальные холодные дни, ощущаемая температура, самое продолжительное похолодание, циклы замерзания-оттаивания (30%)
- › Ветер: дни с буроном, ощущаемая температура (20%)
- › Осадки: глубина снежного покрова, общее количество осадков (25%)
- › Засуха: SPEI (30%)

Более высокий вес засухи и температуры объясняется тем, что эти два фактора обычно считаются основными драйверами джута.

После этого итоговая оценка риска была рассчитана как для базового, так и для будущих периодов, чтобы получить годовую шкалу риска. Важно отметить, что в этих расчетах под годом понимается зимний сезон и предшествующее ему лето. Таким образом, год 2024 представляет зимний сезон 2023/2024 (начиная с ноября 2023 года по март 2024 года).

Для повышения точности анализа джутов каждое событие дополнительно классифицировалось по процентилю в историческом базовом периоде. Джуты были распределены по трем уровням опасности: низкая опасность – 80-й процентиль, средняя опасность – 90-й процентиль, высокая опасность – 98-й процентиль. Для определения вероятности наступления каждого уровня опасности, а также средней вероятности наступления в базовом периоде, был использован метод градиентного бустинга для регрессии. Этот метод дает непрерывный результат, который можно напрямую интерпретировать как вероятность наступления события. В соответствии с требованиями проекта, итоговая визуализация данных должна была быть представлена в формате Microsoft Excel. На заключительном этапе данные были сохранены в формате NetCDF, разбиты по странам и экспортированы в файл CSV.

5. ИЗВЛЕЧЕННЫЕ УРОКИ И ВЫВОДЫ

Ниже приведены основные уроки, извлеченные в ходе выполнения данного задания. Они могут быть полезны для аналогичных проектов:

- › При картировании нескольких регионов рекомендуется использовать единую базу данных и одни и те же модели для всех регионов, чтобы обеспечить максимальную сопоставимость и избежать погрешности, которая может возникнуть при использовании разных источников данных или моделей.
- › Казахстан и Монголия хорошо вписываются в одну модель, поскольку характеризуются схожим уровнем засушливости и погодными условиями. Включение Грузии оказалось более сложным, так как для этой страны требуется более точное пространственное разрешение и учет уникальных топографических особенностей.
- › Необходимо иметь в команде квалифицированных специалистов, способных консультировать по вопросам сбора, очистки и моделирования данных. Начать с нуля, изучив Python или R, возможно, однако это займет больше времени. Такой подход может быть оправдан, если навыки будут использоваться в будущем.
- › В команде должны быть специалисты со знаниями в области статистики.
- › Следует заранее закладывать достаточное время на загрузку данных. При ограниченных временных ресурсах оптимальным решением может стать увеличение пространственной сетки, например, с 50×50 км до 100×100 км: это

сократит время на скачивание и расчеты, при этом позволит сохранить общую тенденцию в результатах.

- › Представленный подход, скорее всего, окажется итеративным, то есть на определенном этапе может потребоваться возврат к предыдущим шагам для корректировки исследовательских вопросов или методологии. Это может быть вызвано нехваткой или недостаточным качеством данных, результатами обзора литературы или другими причинами. Настоятельно рекомендуется как можно раньше признать возможные ограничения данных и их способность отвечать на исследовательские вопросы.
- › Уделите достаточно внимание визуализации и описанию результатов с учетом целевой аудитории. Возможно, потребуется подготовка различных форматов и языковых версий.
- › По возможности, избегайте расчета годовых вероятностей наступления событий. Хотя это полезно в экономическом моделировании, в климатической науке чаще используются 30-летние интервалы или тренды.
- › Если модель требует годовых значений, рекомендуется добавить линию тренда на графиках, чтобы отразить изменение климатических паттернов со временем.

В дальнейшем будет целесообразно включить гидрологическую модель в оценку речных паводков, поскольку она охватывает весь гидрологический цикл и позволяет моделировать масштаб паводков. Проведение оценки водных климатических рисков как на

глобальном уровне, так и в конкретных регионах, является крайне важной и актуальной задачей. Такие оценки необходимы для обоснованного формирования политики, расстановки приоритетов в её реализации, бюджетного планирования и инфраструктурного развития, поскольку изменение климата продолжит оказывать влияние на окружающую среду. Вода остается жизненно важным и в то же время сложным ресурсом. Несмотря на высокую значимость, проведение таких оценок требует тщательной подготовки, в том числе статистической, вычислительной и организационной. Также важно обеспечить наличие достаточного кадрового ресурса.

Приведенное здесь задание было весьма амбициозным и реализовано в условиях ограниченного времени. Хотя выбор, загрузка, обработка и оценка данных были выполнены в установленные сроки, это потребовало определенных компромиссов. В дальнейшем мы рекомендуем предусматривать больше времени на начальный этап сбора данных, что позволит включить больше переменных и уменьшить пространственную сетку, улучшив тем самым точность модели. Кроме того, включение гидрологической модели позволило бы лучше учитывать паводковые риски. Аналогично, расчеты по джутам являются предварительной попыткой количественной оценки вероятности их наступления.

6. Список использованной литературы

Coordinated Regional Climate Downscaling Project (CORDEX) (2025): Координированный проект регионального уточнения климатических моделей. Получено с <https://cordex.org/>

Copernicus Climate Change Service (2025): Хранилище климатических данных Copernicus. Получено с <https://cds.climate.copernicus.eu/>

Cotterill, D., Stott, P., Christidis, N., Kendon, E. (2021). Увеличение частоты экстремальных суточных осадков в Великобритании осенью. Weather and Climate Extremes. Том 33.

