

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (ИРНИТУ, г. Иркутск).**

На правах рукописи

АГЕГНЕХУ КИТАНБО ЙОШЕ

**Оценка современного состояния подземных и поверхностных
водных ресурсов Центральной Эфиопии для разработки стратегии
водопользования**

1.6.6 - Гидрогеология

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

**Научный руководитель:
Лариса Ивановна Аузина**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, руководитель лаборатории
гидрогеологии, институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный
исследовательский технический университет (ИРНИТУ)

Иркутск – 2026

Содержание диссертации

ВВЕДЕНИЕ	4
Актуальность темы исследования.	5
Объектами исследования	6
Предметом исследования.....	6
Цель работы:	6
Основные задачи исследования:	6
Научная новизна.	7
Теоретическая и практическая значимость работы.	8
Фактический материал и методы исследования.	8
Основные защищаемые положения:.....	10
Личный вклад автора.	11
Степень достоверности и апробация результатов исследований.	12
Результаты исследований автора опубликованы	14
Соответствие паспорту специальности.....	14
Структура и объём диссертации:	14
Благодарности.....	15
ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ (АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ)	16
ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ РЕГИОНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ВОСТОЧНО-АФРИКАНСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ.....	45
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ИНДЕКСА ВОДООБИЛЬНОСТИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ	103
ГЛАВЫ 4 ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА И РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭФИОПИИ.....	148

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	214
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	215
Список работ, опубликованных по теме диссертации.....	251
Доклады на конференции	254

ВВЕДЕНИЕ

Природные воды, обладающие потенциалом для многоцелевого водоснабжения, представляют собой ограниченный ресурс, играющий критическую роль в поддержании функционирования систем жизнеобеспечения населения и экосистемы Земли в целом. Его изменчивость оказывает большое влияние на социально-экономическое развитие мира, включая Эфиопию, особенно центральные районы страны.

Интенсивность урбанизации (Goldblatt et al., 2016), резкий рост численности населения (Mekonnen and Hoekstra, 2016), ухудшение экологической обстановки, значительные потери воды в промышленности и коммунальном хозяйстве, нерациональное использование природной воды, а также глобальные климатические изменения, приводящие к снижению питания за счёт инфильтрации атмосферных осадков и увеличению испарения, влекут за собой заметное сокращение водных ресурсов (Salman, 2005, Wu et al., 2024, Dao et al., 2024, Bartczak et al. 2024).

Эфиопия в целом обладает обильными водными ресурсами (Berhanu et al. 2014), но из-за крайне неравномерного их распределения как по площади, так и по сезонам года, а также отсутствия технических возможностей для сбора и хранения вода зачастую недоступна тогда и там, где она необходима (Awulachew, 2007). Объективно оценить возможности полноценного водоснабжения сложно, поскольку исследования предыдущих периодов носят фрагментарный характер и характеризуют ресурсы природных вод на основе агрегированных статистических анализов без использования высокоразрешающих пространственных данных (Awulachew, 2007; Awulachew et al., 2008), в связи с чем важно переоценить полученные ранее результаты с использованием доступной в настоящее время дистанционной и полевой информации, результатов геологических и гидрогеологических изысканий и мониторинга, а также современных данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения.

Перечисленные аспекты обусловили постановку научной задачи данного исследования, заключающуюся в изучении и анализе условий формирования и динамики изменений ресурсного потенциала поверхностных и подземных вод Центральной Эфиопии, а также их количественной оценке с целью разработки научно обоснованной стратегии и информационной основы управления водными ресурсами региона.

Актуальность темы исследования. В Центральной Эфиопии состояние водных ресурсов находится под мощным влиянием человеческой деятельности, что приводит к нехватке воды, ухудшению её качества и росту конкуренции за этот жизненно важный ресурс. Озера и реки региона играют ключевую роль для разноцелевого водоснабжения, добычи соды, рыбоводства, обустройства рекреационных зон и поддержания существования разнообразных форм дикой природы (Raventós, 2010). Происходит значительное расширение орошаемых территорий и интенсивное развитие промышленности, а также рост спроса на хозяйственно-питьевую воду из-за увеличения численности населения (Raventós, 2010; Hamza and Getahun, 2022). В настоящее время в Эфиопии в среднем на человека необходимо 1.575 м³ воды в год (Hirpa et al. 2023), что является относительно большим объёмом, при этом используется лишь около 3% суммарных водных ресурсов страны (Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций [FAO, 1997]). Разработке оптимальной стратегии разноцелевого использования водных ресурсов препятствует фрагментарная, зачастую крайней низкой гидрогеологическая изученность, нехватка комплексных и достоверных данных о потенциале водных ресурсов.

Сложные структурно-тектонические и геолого-гидрогеологические условия, крайне ограниченные данные по гидрогеологическим скважинам и другим водопунтам, слабо развитая сеть мониторинга, недостаточный учёт климатической изменчивости и меняющихся условий землепользования приводят к высокой неопределённости в количественной оценке реального водопотребления и водного ресурсного потенциала и затрудняют организацию поисковых работ.

Таким образом, исследования природных водных ресурсов в Эфиопии остаются недостаточными, ограниченными и фрагментарными вследствие их локального проведения, использования данных с низким пространственным разрешением излишне упрощённых геолого-гидрологических моделей, что снижает их эффективность для последующей количественной оценки и управления водными ресурсами в целом.

Для решения проблемы создания детального и достоверного информационного обеспечения водопользования следует собрать и обобщить всю доступную прямую и косвенную гидрогеологическую информацию, выявить и научно обосновать основные факторы, влияющие на наличие водных ресурсов в конкретных природных условиях, создать информационно-картографическую основу для поддержки принятия решений о ресурсной перспективности и ведении рациональных работ по поиску и использованию вод.

Объектами исследования являются поверхностные и подземные воды центральных районов Эфиопии.

Предметом исследования являются природные и техногенные факторы, которые обуславливают условия формирования поверхностных и подземных вод Центральной Эфиопии и способ их формализации в прогнозно-поисковые геоинформационные модели.

Цель работы: исследование условий формирования и динамики изменений ресурсного потенциала поверхностных и подземных вод Центральной Эфиопии с целью разработки системы и информационной основы для управления водными ресурсами.

Основные задачи исследования:

- анализ условий формирования поверхностных и подземных вод региона.
- характеристика пространственной и временной изменчивости режима ресурсного потенциала поверхностных и подземных вод Центральной Эфиопии;

- выявление основных факторов и количественная оценка степени их влияния на пространственно-временную динамику ресурсного потенциала природных вод с использованием сопоставления данных дистанционного зондирования Земли и данных прямых наземных исследований, в том числе бурения;

- разработка комплексного показателя водообильности исследуемой территории за счёт подземных вод и создание соответствующей прогнозной карты;

- обоснование перспективных участков для организации водоснабжения за счёт ПВ,

- разработка системы управления водными ресурсами Центральной Эфиопии.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается во всестороннем обобщении данных о формировании ресурсов поверхностных и подземных вод в Центральной Эфиопии, оценке ресурсов подземных вод для разноцелевого водоснабжения в Центральной Эфиопии с использованием комплексного индекса, мониторинге динамики водных ресурсов с использованием инструментов дистанционного зондирования и географических информационных систем (ГИС) для развития водных ресурсов и управления ими в Центральной Эфиопии. На основе разнородной геоинформации впервые для территории Эфиопии выполнены: сбор и систематизация данных бурения, геологии, мониторинговых станций, разработка гидрогеологических разрезов, идентификация ключевых факторов, влияющих на поверхностные и подземные водные ресурсы, а также оценка их относительного влияния на формирование и динамические изменения этих ресурсов, разработку комплексного индекса для оценки использования подземных вод, оценку многопрофильного водопотребления, количественную оценку поверхностных и подземных водных ресурсов и анализ их пространственно-временной изменчивости. Таким образом, впервые в пределах Центральной Эфиопии научно обоснованным образом выделены гидрогеологические структуры различного типа и, в их пределах, конкретные участки, наиболее перспективные для постановки геологоразведочных работ на подземные воды. Полученные

результаты являются первой системной информационно-картографической основой для принятия решений о водопользовании на территории Центральной Эфиопии.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическое значение работы заключается в разработке и обосновании научно-методологических подходов к оценке ресурсного потенциала водных ресурсов фрагментарно изученных регионов, включая интеграцию данных дистанционного зондирования, географических информационных систем, результатов геологических, гидрологических, гидрогеологических и геофизических работ.

Исследование расширяет знания о пространственно-временной динамике поверхностных и подземных вод, формирует концептуальную основу для оценки водообильности и идентификации перспективных районов для поисково-разведочных работ на базе разработанного комплексного индекса водообильности, а также вносит вклад в развитие теории управления водными ресурсами в условиях дефицита атмосферных осадков и изменчивости климата.

Анализ текущего состояния и количественная оценка водных ресурсов в Центральной Эфиопии предоставляют важные эмпирические данные для разработки эффективной и устойчивой стратегии управления водными ресурсами. Она позволяет лицам, принимающим решения, выявлять доступность ресурсов, сезонные колебания и существующие дефициты, что способствует обоснованному планированию использования поверхностных и подземных водных систем. В свою очередь, это повышает надёжность разноцелевого водоснабжения, укрепляет устойчивость к климатическим рискам и направляет долгосрочное региональное управление водными ресурсами.

Фактический материал и методы исследования. Район исследования расположен в центральной части Эфиопии на площади 383000 км². Фактический материал включает информацию об осадках, температуре, полученную в Эфиопском метеорологическом институте, геологические и структурно-тектонические карты, предоставленные Министерством горнорудной

промышленности и нефти Эфиопии (MoMP); сведения по водозаборным скважинам, полученные в Министерстве энергетики и водных ресурсов Эфиопии, геотермальные данные получены от Геологической службы Эфиопии (GSE), а данные о расходе воды в региональных и локальных реках собраны у Водохозяйственных органов Эфиопии. Кроме того, были обработаны данные дистанционного зондирования из различных официальных источников, включая цифровые модели рельефа, линеаментов, атмосферные осадки и т.д. Глобальная система ассимиляции наземных данных (Rodell, et al., 2004) и наборы данных эксперимента по восстановлению силы тяжести и климата (Landerer & Swenson, 2012) использовались совместно для оценки и мониторинга наземных ресурсов воды и подземных вод). Кроме того, была обработана информация, полученная из Глобальной системы ассимиляции земельных данных (GLDAS), дистанционного зондирования из различных официальных источников, включая цифровые модели рельефа, архивные данные по количеству выпавших атмосферных осадков, данные, полученные при проведении совместной спутниковой миссии NASA и Германским центром авиации и космонавтики (GRACE), набор данных TerraClimate и т.д. Данные о распределении почв различного типа были получены из Гармонизированной мировой базы данных почв в масштабе 1:5 000 000, основанной на Почвенной карте мира ФАО–ЮНЕСКО. Данные о землепользовании и земном покрове получены на основе временных рядов изображений Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Базовые данные по многосекторному водопотреблению взяты из технической записки, опубликованной в 2015 году (Adane et al., 2021). Данные о подземном питании (пополнении) водоносных горизонтов получены из Программы глобального гидрогеологического картирования и оценки (WHYMAP, гидрогеологическая карта мира в масштабе 1:25 000 000). Общий объем базы данных составил 1450 точек наблюдения и 14 индикаторов; 7 из которых были использованы для статистического анализа. Материалы были проанализированы с использованием облачных технологий Google Earth Engine и ряда программных пакетов, включая PCI Geomatica, R-Studio, ArcGIS 10.4, QGIS, XLSTAT, численный метод SCS-

численный показатель, nanoCAD и другие. Кроме того, для статистической обработки были использованы многомерные методы анализа (кластерный и факторный анализ), которые были подтверждены факторным анализом. Пространственное распределение поверхностных и подземных вод, геопространственный анализ, управление пространственными данными и их визуализация, интеграция данных дистанционного зондирования, поддержка принятия пространственных решений, интеграция данных и интероперабельность, картографическое представление и коммуникация, делиниация водосборов, анализ рельефа и другие пространственные задачи выполнялись с использованием QGIS и ArcGIS. ПО R-Studio применялось для комплексного статистического анализа показателей поверхностных и подземных вод, включая выявление тенденций, оценку их временной изменчивости и корреляционный анализ гидрологических параметров.

Основные защищаемые положения:

1. Условия формирования ресурсов природных вод Центральной Эфиопии обусловлены тектоническим развитием зоны Восточно-Африканского рифта, которое предопределило их крайне неравномерное распределение в соответствии с выделенными гидрогеологическими структурами.

2. Разработан комплексный показатель водообильности, включающий ряд легко определяемых факторов и позволяющий выделить участки, наиболее перспективные для постановки геологоразведочных работ на подземные воды в центральной части Эфиопии для разноцелевого водоснабжения.

3. Произведена количественная оценка ресурсного потенциала природных вод Центральной Эфиопии, которая свидетельствует о возможности обеспечения хозяйственно-питьевых и производственных потребностей исследуемого региона в круглогодичном режиме при условии реализации ключевых позиций стратегии управления водными ресурсами, предполагающей дифференцированный подход к их использованию:

поверхностных вод в периоды года с повышенной влажностью и подземных вод в засушливые периоды.

Личный вклад автора. Автор в течение нескольких лет собирал и обрабатывал полевые данные. Дебиты водозаборных скважин и уровень подземных вод были измерены в 100 скважинах, расположенных вблизи городов Арба Минча и Гидоле (с сентября по ноябрь 2021 года), в 40 скважинах вблизи города Аддис-Абебы (с сентября по ноябрь 2023 года) и в 20 скважинах вблизи города Бахир-Дара (с сентября по ноябрь 2025 года). Расход реки Кулуфо в г. Арба Минче измерялся в 2021, 2023 и 2025 годах. Дополнительные данные были получены с помощью рекогносцировочных обследований, проведённых в исследуемом регионе в те же годы. Помимо измерения дебита скважин и расхода рек, я активно проводил исследовательскую работу совместно с общественными институтами Университета Арба Минч по бассейну рек Гатто и Аргуба, разрабатывал проект отводного орошения в Зумме совместно с Амхара дизайн, осуществлял авторский надзор за строительством плотины и отводного канала в рамках проекта разработки сахарного месторождения Омо-Кураз совместно со Строительным предприятием по водоснабжению Южной Эфиопии.

Проработан существенный объём информации, полученной из различных источников, включающих опубликованные материалы, государственные отчёты, данные, опубликованные министерствами; онлайн-базы с данными дистанционного зондирования и спутниковыми данными (Swenson, 2012; Abatzoglou et al., 2018), а также гидрологические модели (Rodell et al., 2004).

Собранные полевые, литературные и архивные данные были организованы в структурированную базу данных для анализа. Данные по расходу подземных вод, стоку рек, осадкам и гидрологическим наблюдениям были собраны с указанием пространственных и временных идентификаторов для обеспечения сопоставимого анализа между участками и периодами. Данные, полученные из интервью, фокус-групп и полевых наблюдений, были оцифрованы и закодированы для интеграции с количественными наборами данных. Эта организованная база данных позволила

провести комплексный анализ, позволивший оценить доступность, вариабельность и уровень спроса на водные ресурсы в исследуемом регионе. В результате общий объём базы данных, подготовленной для последующего анализа, составил 1 450 точек наблюдений, описанных 14-ю показателями.

Собранные данные были проанализированы для оценки условий формирования и распределения природных водных ресурсов в Центральной Эфиопии, а также для оценки подземных вод в целях разноцелевого водоснабжения с использованием комплексного индекса. Количественные показатели, включая дебит скважин, сток рек и осадки, были обработаны для оценки пространственной и временной изменчивости доступности поверхностных и подземных вод. Спрос на воду для разноцелевого использования был количественно оценен для хозяйственно-питьевых, сельскохозяйственных, промышленных нужд и для животноводства. Статистические методы, включая множественную линейную регрессию, применялись для анализа зависимости между ресурсами подземных вод и ключевыми факторами, такими как осадки, мм (RF), высота над уровнем моря, м (DEM), плотность разломов (FD), км/км², испаряемость, мм (ET), расстояние до основной реки, км (DM), ресурсы поверхностных вод оценивались с использованием метода SCS-CN с учётом землепользования, типа почвы и начальных условий влажности. Анализ позволил выявить сезонные колебания ресурсов воды, дать представление о рисках засух и наводнений, а также предложить стратегию управления водными ресурсами, поверхностными и подземными, в исследуемом регионе.

Степень достоверности и апробация результатов исследований.

Достоверность результатов исследований обусловлена высокой степенью сходимости выделенных в соответствии с комплексным показателем перспективных ресурсообеспеченных зон и данных о водообильности гидрогеологических скважин, эксплуатирующихся на этих участках.

Результаты диссертационного исследования были представлены на ряде конференций, в том числе, на конференции «Научные дискуссии в английском

научном дискуссионном клубе Cutting Edge (ИрННТУ, 13 марта 2023 г.)», конференции «Окружающая среда и общество», Международной конференции «Бассейн реки Нил и водно-болотным угодья Судда: адаптация к изменениям климата и устойчивость» (20–21 марта 2023 г., Международный университет Флориды, Майами, Флорида), Ежегодной молодёжной конференции «Наука настоящего и будущего: исследовательский ландшафт в 21 веке» (ИНЦ СО РАН, 2024), на 1-м Международном конгрессе по экологическому восстановлению природы (с акцентом на сохранение бактериальных верблюдов), организованном Университетом Мохагхег Ардабили (Иран, 27 -28 августа 2024 года), 3-й Азиатской международной неделе водных ресурсов (23-28 сентября 2024 года, Пекин, Китай), на 7-м Международном симпозиуме по управлению водными ресурсами и окружающей средой (WREM 2024), на 4-м Международном молодёжном форуме по охране почв и водных ресурсов (IYFSWC-IV) 21-24 сентября 2024 года, организованном Шэньянским сельскохозяйственным университетом (Шэньян, Китай), на 8-й Международной онлайн-конференции по наукам о воде (ECWS-8 2024, 14–16 октября 2024 года), на 4-й Международной онлайн-конференции «Наука, общество и инновации в лесном хозяйстве: пути к глобальной устойчивости» (23–25 сентября 2024 года), организованной журналом Water, MDPI, на II Международной научно-практической конференции «Вклад российских и африканских университетов в устойчивое развитие регионов (RAFU)» 17 декабря 2024 года, на Учёном совете института «Сибирская школа геонаук» ИрННТУ 12.05.2025, на Международной молодёжной семинар-конференции в рамках Международного совместного исследовательского Центра чистой воды ИрННТУ и Харбинского политехнического университета 30 мая 2025, на 9-й Международной онлайн-конференции «Недавние достижения в гидрологии в условиях изменяющейся среды» 11–14 ноября 2025 года, организованной журналом Water, MDPI, 18-м Международном симпозиуме «Взаимодействие воды с горными породами», 15-м международном симпозиуме «Прикладная изотопная геохимия» (Кальяри, Италия, 16-21 июня 2025 года) и конференции «Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения – 2025)».

Результаты исследований автора опубликованы в 20 публикациях, из них 10 публикаций в журналах, входящих в базу данных Scopus, 5 в научных журналах Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации (ВАК РФ).

Соответствие паспорту специальности. Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 1.6.6 Гидрогеология, в части параграфа 11 «Комплексное использование подземных и поверхностных водных ресурсов».

Структура и объём диссертации: диссертация состоит из 256 страниц текста, включая введение, четыре главы, заключение, 27 таблиц, 50 рисунков, 304 наименования в списке использованной литературы.

В первой главе «Изнченность научной проблемы» проведен всесторонний анализ информации локальных и региональных данных по основным направлениям исследований подземных и поверхностных вод, а также методов, используемых для оценки водного ресурсного потенциала. **Вторая глава** «Формирование природных условий региона под воздействием структурно-тектонического развития Восточно-Африканской рифтовой зоны» посвящена обоснованию первого защищаемого положения. Впервые проведён анализ структурно-тектонического строения территории, результатом которого стало выделение трёх гидрогеологических структур, позволяющих обосновать крайне неравномерное распределение ресурсов природных вод Центральной Эфиопии. **В третьей главе** «Разработка комплексного индекса водообильности пород-коллекторов» рассматривается второе защищаемое положение. В главе изложены методы разработки комплексного индекса водообильности, который включает ряд легко определяемых факторов и позволяет впервые научно обоснованным образом выделить конкретные участки, наиболее перспективные для постановки геологоразведочных работ на подземные воды на начальных стадиях исследований. Он является первой системной информационно-картографической основой для принятия решений о водопользовании на исследуемой территории. **В четвертой главе** «Оценка ресурсного потенциала и разработка стратегии

управления водными ресурсами в Центральной Эфиопии» обосновывается третье защищаемое положение. На основе количественной оценки ресурсного потенциала природных вод Центральной Эфиопии впервые доказана возможность круглогодичного обеспечения разноцелевого спроса на водоснабжение при условии использования поверхностных вод в сезон дождей и сочетание поверхностных и подземных вод в сухой сезон, что может рассматриваться как основа стратегии устойчивого управления водными ресурсами в исследуемом регионе.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, кандидату геолого-минералогических наук, доценту, заведующей лабораторией гидрогеологии СШГ ИРННТУ Аузиной Л.И., кандидату геолого-минералогических наук, проректору по геологии, наукам о Земле и окружающей среде ИРННТУ Паршину А.В., доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой городского строительства и хозяйства ИАСИД ИРННТУ Чупину В.Р., научному сотруднику СШГ ИРННТУ Лоншакову Г.С., инженерам СШГ ИРННТУ Сумкину А.А. и Долгих М.Н., а также другим коллегам из института «Сибирская школа геонаук» ИРННТУ за помощь в подготовке данной работы.

ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ (АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ)

Дефицит воды вызывает тревогу во многих странах мира (Valli et al., 2003; Faramarzi et al., 2010; Boretti and Rosa, 2019; McNally et al., 2019; Vollmer and Harrison, 2021; Schlamovitz and Becker, 2021; Mishra et al., 2021; Salehi, 2022). Предыдущие исследования сформировали фундаментальную основу для понимания как доступности, так и дефицита водных ресурсов, сосредоточив внимание на количественной оценке возобновляемых водных ресурсов и долгосрочном прогнозировании их наличия и использования, что заложило основу для оценки дефицита воды в будущем (Kummu et al., 2010; Rosa et al., 2020). Согласно данным Kummu et al. (2010), доля мирового населения, сталкивающегося с хроническим дефицитом воды (менее 1000 м³ на человека в год), была весьма незначительной (2%) до 1900 года. К 1960 году этот показатель резко увеличился до 9%, а к 2005 году — до 35% (Rosa et al., 2020). В 2020 году 2,4 миллиарда человек жили в странах с дефицитом воды. Согласно отчету Конференции ООН по воде 2023 года в Нью-Йорке, опубликованному Детским фондом организации объединённых наций (UNICEF), 2 миллиарда человек (26% населения) не имели доступа к безопасной питьевой воде, а 3,6 миллиарда (46%) — к безопасной системе санитарии. По данным Всемирного отчёта о водных ресурсах 2024 года, уже 2,2 миллиарда человек не имели доступа к безопасной питьевой воде. Ключевыми факторами, приводящими к дефициту питьевой воды, являются изменение климата, рост мирового населения, увеличение спроса и низкая эффективность управления водными ресурсами (Salehi, 2022). Эфиопия не является исключением.

Основными источниками разноцелевого водоснабжения Эфиопии являются подземные и поверхностные воды. Поверхностные воды, включая реки, озера и водохранилища, вносят значительный вклад в региональную водообеспеченность, однако они отличаются высокой сезонностью и пространственной неоднородностью, что отражает сложный рельеф и климатическую изменчивость страны. Подземные воды, с другой стороны, обеспечивают более надёжный и

круглогодичный водный ресурс, особенно в аридных и полуаридных районах, где поверхностные воды скудны или крайне изменчивы. Несмотря на их важность, подземные воды Эфиопии остаются слабо исследованными и недостаточно картированными, особенно в районах с ограниченными данными, что создаёт проблемы для устойчивого управления водными ресурсами. Исследователи оценивали поверхностные и подземные водные ресурсы Эфиопии в разные периоды времени и на различных масштабах для изучения доступности воды следующим образом.

Текущее состояние ресурсов поверхностных вод в Эфиопии является крайне нестабильным и определяется совокупным воздействием сложного рельефа, пространственно неоднородного распределения атмосферных осадков и выраженной их сезонной изменчивости. Чёткая смена влажного и сухого сезонов вызывает значительные временные колебания расхода рек, уровней озёр и площади заболоченных территорий, что приводит к высокой вариабельности доступности поверхностных вод в течение года. При этом Эфиопия располагает обширной сетью рек (12) (FAO 1997; Awulachew 2007; MoWE and FAO, 2012), водно-болотных угодий и водохранилищ, являющихся основными источниками разноцелевого водоснабжения включая крупные речные бассейны, такие как бассейны рек Аббай, Аваш, Баро-Ачобо, Денакил Дженале, Огаден, Омо-Гибе, Текезе, Вабишебеле, бассейн Рифтовой долины, озёр (12) (Hughes and Hughes, 1992; Kebede et al. 2005; Awulachew 2007; Ayenew and Robert, 2007; Dinka, 2012; Bird Life International, 2013; Mohamed et al., 2013). В последние десятилетия естественная изменчивость ресурсов поверхностных вод всё более модифицируется под воздействием изменения климата и усиливающихся антропогенных нагрузок, включая изменение растительного покрова на территориях землепользования, расширение сельскохозяйственных угодий, строительство водохранилищ и увеличение забора воды на промышленные нужды. В совокупности эти факторы существенно изменили гидрологические режимы, создавая сложности для устойчивого управления и долгосрочной надёжности ресурсов поверхностных вод в стране (Conway, 2000; Awulachew, 2007; Beyene et al., 2010).

В настоящее время исследования поверхностных водных ресурсов в Эфиопии в основном сосредоточены на гидрологической характеристике крупных речных бассейнов с акцентом на процессы «осадки – сток», изменчивость речного стока и динамику паводков в условиях высокой климатической изменчивости (Conway, 2000; Awulachew, 2007). Значительный массив научных работ посвящён анализу влияния климатической изменчивости на доступность поверхностных вод, засухи и наводнения, подчёркивая чувствительность речного стока к изменениям количества осадков и температуры воздуха (Conway & Schipper, 2011). Другие ключевые направления исследований включают оценку водных ресурсов в пределах отдельных бассейнов рек, изучение переноса наносов и заиливания территорий за счёт строительства водохранилищ, что обусловлено интенсивной почвенной эрозией, а также гидрологические последствия изменений землепользования и почвенного покрова (Setegn et al., 2011; Hurni et al., 2016). Исследования поверхностных вод также в значительной степени ориентированы на развитие гидроэнергетики, расширение орошения и управление режимом работы водохранилищ, при этом всё больше внимания уделяется деградации качества воды и интегрированному управлению водными ресурсами, особенно в трансграничных бассейнах, таких как бассейн реки Нил (Awulachew et al. 2012; Gebrehiwot & van der Veen, 2013). Таким образом, основные направления исследований поверхностных вод были рассмотрены на региональном и локальном уровнях.

Условия функционирования и структура многопрофильных систем водоснабжения в Эфиопии, особенно в её центральных регионах, рассчитаны на обеспечение разноцелевого спроса, включая хозяйственно-питьевое водоснабжение, орошение сельскохозяйственных культур, животноводство, гидроэнергетику и промышленное использование. Эффективность и надёжность этих систем во многом определяются выраженной пространственной и временной изменчивостью водных ресурсов, обусловленной значительным геоморфологическим разнообразием, сезонностью климата и сложными гидрологическими условиями. Кроме того, результативность водоснабжения ограничивается пропускной способностью, техническим состоянием и

пространственным распределением существующей инфраструктуры, а также институциональными и управленческими рамками, регулирующими распределение и управление водными ресурсами. Ограниченная координация между участниками водного сектора и наличие конкурирующих отраслевых приоритетов дополнительно осложняют интегрированное управление водными ресурсами, зачастую снижая общую эффективность и устойчивость системы в условиях растущего спроса и климатической изменчивости (Awulachew, 2007; Conway & Schipper, 2011; World Bank, 2016).

История исследований поверхностных вод в Эфиопии представляет собой непрерывный процесс (Gizaw, 2002; Kim & Kaluarachchi, 2009; Nesru et al., 2020; Bonetto et al., 2021; Shako & Ping, 2021; Balcha et al., 2022; Hulluka et al., 2023; Tesfaye & Breuer, 2024). Ранние исследователи заложили базовое понимание ресурсов поверхностных вод Эфиопии. Например, первые исследования, ориентированные на конкретные бассейны, начали количественно оценивать локальные водные балансы (Awulachew, 2007; Awulachew et al., 2008; Bayabil et al., 2010; Gebreyohannes et al., 2013), проводился комплексный обзор водных ресурсов страны (Dile et al., 2013), моделировались воздействия изменения климата на верхнюю часть бассейна р. Голубой Нил (Kim & Kaluarachchi, 2009), и прогнозировалась нехватка воды в бассейне реки Аваш на ближайшие десятилетия (2006–2030, 2031–2055 и 2056–2080 гг..) (Taye et al. 2018; Gedefaw et al., 2019). В докладе Всемирного банка 2008 года предлагались меры по смягчению экономических и социальных последствий изменчивости водных ресурсов с целью содействия устойчивому развитию (Sadoff, 2008), в исследованиях, ориентированных на отдельные бассейны, применялись пространственно распределённые модели для оценки региональных ресурсов поверхностных и подземных вод, как, например, в бассейне реки Геба (Gebreyohannes et al., 2013), исследования, проведённые в Эфиопском нагорье, были направлены на изучение основных факторов формирования поверхностного стока и показали, что рельеф, играет наиболее значимую роль в генерации стока, чем ландшафтные особенности территории (Bayabil et al., 2010).

Однако ограничения данных, разреженная сеть водомерных постов и короткие ряды наблюдений ограничивали достоверность оценок стока и долгосрочных оценок доступности воды в различных речных бассейнах, что также отмечалось в других исследованиях по Эфиопии, включая её центральные регионы (Conway & Hulme, 1996; Awulachew, 2007).

В первом десятилетии 21 века появились первые попытки моделирования воздействия на водные ресурсы изменения климата, включая исследования верхней части бассейна реки Голубой Нил с использованием глобальных циркуляционных моделей (GCM), таких как HadCM3, и модели SWAT. Для прогнозирования будущих гидрологических реакций используются гидрологические модели, которые интегрируют статистические методы, данные дистанционного зондирования Земли (спутников) и метеорологические данные для предсказания уровней воды, паводков и отклика водосборов на изменения климата, с применением прогнозной аналитики для оценки будущих сценариев (Kim & Kaluarachchi, 2009).

В соответствии с этими прогнозами предполагались значительные изменения, включающие потенциальное снижение среднего ежемесячного объёма стока до 50% в краткосрочной перспективе (2010–2040 гг.), но возможное удвоение к концу века (2070–2100 гг.) (Dile et al., 2013). Эта фундаментальная работа в совокупности подчеркнула как потенциал водных ресурсов Эфиопии, так и их уязвимость, создав основу для более сложного моделирования в условиях растущих социально-экономических и климатических нагрузок.

В бассейне реки Аваш прогнозировался дефицит воды, связанный с повышением температуры и изменчивости осадков с использованием модели Water Evaluation and Planning (WEAP), при этом отмечалось, что большая часть бассейна будет испытывать усиливающийся водный стресс даже в дождливые месяцы, усугубляемый увеличением объёмов орошения (Taye et al., 2018; Gedefaw et al., 2019). Эти исследования указывают на растущий спрос на воду, который, по некоторым оценкам, уже в этот период превышал ежегодный объём стока (Taye et al., 2018; Genjebo et al., 2023; Gebreyesus et al., 2025).

Современные исследования, начиная с 2020 года, сосредоточены на прямом решении выявленных в предыдущих работах пробелов в знаниях и реализации водного менеджмента, с особым акцентом на интегрированное управление и методологические инновации для регионов с ограниченными данными (Mersha et al., 2016; Worqlul et al., 2019; Tigabu et al., 2021). Результаты спутникового мониторинга осадков и цифровые модели рельефа также позволили проводить гидрологический анализ в бассейнах с недостатком данных, при этом в исследованиях всё чаще уделялось внимание экстремальным явлениям, таким как наводнения и засухи (Setegn et al., 2011; Tekleab et al., 2013).

В исследованиях поверхностных вод всё больше акцент смещался на последствия изменения климата, вопросы водно-энергетико-пищевого взаимодействия (water–energy–food nexus) и трансграничное управление водными ресурсами, особенно в бассейне р. Нил. Повышенное внимание уделялось динамике ресурсного потенциала озёр (например, озеро Тана, озёра Рифтовой долины) и мониторингу эксплуатации водохранилищ, поддерживаемому данными спутниковой альтиметрии и совместной спутниковой миссией NASA и Германским центром авиации и космонавтики (GRACE). Эти работы продемонстрировали рост гидрологической изменчивости, изменения режимов стока и усиливающуюся нагрузку на системы поверхностных вод в связи с ростом населения, расширением орошаемого земледелия и строительством крупных плотин (Worqlul et al., 2018; Gebremicael et al., 2019).

В последние годы в ряде суббассейнов Эфиопии широко применяются современные гидрологические модели и интегрированные методы оценки динамики поверхностных водных ресурсов. Эфиопскими исследователями Adeba и Tafese (2021) были оценены ресурсы и возможность использования поверхностных вод в суббассейне р. Мугер с использованием модели SWAT (Soil and Water Assessment Tool), продемонстрировав её высокую способность воспроизводить временную изменчивость поверхностного стока и основных компонентов водного баланса в локальных гидроклиматических условиях. Данное исследование обеспечило базовые расчёты поверхностных водных ресурсов и

гидрологических откликов на уровне субводосборов, что имеет важное значение для планирования и управления водными ресурсами.

В рамках оценки климатических воздействий Merga et al. (2022) исследовали влияние будущих изменений климата на возможность использования поверхностных вод в суббассейне Дхидхесса. р с использованием модели SWAT. Результаты показали ожидаемое снижение речного стока примерно на 10 % к 2044 году и на 6,3 % к 2084 году в соответствии с прогнозируемыми климатическими сценариями, что подчёркивает уязвимость поверхностных водных ресурсов к климатически обусловленным изменениям гидрологического режима.

На уровне водосбора Tilahun et al. (2025) количественно оценён потенциал поверхностных водных ресурсов и их сезонную изменчивость в водосборе рек Аваш-Белло, что позволило провести детальный пространственный анализ процессов формирования стока. Кроме того, Gobezie et al. (2023) исследовали взаимодействие поверхностных и подземных вод в бассейне Боркена (бассейн реки Аваш), выявив участки рек с притоком и оттоком воды в подземную водную систему и определив зоны гидравлической связности между поверхностными и подземными водами. В совокупности данные исследования демонстрируют возрастающее применение физически обоснованных гидрологических моделей и интегрированных подходов к анализу поверхностно-подземных водных взаимодействий для углублённого понимания доступности водных ресурсов, их сезонной изменчивости и чувствительности к климатическим изменениям в речных бассейнах Эфиопии.

В районах с ограниченной доступностью поверхностных водных ресурсов или в периоды сезонной и продолжительной засухи жизненно важным альтернативным источником пресной воды являются подземные воды. Благодаря относительной надёжности и устойчивости к краткосрочной климатической изменчивости подземные воды играют ключевую роль в удовлетворении многопрофильного спроса, включая бытовое водоснабжение, сельское хозяйство, промышленность. Такая зависимость особенно выражена во многих развивающихся странах, включая Эфиопию, где подземные воды существенно

способствуют обеспечению безопасности жизнедеятельности, повышают адаптационный потенциал к климатической изменчивости и поддерживают социально-экономическое развитие в условиях нехватки водных ресурсов.

Исследования подземных водных ресурсов в Эфиопии в основном сосредоточены на характеристике и оценке основных водоносных систем, с особым акцентом на водоносные подразделения в трещиноватых вулканических и осадочных породах, широко распространённых в различных геологических и физико-графических условиях страны. Ключевые направления исследований включают изучение механизмов питания и движения подземных вод, роли зон трещиноватости различного генезиса в контроле их распространения и гидравлической взаимосвязи водоносных подразделений между собой, а также с поверхностными водами, особенно в крупных речных бассейнах, таких рек как Аббай и Аваш. Значительное внимание уделяется оценке влияния климатической изменчивости на пополнение, ресурсы и возможность использования подземных вод, а также оценкам ресурсного потенциала подземных вод и анализу оптимальных объёмов водоотбора. Кроме того, проводятся гидрогеохимические исследования качества подземных вод, направленные на оценку факторов его формирования и ряда возникающих при этом проблем, включая засоление, повышенное содержание фтора и нутриентов, влияющих на пригодность подземных вод для хозяйственно-питьевого и сельскохозяйственного использования. В последние годы всё более широко применяются численные модели, методы дистанционного зондирования, изотопная гидрогеохимия, разрабатываются подходы интегрированного управления водными ресурсами для повышения эффективности освоения и долгосрочной устойчивости использования подземных вод в Эфиопии. Таким образом, основные направления исследований подземных вод были рассмотрены на региональном и локальном уровнях.

Исследования подземных вод в Эфиопии начались в середине XX века, что в значительной степени обусловлено растущим спросом на разноцелевое водоснабжение. Ранние работы (1950–1970 гг.) в основном носили региональный характер и были сосредоточены на выявлении подземных водных ресурсов с

помощью геологического картирования, поискового бурения и базового гидрогеохимического анализа (UNDP, 1973; MacDonald et al., 2001). Эти работы часто поддерживались международными организациями, такими как Программа развития ООН (UNDP), Британская геологическая служба (BGS) и Французская геологическая служба (BRGM), и привели к созданию первых национальных гидрогеологических карт Эфиопии, а также оценок ресурсов подземных вод крупных региональных структур (UNDP, 1973; Chernet, 1993). Таким образом, исследования того времени были направлены на формирование гидростратиграфической основы для проведения национальных оценок подземных водных ресурсов (EIGS, 1993; EIGS, 1996; Mengesha et al., 1996; Tefera et al., 1996; WARCOS, 1990). Кроме того, эти работы способствовали углублённому пониманию основных гидрогеологических структур и подразделений Эфиопии, включая коллекторы в докембрийском фундаменте, мезозойские осадочные бассейны и обширные кайнозойские вулканические структуры.

Кроме того, проводились исследования, оценивающие возможность использования подземных вод для орошения земель, при этом отмечалось, что используется лишь часть потенциальных ресурсов подземных вод страны (Worqlul et al., 2017).

В более поздних исследованиях были применены передовые подходы, такие как изотопная гидрогеохимия, методы машинного обучения и многокритериальный анализ для картирования ресурсного потенциала подземных вод. Моделирование на основе географических информационных систем (GIS) позволило углубить понимание динамики подземных вод (Kebede, 2013; Fenta et al., 2015; Nigussie et al., 2019; MacDonald et al., 2019).

В настоящее время исследования включают моделирование потоков подземных вод с использованием таких инструментов, как MODFLOW и FEFLOW, которые в основном применяются для оценки условий питания водоносных подразделений (Berhanu et al., 2014; Valcha et al., 2023). Несмотря на значительный прогресс в этой области, остаются серьёзные проблемы. Многие водоносные системы до сих пор недостаточно охарактеризованы из-за разреженной сети

наблюдений, ограниченных гидрогеологических данных и высокой сложности тектонически активных и литологически разнообразных территорий Эфиопии. Интегрированные оценки взаимодействия подземных и поверхностных вод остаются недостаточно развитыми, что ограничивает возможности страны по разработке комплексных стратегий управления водными ресурсами (Mengistu et al., 2021; Alemayehu et al., 2023).

Правительственные и институциональные отчёты сыграли ключевую роль в документировании и развитии гидрогеологических исследований в Центральной Эфиопии (WAPCOS, 1990; MWR, 2002; Mengistu, 2003; Demlie et al., 2007; Taye, 2007; Ayenew, 2008; Beye, 2009; Awulachew, 2010; MoWE, 2011; Yitbarek et al., 2012; MoWE, 2013; Bonetto et al., 2021). Академические учреждения также внесли значительный вклад в понимание гидрогеологии Центральной Эфиопии. Например, диссертационные работы, представленные в университетах Эфиопии, в том числе в Университете Аддис-Абебы, были посвящены гидрогеологической оценке территорий городов Адам и Назарет-Дера (Taye, 2007), фокусируясь на их уникальных гидрогеологических и гидрогеохимических характеристиках.

Геологическая служба Эфиопии принимала участие в гидрогеологических исследованиях (EIGS, 1996; Mengesha et al., 1996; Tefera et al., 1996; Abbate et al., 2014; UNICEF Ethiopia, 2020; UNESCO, 2004) с последующим созданием гидрогеологической карты масштаба 1:2 000 000 и её пояснительной записки (EIGS, 1993; EIGS, 1996). Геологическая служба Эфиопии также участвовала в подготовке эфиопских гидрогеологов, работающих в области оценки подземных водных ресурсов (Gasse & Street, 1978; Dejene, 1989; Chernet, 1993; Demlie et al., 2007).

Преыдушие инициативы внесли вклад в национальные программы оценки и развития подземных вод, одновременно способствуя передаче знаний посредством маломасштабных демонстрационных исследований. Информация о подземных водных ресурсах также отражаются в отчётах Министерства водных ресурсов, ирригации и энергетики (Mengistu et al., 2019). Однако нехватка гидрогеологической информации во многих регионах субсахарской Африки,

включая отдельные части Эфиопии, приводит к недостаточному пониманию и невозможности детализации гидрогеологических условий конкретных водоносных подразделений (Walker et al., 2019a). Постоянные проблемы в оценке ресурсов подземных вод на территории Эфиопии отражены в научной литературе (Moges et al., 2019; Fenta et al., 2020; Mengistu et al., 2021; Bonetto et al., 2021).

Локальные исследования подземных вод в Эфиопии в основном сосредоточены на картировании потенциала, оценке качества воды для хозяйственно-питьевого и сельскохозяйственного использования, а также на оценке восполнения ресурсов подземных вод в различных гидрогеологических условиях. Эти исследования обеспечивают важные для конкретных регионов специфические сведения об извлечении и использовании подземных вод, их качестве, а также ключевых проблемах управления водными ресурсами. Эти исследования улучшили концептуальные модели условий питания водоносных подразделений, однако оставались преимущественно локальными по площади и ограниченными по объёму данных (Kebede et al., 2005).

Детальное гидрогеохимическое исследование, проведённое в районе Джимма, включало 51 пробу подземных вод из скважин различной глубины, источников подземных вод, а также точки отбора поверхностных вод. Результаты показали, что преобладающими гидрохимическими типами вод в водоносных горизонтах являются кальциевый гидрокарбонат (Бикарбонат кальция) (Ca-HCO_3) и кальциево-магниевый гидрокарбонат (Ca-Mg-HCO_3), характерные для пресных вод вулканических областей. Вместе с тем в отдельных пробах, преимущественно из более глубоких частей разреза, выявлены воды с повышенной минерализацией типа бикарбонат натрия (Na-HCO_3), в то время как активные геохимические процессы, такие как выветривание силикатных минералов, являются доминирующими механизмами в более глубоких частях гидрогеологического комплекса, что обычно связано с более длительным временем пребывания подземных вод (Kitessa et al., 2024).

В рамках другого исследования была разработана концептуальная гидрогеологическая модель водоносных подразделений в вулканических

образованиях, проведена оценка качества подземных вод в районе города Дангила. Установлено, что в гидрогеологическом разрезе преобладают воды типа кальциевый гидрокарбонат (Ca-HCO_3), тогда как на больших глубинах доминируют типы кальциево-натриевый гидрокарбонат (Ca-Na-HCO_3), натриево-кальциевый гидрокарбонат (Na-Ca-HCO_3) и натрий гидрокарбонат (Na-HCO_3) (Fenta et al., 2020). Оценка качества подземных вод в бассейне реки Гидабо, основанная на анализе 30 проб из буровых скважин, источников и колодцев, отобранных в сухой и влажный сезоны, показала, что 80 % исследованных проб подземных вод пригодны для питьевого водоснабжения, а 93,33 % — для орошения (Mussa et al., 2025). ГИС- и дистанционно-зондировочное исследование, выполненное в регионе Джимма и Борена с использованием геопространственных данных и метода аналитической иерархии (АНР), позволили выделить наиболее ресурсообеспеченные зоны. Результаты показали, что в регионе Джимма лишь 4,6 % территории отнесено к категории высокой пригодности для освоения подземных вод, тогда как в зоне Борена этот показатель составляет 6,2 %, что указывает на пространственную неоднородность потенциала подземных вод (Assefa et al., 2025). Другие локальные исследования включали картирование уязвимости подземных вод. Например, в городе Мэкэле и прилегающих районах региона Тыграй на основе анализа гидрогеологических условий и параметров землепользования были выявлены территории, подверженные наибольшему загрязнению (Abera et al., 2022).

Проведенные исследования позволили выделить основные факторы, влияющие на режим поверхностных вод и их ресурсную изменчивость, а также роль этих факторов в возрастающем дефиците пресной воды. Водные ресурсы в первую очередь находятся под влиянием климатических условий, геологического строения и рельефа, а также антропогенной деятельности, включая изменение климата, быстрый рост населения, урбанизацию, недостаточное развитие инфраструктуры, чрезмерный водоотбор, загрязнение и особенности управления водными ресурсами. В этих работах последовательно выделяются климатическая изменчивость, быстрый рост населения, изменения структуры землепользования,

деградация ландшафтов и почвенно-растительного покрова. Слабое развитие водной инфраструктуры действительно является ключевым фактором истощения ресурсов (Conway, 2000; AWULACHEW et al., 2007; Hurni et al., 2016). Показано, что изменчивость режимов осадков и повышение температуры воздуха существенно влияют на восполнение водных ресурсов, приводя к росту гидрологической неопределённости и увеличению частоты засух (Conway & Schipper, 2011). Кроме того, вырубка лесов, расширение сельскохозяйственных угодий и почвенная эрозия снижают инфильтрационную способность и увеличивают поверхностный сток и вынос наносов, что влияет на возможность использования воды (Setegn et al., 2011; Gebrehiwot & Veen, 2013). Социально-экономические факторы, включая рост потребности в оросительной воде и увеличение городского водопотребления, дополнительно усугубляют дефицит пресной воды, особенно в вододефицитных бассейнах, таких как бассейны реки Аваш и Рифтовой долины (Awulachew et al., 2012). В совокупности эти исследования подчёркивают, что дефицит воды в Эфиопии обусловлен сочетанным воздействием климатических, природных и антропогенных факторов, а не абсолютной физической ограниченностью водных ресурсов.

Формирование подземных вод контролируется взаимосвязанными естественными и антропогенными факторами, влияющими на питание и характеристики водоносных горизонтов. Топография и геоморфология определяют пути стока поверхностных вод и локальное питание (Marti et al., 2025). Климат, особенно осадки и эвапотранспирация, регулирует питание, в то время как растительный покров и землепользование влияют на соотношение инфильтрации и поверхностного стока (Mohan et al., 2018). Изменения землепользования, такие как урбанизация и сельское хозяйство, изменяют динамику инфильтрации и доступность подземных вод (Siyad & Mohamed, 2025). Геология и гидрогеология, включая литологию и трещиноватость пород, определяют пористость и проницаемость, важные для хранения и движения воды (Mihret & Wuletaw, 2025). Кроме того, человеческая деятельность, такая как забор подземных вод и орошение, изменяет естественный баланс питания и разгрузки и может приводить

к истощению ресурсов при несбалансированном использовании (Siyad & Mohamed, 2025). В совокупности эти факторы формируют распределение, объём и устойчивость подземных вод, подчеркивая необходимость интегрированной оценки в регионах с ограниченными данными.

Оценка водных ресурсов в Эфиопии представляет собой совокупность методов, направленных на определение их количественных и качественных характеристик, а также пригодности для хозяйственного использования. В зависимости от целей и задач исследования применяются различные методологические подходы, основные из которых приведены ниже.

Гидрологические расчёты основаны на анализе данных наблюдений за речным стоком, уровнями воды в озёрах и водохранилищах, а также режимами атмосферных осадков и испарения. Эти методы позволяют определять средние, минимальные и максимальные величины водных ресурсов, а также оценивать их временную изменчивость.

Оценка ресурсов подземных вод включают расчёты, основанные на данных разведочного бурения, опытных откачек, а также изучении фильтрационных характеристик водоносных подразделений и условий их питания.

Часто используются балансовые методы, которые базируются на составлении водного баланса территории с учётом притока, расхода и аккумуляции воды. Данные методы широко применяются при комплексной оценке водообеспеченности регионов.

Гидрохимические и экологические методы направлены на оценку качества водных ресурсов, уровней загрязнения и экологического состояния водных объектов.

Методы моделирования и геоинформационные технологии (GIS) позволяют прогнозировать изменения водных ресурсов под воздействием климатических и антропогенных факторов, а также обеспечивают наглядную визуализацию результатов оценки.

Оценка ресурсов поверхностных вод в Эфиопии осуществляется чаще всего балансовым методом с использованием результатов полевых измерений, данных

дистанционного зондирования, гидрологического моделирования и геоинформационного анализа. Полевые измерения включают измерение расхода рек на гидрометрических постах, мониторинг уровней воды в озёрах и водохранилищах, а также регистрацию осадков и испарения.

Методы дистанционного зондирования позволяют осуществлять временной мониторинг динамики поверхностных вод и оценивать изменения ресурсов на больших и труднодоступных территориях, что особенно важно в условиях разреженной сети гидрометрических постов.

Гидрологическое моделирование (например, SWAT — Soil and Water Assessment Tool; HEC-HMS и HEC-RAS; MIKE SHE и MIKE 11 и др.) применяется для концептуального и физического моделирования. Анализ водного баланса, учитывающий приходные (поступающие) составляющие (осадки, сток рек) и расходные составляющие (испарение, водоотбор, сток в нижерасположенные участки), широко используется для оценки ресурсов воды в озёрах Эфиопии (например, озёрах Рифтовой долины) и водохранилищах.

Методы геоинформационного анализа (GIS) и пространственного анализа применяются для делимитации границ водосборов и речных сетей, оценки объёмов воды в водохранилищах и озёрах, а также для анализа пространственных закономерностей распределения поверхностных вод.

Таким образом, имеющаяся в настоящее время исходная информация по поверхностным водным ресурсам обеспечивает достаточную основу для уточнения и обновления существующих оценок объёмов поверхностных вод, а также для анализа их пространственно-временного распределения на территории Центральной Эфиопии. Комплексный характер набора данных позволяет получить более детальное представление о временной изменчивости и пространственной неоднородности обеспеченности поверхностными водами. Эта расширенная информационная база способствует совершенствованию моделирования гидрологических процессов, выявлению регионально значимых водосборных бассейнов и служит основой для проведения оценок устойчивости водных

ресурсов, имеющих практическую и политическую значимость в пределах исследуемой территории.

Методы, используемые для оценки ресурсов подземных вод, представляют собой совокупность взаимодополняющих подходов, различающихся по требованиям к данным и пространственному масштабу. Гидрогеологические и объёмные методы позволяют оценивать ресурсы подземных вод на основе геометрии водоносных горизонтов, мощности насыщенной зоны и эффективной пористости, определяемых по результатам геологического картирования и данных скважин. Метод водного баланса количественно оценивает ресурсы подземных вод путем анализа компонентов питания и разгрузки, включая осадки, инфильтрацию, эвапотранспирацию и водоотбор. Анализ откачек и аквиферных испытаний обеспечивает оценку гидравлических параметров, необходимых для определения ресурсов и эксплуатационных ресурсов на локальном уровне. В условиях дефицита данных геофизические методы широко применяются для интерпретации подповерхностных условий и определения протяженности водоносных горизонтов. Численные модели подземного водного потока интегрируют гидрогеологические, климатические и данные по водоотбору для моделирования ресурсов подземных вод и оценки их устойчивости при различных сценариях антропогенной нагрузки. Кроме того, методы дистанционного зондирования и ГИС обеспечивают пространственную интеграцию разноисточниковых данных для оценки питания и выделения зон подземных водных ресурсов, тогда как изотопные и гидрохимические методы способствуют пониманию возраста подземных вод, скоростей питания и разграничению возобновляемых и невозобновляемых ресурсов подземных вод.

Отчёты правительственных, институциональных и академических учреждений также сыграли важную роль в повышении понимания доступности водных ресурсов в Эфиопии, включая её центральные регионы. Всемирный банк предоставляет обзор сектора водоснабжения, санитарии и гигиены (WASH) в Эфиопии, отмечая как значительный прогресс, так и сохраняющиеся проблемы (Sadoff, 2008). В отчёте подробно описывается активная поддержка Всемирного

банка с 1994 года и текущее состояние доступа к безопасной питьевой воде и санитарным услугам, с акцентом на влияние загрязнения воды и продолжающихся конфликтов через Программу водного партнёрства (Water Partnership Program, WPP) и Программу водоснабжения и санитарии (Water and Sanitation Program, WSP) (World Bank, 2023). Министерство водных ресурсов и энергетики Эфиопии (MoWE) определяет миссию по улучшению водоснабжения и санитарии, развитию энергетики и водных ресурсов, а также осуществляет мониторинг текущих проектов, направленных на решение водных проблем в различных регионах страны (MoWE, 2013).

Правительственные и институциональные отчёты сыграли ключевую роль в документировании и развитии гидрогеологических исследований в Центральной Эфиопии (MWR, 2002; Mengistu, 2003; Demlie et al., 2007; Taye, 2007; Ayenew, 2008; Beye, 2009; Awulachew, 2010; MoWE, 2011; Yitbarek et al., 2012; MoWE, 2013). Академические учреждения также внесли значительный вклад в понимание гидрогеологии Центральной Эфиопии. Например, диссертационные работы, представленные в университетах Эфиопии, в том числе в Университете Аддис-Абебы, были посвящены гидрогеологической оценке территорий городов Адам и Назарет-Дера (Taye, 2007), фокусируясь на их уникальных гидрогеологических и гидрогеохимических характеристиках.

Геологическая служба Эфиопии принимала участие в гидрогеологических исследованиях (Mengesha et al., 1996; UNESCO, 2004; Abbate et al., 2014; UNICEF Ethiopia, 2020) с последующим созданием гидрогеологической карты масштаба 1:2 000 000 и её пояснительной записки (EIGS, 1993; EIGS, 1996). Геологическая служба Эфиопии также участвовала в подготовке эфиопских гидрогеологов, работающих в области оценки подземных водных ресурсов (Gasse & Street, 1978; Dejene, 1989; Chernet, 1993; Demlie et al., 2007).

Предыдущие инициативы внесли вклад в национальные программы оценки и развития подземных вод, одновременно способствуя передаче знаний посредством маломасштабных демонстрационных исследований. Информация о подземных водных ресурсах также отражается в отчётах Министерства водных

ресурсов, ирригации и энергетики (Mengistu et al., 2019). Однако нехватка гидрогеологической информации во многих регионах субсахарской Африки, включая отдельные части Эфиопии, приводит к недостаточному пониманию и невозможности детализации гидрогеологических условий конкретных водоносных подразделений (Walker et al., 2019a). Постоянные проблемы в оценке ресурсов подземных вод на территории Эфиопии отражены в научной литературе (Mengistu et al., 2021; Bonetto et al., 2021; Fenta et al., 2020; Moges et al., 2019). Следует отметить существенную роль некоторых международных организаций в оценке и управлении водными ресурсами Эфиопии, главным образом в рамках реализуемой правительством Национальной программы One WASH (OWNP). Их миссии в целом направлены на расширение доступа к устойчивому водоснабжению, санитарии и гигиене (WASH), а также на снижение уязвимости к изменению климата и интегрированное управление водными ресурсами. Особенно заметную роль играют следующие организации:

1. Всемирный банк, являясь одним из основных партнёров Национальной программы One WASH (OWNP), осуществляет миссию по укреплению устойчивого доступа к услугам водоснабжения, санитарии и гигиены (WASH) и повышению устойчивого развития этого сектора. Он предоставляет значительную финансовую и техническую поддержку крупномасштабным проектам городского и сельского водоснабжения и санитарии, развитию институционального потенциала и совершенствованию управления сектором.

2. Африканский банк развития (AfDB) сосредоточивает свою деятельность на расширении доступа к климатически устойчивым и гендерно ориентированным услугам водоснабжения и санитарии, особенно в засушливых районах, таких как регион Борана. Его проекты направлены на улучшение доступа к воде, а также на продвижение интегрированного управления ресурсами поверхностных вод в пределах отдельных бассейнов.

3. Детский фонд Организации Объединённых Наций (UNICEF) работает в рамках Национальной программы One WASH (OWNP). Миссия UNICEF заключается в обеспечении справедливого доступа к безопасным, доступным и

устойчивым услугам водоснабжения и санитарии в сельских, городских и лагерных (для беженцев) районах. Основные инициативы включают внедрение климатически устойчивых проектов WASH с использованием картирования подземных вод и солнечной энергии.

4. WaterAid, международная неправительственная организация, миссия которой заключается в «преобразовании жизни через устойчивые и безопасные услуги водоснабжения, санитарии и гигиены» (WaterAid, Годовой отчет Эфиопии 2023-2024 1) в Эфиопии. Каждая организация заслужила высокую репутацию за техническую экспертизу, работу по расширению возможностей сообществ и влиянию на заинтересованные стороны для создания благоприятных условий для долгосрочных инициатив в сфере WASH.

5. Институт мировых ресурсов (WRI) сотрудничает с государственными партнёрами для более глубокого понимания рисков, связанных с нерегулируемым водоотбором, улучшения эффективного планирования и продвижения интегрированного управления водными ресурсами с целью обеспечения устойчивого развития и повышения устойчивости к изменению климата.

6. Стокгольмский международный институт водных ресурсов (SIWI) участвует в программе «Водное и ландшафтное управление в Эфиопии» с миссией повышения роли государственных учреждений в области управления водными ресурсами, разработки политики и законодательства для улучшения водной безопасности.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы

1. В настоящее время имеется весьма ограниченный объем информации, особенно по отдельным регионам: например, по территориям городов Афар, Метекель, Асоса, Кемаши, Западный Гондар, Восточный Гураре, Гураре, Хадия, Силте, Мареко, Кебена, Давро, Вулита, Гамо, Дераше, Алле, Консо, Южный Омо, Ари, Гофа, Баскетто, Южный Волло, Северный Волло, Северный Гондар, Восточный Годжам, Западный Годжам и т.д.

2. Несмотря на наличие нескольких национальных и бассейновых исследований поверхностных водных ресурсов в Эфиопии, существенные

исследовательские пробелы сохраняются на региональном уровне. Большинство существующих оценок опирается на данные с низким пространственным разрешением и обобщённые гидрологические модели, что ограничивает возможность проведения комплексной оценки и принятия обоснованных решений для регионального планирования водных ресурсов в Эфиопии, включая её центральные районы (Berhanu et al., 2014). Пространственно-временная изменчивость доступности поверхностных вод, обусловленная сложным рельефом и высокой климатической неоднородностью, часто отражается недостаточно полно. Кроме того, во многих регионах отсутствуют долгосрочные гидрометеорологические наблюдения, что приводит к высокой неопределённости при оценке стока и анализе водопотребления. Влияние изменений землепользования, климатической изменчивости и растущего водного спроса недостаточно интегрировано в региональные оценки. В связи с этим существует необходимость в высокоточных, регионально ориентированных оценках поверхностных водных ресурсов, основанных на интеграции данных дистанционного зондирования, ГИС и гидрологического моделирования, для обеспечения устойчивого и научно обоснованного управления водными ресурсами в регионах Эфиопии с дефицитом данных. Эфиопия сталкивается с экологическими проблемами, такими как дефицит воды, её низкое качество, снижение уровней озёр, деградация почв и потеря биоразнообразия, усугубляемые изменением климата. Эти вызовы подчёркивают важность проведения детальных исследований водных ресурсов для обеспечения устойчивого управления этим сектором.

3. Несмотря на наличие локальных и суббассейновых исследований поверхностных водных ресурсов в Эфиопии, оценки на локальном уровне остаются ограниченными и фрагментарными. Многие существующие работы основаны на разрозненных гидрометеорологических данных и не включают анализы с высоким пространственным и временным разрешением, что снижает их эффективность для объектно-ориентированного управления водными ресурсами и планирования инфраструктуры. Малые водосборы, суббассейны и системы водоснабжения на уровне сообществ часто недостаточно представлены, а влияние изменений

землепользования, климатической изменчивости и антропогенных воздействий на локальную доступность поверхностных вод количественно оценивается недостаточно. Кроме того, ограниченная интеграция данных дистанционного зондирования, ГИС и наземных наблюдений сдерживает точную оценку стока, ресурсов воды и сезонной изменчивости. Эти пробелы подчеркивают необходимость локализованных, основанных на данных оценок поверхностных водных ресурсов для обеспечения устойчивого водоснабжения, управления паводками и развития сельского хозяйства в Эфиопии.

4. Региональные оценки ресурсов подземных вод в Эфиопии остаются ограниченными вследствие недостатка данных по скважинам, сложных гидрогеологических условий и недостаточно развитых сетей мониторинга. Ряд исследований носит локальный характер и характеризуется недостаточной интеграцией климатической изменчивости, изменений землепользования и объёмов водоотбора на региональном уровне. Ограниченное применение интегрированных методов дистанционного зондирования, ГИС и численного моделирования, а также слабый учёт взаимодействия подземных и поверхностных вод, сдерживают получение надёжных оценок ресурсов подземных вод в региональном масштабе. Эти пробелы подчеркивают необходимость комплексных, регионально ориентированных оценок, направленных на поддержку устойчивого управления подземными водными ресурсами.

5. Оценка ресурсов подземных вод на локальном уровне в Эфиопии остается недостаточной из-за ограниченного числа скважин, краткосрочных наблюдений и недостаточной характеристики свойств водоносных горизонтов. Многие исследования опираются на обобщённые предположения и данные с низким разрешением, что снижает их эффективность для планирования водоснабжения на конкретных участках. Влияние изменений землепользования, климатической изменчивости и локального водоотбора часто оценивается недостаточно, а взаимодействие подземных и поверхностных вод почти не учитывается. Эти ограничения подчеркивают необходимость проведения локальных, высокоточных и интегрированных оценок подземных вод,

использующих полевые данные, дистанционное зондирование, ГИС и геофизические методы для обеспечения устойчивого развития водных ресурсов.

6. Предыдущие оценки водных ресурсов в основном фокусировались отдельно либо на поверхностных, либо на подземных водах, что создавало пробелы в знаниях и интегрированной оценке динамики этих систем и их гидравлического взаимодействия (Gebreyohannes et al., 2013; Dile et al., 2013). В настоящее время сохраняется значительный пробел в масштабировании результатов оценки восполнения водных ресурсов, что ограничивает их более широкое использование для стратегического управления ресурсами (Gebreyohannes et al., 2013). Таким образом, разреженные и сокращающиеся сети гидрометрических наблюдений, неопределённость в оценках воздействия изменения климата, слабая интеграция взаимодействий поверхностных и подземных вод, ограниченное подтверждение современных методов моделирования, недостаток долгосрочных наблюдательных данных и недостаточная количественная оценка процессов восполнения, неполная оценка качества воды и динамики осадков, слабая связь между научными исследованиями и управлением водными ресурсами — всё это требует внедрения интегрированных систем мониторинга, улучшения обмена данными, анализа взаимодействия поверхностных и подземных вод, а также более тесного согласования научных исследований с институциональным управлением водными ресурсами в Эфиопии, включая её центральные регионы.

7. Аналитический обзор методологий, применяемых для оценки поверхностных и подземных водных ресурсов в Эфиопии, выявляет широкий спектр подходов. Однако сохраняются значительные пробелы в знаниях: предыдущие исследования характеризовали бассейны на основе агрегированных статистических данных и не обладали пространственной информацией высокого разрешения (AWULACHEW et al., 2007; Awulachew et al., 2008), а многие водоносные системы до сих пор недостаточно изучены из-за разреженной сети наблюдений, ограниченных гидрогеологических данных и высокой сложности тектонически активного и литологически разнообразного рельефа Эфиопии. Таким

образом, современная оценка водных ресурсов с использованием высокоразрешающего дистанционного зондирования для уточнения доступности водных ресурсов в исследуемом регионе является крайне важной и актуальной задачей.

В последние годы исследования в Эфиопии развиваются в направлении интеграции гидрологической науки, климатического моделирования, геопространственных технологий, социально-экономических исследований и анализа политики. Такой междисциплинарный подход отражает необходимость разработки инновационных решений для борьбы с нехваткой воды, рационального распределения ресурсов и повышения устойчивости к изменениям климата. Выводы, сделанные на основании анализа существующего уровня изученности гидросферы, определяют дальнейшие направления исследований.

Подземные воды являются критически важным ресурсом, особенно в засушливых и полузасушливых районах, подверженных риску засух. Ключевыми задачами являются точное картирование водоносных горизонтов, изучение процессов их питания и оценка устойчивых водоотборов. Для этих целей применяются такие методы, как электротомография, сейсмические исследования и переходные электромагнитные методы (ТЕМ) для изучения подземных структур; картирование гидрогеологических условий с использованием дистанционного зондирования и GIS; а также гидрогеохимический и изотопный анализы, позволяющие отслеживать источники питания и движение потоков подземных вод. Эти исследования существенно расширили понимание распределения и устойчивости подземных вод и имеют ключевое значение для планирования безопасных систем водоснабжения, определения наиболее перспективных мест для бурения гидрогеологических скважин.

Понимание взаимодействия между подземными и поверхностными водами имеет решающее значение для устойчивого управления водными ресурсами. Исследования следует сосредоточить на количественной оценке гидравлической взаимосвязи и объёмах водообмена между поверхностными и подземными водами с использованием трассерных исследований, изотопного анализа и численного

моделирования. Полученные данные будут интегрироваться в планирование разноцелевого распределения воды, что позволит оптимизировать забор воды и гарантировать, что эксплуатация подземных вод не окажет негативного воздействия прочие составляющие экосистем.

Качество поверхностных вод в Эфиопии подвергается угрозе со стороны сельского хозяйства, урбанизации, индустриализации и природных геохимических процессов. Современные исследования включают мониторинг качества воды, предотвращение, снижение и ликвидацию загрязнений для обеспечения безопасного и устойчивого использования рек и озёр. Результаты этих исследований используются для разработки нормативов качественного состава воды, стратегий контроля загрязнения и мер по охране здоровья населения.

Современные исследования подчёркивают важность интегрированных подходов к управлению водными ресурсами, которые одновременно учитывают поверхностные и подземные воды, землепользование, климатическую изменчивость и социально-экономические факторы. Поэтому крайне важно изучать как поверхностные, так и подземные водные ресурсы с целью обеспечения устойчивого управления водными ресурсами.

Эфиопия очень уязвима к изменению климата и его variability, что проявляется в виде засух, наводнений и неравномерного распределения осадков. Поэтому важно моделировать влияние изменения климата на осадки, стоки рек и питание подземных вод.

Наконец, рекомендуется активное внедрение современных технологий и подходов для наиболее эффективного и обоснованного принятия решений в области водных ресурсов. Дистанционное зондирование, ГИС, искусственный интеллект, машинное обучение и численное моделирование позволяют улучшить картирование, мониторинг и прогнозирование водных ресурсов. Перспективные исследования должны также учитывать существующие пробелы в знаниях, включая ограниченные долгосрочные сети мониторинга, неполную интеграцию социально-экономических и экологических факторов и необходимость более тесной связи науки с политикой. Междисциплинарные подходы, объединяющие

гидрологию, гидрогеологию, технологии и управление, являются ключевыми для повышения устойчивости водных ресурсов к климатическим изменениям и обеспечения развития стратегии управления водными ресурсами Эфиопии.

Таблица 1.1- Выводы о изученности научной проблемы

Поверхностные воды		Подземные воды	
Основные направления исследований		Основные направления исследований	
Региональные исследования и их результаты	Локальные исследования и их результаты	Региональные исследования и их результаты	Локальные исследования и их результаты
Региональные оценки поверхностных водных ресурсов в Эфиопии остаются недостаточными вследствие использования данных с низким пространственным разрешением и упрощённых гидрологических моделей, что ограничивает эффективное планирование водных ресурсов, включая центральную часть Эфиопии (Berhanu et al., 2014).	Локальные и суббассейновые оценки поверхностных вод в Эфиопии остаются ограниченными и фрагментарными, часто опираются на разрозненные данные и анализы с низким разрешением, что снижает их эффективность для локального управления водными ресурсами и планирования инфраструктуры.	Региональные оценки ресурсов подземных вод в Эфиопии ограничены из-за нехватки данных по скважинам, сложной гидрогеологии и недостаточно развитых сетей мониторинга, при этом лишь немногие исследования учитывают климатическую изменчивость, изменения землепользования и водоотбор на региональном уровне.	Оценки ресурсов подземных вод на локальном уровне в Эфиопии остаются недостаточными из-за ограниченного числа скважин, краткосрочных наблюдений и недостаточной характеристики свойств водоносных горизонтов.

Продолжение таблицы 1.1

<p>Изменчивость поверхностных вод часто недостаточно охарактеризована вследствие сложного рельефа, климатической неоднородности и ограниченности долгосрочных гидрометеорологических данных, что приводит к высокой неопределённости в оценке стока и анализе водопотребления.</p>	<p>Малые суббассейны и оценки водных ресурсов на уровне сообществ недостаточно представлены, а влияние климатических изменений и человеческой деятельности на локальные поверхностные воды остаётся слабо количественно оцененным.</p>	<p>Ограниченная интеграция данных дистанционного зондирования, ГИС и моделирования, а также слабый учёт взаимодействия подземных и поверхностных вод ограничивают достоверность региональных оценок подземных вод, подчёркивая необходимость комплексных, регионально ориентированных исследований для устойчивого управления.</p>	<p>Многие исследования опираются на данные с низким разрешением и обобщённые предположения, что ограничивает их эффективность для планирования водных ресурсов на уровне суббассейнов, тогда как влияние изменений землепользования, климатической изменчивости и взаимодействия подземных и поверхностных вод остаётся слабо количественно оценённым.</p>
--	--	--	--

Продолжение таблицы 1.1

Методы моделирования и геоинформационные технологии (GIS) позволяют прогнозировать изменения водных ресурсов под воздействием климатических и антропогенных факторов, а также обеспечивают наглядную визуализацию результатов оценки. Методы дистанционного зондирования позволяют осуществлять временной мониторинг динамики поверхностных вод и оценивать изменения ресурсов на больших и труднодоступных территориях, что особенно важно в условиях разреженной сети гидрометрических постов. Гидрологическое моделирование (например, SWAT — Soil and Water Assessment Tool; HEC-HMS и HEC-RAS; MIKE SHE и MIKE 11 и др.) применяется для концептуального и физического моделирования.

Методы, используемые для оценки ресурсов подземных вод, представляют собой совокупность взаимодополняющих подходов, различающихся по требованиям к данным и пространственному масштабу. Гидрогеологические и объёмные методы позволяют оценивать ресурсы подземных вод на основе геометрии водоносных горизонтов, мощности насыщенной зоны и эффективной пористости, определяемых по результатам геологического картирования и данных скважин. Метод водного баланса количественно оценивает ресурсы подземных вод путём анализа компонентов питания и разгрузки, включая осадки, инфильтрацию, эвапотранспирацию и водоотбор.

Следовательно, повторная оценка ранних региональных и локальных исследований поверхностных и подземных вод с использованием данных дистанционного зондирования высокого разрешения для уточнения доступности водных ресурсов в исследуемом регионе является крайне необходимой.

Современные исследования подчёркивают важность интегрированных подходов к управлению водными ресурсами, которые одновременно учитывают поверхностные и подземные воды, землепользование, климатическую изменчивость и

Продолжение таблицы 1.1

социально-экономические факторы. Поэтому крайне важно изучать как поверхностные, так и подземные водные ресурсы с целью обеспечения устойчивого управления водными ресурсами.

Эфиопия высоко уязвима к изменению климата и его вариабельности, что проявляется в виде засух, наводнений и неравномерного распределения осадков. Поэтому важно моделировать влияние изменения климата на осадки, стоки рек и питание подземных вод.

ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ РЕГИОНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ВОСТОЧНО-АФРИКАНСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

В районе исследования (рисунок 2.1), расположенного в пределах Главного Эфиопского рифта (MER) — северного сегмента Восточно-Африканской рифтовой системы — влияние структурно-тектонического развития территории выражено особенно отчётливо. Часть рифтовой системы, расположенная на территории Эфиопии, характеризуется доминированием Афарского тройного соединения, где активно расходятся Нубийская, Сомалийская и Аравийская плиты. Африканская плита разделяется на Нубийскую плиту на западе и Сомалийскую плиту на востоке, при этом Нубийская и Сомалийская плиты также расходятся от Аравийской плиты, образуя рифтовую систему Y-образной формы, характеризующуюся активным растяжением, вулканической активностью и сейсмичностью. Эта тектоническая конфигурация создает сложную систему бассейнов, разломов и впадин, определяющую динамику как поверхностных и подземных вод. Эта зона Восточно-Африканского рифта простирается более чем на 3 000 км от Афарского треугольника в Эфиопии на юг до Мозамбика и движется со скоростью примерно 6–7 мм в год. Формирование началось в миоцене, примерно 22–25 миллионов лет назад, с активного развития в тройной точке Афар и последующим распространением на юг. Следовательно, структурная и тектоническая эволюция региона играет ключевую роль в формировании и распределении водных ресурсов в Центральной Эфиопии, влияя на водоносные подразделения, динамику питания и гидравлическую связь поверхностных и подземных вод (WoldeGabriel et al., 1990; Ravitt, 2001; Йоше и Аузина, 2025).

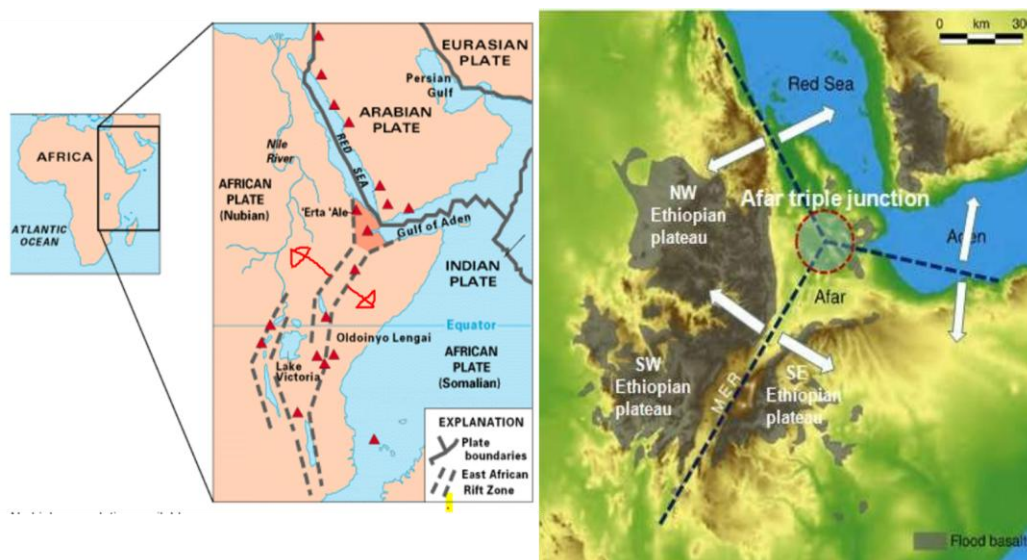


Рисунок 2.1- Тектонические подвижки в Восточной Африке: Восточно-Африканский рифт (EAR) — это активная континентальная рифтовая зона, где Африканская плита раскалывается на Нубийскую и Сомалийскую плиты, отделяясь от Аравийской плиты в районе «тройного сочленения» в регионе Афар.

Формирование и пространственное распределение природных условий Эфиопии, включая поверхностные и подземные водные системы, в значительной степени обусловлены структурно-тектонической эволюцией Восточно-Африканской рифтовой зоны. Данная ситуация согласуется с аналогичными, сложившимися в других рифтовых регионах мира (Surmaajav, 2019; Olaka et al., 2022; Йоше и Аузина, 2025). Рифтообразующие процессы привели к формированию удлинённых депрессий и цепочек пониженных долин, ограниченных крутыми, разломно-обусловленными уступами и разделёнными поднятыми горстовыми блоками. Эти геоморфологические и структурные особенности оказывают глубокое влияние на гидрологические и гидрогеологические условия, особенности режима, аккумуляции и ресурсный потенциал поверхностных и подземных вод.

Описываемые процессы оказывают фундаментальное влияние на рельеф, формируя резкорасчленённые формы, климатические условия (температуру, осадки, испарение и др.), геологические и структурно-тектонические особенности, гидрологический режим и гидрогеологические условия исследуемой территории.