Проект сопряженного сравнения моделей (CMIP) (2025): Шестая фаза проекта CMIP6. Получено с <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2023). Макроэкономические последствия изменения климата и адаптации в Монголии. Оценка с использованием прототипа модели E3. Бонн и Эшборн, Германия. Глобальная программа по Климатически устойчивому экономическому развитию (CRED).

Европейское агентство по окружающей среде (EEA). (2021). «Сухо и влажно»: экстремальные осадки и речные наводнения. <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-changing-climate-hazards-1/wet-and-dry-1/wet-and-dry-heavy>

Fernández-Giménez, M., Batkhishig, B., Batbuyan, B. (2012). Трансгранична и межуровневая динамика увеличивает уязвимость к суровым зимам (джутам) в Монголии. Global Environmental Change, том 22(4), стр. 836–851. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.001>

Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). (2018). Монголия. Воздействие раннего предупреждения. Рим. 32 стр. Лицензия: CC BY-NC-SA 3.0 | GO

Haraguchi, M., Davi, N., Palat Rao, M., Leland, C., Watanabe, M., Lall, U. (2022). Оценка интервалов повторяемости экстремальных климатических условий, связанных с зимними бедствиями и падежом скота в Монголии. Natural Hazards and Earth System Sciences. Том 22, выпуск 8, стр. 2751–2770. Европейский союз геонаук.

Межсекторальный проект сравнения моделей воздействия (ISIMIP) (2025): Репозиторий ISIMIP. Получено с <https://data.isimip.org/>

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) (2023): Изменение климата 2023: Итоговый отчет. Вклад Рабочих групп I, II и III в Шестой оценочный доклад IPCC [Основная редакция: X. Ли и X. Ромеро]. IPCC, Женева, Швейцария, стр. 35–115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

IPCC (2014). Изменение климата 2014: Итоговый отчет. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад IPCC [Ред. P.R. Shukla и L.A. Mayer]. В печати.

Международная федерация обществ Красного Креста и Красного Полумесяца (IFRC). (2022). Монголия: холодная волна 2022, итоговый отчет DREF (MDRMNO17). <https://reliefweb.int/report/mongolia/mongolia-cold-wave-2022-dref-final-report-mdrmn017>

Lange, S. (2019). Сохранение трендов при коррекции смещений и статистическом уточнении в ISIMIP3BASD (v1.0). Geoscientific Model Development Discussions. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-36>

Lange, S., Büchner, M. (2021). Климатические атмосферные входные данные ISIMIP3b с коррекцией смещений (v1.1). <https://doi.org/10.48364/ISIMIP.842396.1>

Nandintsetseg, B., Shinoda, M., Erdenetsetseg, B. (2018). Вклад множественных опасных климатических явлений и перевыпаса в зимнюю катастрофу 2009/2010 гг. в Монголии. Natural Hazards: Журнал Международного общества по предотвращению и смягчению последствий природных катастроф. Springer; Международное общество по предотвращению и смягчению бедствий, том 92(1), стр. 109–126.

Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) (2025). EarthData от NASA. Получено с <https://earthdata.nasa.gov/>

Ran, Q., Wang, J., Chen, X., Liu, L., Li, J., Ye, S. (2022). Относительная важность предшествующей влажности почвы и осадков при формировании наводнений в среднем и нижнем течении реки Янцзы. HESS, 26.19.

Sayed, A. (2010). Джу – медленно развивающееся стихийное бедствие, убивающее скот и лишающее средств к существованию в Монголии. Блоги Всемирного банка. <https://blogs.worldbank.org/en/eastasiapacific/Dzud-a-slow-natural-disaster-kills-livestock-and-livelihoods-in-mongolia>

Tamm, O., Saaremae, E., Rahkema, K., Jaagus, J., Tamm, T. (2023). Усиление экстремальных коротких ливней в результате изменения климата – необходимость регулярного обновления кривых интенсивность-длительность-частота. Climate Services, 30.

Программа ООН по окружающей среде (UNEP). (2020). Как изменение климата делает рекордные наводнения новой нормой. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-climate-change-making-record-breaking-floods-new-normal>

Управление ООН по снижению риска бедствий (UNDRR). (2024). Джу. <https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/mh0041>

Wignaraja, K., Dimovska, M. (2024). Спасение пустыни Гоби и монгольских степей от джу. спасет жизни и средства к существованию. PreventionWeb, UNDRR. <https://www.preventionweb.net/news/saving-gobi-desert-and-mongolian-steppes-Dzud-will-also-save-lives-and-livelihoods>

Всемирный банк. (2021). Портал знаний об изменении климата. Получено с <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). (2024). Джу в Монголии сменяется риском наводнений и загрязнения окружающей среды. Пресс-релиз. <https://www.who.int/mongolia/news/detail/04-04-2024-Dzud-emergency-in-mongolia-moves-to-risk-of-floods-and-environmental-contamination>

Всемирный институт ресурсов (WRI) (2025). Атлас водных рисков Aqueduct. Получено с <https://www.wri.org/aqueduct>

Yu, T., Ran, Q., Pan, H., Li, J., Pan, J., Ye, S. (2023). Влияние осадков и влажности почвы на паводковые риски в увлажненных горных водосборах: моделирование. Front. Earth Sciences. 11-2023.

Yukimoto, S., et al. (2019). Модель Земной системы версии 2.0 Японского метеорологического института (MRI-ESM2.0): описание и базовая оценка физических компонентов. J. Meteorol. Soc. Jpn., 97, 931–965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>