Климатические характеристики, включая температуру, количество и распределение осадков, испарение и эвапотранспирацию, определяют объём, пространственную изменчивость и потенциал питания водных ресурсов. Рельеф, включающий высоту, крутизну склонов и расчленённость территории, существенно влияет на процессы стока и инфильтрации, определяя условия питания подземных вод. Плотность речной сети отражает степень концентрации поверхностных вод и эффективность дренажа, регулируя баланс между поверхностным стоком и инфильтрацией.

Не менее важную роль играют структурно-тектонические факторы. Разломы, трещиноватость пород, направления тектонических нарушений и их интенсивность улучшают вторичную пористость (это пустотное пространство в горных породах [трещины, каверны, поры выщелачивания]), сформировавшееся после их образования в результате геологических процессов, таких как растворение, трещинообразование и доломитизация, что значительно увеличивает фильтрационно-ёмкостные свойства пород-коллекторов, особенно в карбонатных отложениях) и проницаемость, создавая благоприятные условия для перемещения и накопления подземных вод в трещиноватых вулканогенных и осадочных толщах. Геологические и гидрогеологические условия, литология, свойства водоносных горизонтов, пространственное сочетание проницаемых и слабопроницаемых пород определяют возможные пути движения подземных вод.

В совокупности эти климатические, геоморфологические, структурные и геологические параметры формируют гидрологический режим Центральной Эфиопии, определяя как доступность, так и пространственное распределение подземных водных ресурсов. Комплексное понимание данных факторов имеет решающее значение для корректного выделения зон потенциальных подземных вод и обеспечения устойчивого управления водными ресурсами.

Геологическое строение территории оказывает существенное влияние на формирование, распределение и качество водных ресурсов.

В Эфиопии геологические исследования охватывают широкий спектр направлений, включая геологическое картирование, разведку полезных

ископаемых, вулканологию, геохимию и палеонтологию (Di Paola, 1972; Kazmin et al., 1978; Zanettin et al., 1980; WoldeGabriel et al., 1990; Talovina et al., 2022). Эти исследования необходимы для понимания геологической эволюции страны, оценки и снижения геологических рисков, а также для изучения природных ресурсов, прежде всего воды. Геология Эфиопии характеризуется динамическими процессами, связанными с рифтингом земной коры, вулканизмом и осадконакоплением, которые формировали ландшафт страны — от высоких гор и плато до солончаков и рифтовых долин — на протяжении более миллиарда лет геологической истории (Abbate et al., 2014). Комплексные обзоры геологической эволюции Эфиопии предоставляют основу для понимания процессов, определяющих современные ландшафты страны (Williams, 2016).

Таким образом, геологическая история центральной части Эфиопии, охватывает период от неопротерозойской эры до современного четвертичного вулканизма и осадконакопления. Основные геологические комплексы включают: Плейстоцен–Голоценовые рыхлые осадочные отложения, Плейстоцен–Голоценовые вулканиты, Плио-плейстоценовые вулканиты, Мио-плиоценовые вулканиты, Олиго-миоценовые трапповые формации, Позднепалеозойские–эоценовые осадочные породы, фиксирующие морские и Неопротерозойский фундамент.

Для лучшего понимания гидрогеологических условий исследуемого региона геологические периоды были дополнительно сгруппированы на основе имеющихся данных в следующие единицы: неконсолидированные осадочные отложения, вулканические изверженные породы, юрские карбонатные породы, юрские песчаники, метаморфические породы и кратоны (рисунок 2.2а). Эта стратиграфическая и структурная разнообразность определяет изменение залегания подземных вод, типов водоносных горизонтов и гидрогеологических характеристик по всей территории Эфиопии.

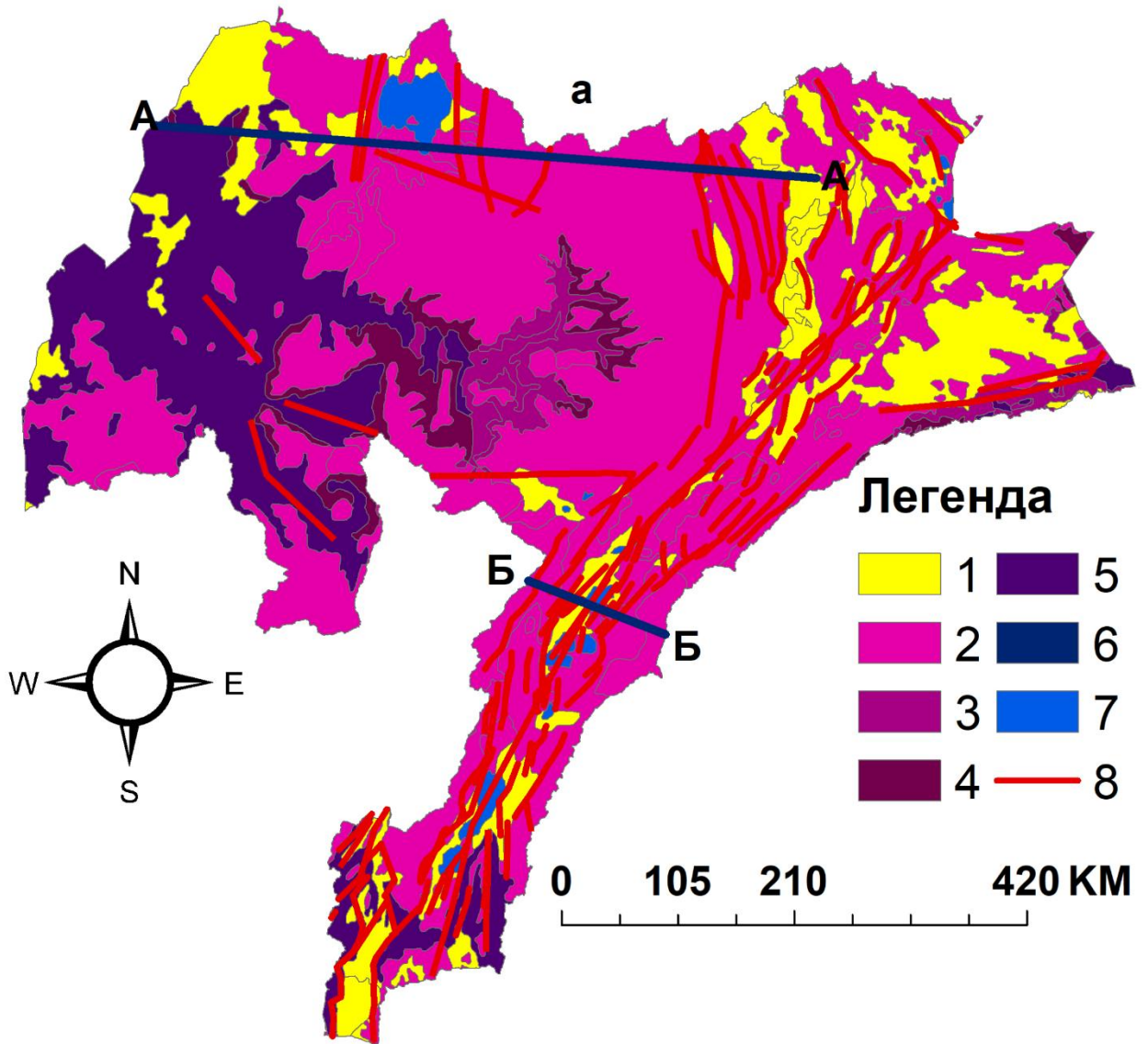


Рисунок 2.2а-1 Геологическая карты центральной части Эфиопии:
 1. Четвертичный период, рыхлые осадочные отложения. 2. Изверженные вулканические породы. 3. Юрский период, карбонатные породы. 4. Юрский период, осадочные породы (песчаники). 5. Докембрийский подвижный орогенный пояс. 6. Докембрийский кратон. 7. Озера. 8. Разломы.

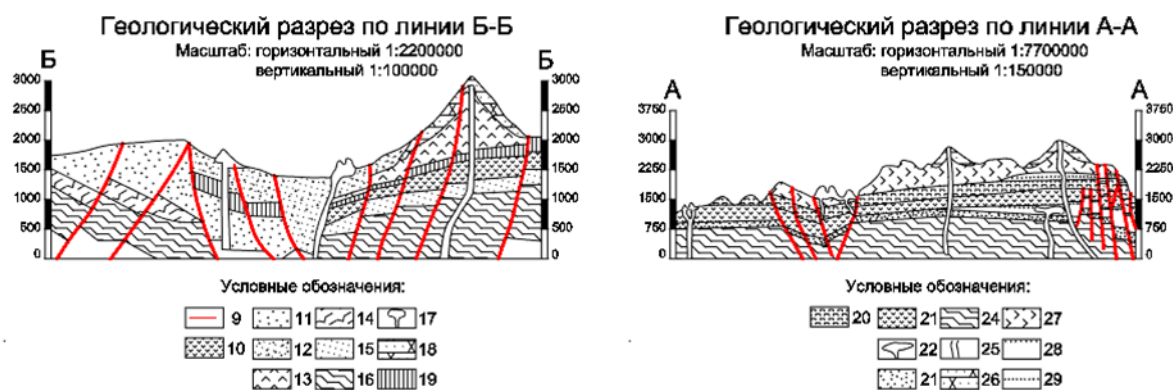


Рисунок 2.26- Геологические разрезы. 9. Разломы. 10. Базальты Арусси и Бейл. 11. Вулканы Джимы. 12. MER игнибриты. 13. MER внеосевых щитовых вулканов. 14. Омо-базальты. 15. Палеозойские и мезозойские осадочные породы. 16. Протерозойский фундамент. 17. Четвертичные вулканы. 18. Риолитовые заглушки и купола. 19. Воегские базальты. 20. Базальты Айба. 21. Базальты Ашанги. 22. Межосадочные вулканы. 23. Палеозойские и мезозойские осадочные породы. 24. Протерозойский фундамент. 25. Четвертичные вулканы. 26. Риолитовые пробки и купола. 27. Темаберские базальты. 28. Палеозойские осадочные породы. 29. Межосадочные осадочные породы.

Стратиграфия разреза Б-Б (рисунок 2.26) характеризуется сложной последовательностью вулканических образований и пород фундамента, отражающей длительную магматическую активность на территории Эфиопии. Последовательность начинается с протерозойского фундамента, на котором залегают базальты Омо, датируемые примерно 30 млн. лет назад. Выше располагаются Джима-вулканы на юго-западе Эфиопии и в южной части Сомалийского плоскогорья, сформированные в интервале 30–27 млн. лет назад (Merla et al., 1979). Базальты Вольлега, залегающие как на фундаменте, так и на наклонных базальтах Омо и Джима-вулканах, образовались в период от 15 до 13 млн. лет назад, за ними последовало формирование вулканических куполов и штоков в плиоцене. Базальты Арусси и Бале с радиометрическим возрастом от 24 до 9 млн. лет, а в отдельных районах от 6 до 2 млн лет, налегают на Джима-вулканы (Zwaan et al., 2020). Последующая вулканическая активность в горах Бале привела к образованию конусов и куполов, связанных с вулканической линией Бонга–Гоба,

состоящих из плейстоцен–четвертичных базальтов, залегающих поверх базальтов Аруси и Бале. Главная Эфиопская Рифт-Зона характеризуется отложением игнимбритов и базальтовых потоков в период от 11 до 8 млн лет назад, при этом возраст пород варьирует от 7 млн. лет на севере до 2 млн. лет на юге. Офф-аксиальная магматическая активность, преимущественно базальтового состава, происходила в мио-плиоцене и подверглась оледенению в позднем четвертичном периоде. Вулканы Афар фиксируют первую стадию континентального рифтинга в регионе, с активностью в интервале от 26 до 6 млн. лет назад (Zwaan et al., 2020). Эта вулканическая последовательность предоставляет важные сведения о тектоно-магматической эволюции Эфиопского нагорья и системы Восточно-Африканского рифта, демонстрируя пространственные и временные вариации магматических процессов, расширения коры и их гидрогеологические последствия.

Геологический разрез исследуемой территории был построен на основе данных магнитостратиграфического анализа, представленных в различных исследованиях (Zanettin et al., 1980; Rochette et al. 1998; Ukstins et al., 2002; Coulié et al., 2003). Вулканические базальты вдоль разреза А-А (рисунок 2.2) стратиграфически подразделяются на отдельные литостратиграфические единицы. К ним относятся переходные базальты Ашанги и переходные лавовые потоки Айба, возраст которых составляет примерно 31 и 29 млн. лет соответственно (Coulié et al., 2003); риолиты Амба Аладжи, простирающиеся от позднего олигоцена на северных выходах до раннего миоцена на южных (Zanettin et al., 1980); базальты щитового вулкана Термабер раннего и среднего миоцена, возрастом от 23 до 11 млн. лет (Kieffer et al., 2004); базальтовые интрузии и купола Аксума–Адва, сформированные в мио-плиоцене, примерно 19–15 млн. лет назад (Prior, 1900; Nagos et al., 2010); и, наконец, базальты рифтового бассейна Тана, относящиеся к четвертичной вулканической активности (Jepson & Athearn, 1964). Данная стратиграфическая структура обеспечивает детальный временной и литологический контекст для понимания вулканической эволюции, структурного развития и гидрогеологических характеристик региона.

Вулканическая история Эфиопии характеризуется серией значительных вулканических событий, которые сформировали стратиграфию и геоморфологию страны (рисунок 2.3). От самых современных до самых древних геологических единиц эти вулканические проявления включают плейстоцен–четвертичные и позднемиоценовые потоки лавы и вулканические постройки, позднемиоцен–четвертичную вулканическую провинцию Афара, позднемиоцен–четвертичную вулканическую провинцию Главного Эфиопского рифта (MER), олигоцен–миоцен–позднеэоценовые базальты на юге страны и базальты палеозой–четвертичные последовательности, а также протерозойский фундамент. Эти вулканические единицы отражают различные фазы тектоно-магматической эволюции, демонстрируя сложное взаимодействие рифтинга, растяжения земной коры и магматизма мантии, происходившее на протяжении последних десятков миллионов лет. Плейстоцен–четвертичные и позднемиоценовые вулканические проявления связаны с развитием Главного Эфиопского рифта и представлены обширными лавовыми потоками, конусами выноса пепла и щитовыми вулканами, что существенно повлияло на региональный рельеф, систему стока и гидрогеологические условия. Вулканическая провинция Афара на северо-востоке примечательна активными рифтинговыми процессами, базальтовыми трещинными извержениями и обширными лавовыми полями, формируя один из наиболее тектонически и вулканически активных регионов мира. Вулканическая провинция MER демонстрирует слоистые вулканические последовательности, сформированные в результате повторяющихся извержений, что является ключевым для понимания распределения и хранения подземных вод в трещиноватых базальтовых водоносных горизонтах. Более древние вулканические и осадочные последовательности, включая олигоцен–миоцен–позднеэоценовые базальты на юге Эфиопии, сохраняют свидетельства раннего рифтингового магматизма, предоставляя важную информацию о развитии Эфиопского плато и его структурных основ. Подстилающие палеозой–четвертичные и протерозойские породы фундамента формируют тектоническое и магматическое основание, контролируя региональные структурные линии, пути движения подземных вод и

локализацию водоносных подразделений (Rochette et al., 1998). Эти методы позволяют установить хронологические рамки и создавать детализированные геологические разрезы исследуемой территории, интегрирующие стратиграфию, тектонику и вулканическую историю. Такие разрезы имеют фундаментальное значение для понимания региональной геологической эволюции, оценки вулканических рисков и изучения гидрогеологических систем Эфиопии.

В результате этой вулканической деятельности, рифтовые вулканы представляют собой четвертичные вулканы с рифтовыми несцементированными и спаянными пирокластическими образованиями и базальтами. Состоят из вулканического пепла, пемзы, игнимбритов и пирокластических пород. Мощность рифтовых вулканов достигает 500 метров. В районе встречаются многочисленные разломы, трещины и вулканические формы рельефа, отдельные вулканы и конусы, кальдеры и кратеры. Четвертичные плейстоценовые базальты плато состоят из скоревидных базальтов, преимущественно пузырчатых и скоревидных. Имеют ограниченное горизонтальное распространение, связанное с центральными извержениями из вулканических центров на плато; в основном ассоциированы с щитовыми вулканами.

Щитовые вулканы представляют собой миоценовые (третичные) базальты, чередующиеся с небольшими количествами кислых вулканических пород (например, риолиты) и трахитов. Мощность щитовых базальтов достигает от 50 до 100 км. Они расходятся радиально от вершины и наклоняются под углом около 5° . Мощность щитовых базальтов достигает 500 метров; широкие щиты (до 100 км) разбросаны по Эфиопскому плато. Формирования Айба, Алачи и Термабер (верхние базальты) представляют собой олиго-миоценовые (третичные) базальты с интеркаляциями риолитов и игнимбритов в верхней части. Могут быть связаны со щитовыми вулканами. В основном массивные базальты, но часто встречаются колонные трещиноватые слои. Также распространены слои кислых пород, риолитов и туфов. Между контактом этой толщи с подстилающей формацией Ашанги могут просматриваться палеопочвенные горизонты. Мощность верхних базальтов достигает 1000 метров. Обычно формируют плоские плато с ровной

поверхностью и крутыми обрывами по краям. Формация Ашанги (нижние базальты) представлена олигоценовыми (третичными) глубоко выветрившимися брекчированными базальтами, мощностью около 500 метров, формирующими пересечённый рельеф.

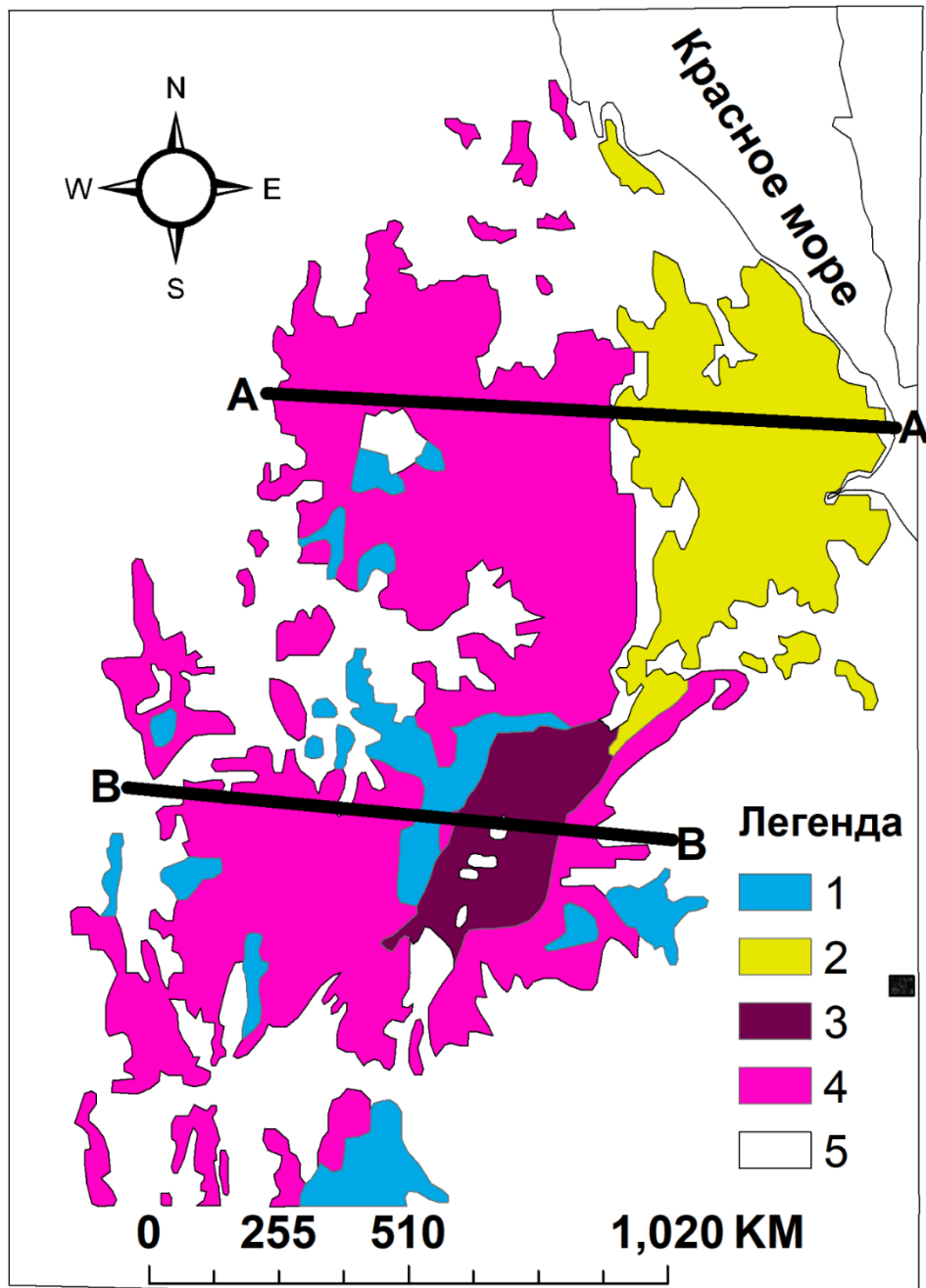


Рисунок 2.3- Распространение базальтовых пород в Эфиопии: 1. Плейстоцен–четвертичные вулканические потоки, подчиненные позднему миоцену. 2. Вулканическая провинция Афарской впадины, поздний миоцен – четвертичный период. 3. Вулканическая провинция Главного Эфиопского рифта, поздний миоцен – четвертичный период. 4. Вулканические потоки олигоцен – миоцен, включая поздний эоцен на юге Эфиопии. 5. Осадочные породы палеозоя – четвертичного периода и протерозойский фундамент.

Рыхлые осадочные отложения относятся к миоцену и современному четвертичному периоду и объединены в голоценовые аллювиальные отложения. Они, вероятно, формировались в ходе климатических колебаний в период голоцена. Мощность неконсолидированных осадков достигает 400 метров. Четвертичные аллювиально-озёрные отложения включают четвертичные и современные аллювиальные отложения, в т.ч, озёрные образования, речные террасы, вулканокластические материалы, коллювий и осыпи, флювиальные и дельтовые отложения, эллювиальные материалы. Эти локализованные отложения встречаются в Центральной Эфиопии, на юге и северо-западе страны.

Скальные осадочные породы включают плиоценовые (терциарные) отложения, верхнемеловые и юрские осадки. Эти осадочные породы состоят из чередующихся слоёв гипса, мергеля, сланца, ангидрита, доломита, известняка и песчаника. Их мощность достигает 1000 метров. В Эфиопии эти образования объединены в формации Аураду и Тале, формацию Алверо, а также формации Габредарре, Хаманиле, Урандеб и Антало (Рисунок 2.26).

Карбонатные породы широко распространены в Эфиопии в пределах мезозойских и кайнозойских осадочных бассейнов и являются важной составляющей геологического строения страны и её подземных водоносных систем (рис 2.26). Мощные юрские толщи известняков преобладают в центральной и северной Эфиопии, в частности в бассейнах Голубого Нила и Мекеле, где такие формации, как Антало, Габредарре, Хаманлей и Урандеб, образуют латерально протяжённые карбонатные платформы мощностью обычно от 500 до 1000 м. В восточной и юго-восточной Эфиопии эоценовые карбонатно-эвапоритовые толщи, представленные формациями Аураду и Талех бассейна Огаден, включают переслаивание известняков, гипса и ангидрита и местами характеризуются хорошо развитым карстом. Кроме того, карбонатные отложения представлены озёрными известняками в рифтовых бассейнах Главного Эфиопского рифта и депрессии Афар, что отражает рифтогенный характер осадконакопления. Незначительные проявления докембрийских мраморов также отмечаются в пределах

Мозамбикского пояса и Аравийско-Нубийского щита. Благодаря интенсивной трещиноватости и карстовым процессам эти карбонатные толщи формируют одни из наиболее продуктивных региональных водоносных горизонтов Эфиопии, играя ключевую роль в накоплении, движении и обеспечении подземных вод.

Метаморфические породы. Мозамбикский пояс среднего и высокого уровня метаморфизма на юге и западе Эфиопии представляет собой протерозойский фундамент, сложенный палеопротерозойскими метаосадочными породами и гнейсами, а также до- и синтетектоническими гранитами. В целом высокометаморфизованные породы чередуются с породами низкой степени метаморфизма. Докембрий. Низкометаморфизованный Аравийско-Нубийский щит на севере Эфиопии относится к протерозойскому фундаменту и представляет собой переходную зону между низкометаморфизованными вулканогенно-осадочными толщами и мафит-ультрамафитовыми комплексами Аравийско-Нубийского щита. Основные литологические разности включают метавулканогенно-осадочные породы и посттектонические гранитные интрузивные магматические образования. Данная часть фундамента Эфиопии, в отличие от фундамента значительной части Центральной Африки, претерпела многократные этапы деформации и орогенеза.

Ещё одним аргументом в пользу крайне сложной структуры территории является карта разломов и вулканических структур различного возраста (рисунок 2.4), которые могут выступать либо как проводники, либо как преграды для движения подземных вод. Развитые сети трещин, формирующиеся в зонах разломов, увеличивают вторичную пористость и гидравлическую проводимость пород, что позволяет воде быстро перемещаться вдоль плоскости разлома. Разломы играют связующую роль между блоками, часто сложенными породами с контрастными свойствами.

Структуры, сформированные вулканической активностью, включают лавовые потоки (базальты), дайки, силлы, кольцевидные депрессионные структуры; эти образования могут быть проницаемыми или непроницаемыми и выполнять роль как барьеров, так и коллекторов подземных вод. Вулканические и дизъюнктивные структуры, их пространственное распределение, ориентация и

взаимосвязь существенно влияют на распределение, формирование и питание подземных вод, подчёркивая сложное взаимодействие между тектонической активностью, вулканизмом и гидрогеологическими условиями региона.

Дизъюнктивные и вулканические структуры играют ключевую роль в формировании, распределении и динамике водных ресурсов, оказывая влияние как на движение, так и на возможность использования подземных вод (Talovina, 2022).

Сама вулканическая активность также может оказывать влияние на гидрогеологию, транспортируя глубокие насыщенные водой жидкости к поверхности, способствуя локальному пополнению ресурсов подземных вод и формированию родников и геотермальных систем. Следовательно, взаимодействие разломов, трещин и вулканических структур приводит к гетерогенным гидрогеологическим условиям, что критически важно для понимания распределения подземных вод, потенциала их пополнения и управления ресурсами.

В контексте изучаемого региона пространственное распределение и возраст разломов и вулканических структур (рисунок 2.4) подчёркивают сложность территории и её прямое влияние на формирование водных ресурсов. Картирование этих структурных элементов предоставляет важные сведения для гидрогеологической оценки, характеристики водоносных горизонтов и устойчивого управления как поверхностными, так и подземными водными ресурсами, демонстрируя сложную взаимосвязь между тектоническими и вулканическими процессами и доступностью пресной воды в геологически активных районах.

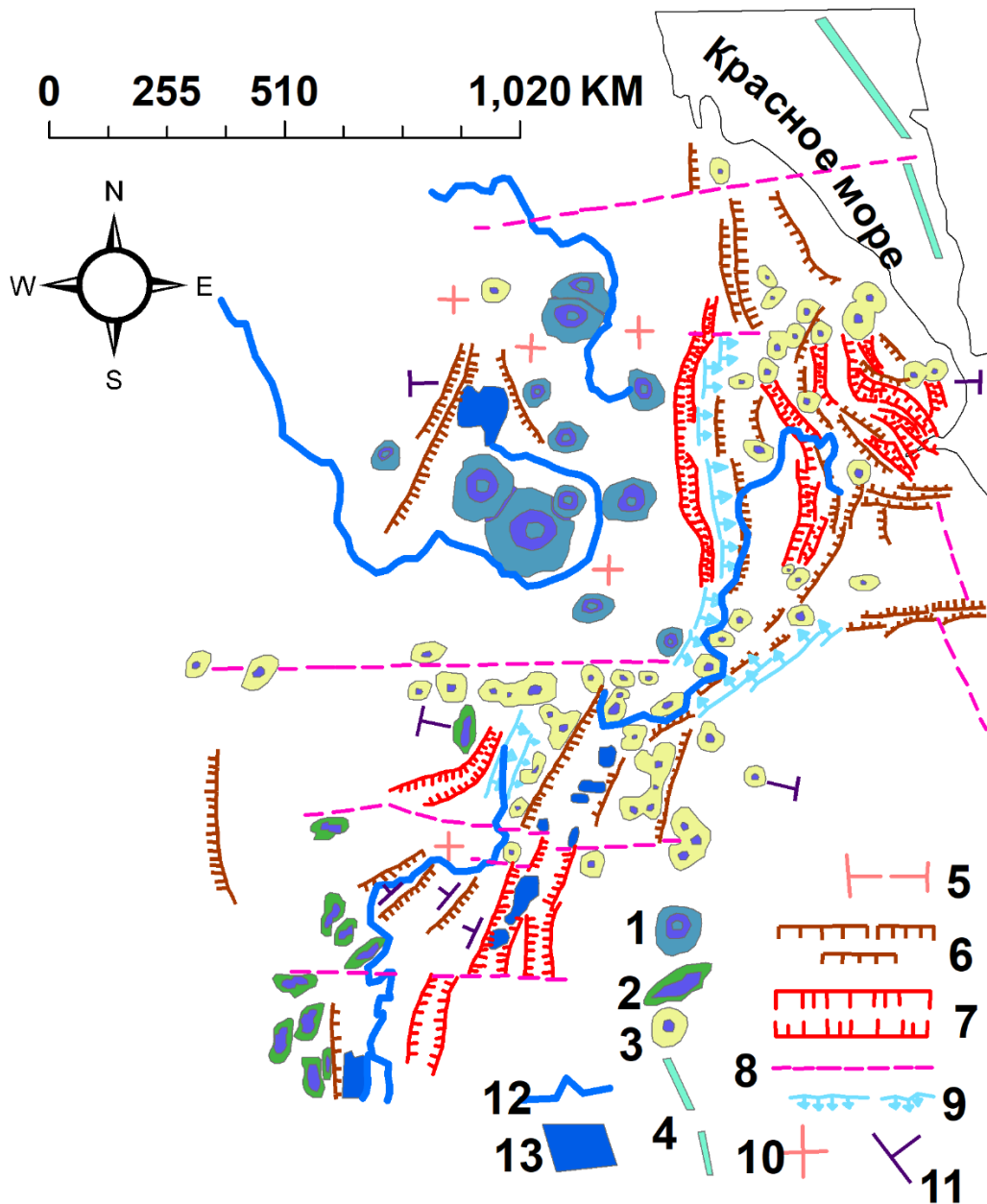


Рисунок 2.4- Схематическая карта разломов и вулканических структур: 1. Миоценовые вулканические структуры Термабера. 2. Вулканические купола и потоки плиоценового периода. 3. Плио-четвертичные вулканические структуры. 4. Центральная ось Красного моря. 5. Реки. 6. Зоны разломов северо-восточного простирания. 7. Грабенообразные структуры. 8. Разломы субширотного простирания. 9. Флексуры. 10. Горизонтальные лавовые потоки и осадочные породы. 11. Угол наклона лавовых потоков. 12. Реки. 13. Озера.

Высота над уровнем моря оказывает фундаментальное влияние на формирование водных ресурсов, поскольку определяет пространственное распределение осадков, температурных режимов и связанные с ними процессы накопления и движения воды (Gnann et al., 2025). Изменения высоты формируют

орографический эффект: тёплые и влажные воздушные массы поднимаются на возвышенности, охлаждаются и конденсируются, что приводит к увеличению количества осадков в горных районах. Одновременно температура воздуха с увеличением высоты снижается, сокращая потери влаги на испарение и транспирацию, тем самым увеличивая потенциал хранения воды в грунте, водоносных горизонтах и поверхностных водных объектах.

Крутизна склонов и градиенты рельефа, связанные с высотой, дополнительно регулируют движение и аккумуляцию воды. Крутые склоны способствуют быстрому поверхностному стоку и ограниченному инфильтрационному питанию, тогда как умеренные и пологие склоны повышают степень просачивания воды и способствуют формированию различных типов водоносных горизонтов. Таким образом, высотная зональность создаёт уникальные климатические и геоморфологические условия, определяющие эффективность улавливания, хранения и постепенного высвобождения пресной воды. По этой причине горные и высокогорные районы часто функционируют как ключевые гидрологические «водные башни», обеспечивая водными ресурсами как локальные территории, так и обширные низинные области, зависящие от их устойчивого стока.

Эфиопия характеризуется одним из наиболее разнообразных и сложных рельефов в Африке, сформированным длительной тектонической эволюцией и активными рифтовыми процессами. Территория страны традиционно подразделяется на пять основных морфотектонических и топографических регионов: Главную рифтовую долину, западные низменности, западные нагорья, восточные низменности и восточные нагорья. Такое региональное деление отражает глубоко расчленённый и контрастный ландшафт, включающий поднятые плато, тектонические грабены, вулканические массивы, крутые уступы и депрессии, связанные с развитием рифта. Это исключительное топографическое разнообразие оказывает существенное влияние на гидрологические процессы, включая пространственное распределение осадков, формирование и структуру речной сети, а также характер и интенсивность питания подземных вод в пределах исследуемого региона.

Наименьшие абсолютные отметки рельефа в пределах Эфиопии наблюдаются на востоке, в Данакильской (Афарской) депрессии, где поверхность земли опускается до -48 м, а днища отдельных вулканических кальдер — таких как кальдера вулкана Даллол — достигают отметок до -214 м, что делает этот район одним из самых низких несубмержированных участков суши на Земле (рисунок 2.7а).

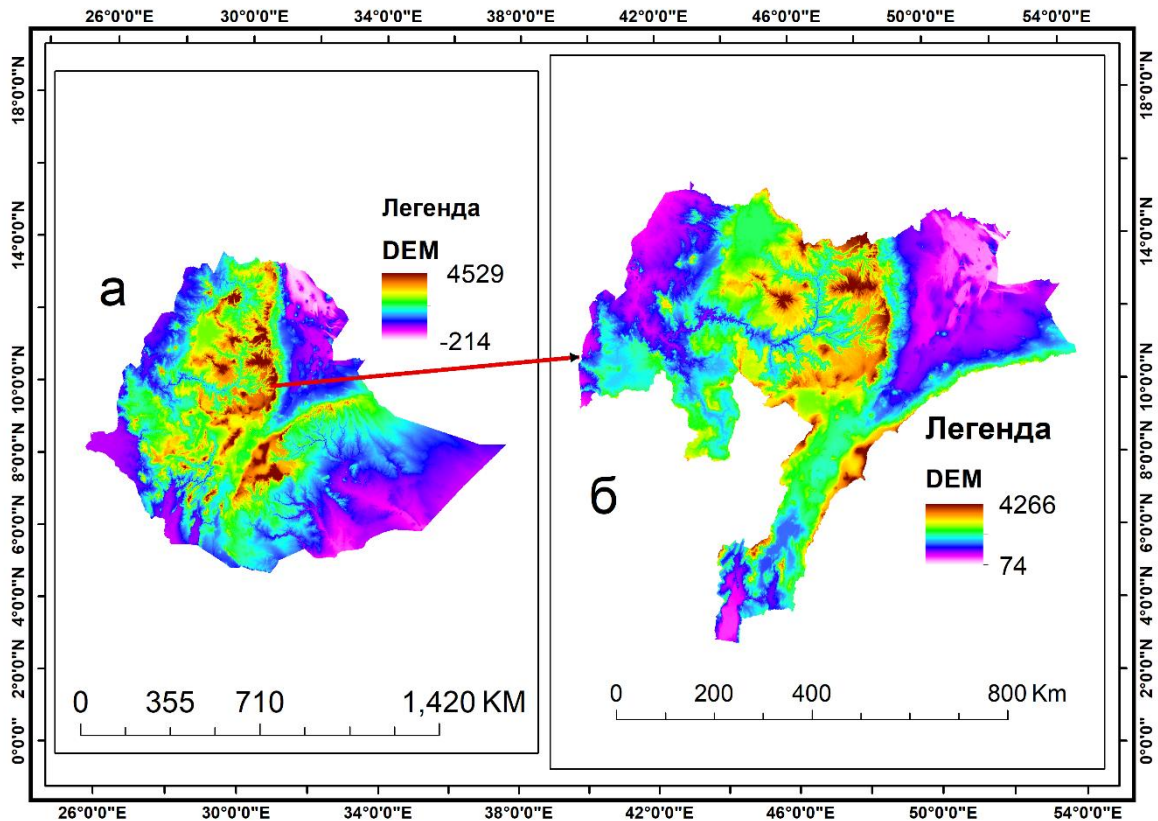


Рисунок 2.7- Цифровая модель рельефа (ЦМР) Эфиопии (а) и ее центральной части (б) (цветом указаны абсолютные отметки, м)

На противоположном высотном пределе находится гора Рас-Дашен, высота которой составляет 4 620 м над уровнем моря и которая является наивысшей точкой страны (рисунок 2.7а). Центральная часть Эфиопии, включающая значительную часть Главной рифтовой системы и прилегающих нагорий, также отличается выраженными вертикальными контрастами. Здесь абсолютные отметки варьируют от 74 м в Афарской впадине до 4 266 м в массиве горы Чоке (рисунок 2.7 б). Такой значительный диапазон высот подчёркивает решающую роль рельефа как контролирующего фактора в формировании, распределении и

пространственно-временной изменчивости как поверхностных, так и подземных водных ресурсов региона. Рельеф Эфиопии играет важную роль в формировании водных ресурсов, влияя на климатические условия (температура, осадки, испарение и др.).

Температура является ключевым фактором в формировании и распределении водных ресурсов, поскольку она непосредственно регулирует процессы испарения, а также влажность воздуха и почвы. Повышение температуры усиливает испарение, ускоряя потерю воды с поверхности суши, растительности и водохранилищ, одновременно увеличивая влажность атмосферы и почвы. Этот механизм существенно влияет на доступность воды, особенно в засушливых и полузасушливых регионах, где интенсивность испарения часто превышает количество осадков (Йоше и Аузина, 2025).

В Эфиопии, включая её центральные районы, среднегодовые температуры демонстрируют значительную пространственную вариабельность: 5–25 °C в горных областях, 20–45 °C в низменностях и 20–30 °C в умеренных зонах. Повышение температуры также изменяет режим осадков, вызывая более интенсивные дождевые события вследствие большей способности тёплого воздуха удерживать влагу. Напротив, увеличение испарения усиливает вероятность засухи в уязвимых регионах. Кроме того, повышение температуры воздуха напрямую приводит к нагреванию поверхностных водных объектов, создавая дополнительную нагрузку на водные экосистемы и виды человеческой деятельности, зависящие от водных ресурсов. В климатическом отношении май является одним из самых жарких и засушливых месяцев в Эфиопии, после чего наступает основной сезон дождей, продолжающийся с июня по август. Самыми прохладными месяцами обычно являются декабрь и январь, тогда как наиболее жаркими — март, апрель и май. В результате пространственное распределение температуры по территории Эфиопии варьирует примерно от 6,9 °C до 35 °C (рисунок 2.8в).

Долговременные климатические исследования свидетельствуют о продолжающейся тенденции потепления. За последние 120 лет (1901–2020 гг.) в

Эфиопии наблюдалось пространственное и временное увеличение средней температуры на $0,24\text{--}1,92^\circ\text{C}$ и $0,72\text{--}1,08^\circ\text{C}$ соответственно (Berihun et al., 2023). Региональная оценка для Восточной Африки за период 1979–2010 гг. также выявила значительные возрастающие тенденции: максимальная температура увеличилась до $1,9^\circ\text{C}$, а минимальная — до $1,2^\circ\text{C}$ практически по всей территории региона (Gebrechorkos et al., 2019). Другие исследования подтверждают рост годовых максимальных и минимальных температур в Эфиопии и её центральной части, причём повышение максимальной температуры является особенно выраженным (Tegegn et al., 2024; Miheretu, 2021).

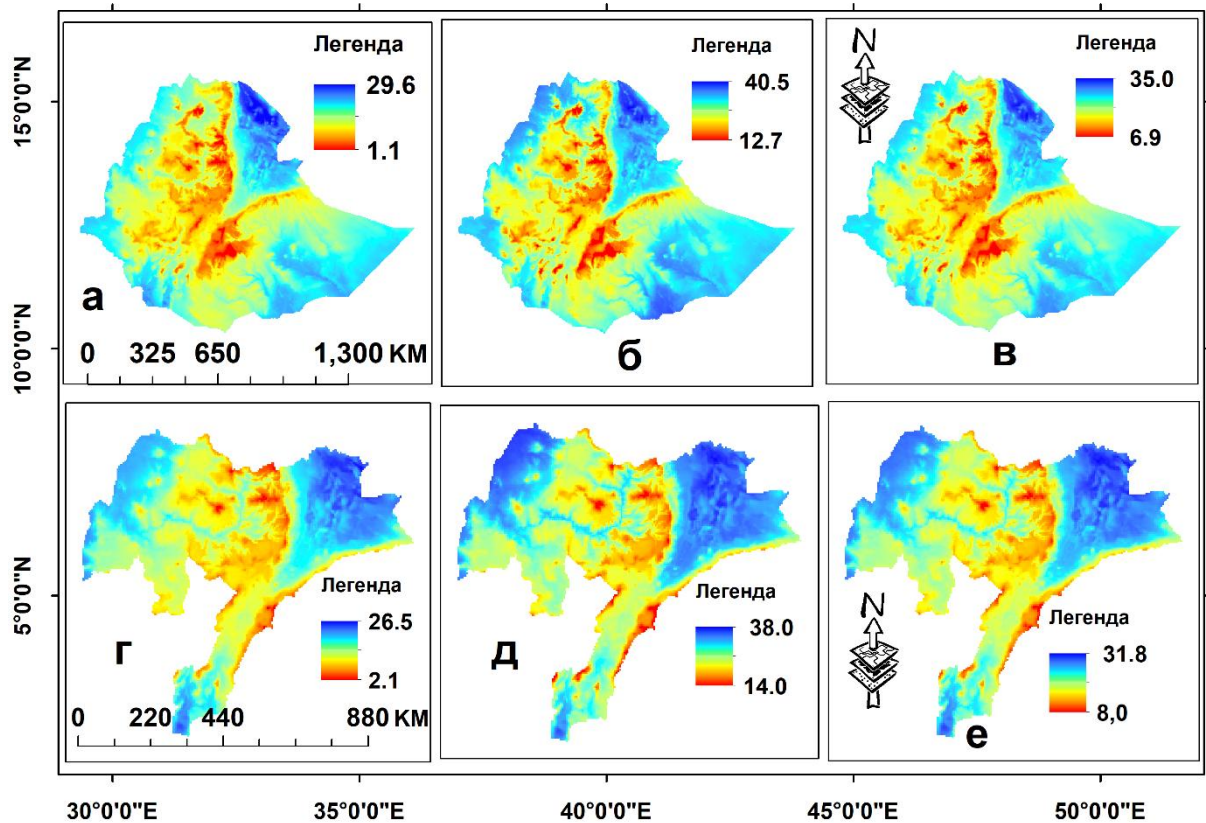


Рисунок 2.8- Пространственное распределение температуры ($^\circ\text{C}$) в Эфиопии и её центральной части: а. минимальная температура; б. максимальная температура; в. среднегодовая температура ($^\circ\text{C}$).

Анализ данных, представленных на рисунке 2.8б, позволяет установить, что минимальное годовое пространственное распределение температуры на территории Эфиопии характеризуется значительной амплитудой и варьируется в пределах от $1,1^\circ\text{C}$ до $29,6^\circ\text{C}$ (рисунок 2.8а). Такая изменчивость отражает

выраженную пространственную неоднородность температурного режима, обусловленную, в частности, орографическими особенностями, высотной поясностью и региональными климатическими факторами. Максимальное годовое пространственное распределение температуры колеблется от $12,7^{\circ}\text{C}$ до $40,5^{\circ}\text{C}$, при этом наиболее высокие значения визуально выделены красным цветом на рисунке 2.8б. Среднегодовое пространственное распределение температуры изменяется в диапазоне от $6,9^{\circ}\text{C}$ до $35,0^{\circ}\text{C}$; зоны с повышенными значениями также обозначены красным цветом на рисунке 2.8в, что позволяет наглядно определить области с наиболее тёплыми климатическими условиями.

Кроме того, анализ данных, представленных на рисунке 2.8г, свидетельствует о том, что в пределах исследуемого региона минимальные годовые значения температуры находятся в диапазоне от $2,1^{\circ}\text{C}$ до $26,5^{\circ}\text{C}$. По сравнению с общенациональными показателями данный интервал демонстрирует несколько меньшую амплитуду колебаний, что может указывать на относительную однородность температурных условий в пределах рассматриваемой территории. Максимальные годовые значения варьируются от $14,0^{\circ}\text{C}$ до $38,0^{\circ}\text{C}$ (наиболее высокие показатели обозначены красным цветом на рисунке 2.8д), тогда как среднегодовое пространственное распределение температуры составляет от $8,0^{\circ}\text{C}$ до $31,8^{\circ}\text{C}$. Повышенные значения среднегодовой температуры также выделены красным цветом на рисунке 2.8в, что подчёркивает пространственную концентрацию наиболее тёплых зон и способствует более детальной интерпретации климатических особенностей исследуемого региона.

Испарение (Е) является фундаментальным процессом, определяющим динамику водных ресурсов, поскольку оно переносит воду с поверхности водоёмов — таких как озёра, реки, водно-болотные угодья и водохранилища — в атмосферу, тем самым формируя региональный водный баланс и влияя на общую доступность водных ресурсов (Diaz et al., 2025). Его гидрологическое значение особенно велико в засушливых и полузасушливых регионах, включая Эфиопию, где высокий испарительный спрос может приводить к значительным потерям воды из природных и искусственных хранилищ. Эти потери снижают надёжность

водоснабжения и усиливают конкуренцию за ограниченные водные ресурсы. В Эфиопии испарение демонстрирует выраженный пространственный градиент, уменьшаясь от влажного юго-запада к более сухому северо-востоку: от 1600–1800 мм/год до 600–1000 мм/год соответственно.

Эвапотранспирация (ЕТ), объединяющая испарение с почвы и водных поверхностей и транспирацию растений, является не менее важным компонентом гидрологического цикла. Значения ЕТ сильно варьируют по территории Эфиопии в зависимости от климатических условий, рельефа, растительного покрова и характера землепользования. Годовая ЕТ составляет 900–1200 мм/год в западных высокогорьях (например, Джимма, Иллубабор), 1000–1400 мм/год в центральных и северных высокогорьях, 1200–1800 мм/год в зоне Рифтовой долины, 2000–2500 мм/год в восточных и юго-восточных низменностях и 800–1100 мм/год в юго-западной части страны. Эти пространственные различия существенно влияют на распределение и устойчивость водных ресурсов, особенно в природных водоёмах, таких как озёра, реки и зоны питания подземных вод.

Для количественной оценки соотношения на влагу и доступного водного ресурса используется индекс эвапотранспирации. Этот индекс отражает суммарное количество влаги, поступающей в атмосферу в результате испарения и транспирации, характеризуя тем самым взаимодействие между факторами атмосферного спроса и водным обеспечением территории. В исследуемом регионе индекс эвапотранспирации варьирует от 0,55 до 3,97 мм в год (рисунок 2.9), подчёркивая значительную пространственную неоднородность атмосферных потерь влаги.

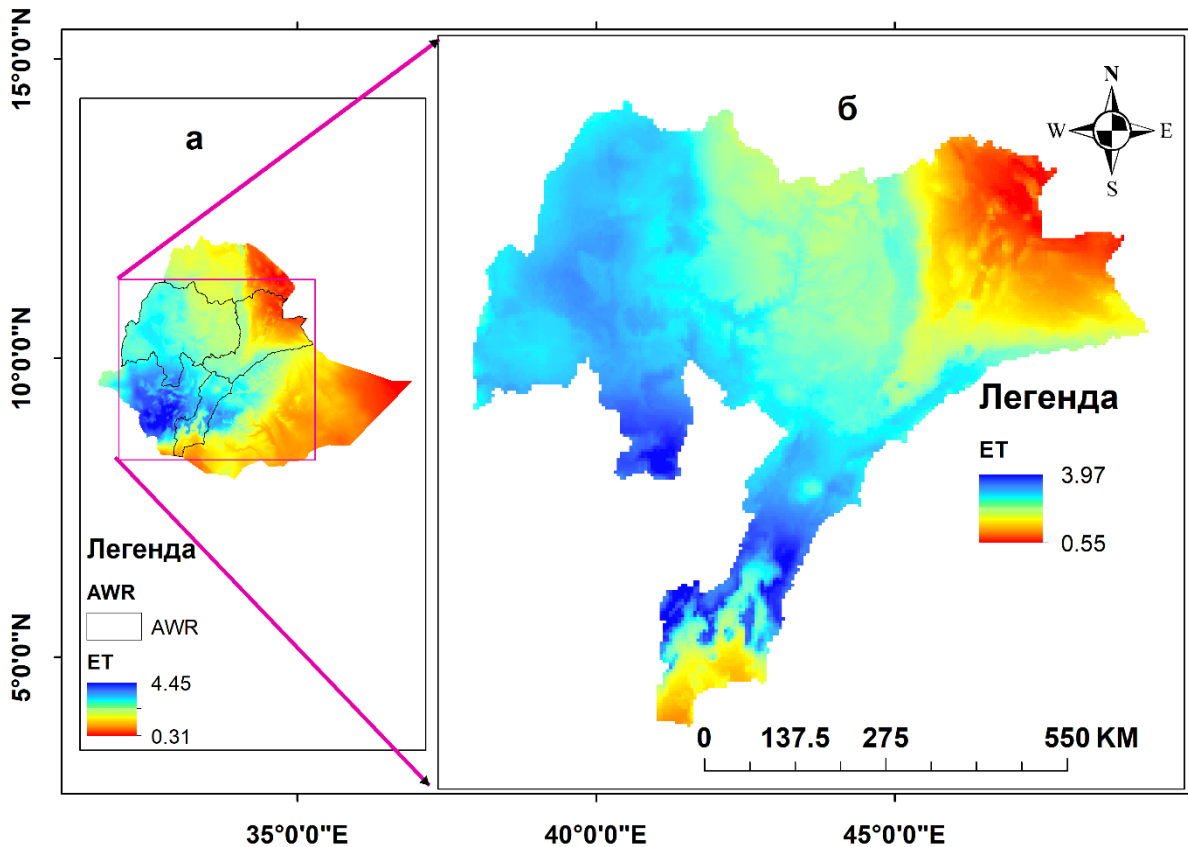


Рисунок 2.9- Распределение суммарного показателя эвапотранспирации (ЕТ) (мм/сут) в Эфиопии (а) и ее центральной части (б) (цветом указаны суммарное испарение, мм)

Анализ данных, представленных на рисунке 2.9, демонстрирует пространственное распределение скорости (интенсивности) эвапотранспирации на территории Эфиопии и в её центральной части. Как показано на рисунке 2.9а, эвапотранспирация характеризуется выраженной пространственной неоднородностью в пределах всей страны. Наиболее высокие значения наблюдаются в западных и юго-западных районах Эфиопии, где они обозначены синим цветом на карте. Повышенные показатели, вероятно, обусловлены более высоким уровнем атмосферных осадков, значительной плотностью растительного покрова и большей увлажнённостью почв, что способствует усилению процессов испарения и транспирации.

В противоположность этому, пониженные значения эвапотранспирации отмечаются в восточных, северо-восточных и юго-восточных районах страны. Данные территории в целом характеризуются аридными и полуаридными

климатическими условиями, разреженным растительным покровом и ограниченной доступностью влаги, что существенно снижает интенсивность испарительно-транспирационных процессов.

Аналогичная пространственная закономерность прослеживается и в центральной части Эфиопии (рисунок 2.9б). Юго-западная часть исследуемого региона отличается высокими значениями эвапотранспирации, тогда как в его восточной части фиксируются значительно более низкие показатели. Выявленный запад–восточный градиент указывает на доминирующую роль климатических факторов — прежде всего распределения осадков, температурного режима, рельефа и характера землепользования — в формировании пространственной динамики эвапотранспирации. В целом полученные результаты подчёркивают тесную взаимосвязь между гидроклиматическими условиями и процессами поверхностного водо- и энергообмена на территории Эфиопии.

Осадки играют фундаментальную и определяющую роль в формировании и распределении водных ресурсов, являясь основным источником восполнения поверхностных и подземных гидрологических систем (Thomas et al., 2016). Их характеристики — количество, интенсивность, продолжительность, частота и пространственно-временное распределение — определяют ключевые гидрологические процессы, такие как инфильтрация, формирование поверхностного стока, динамика влажности почвы и пополнение подземных вод. В Эфиопии эти параметры осадков проявляют значительную изменчивость, что во многом обусловлено сложным геологическим строением, высокоразнообразным рельефом и особенностями атмосферной циркуляции (Alhamshry et al., 2020; Berihun et al., 2023). В результате распределение осадков по территории страны крайне неравномерно в пространстве и времени, что непосредственно влияет на объём и сезонность водоснабжения рек, ручьёв, озёр, болот и водоносных горизонтов.

Годовое количество осадков существенно варьирует в различных регионах. Западные высокогорья (например, Джимма и Воллега) получают от 1 800 до 2 500 мм осадков в год (данные Эфиопского метеорологического института), тогда как

центральные и северные высокогорья, включая Аддис-Абебу и Гондар, получают в среднем 900–1 500 мм (Verhanu et al., 2016). В противоположность этому, восточные и юго-восточные низменности, такие как регионы Афар и Сомали, являются одними из самых засушливых территорий страны, где количество осадков обычно не превышает 200–500 мм в год (Verhanu et al., 2016). Для Эфиопской рифтовой долины характерны промежуточные значения (500–1 200 мм), тогда как юго-западные районы получают более 2 000 мм осадков ежегодно (Эфиопский метеорологический институт (Verhanu et al., 2016). Эти различия соответствуют изменению толщины годового слоя осадков от 4.4 до 224.6 мм (см. рисунок 2.10 а) и 7.4 до 194 мм в центральной части (рисунок 2.10 б).

Выраженная пространственная изменчивость осадков объясняется преимущественно сезонной миграцией межтропической зоны конвергенции (ITCZ), обусловленной дифференциальным солнечным нагревом. Кроме того, крупномасштабные океано-атмосферные взаимодействия, включая явления Эль-Ниньо–Южное колебание (ENSO), вариации Индийского океанского диполя и региональные муссонные процессы, существенно влияют на формирование режима осадков (Beuene et al., 2023; Tegegn et al., 2024; Йоше и Аузина, 2025). В результате южные и юго-западные районы, характеризующиеся обширными тропическими лесами и влажным климатом, получают наибольшее количество осадков, тогда как гипераридные районы, такие как Огаден и Данакильская впадина, относятся к наиболее сухим регионам страны.

Сезонная изменчивость осадков в Эфиопии главным образом определяется годовой миграцией ITCZ, что порождает сильные межгодовые колебания (Berihun et al., 2023; Tegegn et al., 2024). Климат страны традиционно подразделяется на четыре сезона:

- Киремт (июнь–сентябрь): главный сезон дождей, дающий 50–80% годовых осадков (≈ 907 мм/сезон);
- Бега (декабрь–февраль): сухой сезон;
- Бельг (март–май): короткий сезон дождей;
- Цедай (сентябрь–ноябрь): межсезонье/переходный период.

В целом Эфиопия характеризуется отчётливо выраженными влажным и сухим сезонами: обильные осадки приходятся на период с июня по сентябрь, тогда как с октября по май наблюдается преимущественно сухая погода (≈ 350 мм/сезон) (Berhane et al., 2020; Elzory et al., 2020). Логично показать график многолетних и сезонных изменений осадков. Многочисленные исследования подтверждают значительную внутригодовую и межгодовую изменчивость осадков по всей территории страны, включая её центральные районы (Ali et al., 2012; Gebrechorkos et al., 2019; Tegegn et al., 2024), что существенно влияет на возможность использования воды, стабильность гидрологического режима и сельскохозяйственное производство. Кроме того, долгосрочные исследования демонстрируют тенденцию к снижению количества осадков. Так, фиксируют статистически значимое уменьшение среднегодового количества осадков примерно на 0,146 мм в год за последние 33 года (Kobe & Liu, 2022). Такая изменчивость и постепенное сокращение уровня осадков напрямую влияют на сезонность, объем и надёжность поверхностного водоснабжения рек, озёр, водно-болотных угодий и многокомпонентных водохозяйственных систем, создавая дополнительные сложности для управления водными ресурсами, планирования орошения и выработки гидроэнергии.

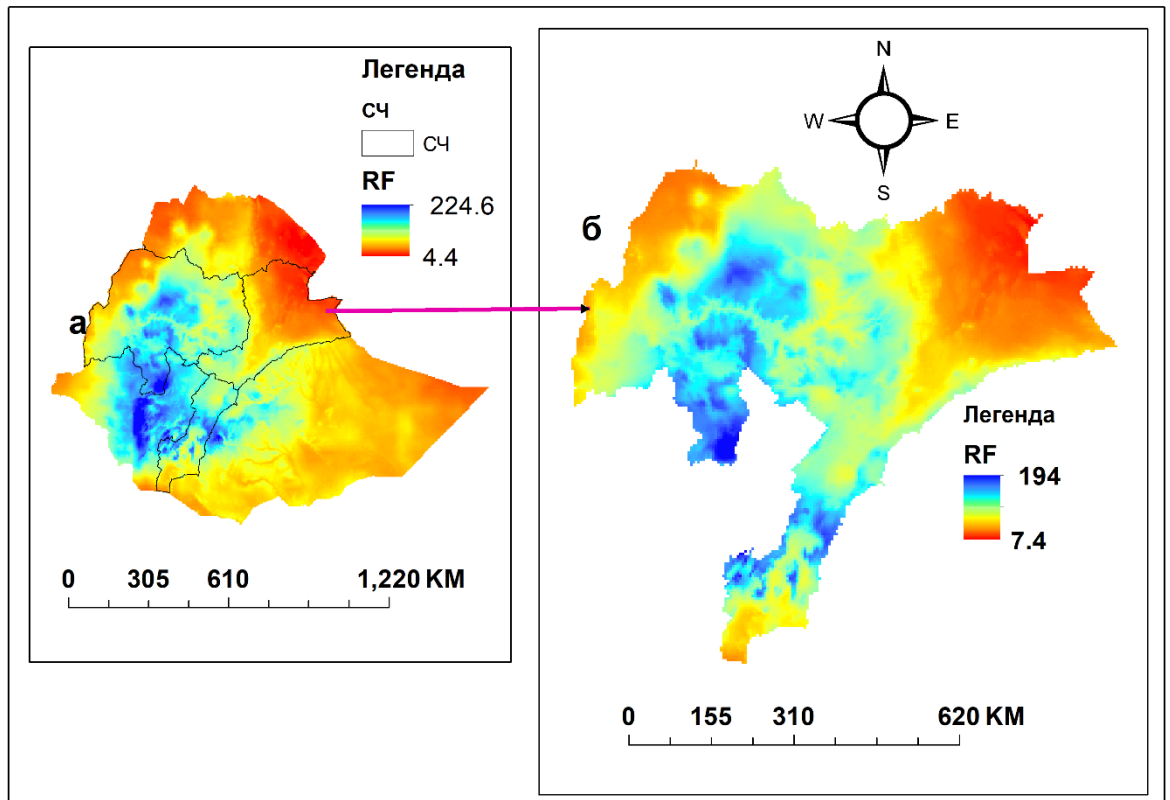


Рисунок 2.10- Пространственная изменчивость осадков на Эфиопии (а) и её центральной части (б) (цветом указаны осадков, мм)

Таким образом, изменения количества атмосферных осадков, эвапотранспирации и температуры воздуха существенно влияют на формирование, распределение и устойчивость водных ресурсов, поскольку они изменяют баланс между приходной и расходной частями гидрологического цикла. Эти климатические параметры взаимодействуют между собой нелинейным образом, регулируя ключевые гидрологические процессы, включая динамику влажности почвы, питание подземных вод, формирование поверхностного стока и испарение с открытых водных поверхностей. Повышение температуры воздуха особенно заметно усиливает потенциальную и фактическую эвапотранспирацию, увеличивая влагоёмкость атмосферы и повышая доступность тепловой энергии на поверхности суши. В результате более высокие температуры могут значительно уменьшать количество воды, сохраняющейся в наземных экосистемах, что приводит к снижению доступности поверхностных вод и ограничению процессов пополнения подземных горизонтов. Одновременно растительность при повышенных

температурах испытывает большую потребность в транспирации, что дополнительно ускоряет потерю влаги из почвенного слоя и неглубоких водоносных горизонтов.

Напротив, увеличение количества осадков способно временно увеличивать ресурсы поверхностных вод, усиливать формирование стока и пополнять озёра, водохранилища и речной сток. Однако экстремальные осадки могут сопровождаться низкой эффективностью инфильтрации вследствие насыщения почвы, образования поверхностной корки или выраженной крутизны рельефа. В таких условиях уменьшается доля атмосферной влаги, которая действительно способствует пополнению подземных вод.

Темпы эвапотранспирации тесно связаны с температурой и метеорологическими условиями и, как правило, возрастают при увеличении тепловой энергии. Эта зависимость подчёркивает высокую чувствительность водных ресурсов к климатическим колебаниям и изменению климата: даже незначительное повышение температуры может привести к существенному увеличению эвапотранспирационных потерь, тем самым изменяя гидрологический баланс даже в регионах со стабильными объёмами осадков.

В заключение, совокупное воздействие переменных осадков, повышающихся температур и изменяющейся эвапотранспирации формирует региональные особенности гидрологического и гидрогеологического режимов и определяет возможность долгосрочной оценки изменчивости ресурсов поверхностных и подземных вод. Понимание этих взаимосвязей имеет ключевое значение для прогнозирования возможности использования, оценки климатических рисков и разработки стратегий устойчивого управления водными ресурсами.

Гидрологические условия представляют собой совокупность пространственных и временных характеристик возникновения, движения и трансформации воды в природных водных объектах — таких как реки, озёра, водно-болотные угодья и водохранилища — а также в прилегающей наземной среде. Эти условия определяют количество и качество доступных водных ресурсов и оказывают существенное влияние на целостность экосистем, динамику

растительности, продуктивность сельского хозяйства и систему управления водными ресурсами (Zhao et al., 2023). Изменения гидрологического режима, вызванные климатической вариабельностью, долгосрочными климатическими изменениями и усиливающимся антропогенным воздействием, создают серьёзные сложности для устойчивого функционирования речных бассейнов, надёжности систем водоснабжения и эффективности водохозяйственного планирования и управления (Lin et al., 2023; Li et al., 2024).

В пределах исследуемого региона обеспеченность поверхностными водами для многоцелевого водоснабжения — особенно в периоды интенсивных осадков — определяется сложной и разветвлённой речной сетью. Традиционно она подразделяется на три крупные дренажные системы: Западную дренажную систему, дренажную систему Рифтовой долины и Юго-Восточную дренажную систему, каждая из которых характеризуется уникальными геоморфологическими особенностями, гидрологическими процессами и климатическими условиями (Рисунок 2.11).

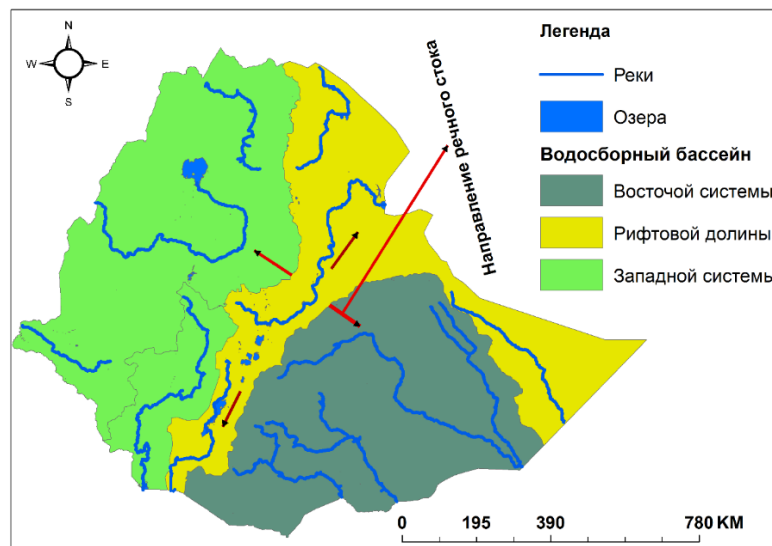


Рисунок 2.11- Дренажные системы Эфиопии сформированы в результате тектонических движений: Жёлтый цвет обозначает внутреннюю дренажную систему Рифтовой долины, сток которой направлен в Красное море и озеро Туркана. Зелёный цвет показывает западную дренажную систему, воды которой текут в западном направлении к Средиземному морю. Серый цвет отражает восточную дренажную систему, сток которой направлен в Индийский океан. Стрелки указывают направление течения рек в соответствии с направлением тектонических движений.

Западная дренажная система является крупнейшей и наиболее водообильной, охватывая около 40% территории Эфиопии и формируя почти 60% её поверхностного стока. В её состав входят бассейны крупных рек — Аббай (Голубой Нил), Текезе и Баро–Акобо, сток которых направлен преимущественно на запад и в конечном итоге поступает в систему реки Нил. В эту систему также входит бассейн Омо–Гибе, воды которого направляются на юг в озеро Туркана. Особое значение имеет бассейн Аббай, истоки которого находятся в озере Тана, крупнейшем пресноводном озере Эфиопии и важном гидрологическом и экологическом объекте.

Дренажная система Рифтовой долины характеризуется внутренним стоком и формируется под влиянием тектонической структуры Восточно-Африканского рифта. В неё входит река Аваш, текущая на северо-восток в сторону Афарской впадины, а также цепь взаимосвязанных озёр: Зуай, Абиджата, Лангано, Шала, Абая и Чамо. Гидрологические процессы в этой системе определяются вулканическим рельефом, геотермальной активностью и высокими показателями испарения, что обуславливает формирование специфических режимов солёности и динамику водоёмов закрытого типа.

Юго-Восточная дренажная система включает реки Вабе-Шебелле и Джубба (Генале), которые направляют свой сток к Индийскому океану. Эти реки отличаются высокой сезонной изменчивостью, обусловленной засушливым и полузасушливым климатом, а также эпизодическим характером выпадения осадков.

Точное определение надёжности и пространственной корректности границ водосборов имеет ключевое значение для достоверной оценки поверхностных водных ресурсов, прогнозирования паводков, гидрологического моделирования и стратегического водохозяйственного планирования. Современные достижения в области дистанционного зондирования, геопро пространственного анализа и методов машинного обучения существенно повысили точность выделения гидрологических единиц, обеспечив более надёжную идентификацию границ речных бассейнов. На

основе интеграции этих технологий в исследуемом регионе была выполнена детальная делимитация водосборов, в результате чего выделено девять основных речных бассейнов Эфиопии (рисунок 2.12 и таблице 2.1): Аббай, Гэнале, Огаден, Вабе-Шебелле, Текезе, Аваш, Данакыль, Баро–Акобо и Омо–Гибе, а также бассейн озёр Рифтовой долины и ряд локальных суббассейнов. Площади водосборов варьируют от примерно 58 тыс. км² (бассейн Данакыля) до 207 тыс. км² (бассейн Аббай), что подчёркивает высокую гидрологическую неоднородность территории страны.

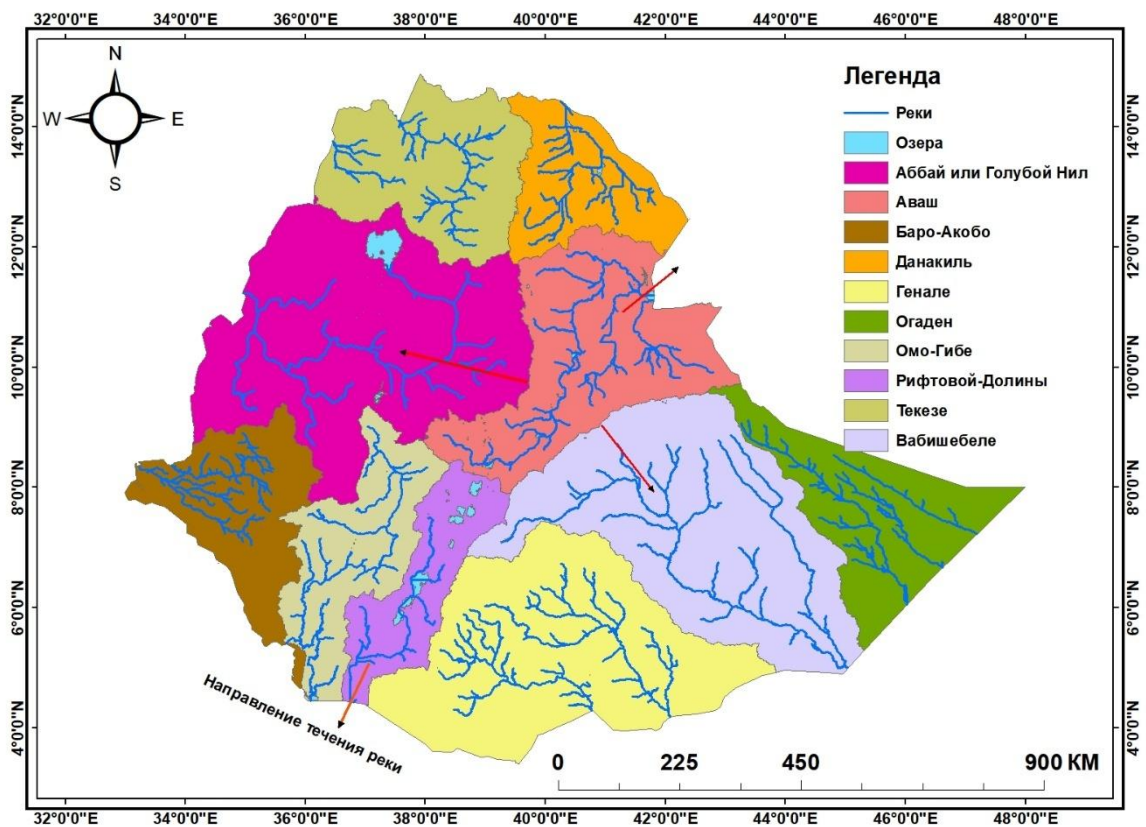


Рисунок 2.12- Речные бассейны Эфиопии: Аббай, Аваш, Баро-Ачобо, Данакил, Генале, Огаден, Омо-Гибе, Текезе, Уабишебеле и бассейны Восточно-Африканской рифтовой долины

Таблица 2.1- Общая площадь каждого речного бассейна была рассчитана в квадратных метрах, а также определены соответствующие минимальные и максимальные высоты, выраженные в метрах над уровнем моря.

Номер	Название речного бассейна	Площадь в квадратных метрах(кв.м)(Q GIS)	Площадь в квадратных метрах (ArcGIS)	Минимальная высота над уровнем моря (м)	Максимальная высота над уровнем моря (м)
1	Аббай	2.07071E+11	2.07288E+11	467	4266
2	Аваш	1.2225E+11	1.22299E+11	74	4201
3	Баро-Ачобо	73031633617	73345988933	355	3273
4	Данакил	57711803443	57719344500	-214	3975
5	Генале	1.76759E+11	1.76804E+11	157	4387
6	Огаден	86332303227	87351781086	333	2090
7	Омо-Гибе	73882479990	73939535184	325	3603
8	бассейны Восточно-Африканской рифтовой долины	53203176905	53187257060	450	4190
9	Текезе	88554856710	88526121869	529	4529
10	Уабишебеле	1.88819E+11	1.89497E+11	183	4178
Общая площадь		1.12762E+12	1.12996E+12		

Обеспеченность поверхностными водными ресурсами в районе исследования в основном связана с реками Аббай (Голубой Нил), Аваш и реками Рифтовой долины, которые являются основными источниками многоцелевого

водоснабжения, включая бытовое водопользование, орошение, гидроэнергетику и экосистемные услуги. Предыдущие исследования указывают на необходимость обновлённых и более детализированных оценок вследствие ограниченности данных, а также выраженной пространственной и временной изменчивости речного стока. Согласно существующим оценкам, потенциальные ресурсы поверхностных вод составляют приблизительно 54,40 млрд м³ для реки Аббай, 4,9 млрд м³ для реки Аваш и 5,64 млрд м³ для рек Рифтовой долины, что отражает существенные различия в гидрологии бассейнов и климатических условиях. Эти речные системы характеризуются значительной сезонной и межгодовой изменчивостью, обусловленной распределением осадков, особенностями водосборов и взаимодействием верхних и нижних участков бассейнов. В настоящем исследовании были собраны, систематизированы и проанализированы гидрологические данные 27 гидропостов, полученные из Министерства водных ресурсов и энергетики Эфиопии, с целью оценки сезонного распределения поверхностных водных ресурсов в пределах исследуемой территории. Пространственное расположение выбранных станций в трёх речных бассейнах представлено на приведённом ниже рисунке 2.13.

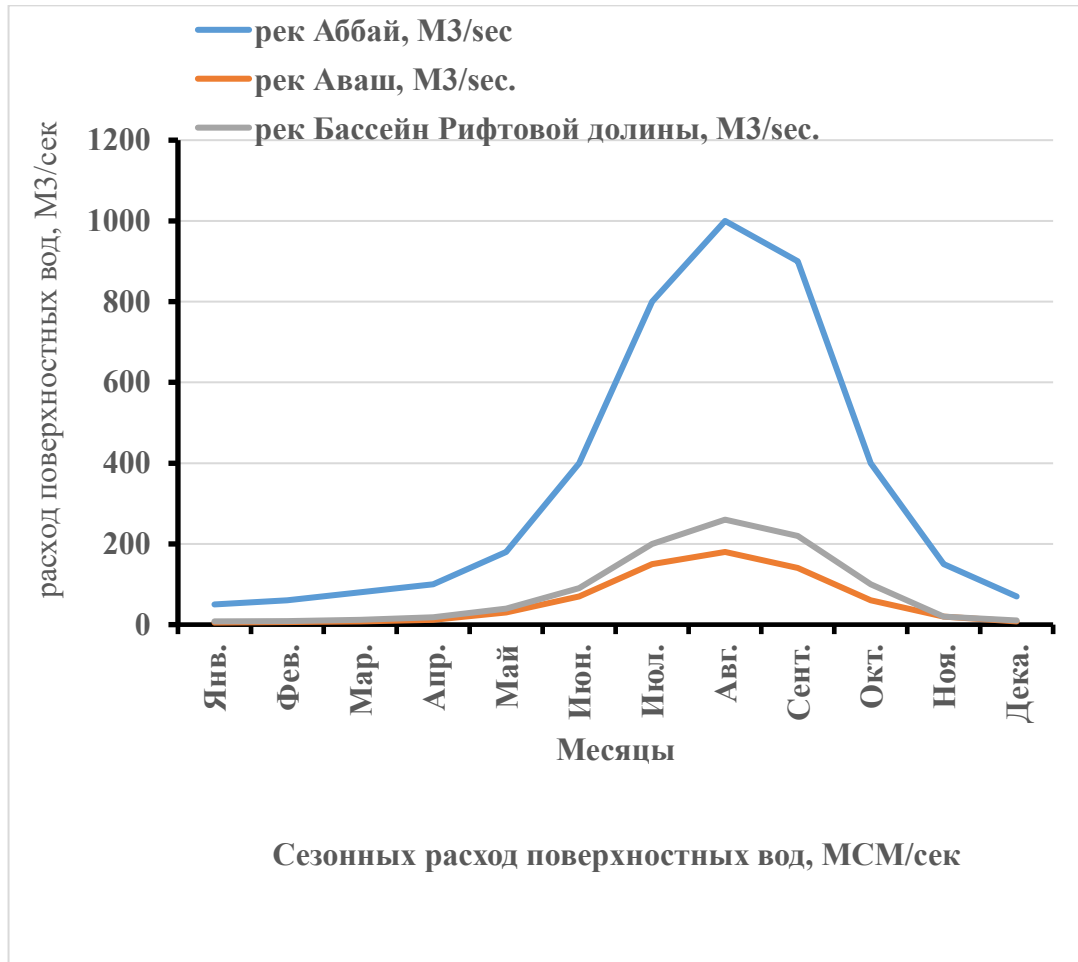


Рисунок 2.13- Сезонное распределение расхода рек Аббай (Голубой Нил), Аваш и рек Рифтовой долины

На основе анализа данных, представленных на рисунке 2.13, река Аббай демонстрирует наибольший сезонный сток в пределах исследуемого региона, за ней следуют реки бассейна Рифтовой долины, тогда как бассейн реки Аваш характеризуется относительно низкими сезонными значениями стока. Такая закономерность указывает на значительную пространственную изменчивость гидрологической реакции основных речных бассейнов, что, вероятно, обусловлено различиями в размере водосборных бассейнов, режиме осадков, рельефе и характеристиках землепользования.

Кроме того, рисунок наглядно демонстрирует выраженную сезонную контрастность речного стока. В сухой период течение рек значительно снижается во всех изученных бассейнах, при этом значения стока падают ниже 200 м³/с по всему исследуемому региону. Такая существенная редукция стока подчёркивает

сильную зависимость этих речных систем от сезонных осадков и указывает на высокую чувствительность гидрологического режима бассейнов к климатическим колебаниям. Сезонные колебания стока имеют важное значение для доступности водных ресурсов, потенциала орошения и устойчивости экосистем региона.

Соответственно, крупные озёра исследуемого региона являются важными источниками многоцелевого водоснабжения, обеспечивая воду для бытовых нужд, орошения, скота, рыболовства и поддержания экосистем. Морфометрические характеристики этих озёр, включая площадь водной поверхности, максимальную и среднюю глубину, объём воды, протяжённость береговой линии и площадь водосбора, приведены в таблице 2.2. Эти показатели имеют ключевое значение для понимания ёмкости водохранилища, гидродинамики, сезонной изменчивости и потенциала устойчивого управления водными ресурсами. Озёра региона демонстрируют значительную пространственную и временную изменчивость, обусловленную различиями в геологии, рельефе, климате и гидрологическом питании, что напрямую влияет на их доступность и надёжность как источников воды для местных сообществ и при планировании на уровне бассейна.

Таблица 2.2-Морфометрические характеристики озёр Эфиопии, обобщённые по данным различных источников (источники: (Hughes & Hughes, 1992; Moges et al., 2005; Awulachew, 2007; Ayenew & Robert, 2007; Dinka, 2012; Bird Life International, 2013; Mohamed et al., 2013)

Название озера	Высота над уровнем моря (masl)	Площадь водосбора (Км2)	Площадь поверхности (Км2)	Максимальная глубина (м)	Объём (млрд куб. м)
Тана	1,788	15 000	3 673	14	28.4
Зивей	1,636	7,380	440	9	1
Лангано	1,585	2,000	230	46	3.8
Абиджата	1,580	10,740	180	14	1
Шала	1,550	2,300	370	266	37
Авасса	1,680	1,300	129	22	1
Абая	1,169	16,342	1,140	24.5	9.82
Чамо	1,110	18,575	317	14.2	3.24

Продолжение таблицы 2.2

Жуй Бахир	570	-	1125	-	-
Хайк	1,900	83	23	81.41	1.01
Ашенге	2,440	129	140	25.5	0.25
Бесека	1,900	420	48.5	7	0.28
Весь					76.8

Озеро Тана (таблице 2.2), расположенное в северо-западных нагорьях Эфиопии, является крупнейшим пресноводным озером страны и важнейшим гидрологическим и экологическим ресурсом в бассейне Голубого Нила. Озеро находится на высоте примерно 1 788 метров над уровнем моря и занимает обширный водосборный бассейн площадью около 15 000 квадратных километров, включающий сеть впадающих рек и ручьев, которые обеспечивают его гидрологический баланс. Общая площадь поверхности озера составляет примерно 3 673 квадратных километра, что делает его не только значительным водоёмом на региональном уровне, но и ключевым источником воды для сельского хозяйства, бытовых нужд и гидроэнергетики в ниспадающих районах. Гидрологически озеро характеризуется значительной изменчивостью глубины: средняя глубина составляет около 8 метров, а максимальная достигает 14 метров в отдельных депрессиях, что отражает его мелководную и обширную морфологию. Такая батиметрическая структура влияет на объём водохранилища, циркуляцию воды и динамику осадков, что, в свою очередь, определяет распределение питательных веществ, состояние водных экосистем и продуктивность биоты. Общий объём озера оценивается примерно в 28,4 миллиарда кубических метров, что подчёркивает его значение как крупного пресноводного резервуара, способного регулировать сток в реку Голубой Нил, которая берет начало в озере Тана и существенно влияет на гидрологию Нила в ниспадающих районах. Помимо гидрологической значимости, озеро Тана поддерживает богатое биоразнообразие, включая эндемичные виды рыб, обширные водно-болотные угодья и места обитания птиц, что делает его центром природоохранной и устойчивой ресурсной

деятельности. Физические и гидрологические характеристики озера — большой водосборный бассейн, значительная площадь поверхности, изменчивая глубина и крупный объем воды — подчёркивают его важность для регионального управления водными ресурсами, регулирования паводков и экологической устойчивости. Понимание этих параметров является ключевым для эффективного планирования и интегрированного управления бассейном в условиях климатической изменчивости и растущего антропогенного давления.

Озеро Зивай (таблице 2.2), расположенное в центральной части Рифтовой долины Эфиопии, представляет собой мелководное пресноводное озеро, обладающее значительным экологическим, гидрологическим и социально-экономическим значением. Расположенное на высоте примерно 1 636 метров над уровнем моря, оно входит в состав подбассейна Зивай-Шала в рамках более крупной системы Эфиопской Рифтовой долины. Площадь его водосборного бассейна оценивается примерно в 7 380 квадратных километров и включает несколько впадающих рек, таких как Меки, Кетар и Бульбула, которые регулируют гидрологический баланс озера и поддерживают уровень воды в течение сезонных колебаний. Общая площадь поверхности озера составляет около 440 квадратных километров, что делает его средним по размеру водоемом в регионе, однако оно играет ключевую роль в обеспечении рыболовства, орошения, водопоя для скота и водоснабжения местных сообществ. Гидрологически озеро Зивай характеризуется относительно мелководной морфологией, со средней глубиной около 9 метров и максимальной глубиной до 6 метров, что влияет на термическую стратификацию, динамику питательных веществ и процессы осадконакопления. Несмотря на небольшую глубину, объём воды оценивается примерно в 1,1 миллиард кубических метров, что обеспечивает поддержание экологической целостности и надёжный источник пресной воды при обычных климатических условиях. Сезонные и межгодовые колебания осадков и притока могут приводить к значительным изменениям уровня воды, влияя на водные экосистемы и сельскохозяйственную деятельность в прилегающих районах. Помимо гидрологической и экономической значимости, озеро Зивай поддерживает разнообразие биоты, включая

мигрирующих и оседлых птиц, водные растения и коммерчески важные виды рыб. Понимание его физических характеристик — площади водосбора, поверхности, глубины и объёма воды — имеет ключевое значение для интегрированного управления водными ресурсами, устойчивого развития рыболовства и природоохранного планирования. Эти параметры подчёркивают уязвимость озера к антропогенным воздействиям, включая забор воды, изменение землепользования и климатические колебания, что требует научно обоснованных стратегий управления для сохранения его экологических функций и социально-экономических преимуществ.

Озеро Лангано (таблице 2.2), расположенное в центральной части Эфиопской Рифтовой долины, является важным пресноводным водоемом, обладающим значительным экологическим, гидрологическим и социально-экономическим значением. Озеро находится на высоте примерно 1 585 метров над уровнем моря и входит в состав подбассейна Абиджатта-Шала-Лангано в рамках более крупной системы Эфиопской Рифтовой долины. Площадь его водосборного бассейна оценивается примерно в 2 000 квадратных километров, включая несколько впадающих рек, которые способствуют регулированию водного баланса озера и сезонной гидрологической изменчивости. Общая площадь поверхности озера составляет около 230 квадратных километров, а его мелководная природа обеспечивает важные ресурсы для рыболовства, туризма, водопоя для скота, орошения и водоснабжения местных сообществ. Средняя глубина озера составляет примерно 46 метров, а максимальная достигает около 15 метров, что отражает его пологое батиметрическое строение и оказывает влияние на внутреннюю циркуляцию воды, термическую стратификацию и процессы осадконакопления. Несмотря на умеренную глубину, объем воды оценивается примерно в 3,8 миллиарда кубических метров, что делает озеро значительным пресноводным резервуаром, поддерживающим региональную гидрологическую стабильность и экосистемы ниспадающих районов. Сезонные и межгодовые колебания осадков и притока приводят к изменчивости уровня воды, влияя на водные экосистемы, продуктивность рыболовства и доступность воды для хозяйственных нужд.

Помимо гидрологической и экономической значимости, озеро Лангано имеет важное экологическое значение, обеспечивая среду обитания для разнообразных водных и наземных видов, включая мигрирующих птиц и эндемичные виды рыб, а также поддерживая водно-болотные угодья, способствующие сохранению биоразнообразия. Понимание физических характеристик озера — площади водосбора, площади поверхности, глубины и объема воды — имеет решающее значение для интегрированного управления водными ресурсами, устойчивого развития рыболовства, туризма и охраны экосистем. В условиях растущего антропогенного давления, включая расширение сельского хозяйства, забор воды и климатические колебания, сохранение и устойчивое управление ресурсами озера Лангано крайне важны для поддержания его экологических функций и социально-экономических преимуществ в Эфиопской Рифтовой долине.

Озеро Абията (таблице 2.2), расположенное в центральной части Эфиопской Рифтовой долины, представляет собой мелководное солёное озеро, обладающее значительным экологическим, гидрологическим и социально-экономическим значением. Озеро находится на высоте примерно 1 580 метров над уровнем моря и входит в состав подбассейна Абиджатта-Шала, гидравлически связанного с соседним озером Шала, что влияет на гидродинамику системы озер центральной Рифтовой долины. Площадь водосборного бассейна озера оценивается примерно в 10 740 квадратных километров и включает сезонные реки и поверхностный сток, регулирующие водный баланс и сезонные колебания уровня воды. Общая площадь поверхности озера составляет около 180 квадратных километров. Озеро относительно мелководное, средняя глубина составляет примерно 14 метра, а максимальная достигает около 6 метров в отдельных депрессиях, что отражает его широкую, но неглубокую морфологию. Несмотря на ограниченную глубину, объём воды оценивается примерно в 1 миллиард кубических метров, обеспечивая значительный водоем, поддерживающий уникальные водные экосистемы, влажные зоны и биоразнообразие, включая эндемичные и мигрирующие виды птиц. Гидрологический режим озера сильно зависит от сезонных осадков, интенсивности испарения и гидравлической связи с соседними озерами, что приводит к

выраженной межгодовой изменчивости уровня воды, солёности и площади поверхности. Мелководность и высокая испаряемость делают озеро особенно чувствительным к климатическим изменениям и антропогенным воздействиям, таким как сельскохозяйственный сток, изменение землепользования и забор воды. Помимо гидрологических функций, озеро Абията обеспечивает важные экологические услуги, включая поддержание мест обитания для дикой природы, циркуляцию питательных веществ и сохранение целостности влажных зон. Понимание физических и гидрологических характеристик озера — площади водосбора, поверхности, глубины и объема воды — имеет решающее значение для интегрированного управления водными ресурсами, природоохранного планирования и устойчивого использования его ресурсов. Эти параметры подчёркивают значимость озера Абията для региональной гидрологии и экологии и необходимость внедрения адаптивных стратегий управления для сохранения его экологических функций и социально-экономических преимуществ в условиях текущих климатических и антропогенных изменений.

Озеро Шала (таблице 2.2), расположенное в центральной части Эфиопской Рифтовой долины, представляет собой глубокое пресноводное озеро, обладающее значительным экологическим, гидрологическим и социально-экономическим значением. Озеро находится на высоте примерно 1 550 метров над уровнем моря и входит в состав подбассейна Абиджатта-Шала-Лангано, гидравлически связанного с соседними озерами, такими как Абията и Лангано, что оказывает влияние на гидродинамику системы озёр центральной Рифтовой долины. Площадь его водосборного бассейна оценивается примерно в 2300 квадратных километров и включает сезонные реки, поверхностный сток и подземные притоки, которые регулируют водный баланс и сезонные колебания уровня воды. Общая площадь поверхности озера составляет около 370 квадратных километров. Озеро Шала отличается значительной глубиной по сравнению с другими озерами Рифтовой долины: средняя глубина составляет примерно 14 метров, а максимальная достигает около 266 метров, что делает его самым глубоким озером Эфиопии. Такая большая глубина оказывает влияние на термическую стратификацию,

распределение питательных веществ, процессы осадконакопления и разнообразие водных местообитаний, что, в свою очередь, формирует высокую экологическую продуктивность озера. Общий объём воды оценивается примерно в 37 миллиарда кубических метров, что подчеркивает его значение как крупного пресноводного резервуара, обеспечивающего гидрологическую стабильность региона и поддерживающего доступность воды в ниспадающих районах. Гидрологический режим озера Шала сильно зависит от сезонных осадков, испаряемости и взаимодействия с окружающими озёрами, что приводит к выраженной межгодовой изменчивости уровня воды и химического состава. Помимо гидрологических функций, озеро поддерживает богатое биоразнообразие, включая эндемичные и мигрирующие виды птиц, рыбные популяции и прилегающие водно-болотные угодья, играя ключевую роль в природоохранной деятельности и устойчивом использовании ресурсов. Понимание его физических характеристик — площади водосбора, площади поверхности, глубины и объёма воды — имеет решающее значение для интегрированного управления водными ресурсами, охраны биоразнообразия и устойчивого развития прилегающего региона. В условиях растущего антропогенного давления и климатической изменчивости внедрение адаптивных стратегий управления является необходимым для сохранения экологической целостности озера Шала и обеспечения его социально-экономических преимуществ для местных сообществ и всей системы Рифтовой долины Эфиопии.

Озеро Авасса (таблице 2.2), расположенное в южной части Эфиопской Рифтовой долины, является пресноводным озером, обладающим значительным экологическим, гидрологическим и социально-экономическим значением. Озеро находится на высоте примерно 1 680 метров над уровнем моря и входит в состав подбассейна Авасса-Шала в рамках более крупной системы Эфиопской Рифтовой долины, гидравлически связанного с соседними озерами, что влияет на региональную гидродинамику. Площадь водосборного бассейна озера оценивается примерно в 1 300 квадратных километров и включает несколько сезонных рек и поверхностный сток, которые регулируют водный баланс и способствуют

сезонным колебаниям уровня воды. Общая площадь поверхности озера составляет около 129 квадратных километров, что делает его средним по размеру озером Рифтовой долины и ключевым ресурсом для поддержания местного населения, включая рыболовство, орошение, водоснабжение и туристическую деятельность. Гидрологически озеро Авасса характеризуется относительно мелководной морфологией: средняя глубина составляет около 10 метров, а максимальная достигает примерно 22 метра, что влияет на термическую стратификацию, осадконакопление и круговорот питательных веществ, а также формирует продуктивность водных экосистем и разнообразие местообитаний. Несмотря на умеренную глубину, объем воды оценивается примерно в 1,29 миллиарда кубических метров, обеспечивая важный пресноводный резервуар, поддерживающий региональную доступность воды и экологическую стабильность. Сезонные и межгодовые колебания осадков, испарения и притока приводят к изменению уровня воды, что сказывается на рыболовстве, площади водно-болотных угодий и качестве воды. Помимо гидрологической значимости, озеро Авасса поддерживает богатое биоразнообразие, включая оседлые и мигрирующие виды птиц, эндемичные виды рыб и прилегающие водно-болотные угодья, способствующие устойчивости экосистем и природоохранным усилиям. Понимание физических и гидрологических характеристик озера — площади водосбора, площади поверхности, глубины и объема воды — имеет решающее значение для интегрированного управления водными ресурсами, устойчивого развития рыболовства и охраны экосистем. Учитывая растущее антропогенное давление, включая изменение землепользования, забор воды и климатические колебания, внедрение адаптивных стратегий управления крайне важно для сохранения экологической целостности озера Авасса и обеспечения его социально-экономических преимуществ для местных сообществ и всей Рифтовой долины.

Озеро Абая (таблица 2.2) является крупнейшим по площади водной поверхности озером южной части Эфиопской рифтовой долины и представляет собой важный пресноводный водоём Восточной Африки. Озеро находится на высоте примерно 1 169 метров над уровнем моря. Общая площадь озера составляет

приблизительно 1 140 км², что делает его крупнейшим озером в пределах Южного рифта Эфиопии. Средняя глубина относительно невелика и колеблется в пределах 7,0–8,6 м, тогда как максимальная глубина достигает примерно 24,5 м, что отражает морфологические особенности его обширной, но неглубокой котловины. Объём воды в озере оценивается примерно в 9,82 км³, благодаря чему оно играет значительную роль в региональном водном балансе, несмотря на сравнительно небольшую глубину по сравнению с более глубокими рифтовыми озёрами. Площадь водосборного бассейна озера составляет около 16 342 км². В него входят несколько крупных притоков, включая реки Билате, Гиabo и Гелана, которые обеспечивают основной приток поверхностных вод, формируют гидрологический режим озера и способствуют сезонным колебаниям уровня воды. Существенные объёмы наносов и питательных веществ, поступающие с притоками, влияют на лимнологические характеристики, прозрачность воды и биологическую продуктивность. В целом озеро Абая представляет собой важный элемент гидрологической системы южного сегмента Главного Эфиопского рифта, поддерживая региональное биоразнообразие, рыбные ресурсы и хозяйственную деятельность прибрежного населения.

Озеро Чамо (таблица 2.2) в южной части Эфиопии, расположенное в Главной рифтовой долине к югу от озера Абая и города Арба-Минч, представляет собой крупный пресноводный водоём с разнообразной гидрологией и биологией. По данным различных научных источников, площадь водной поверхности озера варьируется в зависимости от методики измерения и гидрологических условий, и её оценивают примерно в 317 км² по официальным статистическим данным, хотя некоторые исследования приводят оценки до 551 км², отражая сезонные и пространственные изменения уровня воды. Озеро неглубокое: его максимальная глубина достигает около 14,2 м, а средние значения глубин зачастую находятся в более низком диапазоне, что характерно для озёр рифтовых низменностей с широкими плоскими котловинами. По оценкам гидрологических обзоров, общий объём воды в озере составляет порядка 3,24 кубических километра, что обусловлено сочетанием умеренной глубины и относительно значительной

площади зеркала. Озеро принимает воду от нескольких притоков, включая реку Кулфо и ряд мелких сезонных ручьёв, а также частично получает сбросы из озера Абая через связанные водотоки, что формирует его гидрологическую динамику. Водосборный бассейн озера охватывает значительную территорию — по некоторым оценкам до около 18 575 км², включая прилегающие высокогорья и рифтовые склоны, которые генерируют поверхностный сток и осадки, пополняющие его ресурсы. Эта крупная дренажная площадь отражает экологическую значимость озера и его роль в региональных водных ресурсах, биоразнообразии, а также в локальном экономическом использовании через рыболовство и другие виды хозяйственной деятельности.

Озеро Чев-Бахир (таблица 2.2), исторически также известное как озеро Стефани, представляет собой бессточное солёное озеро, расположенное на юге Эфиопии в пределах Восточно-Африканской рифтовой системы, вблизи границы с Кенией. Озеро находится на высоте примерно 570 метров над уровнем моря. Оно относится к эндорейному бассейну, поскольку не имеет стока, а поступающая вода теряется преимущественно за счёт испарения. Основным источником питания служит река Вейто (Галана-Саган), однако гидрологический режим озера отличается высокой изменчивостью, что связано с межгодовой и многолетней климатической вариабельностью региона. Площадь зеркала озера существенно колеблется: в периоды повышенной влажности она может достигать примерно 2 000 км², тогда как в засушливые фазы водоём сокращается до системы болот, солончаков и пересыхающих лагун. Максимальная зафиксированная глубина открытой воды в XX веке составляла около 7,5 м, что позволяет классифицировать Чев-Бахир как мелководное озеро. Площадь водосборного бассейна охватывает значительную территорию южной части рифтовой долины и оценивается более чем в 1 000 км², при этом реальный гидрологический вклад притоков зависит от интенсивности сезонных осадков. Объём воды также подвержен значительным колебаниям: в современных условиях он относительно невелик из-за малой глубины, однако палеогидрологические реконструкции указывают, что в более влажные климатические эпохи озеро достигало существенно больших уровней

заполнения, потенциально аккумулируя десятки кубических километров воды, вплоть до приблизительно 80 км^3 при максимальных трансгрессивных фазах. Таким образом, Чев-Бахир представляет собой динамичную лимнологическую систему, чувствительную к климатическим изменениям и играющую важную роль в реконструкции палеоклиматической истории Восточной Африки.

Озеро Хайк (таблица 2.2) — это пресноводное высокогорное озеро, расположенное на севере Эфиопии в регионе Амхара на высоте около 1 900 метров над уровнем моря. Оно представляет собой типичную закрытую озёрную систему без поверхностного стока. Водораздел озера охватывает площадь около 83 км^2 , из которой приблизительно 23 км^2 занимает само озеро, что делает его относительно небольшим по сравнению с другими озёрами Эфиопии. Морфометрические исследования показывают, что Хайк — озеро с глубокой котловиной и сложным подводным рельефом: средняя глубина составляет около 37 метров, а максимальная достигает 81,41 метров, что характерно для озёр, сформированных в тектонических и вулканических условиях. Сочетание глубины и площади поверхности обеспечивает объём озера в пределах $81,41 \text{ км}^3$, что свидетельствует о значительной водоёмкости при умеренной площади водной поверхности. Гидрологически озеро питается за счёт сезонных притоков и постоянной реки Анкеркеха, а потеря воды происходит преимущественно за счёт испарения и фильтрации, что делает его чувствительным к климатическим изменениям и антропогенной трансформации водосбора. Благодаря своим морфометрическим и гидрологическим особенностям — умеренной площади, значительной глубине, чётко определённой бассейну и внушительному объёму — озеро Хайк представляет важный лимнологический объект в эфиопском нагорье. Оно играет существенную роль в экологической устойчивости региона, водоснабжении и социально-экономических нуждах, а также служит важным природным архивом для палеоклиматических и экологических исследований Восточной Африки.

Озеро Ашенге (таблица 2.2) — тектонически сформированное пресноводное бессточное озеро, расположенное в южной части региона Тыграй в Эфиопии на высоте приблизительно 2 440 м над уровнем моря. Оно занимает межгорную

вулканическую котловину и не имеет поверхностного стока; его водный баланс определяется притоком сезонных водотоков с окружающих возвышенностей, атмосферными осадками, подземной фильтрацией и испарением. Общая площадь озера составляет приблизительно 140 км². Максимальная глубина достигает примерно 25,5 м, при этом средняя глубина несколько ниже, что указывает на относительно компактную, но достаточно выраженную котловину. Площадь водосборного бассейна оценивается приблизительно в 129 км² и включает прилегающие высокогорные территории, с которых поверхностный сток поступает в озеро в период дождей. Отсутствие постоянного стока делает систему гидрологически замкнутой и чувствительной к климатической изменчивости. Объём воды в озере оценивается ориентировочно в пределах 0,25–0,50 км³, что соответствует его умеренной площади и сравнительно значительной глубине. В совокупности морфометрические и гидрологические характеристики — ограниченная площадь зеркала, умеренная глубина, чётко очерченный водосбор и замкнутый водный баланс — позволяют рассматривать озеро Ашенге как важный лимнологический объект северных Эфиопских нагорий. Оно представляет интерес как с точки зрения региональной гидрологии и экологии, так и в контексте палеоклиматических исследований, поскольку донные отложения озера служат ценным архивом изменений климата и окружающей среды в северо-восточной Африке.

Озеро Бесека (часто русскоязычные источники пишут как Бэсэка-Хайк) (таблица 2.2) — это мелководное, эндорейное солёное озеро в центральной части Эфиопии на территориях Центрального Рифтового Водоёма в регионе Оромия, расположенное на высоте около 1 900 м над уровнем моря и не имеющее постоянного природного стока, где водный баланс определяется притоком грунтовых вод и испарением в условиях жаркого климата. Его современная площадь поверхности заметно увеличилась за последние десятилетия из примерно 3 км² в середине XX в. до около 48,5 км² к началу XXI века, что отражает динамичность гидрологической системы и влияние хозяйственной деятельности и климатических перемен на режим озера. По морфометрическим данным, средняя

глубина озера оценивается примерно в 7,5 м, а максимальная глубина достигает примерно 13 м, что говорит о том, что озеро остаётся сравнительно неглубоким водоёмом с относительно пологими берегами характерной рифтовой котловины. Объём воды, аккумулируемый в озере при таких параметрах, был оценён в разных исследованиях примерно 0,28 м³ в середине 2010-х годов, что делает его водоёмом умеренного размера в сравнении с крупными озёрами Эфиопского Рифта, но значимым в локальном масштабе. Подпитываемый как поверхностными, так и подземными источниками, водосборный район озера составляет порядка ≈420 км², включающий прилегающие равнинные участки рифтовой долины, откуда поступает сезонный сток в периоды дождей. В совокупности эти морфометрические и гидрологические характеристики — ограниченная площадь, умеренная и незначительная глубина, определённый водосбор и средний объём — отражают природно-географическую специфику Бэсэка-Хайк как динамично изменяющегося эндорейного озера в условиях изменений климата и антропогенного воздействия в Эфиопском Рифтовом поясе.

В целом, рассмотренные озёра Эфиопии демонстрируют значительное морфометрическое и гидрологическое разнообразие, отражающее сложную тектоническую структуру Восточно-Африканской рифтовой системы и контрастность климатических условий страны. Крупные водоёмы, такие как Озеро Тана, играют ключевую роль в формировании стока Голубого Нила и обеспечении региональной водной безопасности, тогда как рифтовые озёра — Озеро Зивай, Озеро Лангано, Озеро Шала, Озеро Абията, Озеро Авасса, Озеро Абая и Озеро Чамо — характеризуются различной глубиной, площадью и объёмом воды, определяющими их экологическую продуктивность и устойчивость. Высокогорные и эндорейные системы, включая.

На основе современных исследований (например, Астраханцев, 1971; Степанов, 1981; Li et al., (2021); Rieß & Dietrich, (2025) и других работ по структурной гидрогеологии) установлено, что разломные зоны, особенно в условиях кристаллических и вулканических пород, часто формируют высокую вторичную пористость (трещины, системы разломов), функционируя как основные

каналы фильтрации и питания подземных вод. Вместе с тем разломы могут выполнять и барьерную функцию, особенно в случаях, когда они сопоставляют водоносные горизонты с непроницаемыми толщами, блокируют латеральный поток и вызывают восходящую фильтрацию, либо заполнены материалом с низкой проницаемостью. Геологические структуры, определяющие ёмкость и условия накопления подземных вод (строение водоносных подразделений), включают складчатые формы, где антиклинали и синклинали контролируют распределение и направление подземных вод. В складчато-разломных горных районах деформированный коренной фундамент формирует сложные, пространственно неоднородные системы фильтрации, разделяя водоносные горизонты на отдельные, слабо связанные между собой гидрогеологические подблоки. Тектонические трещины и системы кливажа также играют важную роль: например, на Лёссовом плато они служат основными путями инфильтрации, обеспечивая быстрое проникновение поверхностных вод в подземную среду (Huang et al., 2020; Li et al., 2021; Rieß & Dietrich, 2025). Эти условия определяют направления и интенсивность подземных водных потоков, поскольку трещины и разрывные нарушения в горных породах контролируют пути циркуляции воды на различных пространственных распределениях, а региональная геологическая структура (Li et al., 2021; Rieß & Dietrich, 2025).

Сложные тектонические элементы такие как разломы, системы трещин и складчатые структуры создают вторичную пористость в породах, которые в ином случае обладают низкой проницаемостью, включая вулканические формации. Именно вторичная пористость определяет зоны аккумуляции подземных вод, направление их движения и места разгрузки (Астраханцев, 1971; Степанов, 1981; Teye, 2007; Demlie et al., 2007; Mihret & Wuletaw, 2025). Таким образом, рифтогенный геодинамический режим развития региона предопределяет, прежде всего, современный структурный план, являющийся, в свою очередь, основой формирования гидрогеологических условий. Применительно к основным геоструктурным элементам в регионе отчётливо выделяются три типа гидрогеологических структур, контрастно различающихся по условиям

формирования и распределения подземных вод: рифтовые впадины – гидрогеологические бассейны; «плечи» рифта (горное обрамление) – гидрогеологические массивы; рифтогенные разрывные тектонические нарушения – обводненные разломы (Астраханцев, 1971; Степанов, 1981; Stepanov, 1985; Stepanov, 1988; Степанов и др. 1989; Диденков 1998).

Обобщённая характеристика подземных вод в структурах главный эфиопский рифтовой зоны приведена в таблице 2.3 и рисунок 2.14. Для обоснования особенностей формирования ресурсов и состава подземных вод внутри выделенных структур представляется возможным произвести более детальное гидрогеологическое районирование. Критериями такого районирования для бассейнов выступают их открытость (или её отсутствие) в сторону Восточно-Африканской рифтовой системы, распространение поверхностных вод во впадинах, наличие интрузивных тел в разрезе осадочных отложений, неплотные осадки, а также различный характер самих водовмещающих пород; гидрогеологические массивы занимающие площади развития горноскладчатых сооружений и вулканических структур, представленные известняками, доломитами, интрузивными и эффузивными. Обводненные разломы сформировавшиеся в основном в пределах площадей развития карбонатных отложений, в соответствии с глубиной заложения выделяются глубокие и приповерхностные структуры.

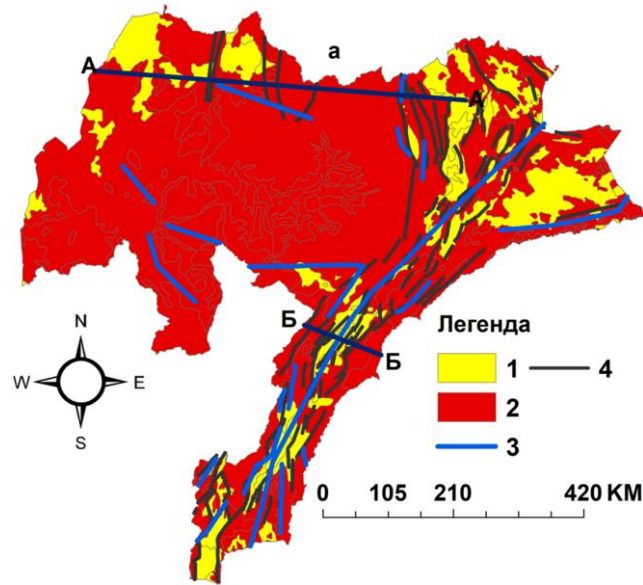
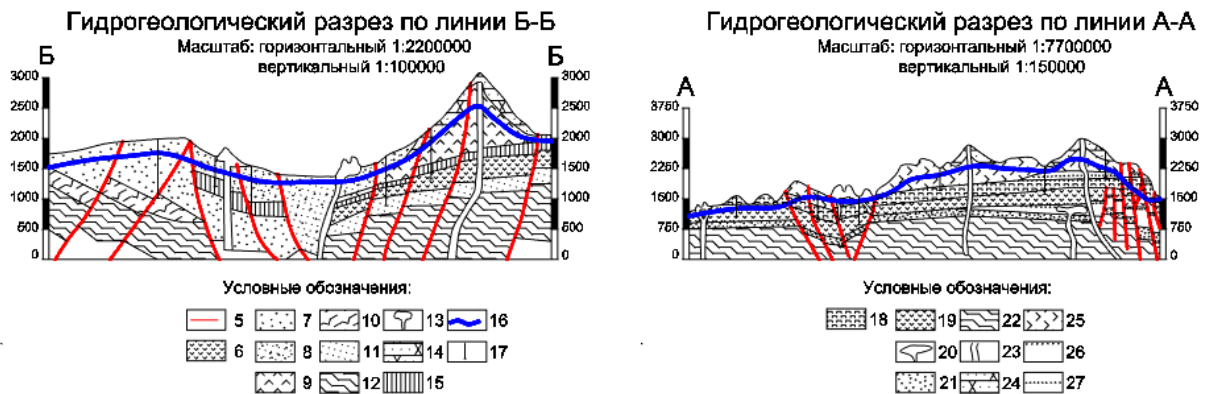


Рисунок 2.14- Структурно-гидрогеологическая схема Центральной Эфиопии:
 Схема не совсем соответствует геологической карте, особенно –
 гидрогеологический бассейн в рифтовой долине
 1- гидрогеологические бассейны; 2- гидрогеологические массивы; 3- обводненные
 разломы; 4- разломы.



Гидрогеологические разрезы: 5. Разломы; 6. Базальты Арусси и Бейл; 7. Вулканыт Джимы; 8. МЕР игнимбриты; 9. МЕР внеосевых щитовых вулканов; 10. Омо-базальты; 11. Палеозойские и мезозойские осадочные породы; 12. Протерозойский фундамент; 13. Четвертичные вулканы; 14. Риолитовые заглушки и купола; 15. Волегские базальты; 16. Уровень грунтовых вод (УГВ); 17. Гидрогеологические скважины; 18. Базальты Айба; 19. Базальты Ашанги; 20. Межосадочные вулканыт; 21. Палеозойские и мезозойские осадочные породы; 22. Протерозойский фундамент; 23. Четвертичные вулканы; 24. Риолитовые пробки и купола; 25. Темаберские базальты; 26. Палеозойские осадочные породы; 27. Межосадочные осадочные породы.

Таблица 2.3- Основные характеристики гидрогеологических структур

Гидрогеологические структуры		Водовмещающие породы	Подземные воды							
			Основные типы	Глубина вскрытия, м	Уровень ПВ, м	Дебиты родников (макс. знач.), л/с	Удельные дебиты скважин, л/с	Водопроницаемость, м ² /сут	Преобладающая минерализация, Ppm	Осредненный химический состав подземных вод в виде формулы Курлова
Гидрогеологические массивы		занимают площади развития горноскладчатых сооружений и вулканических структур, представлены известняками, доломитами, интрузивными и эффузивными образованиями	трещино-грунтовые	1-150	0-80	20	1-95	0.5-85	0.1-754	$M_{0.38} \frac{HCO_3 80 SO_4 20}{Ca 70 Mg 30} pH 7.2$ (2.1)
Гидрогеологические бассейны		приурочены к пониженным участкам рельефа и долинам рек, сложены преимущественно рыхлыми четвертичными отложениями	порово-пластовые	1-100	1-60	120	1-150	1-1400	16-4465	$M_{0.45} \frac{HCO_3 75 SO_4 25}{Ca 60 Mg 40} pH 6.3$ (2.2)
Обводненные разломы	Приповерхностные	выделены по всей исследуемой территории в пределах площадей развития вулканических и карбонатных пород	трещино-жилы и трещино-карстовые	200-400	150-250	1045	22-432	700-3012	50-4719	$M_{0.6} \frac{HCO_3 56 SO_4 44}{Ca 52 Mg 48} pH 6.8$ (2.3)
	Глубокие		до 2000	до +300	400	0.1-0.33		118-64267	$M_{0.95} \frac{SO_4 53 HCO_3 47}{Mg 51 Na 49} pH 5.3$ (2.4)	

Химический состав подземных вод региона, исключая трещинно-жильные воды глубоких разломов, характеризуются в основном как гидрокарбонатно-кальциевый, гидрокарбонатно-кальциево-магниевый.

Гидрогеологические бассейны, приуроченные к пониженным участкам рельефа и долинам рек, сложены преимущественно рыхлыми четвертичными отложениями, а также вулканогенными песчаниками и конгломератами рифтовых зон; обводненность водовмещающих отложений зависит от строения рыхлых образований. Подземные воды (ПВ) в обводнённых породах различного типа представляют собой водные ресурсы, приуроченные к геологическим образованиям с различными физико-механическими и гидродинамическими свойствами. В зависимости от литологического состава, степени трещиноватости и пористости пород подземные воды могут накапливаться и циркулировать в поровых, трещинных и карстовых коллекторах., в которых водоносность обусловлена вторичной пористостью. Тип пород определяет условия питания, хранения и разгрузки подземных вод, их химический состав, дебиты водозаборов и степень уязвимости к антропогенному воздействию.

В гидрогеологических бассейнах Центральной Эфиопии, сформированных в результате деятельности рек и их боковых оврагов, порово-пластовые воды в рыхлых отложениях (песок, гравий, галька) и трещинно-пластовые воды в скальных (сцементированных породах: песчаник, например). Дебиты скважин достигают 0,5-20,0 л/с; удельные дебиты при откачках воды из колодцев – 150 л/с. Глубина залегания уровня воды обычно 1–60 м, глубина скважин 1–100 м. Мощность реголитового водоносного горизонта варьирует от 0 до 400 м. Измеренные значения водопроницаемости варьируют в пределах 1–700 м²/сутки (рисунок 2.14 а; таблица. 2.3). Трещинные подземные воды гидрогеологических бассейнах характеризуются содержанием общего количества растворённых веществ (TDS) с минерализацией от 16 до 4465 ppm (рисунок 2.14; разрезы (А-А и б-б); таблица 2.3). Питание вод преимущественно атмосферное.

Гидрогеологические массивы, приуроченные к горным сооружениям центральной части Эфиопии хребта и его отрогов, характеризуются

распространением преимущественно трещинно-грунтовых вод в зоне выветривания магматических и метаморфических образований докембрийского и протерозойского возрастов. Дебиты скважин достигают 0.13-5 л/с; удельные дебиты при откачках воды из колодцев –20л/с. Глубина залегания уровня воды обычно 0–80 м, глубина скважин 60–150 м. Мощность реголитового водоносного горизонта варьирует от 0 до 1000 м (рисунок 2.14 а; таблица 2.3). Измеренные значения водопроницаемости варьируют в пределах 0.5–85 м²/сутки (рисунок 2.14 а; таблица 2.3). В годовом цикле отмечается резкое увеличение дебитов в весенний и начале летнего периодов, а также их значительное снижение, в ряде случаев до полного прекращения разгрузки подземных вод, в осенне – зимний периоды. Описанная динамика отчетливо проявляется у естественных выходов в основании правого борта распадка Базовый. Трещинные подземные воды гидрогеологических массивов характеризуются содержанием общего количества растворённых веществ (TDS) с минерализацией от 0.1 ppm до 754 ppm (рисунок 2.14; разрезы (А-А и б-б); таблица 2.3). Питание вод преимущественно атмосферное. Практическое использование возможно лишь в отдельные сезоны года.

Подземные воды обводнённых разломов формируются в трещинных коллекторах дизъюнктивных дислокаций, включающих, в зависимости от геологического строения пород, в которых они сформированы, трещинно-жильные и трещинно-карстовые подземные воды. В пределах исследуемой территории обводнённые разломы преимущественно сформировались в пределах площадей развития карбонатных отложений и интрузивных образований (Platt & Wright, 2023). Такие разломы могут служить как мощными каналами разгрузки вод, так и сложными зонами циркуляции, существенно влияя на динамику и интенсивность подземного стока в вулканических породах мощность водоносных подразделений варьирует от 50 до 1000 м, глубина залегания уровня воды от 150 до 250 м и глубина скважин обычно 200–400 м для приповерхностные обводнённые разломы. Дебиты скважин достигают до 5- 150 л/с, проводимость составляет 1400 м²/сут- 3012 м²/сут и характеризуются глубиной обводненные разломы до 300 м (рисунок 2.14 а; таблица 2.3). Дебиты естественных водопроявлений достигают 1 045 л/с в пружины

Дебретабора. Трещинные подземные воды гидрогеологических обводнённые разломы характеризуются содержанием общего количества растворённых веществ (TDS) с минерализацией от 50 до 4 719 ppm (рисунок 2.14; разрезы (А-А и б-б); таблица 2.3) для приповерхностные и от 118 до 64 267 ppm для глубокие обводненные разломы.

Таблица 2.4- Качественная характеристика основных водопроявлений для центральной части Эфиопии

Наименование, местоположение и номера точек наблюдения			Гидрогеологические массивы																
			Компоненты, ppm															pH	TDS
			Нестойкие					Макрокомпоненты											
Lat	Long	NH ₄	NO ₃	F	I	Li	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	CO ₂	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SiO ₂			
Abaya	6.6071	37.8938			16.1		0.46	1	0.5	1315	200	1821			102	765	428	9.6	10
Abaya	6.6104	37.9006			49.1			10	20	37	19	84			0	214		8.7	5.25
Highlands	10.6351	39.9225	0.5		13	0.03	<0.05	10	2	238	10	317	<LD	5	191	51	45	5.9	8.25
Highlands	10.6351	39.9225	0.57					10	1	250	10	323	<LD	9	211	50	44	5.8	8
Highlands	10.6318	39.9275	0.5		10	0.03	<0.05	17	4	200	10	316	<LD	10	173	42	45	5	7.75
Highlands	10.92	39.78			2	0.01	<0.05			0	0	0				0	0	4.5	1.6
Abaya	9.0111	40.389			1.3			16.6	149.2	54.3	16.5	189	84		58	67.9	46.7	3.5	7.2
Abaya	6.1246	37.6336			66		1.39	12.1	3	240	19	412				0	48	2.8	8.6
Abaya	6.5278	37.8333	65	0.44				16	4.3	206	14.5	477	26		15	60	19	2.8	9.2
Highlands	11.13	39.63		4.2	11.2			40.2	7.9	16.6	0.4	213			4.4	4	59.6	1.9	7.45
Highlands	11.0864	39.7317			10			75.3	32.1	32	1.3	464			3.3	5.3	58	1.8	7.1
Highlands	11.0864	39.7317		6.7	2.78			60.4	24.8	37	2.3	421			12.6	16.1	47.5	1.8	8.2
Highlands	9.85	39.73		5.8	4			13.4	2.4	5.2	1	60			1.1	1.3	50.6	1.8	6.85
Highlands	9.8704	39.7546		2.7	0.8			15	3.8	5.2	1	85.4			0.9	0.9	45.4	1.7	7.4
Highlands	11.3167	39.7333		0.65	0.58		<0.1	23	38	50	5	373			0.4	30	5		8.11
Highlands	11.3167	39.7333		0.68	0.38		<0.1	22	40	50	4.1	327	10		0.8	29	7		8.54

Продолжение таблицы 2.4

Highlands	9.0438	38.9011		<LD	1.9		<0.3	17	3	77	22	226	<LD		30	33	0		7	
Highlands	9.2994	38.7396			2	0.01	0.42			0	0	0				0	0		0.1	
Highlands	9.6	41.85		320	0.6			170	46	40	0	240	180		<LD	68	0		2	
Highlands	9.6	41.85		<LD	0.6			365.5	98.3	45	0	427	294		<LD	880	0		754	
Abaya	6.3131	37.7994						14	3	188	21	437			43	48	39		222	
Highlands	9.1647	38.7672		<LD				6	3	55	1	70	24		26	26	0		8	
Наименование, местоположение и номера точек наблюдения			Гидрогеологические бассейны																	
			Компоненты, ppm																	ppm
			Нестойкие							Макрокомпоненты										
	Lat	Long	NO ₃	HBO 2	F ⁻	Fe	Li	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃	CO ₂	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SiO ₂	pH	TDS	
Corbetti	7.2531	38.455			180	0.4	0.6			0	0	0				0.1	0		18	
Corbetti	7.2303	38.3795	9	5				3	0.2	1250	75	1458	522		71	299	409	9.3	26	
Corbetti	7.2322	38.3804			46	0.6	0.03			0	0	0				0	0		19	
Corbetti	7.1719	38.4675			58	0.05		2.21	0.11	1235	40	0			30	558	0	8.0	4137	
Aluto-Langano	7.7956	38.7274		0.5				1	0.1	85	20	177	18		20	206	29	9.2	366.6	
Aluto-Langano	7.7884	38.7963			38			0.44	0.08	748	173	0			96	250	0	7.0	3385	
Aluto-Langano	7.7884	38.7963		14	80.3			1	0.1	675	157	830	163		282	310	556	9.3	3026.1	
Rift Valley	8.4076	39.0212			2.55			34	8	29	7	0		216	6	11	37		30	
Tendaho	11.737	41.0683		1	2.4			11	4	84	9	0		180	26	30	24		22	
Tendaho	11.6957	41.1169						27	6	49	10	223	<LD	8	<10	33	0	7.6	16	
Meteka	8.4795	39.2316		1.4	0.7			21	4	25	3	144	<LD	8	<10	11	28	7.1	17	
Corbetti	7.0181	38.4658						11	19	233	23	905		688	19	28	80		69	
Abaya	7.3198	38.0759			9.25			14	4	23	12	0		129	2.5	6	36		70	

Продолжение таблицы 2.4

Abaya	6.8198	38.0916						14	2	213	27	0		548	9	33	107		80		
Aluto-Langano	7.7884	38.7963	12.4	31.36	91			0.1	<0.1	1170	25 5	1543	284		25	553	993	9.1	30		
Aluto-Langano	7.7898	38.805		32	27.8	0.12	1.3	4	0.5	1200	21 0	1818	781		175	781	321	8.4	21		
Aluto-Langano	7.7934	38.7985		30	36.6	3.3	0.0 2	6	0.2	934	15 0	1442	175		204	454	418	9	3859.2		
Aluto-Langano	7.7934	38.7985	9.3	49.5	90.2			0.1	<0.1	1150	27 8	1438	203		169	900	605	9	28		
Aluto-Langano	7.7934	38.7985	20.82	55.94	88.5			0.2	<0.1	1340	34 0	748	625		207	900	1048	9.8	29		
Aluto-Langano	7.7934	38.7985	19.94	57.52	83			0.1	<0.1	1400	35 0	786	656		205	936	1107	9.8	88		
Aluto-Langano	7.7896	38.7859		23				1.28	0.23	1139	13 4	0			39	385	0		4465		
Aluto-Langano	7.7896	38.7859		23				8	0.9	684	81	1489	99		135	325	210	8.8	3257.9		
Aluto-Langano	7.8018	38.792			22			1.4	0.1	1038	16 3	0			11	416	0	6.7	4216		
Aluto-Langano	7.8018	38.792		31	58			6	0.4	670	53	536	107		73	550	186	9.1	2234.4		
Наименование, местоположение и номера точек наблюдения			Обводненные разломы																		
			Компоненты, ppm																		ppm
			Нестойкие							Макрокомпоненты											
	Lat	Long	NO3	F	Fe	Li	B	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	CO ₂	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SiO ₂	pH	TDS		
Abaya	6.6103	37.9003	1.3	14			2.8 7	0.2	<0.1	1370	17 4	1069	596		89	762	433	9.5	2860		
Abaya	6.6103	37.9003		19				0.2	0.1	1327	17 4	1667	728		89	734	433	9.5	4719		
Abaya	6.6104	37.9006					2.8	0.4	0.1	1370	18 7	0			0	412		8.6	3100		
Aluto-Langano	7.6089	38.6012						8.5	6	3000	75 3	0			67.4	1500	130		8358		

Продолжение таблицы 2.4

Aluto-Langano	7.6089	38.6012						3.5	0.81	3220	40 3	0				1420	55.65		8288
Aluto-Langano	7.6089	38.6012		157				1	0.5	4700	25 0	2367	310.5		148	2095	156	9.6	13480
Highlands	8.8035	39.0833						18	30	2050	0	0		3000		540	0		6760
Corbetti	7.4045	38.421		276				2	0.3	6700	20 5	0			200	3191	0	9.4	23652
Highlands	9.1925	39.0628		0.25				18.4	1.8	6.7	1.6	89	16		1.8	2.1	38.4	7.2	187.5
Aluto-Langano	7.6089	38.6012		190				0.7	0.2	9900	37 4	0			480	4219	0	10.1	34644
Aluto-Langano	7.4894	38.744		1		0.04		10.01	2.32	10	6	0			3	7	0	6.8	118
Abaya	6.8731	37.7714		4		0.18		2.8	0.74	6	5	12			0.8	3	0	7.0	310
Aluto-Langano	7.52	38.772	0.5	2.1	<0.00015			45.7	7.7	18	6	0			<LD	2	0	7.6	323
Corbetti	7.403	38.424	<LD	0.99	<0.1	<0.1		<LD	<LD	1772 5	11 09	0			288	6330	0	10.1	64267
Aluto-Langano	7.487	38.743	24	1.3	0.093			22.7	2.1	17	5	0			4.8	5	0	6.6	137
Aluto-Langano	7.482	38.749	0.4	2	0.076	0.006		24.7	1.1	33	2	0			0.8	1	0	8.3	211
Highlands	9.0135	38.1484	12.1	2		<0.0 5		48	16.6	17	4	268.4			3.6	6.2	0	7.7	60
Rift Valley	8.3833	39.0833	12.1	0.7				48	17	16.6	4	268.4			3.6	6.2	0	7.7	375.9
Aluto-Langano	8.038	39.015	1.6	4.1	0.099			13.5	1.9	30	14	0			2	1	0	7.6	204
Aluto-Langano	7.6809	38.6637								0	0	0				0	0	8.8	50
Abaya	6.5648	37.8246		2.9		0.25		0.6	0.2	6	21	0				0	4	8.2	154
Corbetti	7.152	38.395	<LD	7.1	0.145	0.056		17	5.6	307	12	0			7.8	17	0	8.1	1252
Aluto-Langano	7.6167	38.6	48.7	384	1.752	0.073		0.1	0.3	1300 0	50 0	7930	8760	<LD	70	5520	223	9.7	18700

С точки зрения химического состава воды характеризуются в основном как гидрокарбонатно-кальциевые (Ca-HCO_3), гидрокарбонатно-кальциево-магниевые (Ca-Mg-HCO_3), гидрокарбонатно-натриевым (Na-HCO_3), сульфатно-натриевым/калиевые ($\text{SO}_4\text{-Na/K}$), хлоридно-натриевые (Cl-Na); гидрокарбонатно-хлоридно-натриевый ($\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$); хлоридно-кальциевый (Cl-Ca) и хлоридно-натриевые/калиевым (Cl-Na/K) типами вод и др., с минерализацией до 0,23–0,33 г/дм³ (таблицы 2.4). Состав зависит от глубины формирования разломов (приповерхностные или глубокие) и пород, к которым они приурочены. Питание подземных вод осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков, поверхностных вод, а в ряде случаев — за счёт разгрузки трещинно-жильных вод из водоносных разломов. Воды четвертичных отложений вскрываются скважинами и широко используются местным населением крупных городов, включая Аддис-Абебу, а также сельских поселений для хозяйственно-питьевого водоснабжения, орошения, животноводства, промышленных и других нужд. Наиболее водообильными структурами в районе являются зоны обводнённых разломов, включающие трещинно-жильные и трещинно-карстовые подземные воды. Дебиты источников, дренирующих эти структуры, достигают 1 045 л/с в источниках Дебретабора Бахир-Тимкет.

Структурно-гидрогеологический анализ распределения и формирования подземных вод в конечном итоге позволяет обосновать целенаправленное проведение поисково-разведочных работ по выявлению и промышленной оценке месторождений подземных вод, а также разработку программ мониторинговых исследований и природоохранных мероприятий, направленных на сохранение наиболее уязвимого компонента геологической среды региона Восточной Африки его уникальных водных ресурсов, пространственно приуроченных в основном к зоне Главного Эфиопского рифта.

Выводы. Анализ имеющегося материала показал, что наиболее значимые ресурсы подземных вод, пригодных для разноцелевого водоснабжения, приурочены к зонам приповерхностных обводнённых разломов. Таким образом,

формирование природных условий Эфиопии, включая водные ресурсы, обусловлено структурно-тектоническим развитием зоны Восточно-Африканского рифта. Основные факторы, влияющие на формирование поверхностных и подземных вод: климатические условия (температура, осадки, эвапотранспирация и др.), рельеф, плотность речной сети, структурно-тектонические особенности и геологические характеристики исследуемого региона.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ИНДЕКСА ВОДООБИЛЬНОСТИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ

Разработка комплексного индекса водообеспеченности требует анализа множества природных и антропогенных параметров. Этот процесс, как правило, включает использование факторного анализа, современных статистических моделей и методологических рамок. Такой подход позволяет не только отразить физическую доступность воды учитывая гидрологические, климатические, геологические и ландшафтно-экологические условия, но и обеспечить упрощение и структурирование сложной многомерной информации (Mandal et al., 2016).

Преобразование разнообразных входных данных позволяет исследователям более эффективно оценивать взаимодействия между переменными, выявлять ключевые факторы, определяющие водообеспеченность, и обнаруживать пространственно-временные закономерности, которые могли бы оставаться незамеченными при использовании разрозненных данных. Кроме того, тщательная и методически строгая конструкция показателя повышает сопоставимость результатов в разных регионах и временных периодах, способствует оптимизации поисково-разведочных работ на воду и научно обоснованному управлению водными ресурсами, улучшает возможности мониторинга гидрогеологических изменений в условиях климатической изменчивости, роста населения и усиления антропогенного воздействия.

Исходные данные были получены из различных источников, в том числе, информация о количестве осадков, температуре, карты различного содержания, а также данные по водозаборным скважинам были получены из министерств и институтов Эфиопии.

Составленная база данных включала основные блоки: пространственную привязку точки наблюдения (ТН), геология, состав пород, дебит скважин, тип ландшафта, количество осадков, высота над уровнем моря, температура, испаряемость (эвапотранспирация), плотность дренажной сети, плотность разломов, расстояние до главной реки, расстояние до ближайшей реки, плотность линеаментов и уклон. Общий объём базы составил 1450 точек наблюдений и 14

показателей, систематически объединённых в пять тематических групп. К ним относятся параметры расположения скважин (идентификатор, широта, долгота и высота), характеристики дебита скважин, климатические переменные (осадки и испарение), геологические и геоморфологические характеристики, а также литологическая информация (геологический возраст, плотность дренажной сети, плотность линеаментов, плотность разломов и тип пород). Кроме того, учитываются ландшафтные характеристики, что обеспечивает комплексную основу для пространственного и экологического анализа (таблица 3.1).

Таблица 3.1- Структура исходной базы данных и её фрагмент

Расположение скважины				Геологические, геоморфологические данные и литология						Ландшафты	Водозаборные скважины	Климатические условия	
Well_ID	широта	долгота	Рельеф	Геологический возраст	Плотность дренажа	Разломов	Расстояние до основной речной системы	Плотность линейамента	Состав горной породы	Ландшафт	Скважина, Q, l/s	Испаряемость, ET, mm	Атмосферные осадки, (mm)
Well-1	8.936272	38.67818	2258.13	Nn+Nc	0.224	0.426	26537.58	0.422544	Basalt, Granite	Bare ground	3	2.36314	1613.742
Well-2	8.574314	39.11545	1767.58	Q	0.255	0.361	666.9991	0.361279	Sedimentary	Agriculture +Built Area	3	2.548269	1342.545
Well-3	7.844617	38.1877	2083.5	Qd+Nc	0.218	0.38	39724.7	0.383252	Sedimentary	Bare ground	4	3.218106	1835.804
Well-100	10.11067	35.07383	1132	gd	0.216	0.512	9932.572	0.511528	Basalt, Granite	Trees	7.1	2.356162	1606.805
Well-1000	8.996748	38.77801	2315	Nn	0.22	0.48	36996.09	0.480879	Basalt, Granite	Bare ground	1.13	2.569833	1647.709
Well-1100	9.005334	38.768	2351.28	Nn	0.218	0.487	37332.23	0.487702	Basalt, Granite	Bare ground	2.19	2.543529	1651.894
Well-1200	10.71428	37.05923	2088.05	Qb1	0.279	0.3	25914.44	0.294316	Sedimentary	Agriculture +Built Area	14	2.821405	1991.635
Well-1300	9.132597	38.9919	2526.02	Nn	0.216	0.558	38021.95	0.557139	Basalt, Granite	Agriculture	2.6	2.761	1539.251
Well-1450	8.951415	38.69215	2250.53	Nn	0.22	0.441	28674.4	0.437655	Basalt, Granite	Rangeland	5	2.390547	1625.182

Факторы, определяющие формирование и питания ресурсов подземных вод, представляют собой сложный комплекс взаимосвязанных природных и антропогенных параметров. С климатической точки зрения осадки, температура и испарение формируют базовый водный баланс между притоком влаги и атмосферными потерями, тем самым определяя объём воды, доступной для инфильтрации. Топографические и геоморфологические характеристики такие как абсолютные отметки, полученные по цифровой модели рельефа (DEM), крутизна и экспозиция склонов, и геоморфологические типы играют ключевую роль в регулировании скорости поверхностного стока, инфильтрационного потенциала и формировании зон питания и разгрузки подземных вод.

Геологические и гидрогеологические параметры образуют ещё одну критически важную группу факторов. Геологическое строение и литологический состав пород определяют ёмкость водоносных горизонтов и их фильтрационные свойства. Структурные элементы, такие как степень трещиноватости (густота линеаментов), плотность речной сети и концентрация тектонических разломов влияют на подземный сток и пополнение ресурсов подземных вод. Свойства зоны аэрации в особенности текстура, структура, пористость и проницаемость контролируют скорость вертикальной фильтрации, что, в свою очередь, формирует глубину, объём и устойчивость питания водоносных горизонтов.

Антропогенные факторы, включая урбанизацию, сельскохозяйственную деятельность, забор подземных вод и изменение характера землепользования, всё более существенно модифицируют естественные процессы пополнения ресурсов, изменяя проницаемость верхней части разреза, трансформируя динамику стока и увеличивая водохозяйственные нагрузки.

На основе степени влияния факторов на формирование и распределение ресурсов подземных вод из четырнадцати показателей для статистического анализа были использованы семь наиболее значимых. Для обработки исходных данных были применены методы многомерной статистики кластерный и факторный анализ. Дальнейшее применение методов многомерного анализа, кластерного и факторного, с использованием дендрограммы IBM SPSS Statistics позволило

выявить пять из семи наиболее значимых факторов: К ключевым факторам относятся абсолютные отметки рельефа, полученные по цифровой модели местности (DEM), количество атмосферных осадков (RF), плотность тектонических разломов (FD), расстояние до основной речной системы (DM) и величина испаряемости (ET).

Кластерный анализ (CLU), выполненный с использованием метода одиночной связи (single-linkage), показал, что водоносность исследуемых территорий в первую очередь зависит от расстояния до основной реки (дренажной системы), плотности разломов, отметок высот наблюдательных пунктов и общей величины испаряемости. Этот подход позволил выделить переменные, которые наиболее сильно определяют пространственное группирование на основе гидрологического потенциала.

При применении метода полной связи (complete-linkage) анализ выявил плотность разломов, высоту над уровнем моря и совокупную плотность эрозионной системы и линеаментов как наиболее значимые показатели. Эти факторы тесно связаны с понижениями рельефа и отражают подлежащие геологические и геоморфологические условия, влияющие на аккумуляцию воды. Особенно важно, что совокупный анализ плотности эрозионной системы и плотности линеаментов позволяет оценить развитие и распределение тектонических структур, что обосновывает логическое сосредоточение этих переменных внутри конкретных кластеров.

В целом, сравнительное применение методов одиночной и полной связи подчёркивает значимость как гидрологических, так и структурно-геологических факторов в определении пространственных вариаций потенциала подземных вод, предоставляя надёжную основу для интерпретации взаимосвязей между рельефом, тектоникой и гидрогеологическими процессами.

Факторный анализ в значительной степени подтвердил результаты, полученные с помощью кластерного анализа (CLU), что укрепляет выявление ключевых детерминант водоносности исследуемой территории. Основными факторами были подтверждены расстояние до основной реки, плотность трещин и

линеаментов, высота над уровнем моря и общая испаряемость. Эти переменные не только статистически значимы, но и геологически обоснованы, что обеспечивает надежную и теоретически подтвержденную основу для их включения в гидрогеологические оценки.

Каждый из выделенных параметров играет уникальную роль в формировании гидрогеологических процессов. Высота местности регулирует движение воды под действием гравитации и влияет на климатические градиенты; осадки являются основным источником питания; плотность разломов отражает структурный контроль над путями подземного стока; близость к основной реке определяет степень взаимодействия поверхностных и подземных вод; а испаряемость представляет собой главный механизм потерь влаги в атмосферу. Относительный вклад этих переменных был подтверждён многомерным анализом, что подчёркивает их доминирующую роль в формировании региональных закономерностей распределения водных ресурсов.

Графическое отображение указанных пяти ключевых факторов представлено на рисунке 3.1, что иллюстрирует их пространственное проявление и обосновывает их выбор в качестве основных переменных для последующего моделирования и разработки индикаторов.

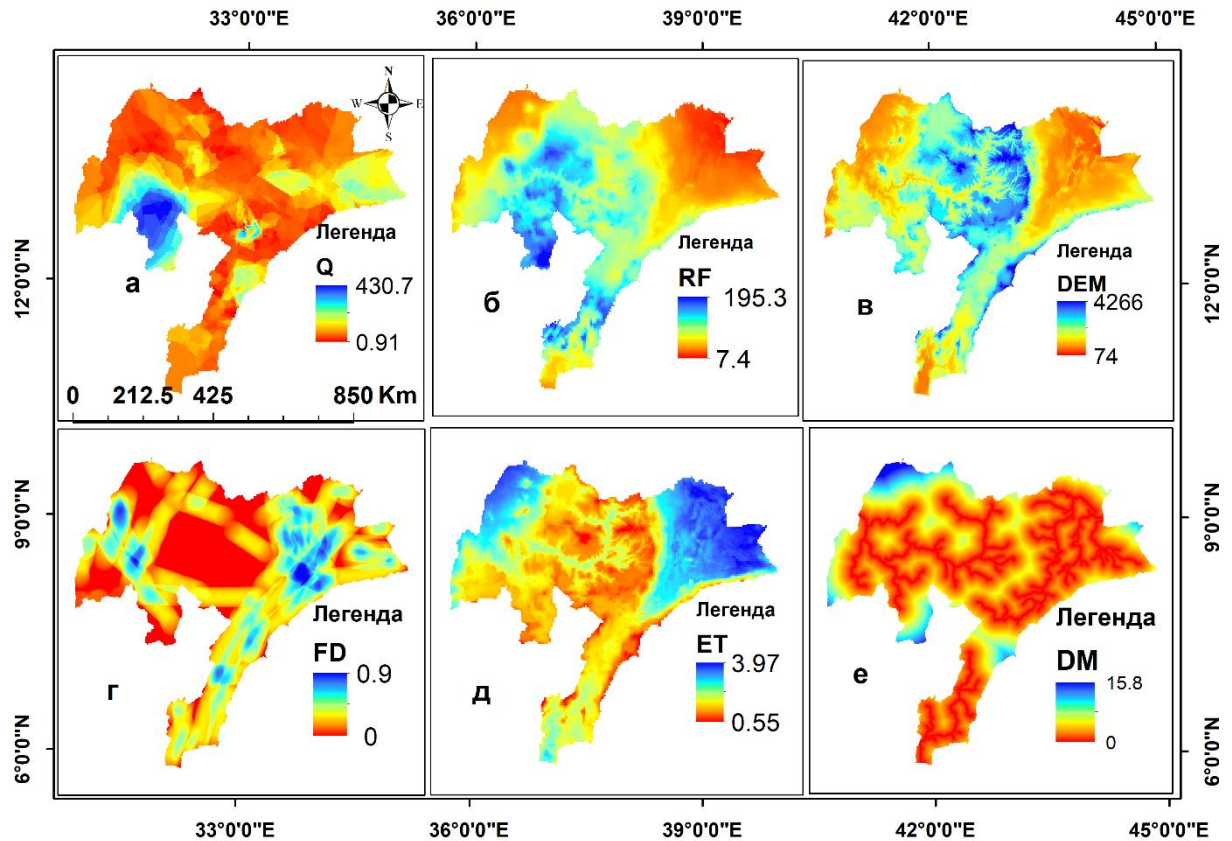


Рисунок 3.1- Графическое представление выбранных факторов, контролирующих водообеспеченность: а. дебит скважины, литров секунду (Q), б. осадки, мм (RF), в. высота над уровнем моря, м (DEM), г. плотность разломов (FD), км/км², д. испаряемость, мм (ET), расстояние до основной реки, км (DM), е.

Расчленённость рельефа играет существенную роль в формировании водных ресурсов, поскольку на больших высотах в соответствии с гидравлическим уклоном, как правило, объем поверхностного стока уменьшается, что позволяет основной части атмосферных осадков проникать в толщу земной коры по зонам экзогенной и тектонической трещиноватости (Grinevskii, 2010; Grinevskii, 2014; Orolbaeva, 2017; Nesterenko, 2017; Kulakov et al., 2021; Brovkin et al., 2021; Dongare, 2024; Decharme & Colin, 2025). Кроме того, крутизна склонов заметно влияет на скорость инфильтрации и распределение воды по различным геоморфологическим элементам. Исследования, проведенные в Тайване, доказывают, что существует значительная корреляция между изменениями абсолютных высот и уровнем грунтовых вод (Vörösmarty et al., 2000; Wang et al., 2021; Yeh et al., 2023). Таким образом, учет топографических особенностей при рассмотрении условий формирования ресурсов природных вод необходим и вполне обоснован.

Сезонные колебания осадков являются важным фактором для оценки ресурсов природных вод (Grinevskii & Pozdnyakov, 2010; Pozdniakov et al., 2020; Устюгов и др. 2024). Как уже отмечалось, в годовом разрезе в Эфиопии выделяются три основных сезона: безводный, который называется Бега (с октября по январь), менее засушливый - Белг (с февраля по май) и сезон дождей - Киремт (с июня по сентябрь).

Зоны тектонических нарушений являются ключевыми структурными факторами, определяющими распространение и формирование подземных вод. Степень их влияния зависит от интенсивности трещиноватости, проницаемости и литологического состава пород. Водопроницающие разломы способствуют питанию и гидравлической связи различных водоносных подразделений, способствуя накоплению водных ресурсов. Напротив, закольматированные разломы функционируют как гидравлические барьеры, разделяя водоносные подразделения и препятствуя естественному движению потока, иногда создавая значительные напоры. Эффект разломов также зависит от рельефа: в высоких зонах проницаемые разломы способствуют вертикальной инфильтрации, тогда как на низких отметках они пересекают мощные осадочные толщины, способствуя формированию структурно контролируемых водоносных подразделений. Таким образом, разломы в значительной степени определяют распределение подземных вод, увеличение или блокирование питания подземных вод, что многократно подтверждено российскими гидрогеологическими исследованиями (Аузина, 2014; Chebykin et al., 2015; Rasskazov et al., 2020; Tagil'tsev et al., 2022; Мальковский и др., 2023; Semyachkov, 2023).

Расстояние до основной дрены (DM) играет существенную роль в формировании подземных водных ресурсов. Близость к реке при наличии гидравлической связи подземных и поверхностных вод обеспечивает дополнительное питание и способствует формированию ресурсного потенциала подземных вод за счёт инфильтрации поверхностных вод через аллювиальные отложения, что варьируется в зависимости от рельефа и литологического состава

этих образования (Zaurbekov et al., 2018; КУРБАНОВА и др. 2020; Pavlova et al., 2020; Kulakov et al., 2021; Кураничева и др., 2021; Xin et al., 2022).

Суммарное испарение (эвапотранспирация — ЕТ) играет существенную роль в формировании подземных водных ресурсов. На пониженных участках рост температуры приводит к увеличению эвапотранспирации, что снижает питание водоносных подразделений, тогда как в высокогорных условиях более низкие значения ЕТ способствуют стабильному и интенсивному пополнению водоносных слоёв, что подтверждено российскими исследованиями (Pozdnyakov & Preobrazhenskaya, 2009; Grinevskii, 2010; Grinevskii, 2014; Vinograd et al., 2019; Pozdniakov et al., 2020; Grinevskiy et al., 2021; Wrzesiński & Sobkowiak, 2022; Wang et al., 2023).

Оценка основных параметров (осадки, мм, абсолютные отметки, м, плотность разломов, км/км², суммарно испарение, мм, расстояние до основной дрены, км) посредством их количественной дифференциации и последующего суммирования на основе полученных рангов и весов являлась ключевым этапом оценки водообеспеченности региона. С учётом степени их значимости для формирования подземных вод дальнейшее использование метода экспертных оценок позволило выявить наиболее перспективные и водообильные зоны, которые легко определяются на начальной стадии исследований. С геологической точки зрения значимость этих факторов хорошо обоснована, поскольку их влияние на распределение и динамику подземных вод формирование подтверждается с гидрогеологической точки зрения.

В результате, в исследуемом регионе, показанном на рисунке 3.1, абсолютные отметки высот варьируются от 74 м (долина Афар) до 4 266 м (гора Чоки) (рисунок 3.1 в). Сезонные колебания осадков являются важным фактором для оценки ресурсов природных вод. На исследуемой территории отмечались сезонные колебания и крайне неравномерное распределение осадков. Количество осадков в регионе составляет от 500 до 2 500 мм/год и Мощность слоя осадков составляет от 7.4 до 195.3 мм/год (рисунок 3.1 б), плотность разломов составляет от 0,1 до 0,9 (рисунок 3.1г), суммарное испарение играет важную роль в

распределении водных ресурсов, особенно в природных водоемах, таких как озера, реки и водохранилища, и составляет от 0.6 до 4 мм /год (рисунок 3.1 д). расстояние до основной дрены составляет от 0.1 до 15.8 км(рисунок 3.1 е). Дебит скважины составляет от 0.91 до 430.7 л/с (рисунок 3.1а).

Индивидуальные тематические слои были классифицированы на пять дискретных классов с использованием метода экспертных оценок, основанного на всестороннем анализе литературы (Machiwal et al., 2011; Kumar et al., 2018; Panda et al., 2020; Yoshe, 2024; Handique et al., 2024). Каждому классу был присвоен числовой показатель от 1 до 3, отражающий его относительное влияние на аккумуляцию подземных вод. Процесс классификации опирался не только на опубликованные исследования, но и на знания исследователя о территории и его практический опыт, что обеспечило учёт контекстных геологических и гидрогеологических особенностей региона (Khan & El Kashouty, 2022).

Система оценок была разработана для количественного определения значимости каждого класса: рейтинг 3 присваивался классу, считающемуся наиболее значимым для пополнения и накопления подземных вод, в то время как рейтинг 1 соответствовал наименее значимому классу. Классы с промежуточными характеристиками получали значения пропорционально, согласно линейному распределению, что позволило создать стандартизированную и воспроизводимую иерархию влияния (таблица 3.2). Данная методика обеспечивает объективное взвешивание тематических слоев в зависимости от их гидрогеологической значимости и формирует надёжную основу для последующего пространственного анализа, многокритериальной оценки и разработки комплексных карт потенциала подземных вод.

Таблица 3.2- Ранги, присвоенные каждому параметру, и их классы по 5 факторам

Факторы	Класс	Средний	Ранг (Ri)
абсолютные отметки (DEM)	0,074-1,2	0.6	3
	1,3-2,1	7.6	2
	2,2-4,3	3.3	1
расстояние до основной дрены (DM)	0 – 24	1.2	3
	25-63	4.4	2
	64-160	11.2	1
суммарно испарение (ET).	0,6 – 1,85	1.2	3
	1,9 – 2,8	2.4	2
	2,9-4	3.5	1
осадок (RF)	7,4 – 59,7	33.6	1
	59,8– 105	82.4	2
	106-195	150.5	3
плотность разломов (FD)	0 – 0,01,	0.0	1
	0,011 – 0,03	0.0	2
	0,031 – 0,1	0.1	3

На рисунке 3.2 представлено подробное графическое отображение пространственного распределения пяти выбранных контролирующих факторов. Каждый фактор был классифицирован на дискретные категории и затем ранжирован в соответствии с его относительным влиянием на условия распределения и формирования подземных вод. Система ранжирования была разработана таким образом, чтобы отражать иерархическую значимость каждого класса: низкие числовые значения присваивались классам, считающимся наименее значимыми с точки зрения их контроля над условиями формирования подземных вод, тогда как более высокие значения классам, признанным наиболее влиятельными.

Данная визуализация не только иллюстрирует пространственную изменчивость ключевых факторов, но и позволяет выявлять территории с

потенциально более высоким или более низким ресурсным потенциалом. Объединение тематической классификации с системой ранжирования обеспечивает интуитивно понятный и аналитически обоснованный инструмент для интерпретации относительного вклада каждого фактора. Такой подход улучшает понимание гидрогеологических процессов, поддерживает многокритериальное принятие решений.

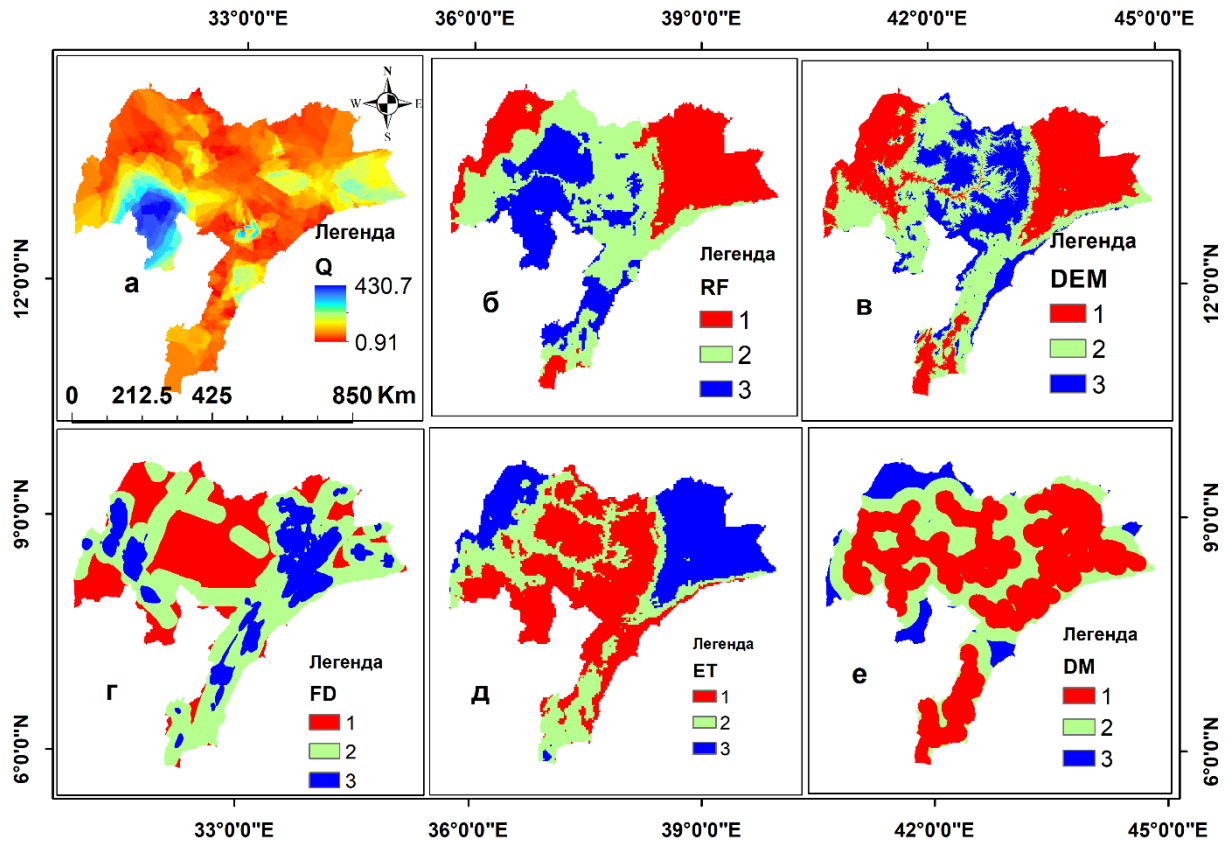


Рисунок 3.2- Схемы распределения выделенных факторов в соответствии с их ранжированием (таблица 3.1): а. дебит скважины, л/с, (Q), б. осадки (RF), в. высота над уровнем моря (DEM), г. плотность разломов (FD), д. испаряемость (ET), е. расстояние до основной реки (DM)

На рисунке 3.2 показано, что пять наиболее значимых факторов из рисунка 3.1 (б – е) были классифицированы на три категории: низкая (1; красный), средняя (2; зелёный) и высокая (3; синий) по их влиянию на формирование и распределение подземных вод. Диапазоны классификации всех факторов, полученные из рисунка 3.1, представлены в таблице 3.2. Низкий уровень осадков (красный) соответствует низкому пополнению подземных вод, средний (зелёный) среднему, высокий (синий) высокому (рисунок 3.2 б). Высокие осадки наблюдаются в центральной и

юго-западной частях, средние в северной и центральной, низкие в западной, восточной и южной. Для высоты рельефа: высокие отметки (синий) в центральной части, средние (зелёный) в юго-западной, центральной и частях южной, низкие (красный) в западной, восточной и южной частях (рисунок 3.2 в). Плотность разломов: высокая (синий) в рифтовой зоне, средняя (зелёный) в трещиноватых породах, низкая (красный) в горах (рисунок 3.2 г). Эвапотранспирация: высокая (синий) восток и запад, средняя (зелёный) центральная часть, низкая (красный) высокогорья (рисунок 3.2 д). Аналогичный подход классификации и анализа был применён к фактору расстояния до главной реки (рисунок 3.2 е), что обеспечило единообразие оценки его влияния на формирование и распределение подземных вод на всей территории исследования.

Оценка потенциала подземных вод базируется на комплексном индексе K_w , который включает пять основных факторов, выделенных на предыдущих этапах. Такой подход позволяет синтезировать несколько тематических слоёв в единый оценочный показатель, отражающий как относительную значимость каждого фактора, так и его пространственную изменчивость на территории исследования.

Для реализации данной методики использовался инструмент Raster Calculator в ArcGIS 10.4, который обеспечивает пространственные вычисления комплексного индекса на основе растровых тематических данных. Перед расчётом каждому тематическому слою и его отдельным классам были присвоены соответствующие веса и ранги, исходя из их относительного влияния на аккумуляцию подземных вод, определённые с помощью экспертной оценки и анализа литературы. Вычисление выполнялось по стандартизированной формуле (Saaty, 2008; Pavlova et al., 2020; Zhang et al., 2021), которая агрегирует взвешенные ранги и формирует пространственно уточнённое представление о ресурсном потенциале подземных вод. Эта процедура обеспечивает надёжную и воспроизводимую основу для оценки распределения подземных вод.

$$K_w = \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^m (W_i \times R_j) \quad (3.1)$$

где K_w — комплексный индекс, R_j — значение ранга каждого класса относительно j -го слоя, а m — общее количество тематических слоёв. W_j — нормализованный вес j -го тематического слоя, который был оценен экспертным методом по подходу Томаса Л. Саати (Saaty 1987; Machiwal et al., 2011). На основе взвешенного оценивания и интеграции выделенных переменных полученные значения K_w классифицируются на три класса в таблице 3.3, отражающих различный уровень водообеспеченности.

Таблица 3.3-Зоны потенциала подземных вод

Ранг	Описание
1	Низкий
2	Средний
3	Высокий

После подготовки и стандартизации всех соответствующих наборов данных была создана схема распределения ресурсного потенциала подземных вод. Этот процесс включал интеграцию классифицированных и взвешенных тематических слоёв с применением ранее рассчитанного комплексного индекса (K_w) для количественной оценки потенциала подземных вод на высоком пространственном разрешении. Каждой ячейке сетки было присвоено значение, отражающее совокупное влияние всех контролирующих факторов, что обеспечило непрерывное пространственное представление водообеспеченности территории.

$$GWPZ = RF_w * RF_R + DEM_w * DEM_R + FD_w * FD_R + DM_w * DM_R + ET_w * ET_R \quad (3.2)$$

где RF, DEM, FD, DM и ET обозначают соответственно количество атмосферных осадков (RF), абсолютные отметки рельефа, полученные по цифровой модели местности (DEM), плотность тектонических разломов (FD), расстояние до основной речной системы (DM) и величина испаряемости (ET), тогда как r и w представляют собой соответственно рейтинг (ранг, присвоенный отдельным подклассам внутри каждого тематического слоя на основе их

специфического влияния на потенциал подземных вод) и вес (общую значимость) тематических слоёв.

Расчет и нормализация весов (W_i): Определение весов параметров на основе их влияния на целевую функцию является методологическим подходом, разработанным профессором Томасом Л. Саати, который лежит в основе процесса аналитической иерархии (АИР) (Machiwal et al., 2011). Эта многоцелевая система принятия решений позволяет систематически оценивать и приоритизировать несколько факторов, количественно определяя их относительную значимость по отношению к заданной цели (Zhang et al., 2021; Fildes et al., 2022).

В данном исследовании для присвоения весов каждому контролирующему фактору была применена шкала Саати, отражающая степень влияния каждого параметра на потенциал подземных вод. Шкала обеспечивает структурированное числовое представление экспертной оценки, позволяя интегрировать как качественную, так и количественную информацию. Конкретное назначение весов было выполнено на основе анализа (Zhang et al., 2021) и представлено в таблице 3.4. Такой подход обеспечивает последовательную, и воспроизводимую систему взвешивания, что критически важно для надёжности последующих многокритериальных оценок на основе GIS и построения схемы распределения комплексного индекса потенциала подземных вод.

Таблица 3.4- Фундаментальная шкала Саати для оценки (Zhang et al., 2021).

Интенсивность важности	Определение	Пояснение
1	Равная важность	Два элемента вносят одинаковый вклад в достижение цели
3	Умеренная важность	Опыт и суждение слегка отдают предпочтение одному элементу перед другим

Продолжение таблицы 3.4

5	Сильная важность	Опыт и суждение сильно отдают предпочтение одному элементу перед другим
7	Очень сильная важность	Один элемент значительно предпочтительнее другого; его доминирование подтверждается на практике
9	Крайняя важность	Доказательства в пользу одного элемента перед другим имеют наивысшую степень уверенности
2,4,6,8	Могут использоваться для выражения промежуточных значений	

Шаги, использованные для присвоения весов каждому фактору, представлены ниже:

1. Определяется цель Разработка комплексного показатель водообеспеченности подземных вод.

2. В соответствии со шкалой Саати (Saaty, 2008) оцениваются влияние каждого фактора на формирование ресурсов подземных вод, каждому фактору присваивается вес по шкале от 1 до 9 в зависимости от степени их влияния (Таблица 3.4). Для этого использовался метод экспертной оценки. Для данного исследования значения шкалы, присвоенные каждому фактору, представлены в таблице 3.5.

Критерии А и В показывают, что первый параметр, А, сравнивается со вторым параметром, В, на основе степени их важности. Оценка значимости факторов чаще всего основывается на анализе и суждениях специалистов в конкретной области. Эти оценки используют специализированные знания и профессиональный опыт экспертов для определения относительной важности или значимости различных факторов в контексте поставленной задачи.

Таблица 3.5- Присвоенные ранги для выбранных тематических слоёв (5 факторов).

Rj		Критерии		Превалирующий фактор	Шкала
z	p	A	B	A or B	(1-9)
1	2	Осадки (RF)	Плотность разломов (FD)	A	5
1	3		Высота над уровнем моря (DEM)	A	9
1	4		Расстояние до основной реки (DM)	A	7
1	5		Испаряемость (ET)	A	7
2	3	Плотность разломов (FD)	Высота над уровнем моря (DEM)	A	3
2	4		Расстояние до основной реки (DM)	A	3
2	5		Испаряемость (ET)	A	5
3	4	Высота над уровнем моря (DEM)	Расстояние до основной реки (DM)	A	3
3	5		Испаряемость (ET)	A	3
4	5	Расстояние до основной реки (DM)	Испаряемость (ET)	A	3

*«А и В сравниваются с точки зрения степени их относительной важности», то есть оценивается, какой из двух факторов (А или В) является более значимым, существенным или определяющим для формирования и распределения подземных вод.

3. Составлена матрица попарных сравнений (М) на основе относительных весов выбранных факторов;

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

где m_{nn} представляет собой относительный вес пары факторов.

4. Для проведения попарного сравнения геометрическое среднее матрицы вычислялось следующим образом:

$$GM_n = \sqrt{m_{1n} * m_{2n} \dots m_{nn}} \quad (3.4)$$

где GM_n обозначает геометрическое среднее элементов n -й строки.

5. На основе составленной матрицы были рассчитаны нормализованные веса (W_i).

Вес каждого контролирующего фактора w оценивался с использованием экспертного анализа методом попарных сравнений, который позволяет сопоставлять относительную значимость критериев, применяемых различными исследователями (März, 2018). Этот подход демонстрирует значимость и положение фактора в иерархии и присваивается каждому фактору путём нормализации матрицы попарных сравнений (Zghibi et al., 2020).

Нормализованная матрица попарных сравнений формируется делением значения каждого фактора в столбце на соответствующую сумму значений по этому столбцу, как показано ниже.

$$W_i = \frac{GM_n}{\sum_{n=1}^N GM_n} * 100 \quad (3.5)$$

Матрица попарных сравнений (GM_n) (таблица 3.5) была составлена на основе относительных весов выбранных факторов, а геометрическое среднее матрицы вычислялось следующим образом в соответствии с Zhang et al. (2021).

В результате анализ матрицы попарных сравнений показал, что осадки являются наиболее значимым параметром, влияющим на пополнение подземных вод в исследуемой территории, составляя примерно 60% от общего веса. Это подчеркивает доминирующую роль атмосферного увлажнения в формировании водоносности аквиферов. За осадками следует плотность разломов, которая занимает второе место по значимости и составляет около 19%, что отражает

критическую роль структурных геологических особенностей в обеспечении подземного стока и инфильтрации. Высота над уровнем моря учитывает примерно 10% от общего веса, что отражает её влияние на гравитационное движение воды и формирование зон питания и разгрузки водоносных горизонтов. Расстояние до основной реки составляет около 7%, указывая на умеряющее воздействие близости поверхностных водных объектов на доступность подземных вод. Наконец, испаряемость является наименее значимым из рассмотренных факторов, с весом около 4%, демонстрируя относительно небольшую, но не полностью пренебрежимую роль в потере влаги в атмосферу. Эти весовые коэффициенты, обобщённые в таблице 3.6, обеспечивают научно обоснованную основу для интеграции факторов в комплексный индекс потенциала подземных вод, гарантируя, что каждый параметр представлен в соответствии с его относительной значимостью.

Таблица 3.6- Рассчитанные веса (W_i) для каждого из пяти параметров

Факторы		RF	FD	DEM	DM	ET	W_i
		1	2	3	4	5	
RF	1	1	5	9	7	7	60%
FD	2	1/5	1	3	3	5	19%
DEM	3	1/9	1/3	1	3	3	10%
DM	4	1/7	1/3	1/3	1	3	7%
ET	5	1/7	1/5	1	5	1	4%

*Элементы матрицы на диагонали принимают значение 1. Значения выше диагонали отражают уровень значимости факторов в матрице попарных сравнений и являются более высокими по сравнению с соответствующими значениями ниже диагонали. Нормализованный главный собственный вектор (Normalized Principal Eigenvector) показывает относительную важность каждого фактора. Высокая степень сходимости указывает на корректность предложенного подхода. Индекс согласованности (CR) был рассчитан в соответствии с методикой Kaur et al. (2020).

Для данного исследования рассчитанный CR составил 0,096, что меньше порогового значения 0,1 и свидетельствует о корректности проведенного анализа.

Для каждого выбранного контролирующего фактора и соответствующего ранга были рассчитаны значения комплексного индекса потенциала подземных вод (K_w), которые представлены в таблице 3.7. Эта таблица предоставляет подробное резюме того, как отдельные факторы, взвешенные в соответствии с их относительной значимостью и классифицированные по рангу, влияют на общую оценку потенциала подземных вод.

Объединяя взвешенное влияние каждого фактора с присвоенным ранговым значением его конкретного класса, значения K_w предоставляют пространственно уточненную меру водообеспеченности для каждой единицы исследуемой территории. Представление данных в таблице 3.7 позволяет ясно понять относительный вклад каждого фактора и обеспечивает прозрачную оценку того, как изменения отдельных параметров влияют на комплексный индекс, что, в свою очередь.

Таблица 3.7- Оценка K_w для каждого фактора на основе степени влияния

Факторы	Ранг (Rj)	W_i (%)	$K_w = (W_i \times R_j)$
Высота над уровнем моря (DEM)	3	10	0.3
	2		0.2
	1		0.1
Расстояние до основной реки (DM)	3	7	0.21
	2		0.14
	1		0.07
Испаряемость (ET)	3	4	0.12
	2		0.08
	1		0.04

Продолжение таблицы 3.7

Осадки (RF)	1	60	0.6
	2		1.2
	3		1.8
Плотность разломов (FD)	1	19	0.19
	2		0.38
	3		0.57

В результате был рассчитан комплексный индекс потенциала подземных вод (K_w) для исследуемой территории путём суммирования взвешенных вкладов всех выбранных факторов. Влияние каждого фактора, определённое на основе присвоенных веса и ранга (таблица 3.7), было агрегировано для получения общего значения индекса для каждой пространственной единицы. Эти значения комплексного индекса затем классифицировались на пять категорий, от 1 до 3, в соответствии со схемой классификации, представленной в таблице 3.7.

Итоговые результаты расчёта K_w представлены в таблице 3.8. Как показано, оценённые значения K_w для исследуемой территории составили 1,42; 2,0; и 2,58 что соответствует категориям низкий, средний и высокий степени водообеспеченности соответственно. Такая классификация обеспечивает чёткое и пространственно уточнённое понимание потенциала подземных вод по региону, позволяя выделять зоны с различным уровнем питания водоносных подразделений и возможность использования водных ресурсов. Результаты отражают интегрированное влияние множества контролирующих факторов и предоставляют научно обоснованную основу.

Таблица 3.8- Комплексный индекс (Квт) для выбранных факторов с указанием их ранга

Основные факторы	Ранг (R_i)		
	1	2	3
RF	0.6	1.2	1.8
FD	0.19	0.38	0.57
DEM	0.3	0.2	0.1
DM	0.21	0.14	0.07
ET	0.12	0.08	0.04
K_w	1.42	2	2.58

Интегрируя все пять выбранных параметров (рисунки 3.2 б–е) в ArcGIS 10.4 с использованием Raster Calculator и их соответствующих весов и рангов, была создана карта потенциала подземных вод для исследуемой территории (рисунок 3.3). Территория исследования была классифицирована на три различных зон потенциала подземных вод низкий, средний, высокий на всей площади изучаемого региона (рисунок 3.3).

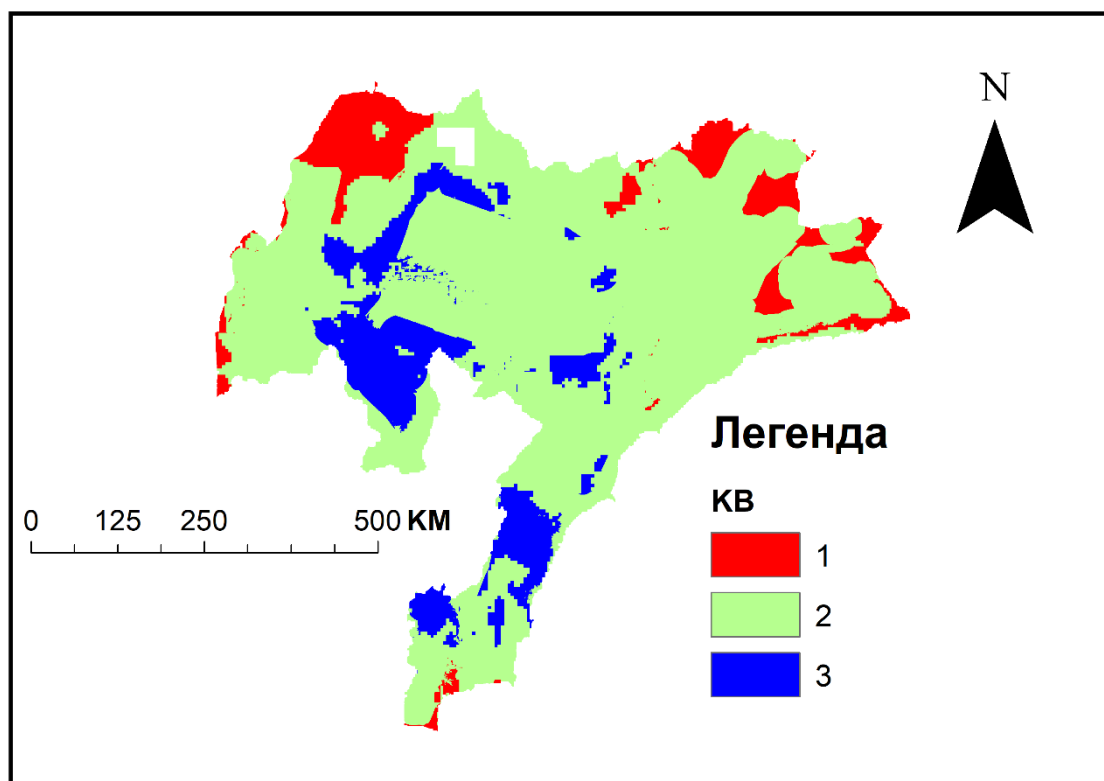


Рисунок 3.3-Схема распределения ресурсного комплексного индекса: 1. Низкий, 2. Средний, 3. Высокий

Анализ показал, что зоны с умеренным и высоким потенциалом подземных вод тесно совпадают с областями с повышенным уровнем осадков, что согласуется с результатами исследований (Stroebel et al., 2019). Эти благоприятные зоны дополнительно характеризуются высокой плотностью линейментов, трещиноватыми песчаниками, низкой плотностью дренажной сети, низкой высотой над уровнем моря, пологими склонами, которые уменьшают поверхностный сток, повышенной плотностью разломов и наличием водоёмов, болот, растительности. На рисунке 3.4, выделенные зоны демонстрируют тесную связь с геологической и геоморфологической структурой бассейна. Зоны с высоким потенциалом в основном приурочены к трещиноватым и разломным вулканическим образованиям, рифтовым линейментам и грабеновым структурам, которые увеличивают вторичную пористость и проницаемость и тем самым способствуют накоплению и перемещению подземных вод. Эти зоны часто совпадают с узлами пересечения крупных разломов и участками с высокой плотностью линейментов, что указывает на ключевую роль тектонических

структур в контроле формирования и распределения подземных вод. Низкие значения комплексного индекса (красный цвет) наблюдались в северо-западной, восточной и некоторых южных частях исследуемого региона, тогда как средние значения (зелёный цвет) преобладали в большинстве центральных районов. Высокие значения комплексного индекса (синий цвет) были сосредоточены в центральной части и в южных районах рифтовой долины. В целом, комплексный индекс находился под сильным влиянием пространственного распределения осадков. Кроме того, пространственное распределение выделенных зон тесно связано с речной сетью. Территории, прилегающие к крупным рекам и дренажным коридорам, как правило, характеризуются более высоким потенциалом подземных вод за счёт усиленного питания в результате взаимодействия поверхностных вод с водоносными горизонтами, наличия аллювиальных отложений с высокой инфильтрационной способностью и локализованного питания вдоль русел рек. Напротив, зоны с низким потенциалом обычно приурочены к структурно монолитным массивным породам, возвышенным участкам и районам с низкой плотностью дренажной сети, где инфильтрация ограничена и преобладает поверхностный сток. Ранее проведённые исследования показали, что такие факторы, как ровный рельеф и незначительный уклон земной поверхности, достаточно, высокие уровень осадков и плотность линеаментов значительно способствуют питания подземных вод за счёт улучшенной инфильтрации поверхностной воды (Jha et al., 2010; Adesola et al., 2023). В соответствии с этими выводами настоящее исследование подтверждает, что территории с низкой высотой над уровнем моря, меньшим расстоянием до основной реки, низкой испаряемостью, высокой плотностью разломов и большим количеством осадков демонстрируют повышенный уровень питания подземных вод. Напротив, регионы с большей высотой над уровнем моря, большим расстоянием до основной реки, высокой испаряемостью, низкой плотностью разломов и меньшим количеством осадков характеризуются сниженным питания подземных вод. Эти результаты подчёркивают комплексное влияние климатических, геологических и топографических факторов на пространственные вариации водообеспеченности в

исследуемой области. Большая часть центральной территории района исследования характеризуется зоной со средним значением комплексного индекса. Северо-западные и отдельные участки восточных районов преимущественно относятся к зонам с низким значением комплексного индекса, тогда как части юго-западных, южных и центральных районов представлены зонами с высоким значением комплексного индекса.

Пространственный охват и относительная площадь каждой зоны потенциала подземных вод, определённые с использованием комплексного индекса (K_w), суммированы (таблица 3.9). Результаты показывают, что зона со низким потенциалом подземных вод занимает $3.7E+10$ км²(9.8%), среднего зона охватывает $2.9E+11$ км² (76.8%), и высокого зона охватывает $5.04E+10$ км² (13,4%).

Эти данные показывают, что большая часть исследуемой территории относится к зоне среднего потенциала подземных вод, за которой следует зона с низким потенциалом, что указывает на ограниченное питания подземных вод в значительных частях региона. Зона со низким потенциалом подземных вод ограничена минимальной частью территории, выделяя локальные участки с оптимальными гидрогеологическими условиями характеристика всех зон (рельеф, литология и пр.). Данная количественная оценка обеспечивает наглядное и научно обоснованное представление о пространственном распределении подземных вод.

Таблица 3.9- Площадь и процентное покрытие территории для оцененных значений K_w по каждому рангу.

Ранг	Описание	Площадь, км ²	%
1	Низкий	$3.7E+10$	9.8
2	Средний	$2.9E+11$	76.8
3	Высокий	$5.04E+10$	13.4
Общий процент			100

Анализ чувствительности был проведён путем систематического исключения отдельных тематических слоёв с целью оценки их относительного влияния на итоговую карту потенциала подземных вод. Такой подход позволяет определить, насколько сильно каждый входной параметр воздействует на результат модели. Изменяя один параметр за раз и наблюдая соответствующие изменения на карте потенциала подземных вод, анализ выявляет факторы с наибольшим влиянием, уточняет взаимодействие между переменными и подтверждает, что модель функционирует последовательно и соответствует теоретическим ожиданиям (Fildes et al., 2022).

$$CP_{pz,i} = \frac{Gz_{pz,i} - Gz_{pz,S}}{Gz_{pz,S}} * 100 \quad (3.6)$$

где $CP_{pz,i}$ представляет собой процентное изменение зоны потенциала подземных вод (PZ) после удаления одного или нескольких тематических слоёв из конкретного объекта (i-го) в анализе. $Gz_{pz,i}$ показывает площадь зоны потенциала подземных вод PZ после удаления тематических слоёв, а $Gz_{pz,S}$ представляет площадь зоны потенциала подземных вод PZ с использованием всех тематических слоёв.

Результаты показали, что удаление любого тематического слоя приводило к заметным изменениям на выходной карте, даже если удаляемый слой имел относительно низкий средний индекс вариации. Это подтверждает, что каждый тематический слой вносит значимый вклад в определение зон потенциала подземных вод. Различия в значениях среднего индекса вариации отражают относительную важность каждого параметра, определённую с помощью матрицы попарных сравнений АНР.

В целом, эксперимент по анализу чувствительности подтверждает корректность подхода к картированию потенциала подземных вод: все выбранные тематические слои являются необходимыми компонентами модели, и их совместное использование обеспечивает более точное и комплексное представление зон потенциала подземных вод по сравнению с использованием

любого отдельного фактора (рисунок 3.4). Эти результаты согласуются с аналогичными исследованиями, проведёнными в других регионах (Chen et al., 2018; Oropku et al., 2024; Shaw & Sharma, 2024).

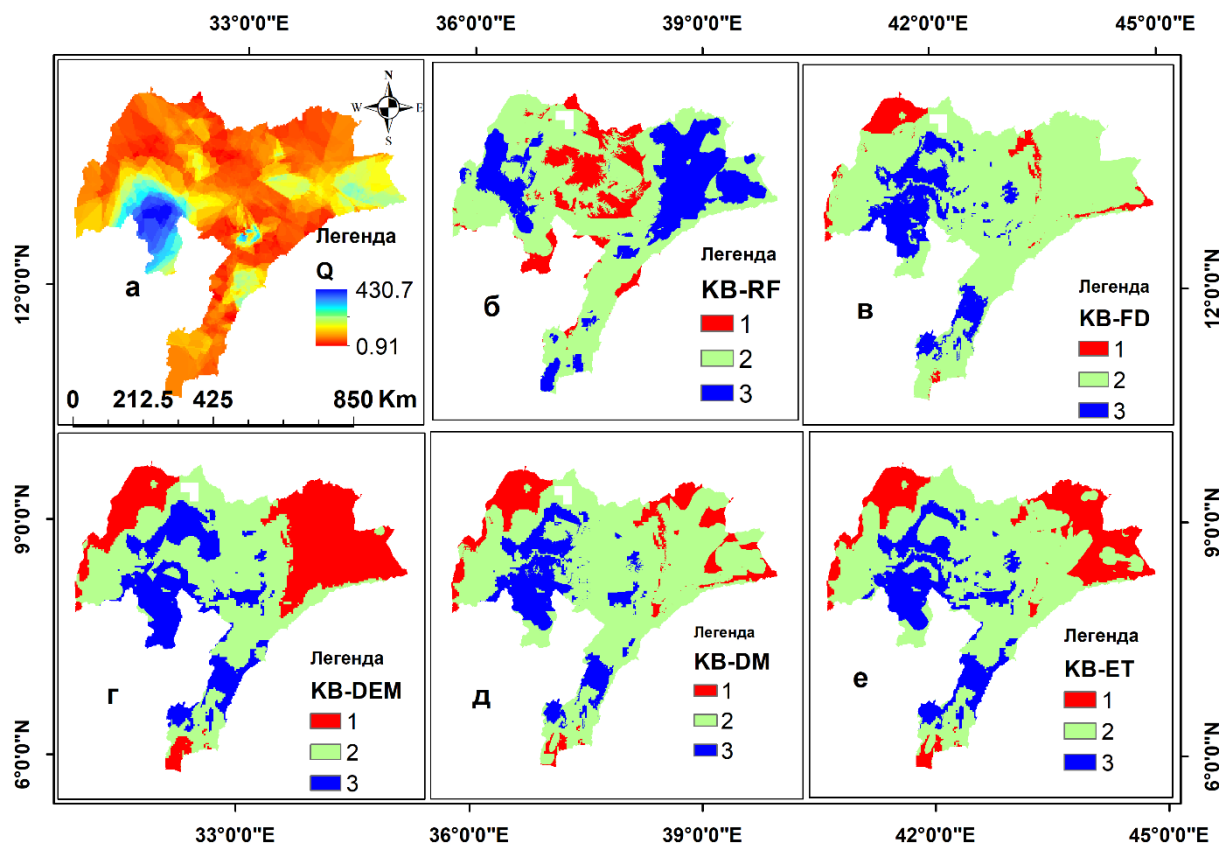


Рисунок 3.4- Схемы распределения ресурсного потенциала подземных вод при отсутствии тематического слоя для анализа чувствительности: а. Расход воды (л/с) б. Отсутствие осадков (RF), в. Отсутствие плотности разломов (FD), г. Отсутствие цифровой модели рельефа/использования земель (DEM), д. Отсутствие расстояния до основной реки (DM) е. Отсутствие испаряемости (ET)

Анализ чувствительности был проведён путём систематического исключения каждого тематического слоя с целью оценки его влияния на выделение зон потенциала подземных вод (K_w). Изменения в классификации потенциала подземных вод при удалении N тематических слоёв представлены в таблице 3.9. Этот анализ является важным для определения наиболее чувствительных параметров, влияющих на потенциал подземных вод в исследуемом регионе.

Результаты показывают, что исключение слоя осадков вызывает наибольшие изменения в зонировании потенциала подземных вод, что демонстрирует, что

осадки являются наиболее чувствительной тематической переменной. В таблице 3.10 положительные значения отражают увеличение площади данного класса K_w при удалении тематического слоя, тогда как отрицательные значения указывают на уменьшение площади из-за исключения этого параметра.

Анализ чувствительности позволил выявить следующее:

- Исключение слоя осадков (RF) приводит к увеличению площадей зон K_w со низким и высоким потенциалом на 36,2% и 99,5% соответственно, в то время как площади зон с умеренной потенциалом уменьшаются на 21,9%.
- Удаление слоя расстояния до основной реки (DM) увеличивает площади зон со низким и высоким потенциалом на 34,9% и 28,4% соответственно, в то время как площади зон с умеренной потенциалом уменьшаются на 8,7%.
- Исключение слоя испаряемости (ET) увеличивает площади зон со низким и высоким потенциалом на 100% и 45,3% соответственно, в то время как площади зон с умеренной потенциалом уменьшаются на 20,1%.
- Удаление слоя плотности разломов (FD) приводит к увеличению площадей зон с умеренной и высоким потенциалом на 0,5 % и 25,7% соответственно, в то время как площади зон с слабого потенциалом уменьшаются на 37,4%.
- Исключение слоя цифровой модели рельефа (DEM) увеличивает площади зон со низким и высоким потенциалом на 89% и 60,1% соответственно, в то время как площади зон с умеренной потенциалом уменьшаются на 39,4%.

В целом, анализ чувствительности подтверждает, что все тематические слои вносят значимый вклад в картирование потенциала подземных вод. Масштаб изменений по классам K_w отражает относительную значимость каждого параметра, при этом наибольшее влияние оказывает слой осадков. Эта проверка подтверждает надёжность и устойчивость модели, принятой для расчета индекса водообильности и последующей оценки потенциала подземных вод.

Таблица 3.10- Анализ чувствительности карты зон потенциала подземных вод в исследуемом регионе

Используемые факторы	Факторы	W(%)	K_w	Площадь, м ²	Изменение площади, м ² при удалении N-го фактора	Анализ чувствительности, %
С использованием всех факторов	RF	60	1	3.7E+10		
	FD	19	2	2.9E+11		
	DEM	10	3	5.04E+10		
	DM	7				
	ET	4				
Без фактора осадков (RF)	FD	39	1	5.04E+10	1.34E+10	36.2
	DEM	42	2	2.27E+11	-6.3E+10	-21.9
	DM	13	3	1.01E+11	5.01E+10	99.5
	ET	6				
	RF	0				
Без фактора Расстояние до основной реки (DM)	RF	67	1	4.99E+10	1.29E+10	34.9
	FD	15	2	2.65E+11	-2.5E+10	-8.7
	DEM	10	3	6.47E+10	1.43E+10	28.4
	ET	8				
	DM	0				
Без фактора Испаряемость (ET)	RF	66	1	7.47E+10	3.77E+10	100
	FD	19	2	2.32E+11	-5.8E+10	-20.1
	DEM	5	3	7.32E+10	2.28E+10	45.3
	DM	10				
	ET	0				

Продолжение таблицы 3.10

Без фактора	RF	66	1	7.47E+10	3.77E+10	100
Испаряемость (ET)	FD	19	2	2.32E+11	-5.8E+10	-20.1
	DEM	5	3	7.32E+10	2.28E+10	45.3
	DM	10				
	ET	0				
Без фактора	RF	63	1	2.32E+10	-1.4E+10	-37.4
Плотность разломов (FD)	DEM	20	2	2.91E+11	1.58E+09	0.5
	DM	10	3	6.33E+10	1.3E+10	25.7
	ET	7				
	FD	0				
Без фактора	RF	67	1	1.21E+11	8.41E+10	89.0
Высота над уровнем моря (DEM)	FD	14	2	1.76E+11	-1.1E+11	-39.4
	DM	13	3	8.06E+10	3.02E+10	60.1
	ET	7				
	DEM	0				

Для оценки надёжности и точности полученных результатов озданные схемы распределения ресурсного потенциала подземных вод были сопоставлены с реальными наблюдениями, включающими дебит водозаборных скважин, и колебания уровня подземных вод (Jha et al., 2010; Machiwal et al., 2011; Panda et al., 2020). Данные о дебите подземных вод обычно получают с помощью опытно-промышленного водоотбора. Надёжность таких наборов данных во многом зависит от качества полевых измерений.

Для данного исследования было использовано всего 1 450 записей дебита скважин (рисунок 3.5), полученных от Министерства водных ресурсов и энергетики Эфиопии, для целей валидации. Надёжность этих данных подтверждается тем, что Министерство предоставило проверенную информацию, включая точные координаты скважин и соответствующие гидрогеологические параметры, что является важным для проверки оценок подземных вод, полученных

с помощью дистанционного зондирования или моделей. Значимость данных, предоставленных Министерством, подтверждается также в смежных исследованиях, таких как сопоставлены изменений уровней озёр Абая и Чамо, определённых по данным альтиметрии (Mulu et al., 2024).

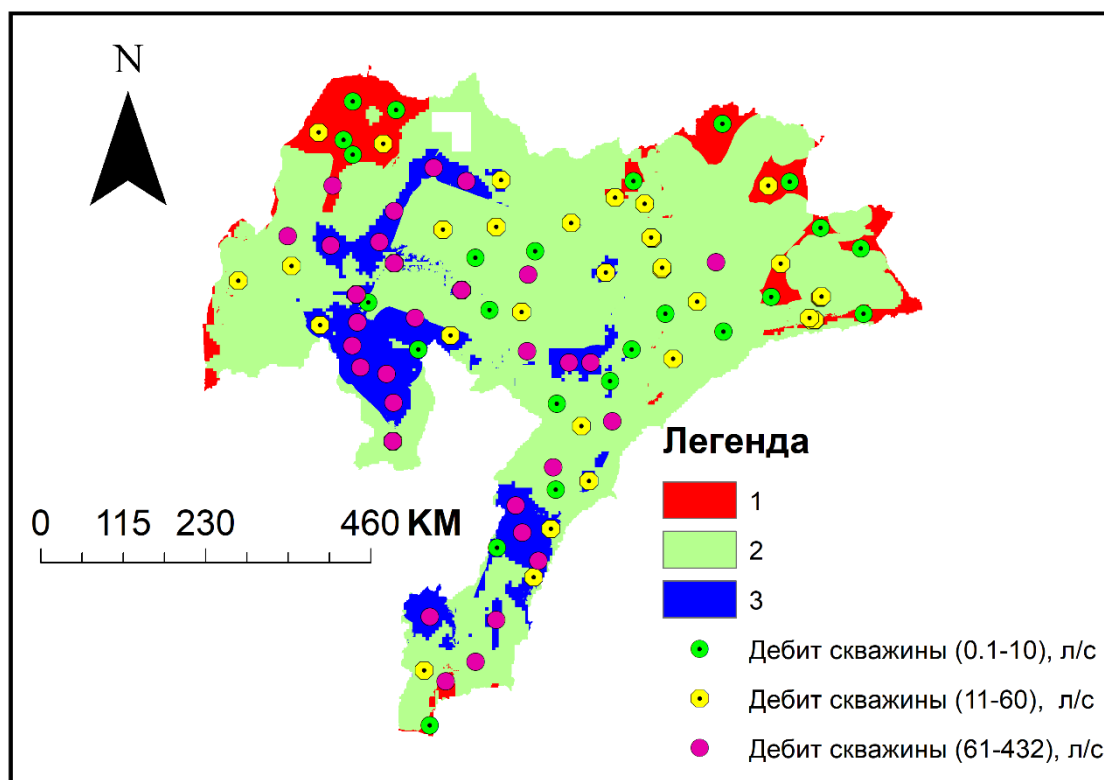


Рисунок 3.5- Схема распределения комплексного индекса, совмещенная с расположением водозаборных скважин различной производительности

На основе полного набора данных по скважинам была проведена детальная проверка соответствия между фактическим дебитом скважин и выделенными зонами потенциала подземных вод (K_w) с целью оценки точности и надёжности картирования потенциала подземных вод. Среди всего набора данных 230 скважин были отнесены к категории низкого дебита (< 10 л/с), из которых 179 скважин (15,6%) находились в пределах зоны низкого потенциала подземных вод, что демонстрирует высокую степень соответствия между наблюдаемыми малодобитными скважинами и прогнозной моделью. Всего 1153 скважин имели средний дебит (11–60 л/с), из которых 737 скважины (58,4%) совпадали с зоной

среднего потенциала, что дополнительно подтверждает способность модели выявлять территории с ограниченным потенциалом подземных вод.

Наконец, 67 скважин имели высокий дебит (> 61 л/с), из которых 53 скважины (4,2%) располагались в зоне высокого потенциала, демонстрируя, что модель успешно выявляет локализованные участки с исключительно высоким потенциалом подземных вод (таблица 3.11).

Эти результаты предоставляют количественные доказательства достоверности карты потенциала подземных вод и подчеркивают надёжность интегрированного методологического подхода. Высокий процент скважин, совпадающих с предсказанными классами K_w , подтверждает полезность разработанной карты для планирования, управления и устойчивого использования водных ресурсов в исследуемом регионе.

Таблица 3.11- Дебит скважин и процент совпадения между картой зон потенциала подземных вод и фактическим дебитом скважин

K_w	Минимальный дебит скважины, л/с	Максимальный дебит скважины, л/с	Общее количество скважин в K_w	Количество скважин, попавших в K_w	Процент совпадения, %
Низкий	0,1	10	230	197	15.6
Средний	11	60	1153	737	58.4
Высокий	61	431	67	53	4.2
Общий процент			1450	1262	78.2

Результаты анализа валидации показывают, что примерно 78.2 % данных о дебите скважин тесно соответствуют зонам комплексный индекс. Такой высокий уровень соответствия свидетельствует о том, что созданная карта потенциала подземных вод обеспечивает надёжное и точное предсказание водообеспеченности исследуемой территории. Следовательно, оцененные зоны потенциала подземных

вод можно считать достоверными, поскольку они хорошо согласуются с полевыми измерениями дебита скважин, полученными из данных инвентаризации точек.

Результаты хорошо согласуются с установленной гидрогеологической структурой исследуемого района, показывая, что зоны с высокими значениями комплексного индекса соответствуют зонам обводненных разломов, зоны Умеренного потенциала связаны с гидрогеологическими бассейнами, а зоны с низким индексом совпадают с гидрогеологическими массивами (рисунок 4.16) (Йоше и Аузина, 2025).

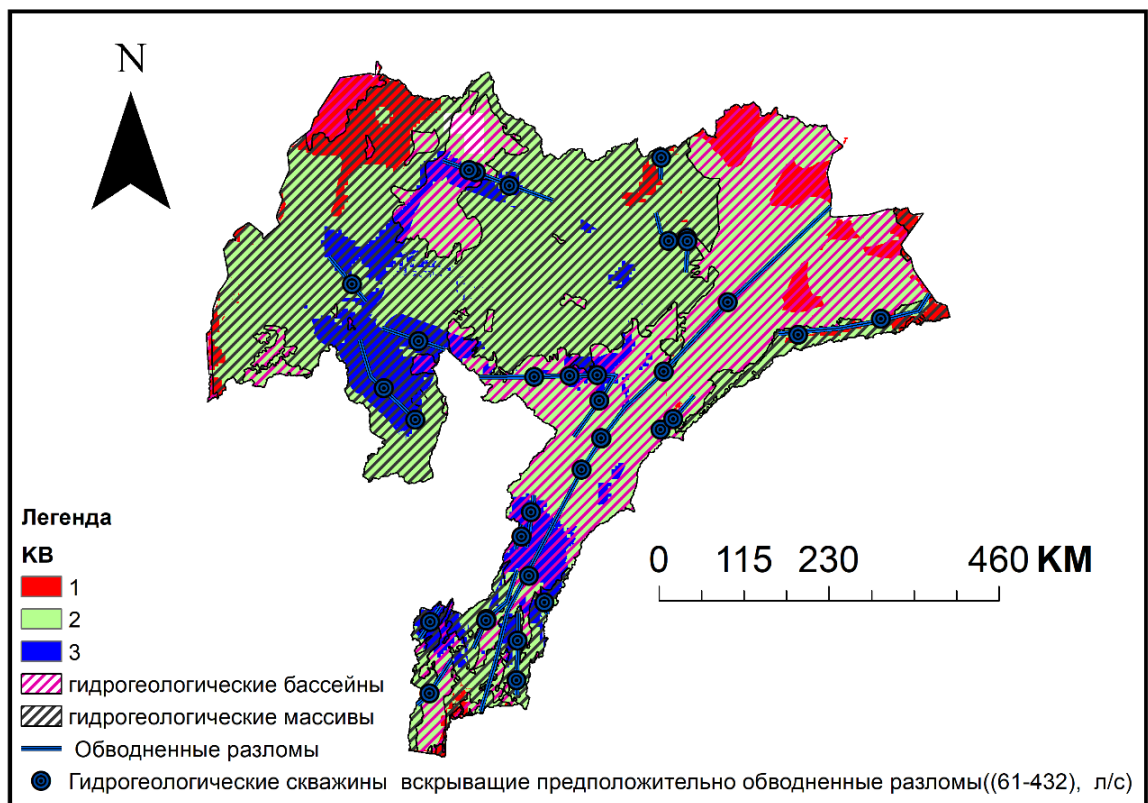


Рисунок 3.6- Схема распределения комплексного индекса, совмещенная со структурно-гидрогеологической картой

Ресурсы подземных вод могут быть оценены с помощью спутниковых данных GRACE путем измерения изменений общего водного баланса (TWS) с последующим вычитанием вкладов почвенной влаги, поверхностных вод и снега/льда (Rodell et al., 2009; Long et al., 2015; Giroto et al., 2017; Yoshe, 2025). Этот метод обеспечивает надёжные наблюдения за изменчивостью подземных вод на больших масштабах, особенно в регионах с ограниченными данными *in situ*, и

широко применяется для мониторинга сезонных и межгодовых колебаний, оценки засухи и поддержки устойчивого управления водными ресурсами.

Следовательно, изменения общего водного запаса (ΔTWS) оценивались как суммарные ресурсов природных вод: изменения ресурсов подземных вод (ΔGWS), изменений ресурсов поверхностных вод (озёра, реки) (ΔSWS), ресурсов почвенной влаги (ΔSMS), водного хранения в кронах деревьев (ΔCWS) и водного эквивалента снега (ΔSWE) (Yoshe, 2024a; Yoshe, 2024b).

$$\Delta TWS = \Delta GWS + \Delta SWS + \Delta SMS + \Delta CWS + \Delta SWE \quad (3.7)$$

Для оценки ресурсов подземных вод используются гидрологические модели, такие как GLDAS, которые позволяют оценивать связанные переменные, включая изменения почвенной влаги (ΔSMS), ресурсов поверхностных вод (ΔSWS) и водного запаса в кронах деревьев (ΔCWS), в то время как изменения водного эквивалента снега и льда (ΔSWE) их нет для исследуемого региона (Yoshe, 2025).

Ресурсы наземных водных ресурсов (TWS) в Эфиопии представляют собой совокупность поверхностных вод, почвенной влаги, подземных вод, а также воды, аккумулированной в озёрах и водно-болотных угодьях в пределах различных гидроклиматических зон страны. Пространственная и временная изменчивость TWS определяется сложным рельефом, включающим Эфиопское нагорье, Рифтовую долину и засушливые низменности, а также выраженной сезонностью осадков, связанной с миграцией Межтропической зоны конвергенции. Основной объём осадков выпадает в сезон керемт (июнь–сентябрь), что приводит к интенсивному пополнению речного стока, водохранилищ и неглубоких водоносных горизонтов, тогда как в сухой сезон наблюдается сокращение ресурсов вследствие испарения и водозабора. Крупные речные бассейны, включая Аббай (Голубой Нил), Омо-Гибе, Аваш и системы Рифтовой долины, характеризуются различной динамикой накопления и истощения вод в зависимости от высоты, геологического строения и типа землепользования. Нагорные районы обеспечивают значительный поверхностный сток и инфильтрацию, тогда как в

рифтовых и низменных областях доминируют процессы испарения и использование подземных вод. Спутниковые гравиметрические миссии GRACE и GRACE-FO выявили межгодовые колебания TWS, связанные с засухами, явлениями Эль-Ниньо и долгосрочными климатическими трендами. Рост ирригации, гидроэнергетики и городского водоснабжения усиливает антропогенное влияние на водный баланс. Понимание динамики наземных водных ресурсов имеет ключевое значение для устойчивого управления водными ресурсами, мониторинга засух и адаптации к климатическим изменениям.

Поверхностные водные ресурсы (SWS) в Эфиопии включают воду, аккумулированную в реках, естественных озёрах, водно-болотных угодьях, поймах и искусственных водохранилищах, и являются важнейшим компонентом национальной гидрологической системы. Их пространственное распределение определяется контрастным рельефом страны — от Эфиопского нагорья до Рифтовой долины — а также ярко выраженной сезонностью осадков, связанной с миграцией Межтропической зоны конвергенции. Основной сезон дождей (керемт, июнь–сентябрь) формирует значительный поверхностный сток, пополняя крупные речные бассейны, такие как Аббай (Голубой Нил), Омо-Гибе, Баро-Акобо, Аваш и Ваби-Шебелле. Вследствие этого ресурсы поверхностных вод характеризуются выраженной сезонной изменчивостью: максимальные уровни наблюдаются после сезона дождей, а в засушливые месяцы происходит их сокращение из-за испарения и стока вниз по течению. В Эфиопии расположено множество естественных озёр, особенно в пределах Рифтовой долины, объём которых зависит от морфологии котловин и климатических условий. Существенную роль играют также крупные водохранилища, созданные для гидроэнергетики и орошения, которые увеличивают объём поверхностных вод и способствуют регулированию стока и смягчению последствий засух. Однако SWS чувствительны к межгодовой климатической изменчивости, включая засухи, связанные с явлениями Эль-Ниньо, которые могут значительно снижать приток воды и уровни водохранилищ. Дополнительное влияние оказывают изменения землепользования, деградация водосборов, заиление и растущий водозабор. Эффективное управление

поверхностными водными ресурсами требует интегрированного бассейнового подхода, мер по сохранению водосборов и адаптации инфраструктуры к климатическим изменениям.

Ресурсы почвенной влаги (SMS) в Эфиопии являются ключевым промежуточным компонентом гидрологического цикла, связывающим атмосферные осадки с поверхностным стоком и пополнением подземных вод. Они представляют собой воду, удерживаемую в почвенном профиле, и в значительной степени зависят от сезонности осадков, гранулометрического состава почв, растительного покрова, рельефа и интенсивности испарения. Климат Эфиопии характеризуется выраженной сменой влажных и засушливых сезонов: основные осадки приходятся на период керемт (июнь–сентябрь), особенно в центральных и северных нагорьях, тогда как сезон белг (февраль–май) обеспечивает дополнительное увлажнение в отдельных регионах. В дождливые периоды ресурсы почвенной влаги существенно увеличиваются, поддерживая богарное земледелие, рост растительности и функционирование экосистем. В засушливые месяцы наблюдается быстрое истощение влаги вследствие высокой испаряемости, особенно в низменных и полузасушливых районах, таких как Афар и Сомали. Пространственная изменчивость SMS значительна: в нагорных районах с более прохладным климатом и тонкодисперсными почвами влага удерживается дольше, способствуя инфильтрации и подпитке грунтовых вод, тогда как песчаные и деградированные почвы засушливых зон обладают низкой влагоёмкостью и подвержены усиленному поверхностному стоку и эрозии. Изменения землепользования, вырубка лесов и чрезмерный выпас скота снижают способность почв удерживать влагу. Спутниковый мониторинг и моделирование поверхности суши позволяют отслеживать динамику почвенной влаги и её чувствительность к засухам и климатической изменчивости. Поскольку сельское хозяйство Эфиопии преимущественно зависит от осадков, сохранение и рациональное управление запасами почвенной влаги имеют решающее значение для продовольственной безопасности и устойчивого развития.

Ресурсы влаги в растительном покрове (CWS) в Эфиопии представляют собой часть атмосферных осадков, перехватываемых и временно удерживаемых на поверхности листьев, ветвей и стволов растений до их испарения обратно в атмосферу или поступления на почву в виде сквозного стока и стока по стволам. Этот компонент гидрологического цикла играет важную роль в регулировании инфильтрации, формировании поверхностного стока, динамике почвенной влаги и локальных микроклиматических условиях. Величина CWS в Эфиопии существенно варьирует в зависимости от климатических условий, высоты над уровнем моря и плотности растительного покрова. Во влажных и субвлажных нагорных районах, где распространены горные леса, редколесья и агролесомелиоративные системы, перехват осадков может составлять значительную долю общего количества дождя, особенно в период интенсивных осадков сезона керемт (июнь–сентябрь). В засушливых и полузасушливых низменностях, таких как регионы Афар и Сомали, где преобладают кустарники и травянистая растительность, ёмкость перехвата значительно ниже из-за разреженного покрова и меньшей площади листовой поверхности. Сезонная изменчивость выражена отчётливо: максимальные значения CWS наблюдаются в дождливые периоды при развитой лиственной массе, тогда как в сухой сезон вследствие опадения листьев и снижения биомассы показатели уменьшаются. Изменения землепользования, включая вырубку лесов и расширение сельскохозяйственных угодий, сокращают способность экосистем к перехвату осадков, усиливая поверхностный сток и эрозию. Восстановление лесов и управление водосборами способствуют повышению гидрологической устойчивости. Понимание динамики CWS важно для интегрированного управления водными ресурсами и адаптации к климатическим изменениям.

Снежные водные ресурсы (SWS) в Эфиопии представляют собой крайне ограниченный и пространственно локализованный компонент национальной гидрологической системы, что обусловлено преимущественно тропическим и субтропическим климатом страны. Постоянный снежный покров на территории Эфиопии отсутствует; однако сезонные снегопады и кратковременное накопление

снега возможны в наиболее высокогорных районах Эфиопского нагорья, особенно на высотах свыше 4000 м над уровнем моря, таких как массивы Сымен и Бале. В этих локальных альпийских зонах снежные водные ресурсы формируются за счёт временного накопления твёрдых осадков, которые затем постепенно высвобождаются в процессе таяния. Несмотря на незначительный вклад в общий годовой водный баланс страны по сравнению с дождевыми осадками, снег может играть локальную гидрологическую роль, регулируя сроки поверхностного стока, поддерживая базисный сток в верховьях рек и влияя на динамику почвенной влаги в переходный период к сухому сезону. Накопление снега носит эпизодический характер и чувствительно к межгодовой климатической изменчивости, включая колебания температуры и аномалии осадков. Повышение температуры в условиях изменения климата, вероятно, приведёт к дальнейшему сокращению частоты и продолжительности снежного покрова, снижая его и без того ограниченную водорегулирующую функцию. В отличие от умеренных и высокогорных регионов мира, где снег играет ключевую роль в сезонном перераспределении водных ресурсов, гидрология Эфиопии в основном определяется дождевым питанием. Тем не менее, изучение снежных ресурсов в высокогорных экосистемах важно для комплексной оценки водных ресурсов, мониторинга климата и сохранения уникальных афроальпийских ландшафтов. Следовательно, в рамках настоящего исследования снежные водные ресурсы не учитывались при анализе поверхностных вод в исследуемых регионах.

Ресурсы подземных вод (GWS) в Эфиопии являются важнейшим компонентом общего водного баланса страны, выполняя функцию стратегического резерва, сглаживающего климатическую изменчивость и обеспечивающего водоснабжение в периоды продолжительной засухи. Подземные воды аккумулируются в различных гидрогеологических структурах, включая трещиноватые вулканические породы Эфиопского нагорья, осадочные бассейны, аллювиальные отложения и кристаллический фундамент. Пространственная изменчивость GWS определяется литологией, тектоническими разломами и трещиноватостью, условиями питания и региональными климатическими

особенностями. В гумидных и субгумидных нагорных районах обильные осадки сезона керемт (июнь–сентябрь) способствуют инфильтрации и пополнению водоносных горизонтов, особенно в зонах с проницаемыми почвами и трещиноватыми базальтами. В засушливых и полузасушливых низменностях, таких как регионы Афар и Сомали, пополнение подземных вод ограничено, носит эпизодический характер и зависит от экстремальных осадков. Динамика ресурсов подземных вод определяется сезонностью осадков, испаряемостью, состоянием растительного покрова и интенсивностью водоотбора. Рост потребления воды для орошения, городского водоснабжения и нужд животноводства усиливает нагрузку на водоносные горизонты, вызывая локальное понижение уровня грунтовых вод. Изменения землепользования, деградация почв и вырубка лесов снижают инфильтрационную способность, ограничивая естественное пополнение. Спутниковая гравиметрия (миссии GRACE), гидрогеологические исследования и численное моделирование улучшают оценку изменчивости ресурсов, однако в ряде регионов наблюдательная сеть остаётся недостаточно развитой. Устойчивое управление GWS требует интегрированного планирования водных ресурсов, регулирования водоотбора, охраны водоносных горизонтов и развития практик искусственного пополнения в условиях усиливающегося антропогенного и климатического воздействия. Изменение ресурсов подземных вод (ΔGWS) оценивается следующим образом:

$$\Delta GWS = \Delta TWS - (\Delta SM + \Delta SWS + \Delta CWS) \quad (3.8)$$

На основе данных GRACE и GLDAS оценка ресурсов подземных вод в районе исследования показывает высокий потенциал подземных вод в юго-западных и центральных районах, средний в центральной части, и низкий — в восточных и некоторых западных районах региона (рисунк 3.7).

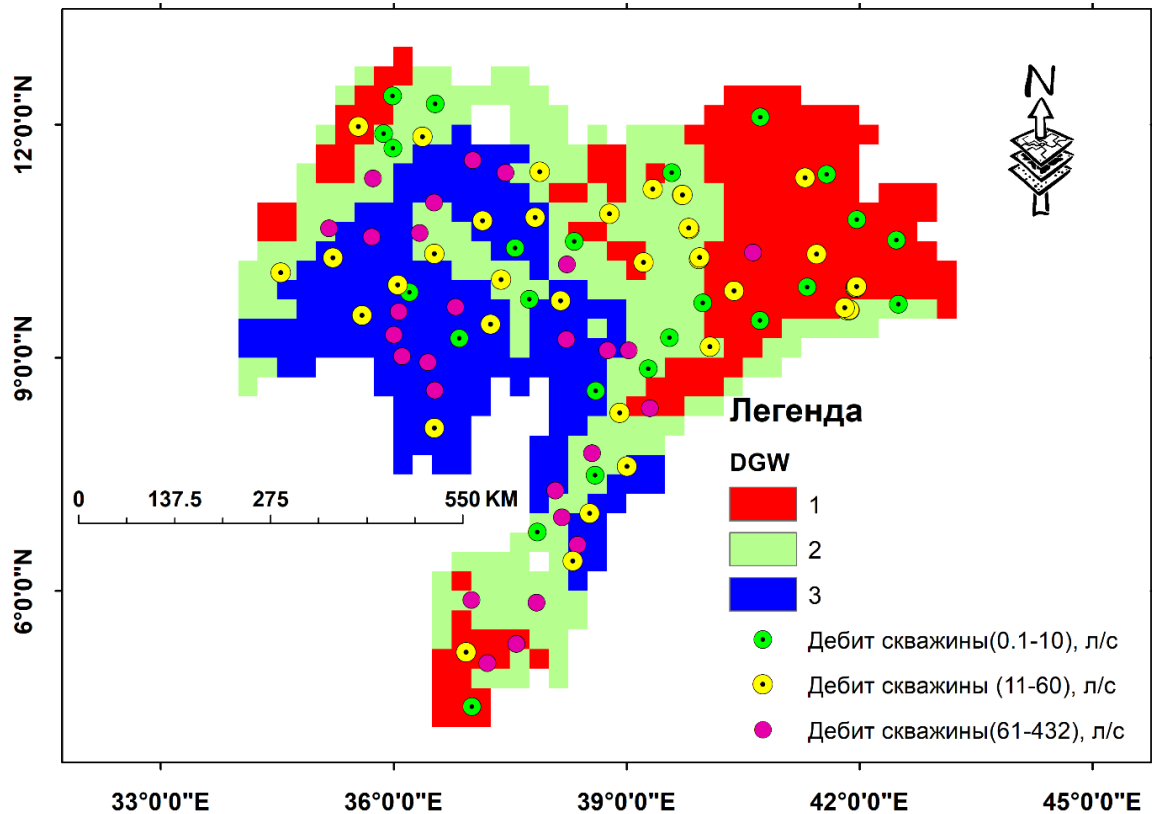


Рисунок 3.7- Схема распределения ресурсов подземных вод, полученная в результате анализа данных GRACE и GLDAS с использованием облачных технологий Google Earth Engine

Как показано на рисунке 3.7, для оценки ресурсов подземных вод были использованы все необходимые гидрологические и климатические параметры с применением данных спутниковой гравиметрической миссии GRACE в сочетании с результатами модели GLDAS. Совместное использование этих источников данных позволило оценить изменения ресурсов подземных вод путем выделения компонента подземной воды из общего объёма наземных водных ресурсов. Полученное пространственное распределение подземных вод демонстрирует тесную связь с пространственными особенностями распределения осадков, что подтверждает определяющую роль атмосферных осадков в процессах питания водоносных горизонтов. Районы с более высоким среднегодовым количеством осадков характеризуются увеличенными запасами подземных вод вследствие усиленной инфильтрации и фильтрации, тогда как территории с низким уровнем осадков отличаются ограниченными подземными ресурсами.

Как представлено на рисунке 3.7, пространственная изменчивость отображена с помощью цветовой шкалы: красный цвет указывает на зоны с низкими запасами подземных вод, а синий — на области с высокими запасами. Данное распределение отражает выраженные гидроклиматические контрасты в пределах исследуемой территории. В частности, восточная часть исследуемого региона характеризуется пониженными запасами подземных вод, что согласуется с более низкими уровнями осадков, повышенной испаряемостью и ограниченным потенциалом питания. Напротив, юго-западная часть региона демонстрирует более высокие значения ресурсов подземных вод, что связано с благоприятными климатическими условиями, включая большее количество осадков и более интенсивные процессы пополнения.

Таким образом, выявленные пространственные закономерности подтверждают тесную зависимость динамики подземных вод от климатических факторов и подчеркивают значимость интеграции спутниковых и модельных данных для комплексной оценки водных ресурсов.

Как показано на рисунке 3.7, полученные результаты были дополнительно верифицированы посредством сопоставления с данными по дебиту скважин, предоставленными Министерством водных ресурсов и энергетики Эфиопии. Проведённый сравнительный анализ выявил чёткую и устойчивую взаимосвязь между фактической продуктивностью скважин и оценками ресурсов подземных вод, полученными на основе спутниковых наблюдений и модельных расчётов. В частности, скважины с высокими показателями дебита преимущественно приурочены к зонам с повышенными запасами подземных вод, определёнными по данным GRACE, отражающим аномалии суммарных водных ресурсов, а также по результатам моделирования GLDAS (Global Land Data Assimilation System). Напротив, скважины с низкими значениями дебита, как правило, расположены в районах, где оценки ресурсов подземных вод являются сравнительно низкими. Такое пространственное соответствие обеспечивает независимое полевое подтверждение достоверности данных дистанционного зондирования и результатов гидрологического моделирования, усиливая обоснованность

применённого в исследовании интегрированного методологического подхода. Выявленная корреляция свидетельствует о том, что региональная изменчивость ресурсов подземных вод, зафиксированная спутниковыми и модельными методами, адекватно отражает локальные гидрогеологические условия, определяющие водоотдачу скважин. Повышенные ресурсы подземных вод, вероятно, связаны с большей насыщенностью водоносных горизонтов, благоприятными условиями питания и соответствующими фильтрационными свойствами пород, что в совокупности способствует увеличению дебита. В противоположность этому, пониженные значения ресурсов могут указывать на ограниченное питание, низкую водопроницаемость или иные гидрогеологические ограничения, приводящие к снижению продуктивности скважин. В целом согласованность между эмпирическими данными и результатами дистанционных и модельных оценок подтверждает их надёжность и практическую применимость для региональной оценки, управления и устойчивого использования ресурсов подземных вод.

Результаты хорошо согласуются с установленной результататы получено по данным GRACE и GLDAS для исследуемого района, показывая, что зоны с высокими значениями комплексного *индекса* соответствуют зонам высокими значениями подземных воды по данным GRACE и GLDAS, зоны Умеренного комплексного *индекса* связаны со средними подземных воды по данным GRACE и GLDAS, а зоны с низким индексом совпадают с низким подземных воды по данным GRACE и GLDAS(рисунок 3.8).

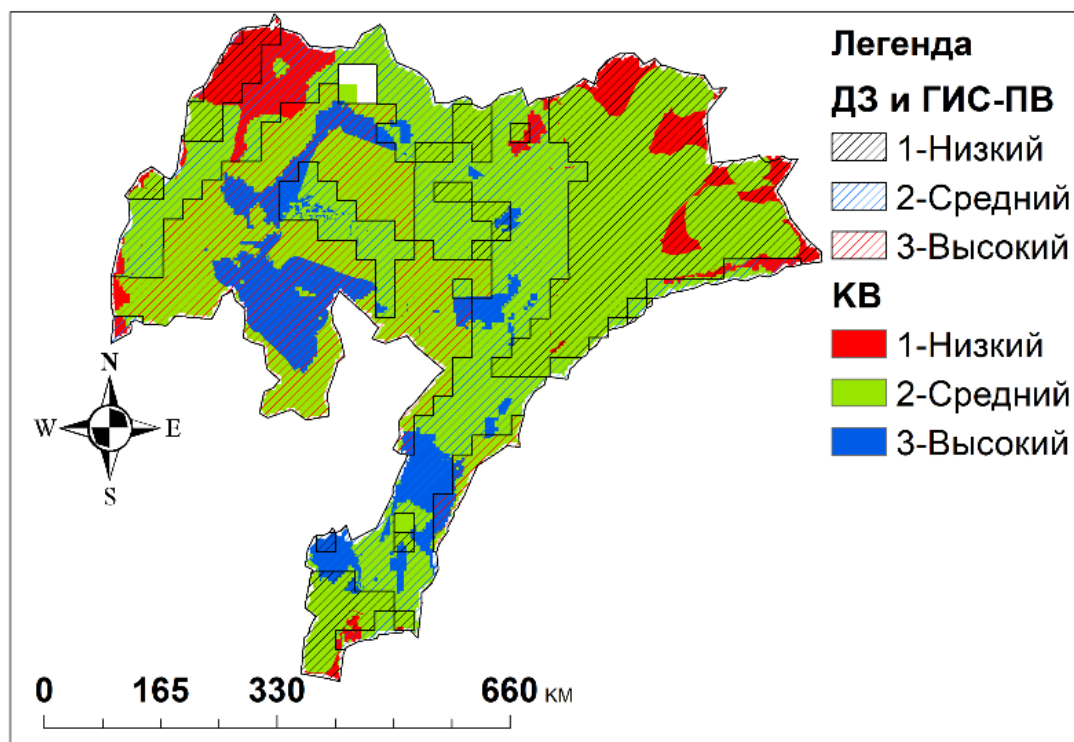


Рисунок 3.8- Схема распределения комплексного индекса, совмещенная со схемой распределения ресурсов подземных вод полученная в результате анализа данных GRACE и GLDAS

Как показано на рисунке 3.8, территории, характеризующиеся высоким значением интегрального (комплексного) индекса, демонстрируют выраженное пространственное соответствие зонам повышенных ресурсов подземных вод, определённых по данным GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) и GLDAS (Global Land Data Assimilation System). Такая пространственная согласованность указывает на наличие устойчивой взаимосвязи между интегрированным индексом — предположительно включающим гидрологические, геологические и, возможно, климатические параметры — и независимо полученными спутниковыми оценками и результатами моделирования наземных процессов, отражающими аномалии суммарных водных ресурсов суши. В частности, районы с высокими значениями индекса последовательно совпадают с зонами, где фиксируются значительные положительные сигналы ресурсов подземных вод, что свидетельствует о способности комплексного индекса адекватно отражать ключевые факторы, определяющие аккумуляцию подземных

вод в пределах исследуемой территории. Аналогичная закономерность наблюдается и для категорий со средними и низкими значениями индекса. Зоны со средними значениями, как правило, соответствуют территориям с умеренными запасами подземных вод, тогда как области с низкими значениями индекса пространственно согласуются с пониженными оценками их объёма. Такая последовательная градационная зависимость для всех трёх категорий (высокая, средняя и низкая) подтверждает не только внутреннюю согласованность индекса, но и его внешнюю валидность при сопоставлении с независимыми гидрологическими наборами данных. Выявленная корреляция подчёркивает надёжность интеграции данных дистанционного зондирования GRACE с результатами наземного моделирования GLDAS для оценки динамики подземных вод на региональном уровне. В целом полученные результаты подтверждают, что комплексный индекс эффективно выделяет гидрогеологически благоприятные и неблагоприятные зоны, формируя научно обоснованную основу для оценки, управления и устойчивого использования ресурсов подземных вод в пределах исследуемого региона.

Несмотря на то, что комплексный индекс в целом показала хорошие результаты, в некоторых районах наблюдалось слабое соответствие или ошибки классификации, обусловленные ограниченным объемом исходных данных. Недостаток наземных наблюдений снизил точность валидации в отдельных зонах, что привело к недостаточно верной оценке ресурсного потенциала подземных вод.

Некоторые ключевые входные слои, такие как расстояние до основной реки, испаряемость, плотность разломов, цифровая модель рельефа и осадки, не имели достаточной пространственной детализации для адекватного представления резкой фильтрационной неоднородности водовмещающих пород, особенно в трещиноватых или вулканических формациях.

Неопределённости также возникали из-за применяемой схемы весов в многокритериальной оценке, которая может не полностью отражает сложные взаимодействия между гидрогеологическими факторами. Более того, грубое пространственное разрешение данных о запасах подземных вод, полученных с

помощью GRACE, ограничивало возможность валидации вариаций модели на мелком масштабе.

Результаты разработанного комплексного индекса водообильности представляют собой важный инструмент для снижения первоначальных затрат, связанных с такими дорогостоящими работами, как бурение, геофизические исследования в скважинах, опытно-фильтрационные работы. Обеспечивая более целенаправленную оценку перспективных участков, данный индекс способствует эффективному выбору и оптимизации полевых исследований.

Выводы. Разработан комплексный индекс водообильности, включающий ряд легко определяемых факторов и позволяющий выделить участки, наиболее перспективные для постановки геологоразведочных работ на подземные воды на начальных стадиях исследований, при этом наиболее перспективными являются зоны обводненных разломов.

ГЛАВЫ 4 ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА И РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭФИОПИИ

Разноцелевая оценка спроса на водоснабжение — это комплексная оценка водных потребностей различных секторов (Хозяйственно-питьевого, промышленного, сельскохозяйственного) в пределах конкретного региона, сопоставляемая с извлечением и использованием водных ресурсов (Fanta et al., 2022). Цель состоит в том, чтобы определить текущие и будущие дефициты или профициты воды и обеспечить основу для устойчивого управления водными ресурсами и стратегического планирования. Разноцелевой спрос на воду в Эфиопии включает разнообразные направления использования воды различными секторами (Berhanu et al., 2014). Спрос на водоснабжение является важнейшей составляющей Многоцелевого использования воды и имеет приоритет согласно водной политике Эфиопии (Коуга, 2020).

Спрос на воду увеличивается по мере роста численности населения, поскольку возрастает потребность в питьевой воде, санитарии и производстве продуктов питания. По данным Worldometer, текущая плотность населения в Эфиопии в середине 2025 года составляет примерно 135 человек на квадратный километр. Этот показатель стабильно растёт: плотность населения в 2021 году составляла 108.59 человек на км² согласно источнику Ethiopia Population Density Historical Chart & Data - Macrotrends, рассчитанной на основе среднегодовой численности населения и площади страны. Рост плотности населения между 2015 и 2021 годами составил 16.9%, а годовой рост за 2021 год — 2.5%. 2025 год 10%.

Водопотребление на душу населения в Эфиопии значительно варьируется между городскими и сельскими районами, а также между различными городами и регионами, зачастую оставаясь ниже международных и национальных стандартов. В среднем жители городских и сельских населённых пунктов Эфиопии потребляют 15–20 литров воды на человека в день (Ali & Terfa, 2012).

До базового уровня 2015 года ряд эмпирических исследований в городах Эфиопии, включая Аддис-Абебу, показывают, что фактическое удельное

водопотребление в муниципальных системах водоснабжения в середине 2010-х годов составляло приблизительно 72–83 л/чел·сут, согласно данным о реальном потреблении. В то же время нормативные проектные показатели водоснабжения для городских поселений Эфиопии предусматривали 60–80 л/чел·сут для домохозяйств, подключённых к трубопроводной сети, и более низкие уровни — 20–30 л/чел·сут — для пользователей общественных водоразборных колонок (отчёт ЛСА). Фактическое бытовое водопотребление в сельской местности, как правило, было значительно ниже и во многих районах не превышало 20 л/чел·сут, что объясняется ограниченным доступом к источникам воды и значительным временем, затрачиваемым на её сбор (Ahmed et al., 2025).

В период с 2015 по 2025 гг. наблюдалось расширение доступа населения к услугам водоснабжения, однако фактические уровни потребления по-прежнему оставались ниже установленных стандартов. Согласно официальному Добровольному национальному обзору Эфиопии, средний показатель обеспеченности питьевой водой в 2020/2021 гг. составлял 19,36 л/чел·сут, что отражает наличие существенных ограничений водоснабжения во многих регионах страны (EVNR, 2022). В этот период фактическое городское водопотребление оценивалось в диапазоне 40–70 л/чел·сут, тогда как в сельской местности оно составляло лишь 10–20 л/чел·сут, при среднем национальном уровне обеспеченности водой порядка 19–25 л/чел·сут. В городе Дилла среднее потребление воды на душу населения было ниже рекомендуемого стандарта (не менее 20 литров на человека в день (Debela & Muhye, 2017; Worajo & Sodo, 2021) и составляло 10 литров. В городе Некемте было отмечено потребление 15.26 литра воды на человека в день для различных бытовых нужд (Ali & Terfa, 2012). В городе Еджубе потребление составляло 14.3 литра в 2017 году, 16 литров в 2018 году, а прогнозы на 2040 год ожидают рост до 36.7 литра в день (Mekuriaw, 2019). В городе Арека — 11.48 литра в день (Worajo & Sodo, 2021). Для города Шашемене при проектировании резервуара для воды было принято среднее потребление 35 литров на человека в день (Gobena, 2016).

На период 2021–2025 гг. в водохозяйственном планировании и государственной политике были приняты более высокие целевые показатели. В рамках долгосрочного планирования водоснабжения до 2030 года, основанного на Планах роста и трансформации, для городов первой категории с численностью населения более одного миллиона человек рекомендован уровень водопотребления 100 л/чел·сут, тогда как для других категорий городов нормативы составляют приблизительно 50–80 л/чел·сут, а минимальный расчётный показатель для сельской местности установлен на уровне около 25 л/чел·сут. Вместе с тем оценки фактического потребления показывают, что в небольших городах в 2024 году средний уровень водопотребления составлял порядка 22 л/чел·сут (Lencha & Babore, 2025). Дополнительные исследования свидетельствуют о том, что во многих зонах обслуживания городские домохозяйства по-прежнему потребляют воду в объёмах, существенно ниже национальных проектных нормативов (около 70 л/чел·сут) (Abraha et al., 2024). В Арба Минч, Зуэй и Дебре-Бырхан водопотребление с 2010 по 2020 годы показало рост среднего потребления с 43, 39 и 28 литров на душу населения в день (до принятия политики) до 72, 51 и 42 литров (после принятия политики [Национальная водная политика Эфиопии]) соответственно (Timotewos & Varjenbruch, 2024). Исследования показывают, что среднесуточное водопотребление в сельской зоне региона Харари составляет 17.6 литра на человека (Ahmed et al., 2025).

Таким образом, в период 2021–2025 гг. фактическое удельное водопотребление в городах Эфиопии оценивается в широком диапазоне 30–70 л/чел·сут, с высокой пространственной вариабельностью между городами и районами, тогда как в сельской местности оно составляет примерно 10–25 л/чел·сут. Показатель водопотребления на душу населения продолжает расти, с прогнозами на 2025 - 2035 годы — 30 и 40 литров в день соответственно (Hamza & Getahun, 2022).

Перечисление всех отраслей, которые используют воду в Эфиопии, включая ее центральную часть, включает питьевое, промышленное, сельское хозяйство, животноводство. Используя исходные данные по отраслевому водоотбору из

технической записка WRI (Adane et al., 2021), описывает базовый уровень 2015 года. Для оценки водопотребления на душу населения и расчёта общего суточного водного спроса используется следующая методика.

Шаг 1: Расчёт общей численности населения: плотность населения составляет 135 человек на квадратный километр, а площадь 1,128,499 км² Эфиопии и 383 000 км² для центральной части. Общая численность населения P равна:

$$P = \rho * S \quad (4.1)$$

где P — это численность населения, составляет 51 705 000 человек, ρ — плотность населения, S — площадь, км²

Шаг 2: Расчёт общего суточного водопотребления: на основе принятой выше нормы суточного потребления на человека (35 литров в день) общий спрос на суммарное хозяйственно-питьевое водоснабжение $Q_{\text{потр}}$, л/сут был рассчитан следующим образом:

$$Q = P * C \quad (4.2)$$

Где Q — это Хозяйственно-питьевой спрос на водоснабжение, а рассчитанный общий спрос составляет 1 809 675 000 литров в день, C — водопотребление на человека.

В результате преобразованное значение Q составило 1 809 675 м³/сут. Таким образом, общий бытовой спрос на водоснабжение Q равен 1 809 675 м³/сутки, что составляет около 0.7×10^9 м³/год.

Согласно технической записке WRI (Adane et al., 2021), описывающей базовый уровень 2015 года на основе исходных данных по отраслевым заборам воды, спрос на хозяйственно-питьевые нужды составлял 679 млн м³/год. Рост численности населения Эфиопии в 2015 году составлял примерно 103 867 135 человек, а в 2025 году — 135 472 051 человек по данным Worldometer, что представляет собой увеличение примерно на 20%. Спрос на 2025 год был масштабирован с использованием коэффициента 20%, чтобы соответствовать растущей потребности в питьевой воде, и составил 13.6 млрд м³/год (таблица 4.2). Для всех отраслевых категорий спроса были выполнены аналогичные расчеты.

Промышленные и энергетические сектора Эфиопии растут, что ведет к увеличению потребности в воде для производства продовольственной и агропромышленной продукции, промышленных товаров, строительных материалов и электроэнергии, энергетики и других отраслей промышленности (WSDE, 2022; Unto, 2024). В результате Эфиопия, включая её центральную часть, обладает разнообразным набором производственных отраслей (AfDB, 2014), включая значительный рост агроперерабатывающей промышленности (EIC-report), текстиля и одежды (EIC-report), производства кожаных изделий и цемента, а также растущее число сахарных заводов (G/Mariam, 2019), при этом несколько новых заводов начали работать в последние годы (AwBA, 2017; Adane et al., 2021; WRI, 2021; Dile et al., 2024; WLRC, 2024).

Помимо этих секторов, другими значительными производственными направлениями являются фармацевтика и стальная/металлообрабатывающая промышленность. Согласно рекомендациям WRI (Adane et al., 2021), промышленное водопотребление составляло 99×10^6 м³/год в 2015 году и увеличилось до 2×10^9 м³/год в 2025 году (таблица 4.2). Техническое руководство показывает, что бассейн реки Аваш обеспечивает 55% национального промышленного водозабора.

Сельское хозяйство, являющееся основой экономики Эфиопии, сильно зависит от орошения, которое составляет значительную часть общего водопотребления (Boru & Regassa, 2020). Согласно отчету MoWIE (MoWIE, 2015) и (Shako & Ping, 2021), орошаемые земли в бассейне Аббай составляли 81 560 га, в бассейне Аваш — 13 410 га, в бассейне Рифт-Валли — 13 930 га, что в сумме составляет 1,1 миллиарда квадратных метров.

В Эфиопии выращивают различные сельскохозяйственные культуры, включая центральные регионы страны, такие как рис, бананы, хлопок, кукуруза, пшеница, тефф, ячмень, овощи (помидоры, картофель, лук), сахарный тростник и сорго (FAO 2012; Taddesse et al., 2020).

Потребность в воде для орошения каждой культуры была собрана из различных документов и отчетов (MoWIE, 2015; EIAR, 2019; Boru & Regassa, 2020;

ABDO, 2020; ESC, 2021; WLRC, 2022; Mulugeta, 2025). Согласно обзору, наибольшую долю орошения потребляет сахарный тростник, за которым следуют бананы (таблица 4.1).

Таблица 4.1- Минимальная и максимальная потребность в воде для каждой культуры в исследуемом регионе (EIC-report, MoWIE, 2015; EIAR. 2019; ABDO, 2020; ESC, 2020) в мм за сезон.

Бассейн	Аббай		Аваш		Рифтовой долины		Сезон(месяц)
	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	
Сорго	450	550	580	640	500	600	4
Рисовый	600	750	550	900	500	800	5.5
Банан	100	1400	1200	1800	1200	1600	13.5
Хлопок	600	900	700	1200	700	1000	5
Кукуруза	500	700	550	850	600	800	5
Пшеница	400	600	450	650	450	650	6
Теффа	400	600	450	650	450	700	4
Ячмень	350	550	400	550	400	600	3.5
Помидоры	500	700	600	900	600	850	3.5
Лук	450	650	550	850	550	800	4.5
Картофель	400	600	450	700	450	700	4
Сахарный тростник	1200	1800	1500	2200	1400	2000	12

Для расчетов была принята максимальная потребность в воде. В результате анализа, потребность в воде для сельскохозяйственных культур в исследуемом регионе варьируется от 550 до 2200 мм за сезон. Объем потребности в воде на сельскохозяйственные нужды был рассчитан путем умножения сезонной потребности в воде для сельскохозяйственных культур на площадь орошаемых земель в исследуемом регионе. Согласно технической записке WR I (Adane et al., 2021), описывающей базовый уровень 2015 года на основе исходных данных по

отраслевым водозаборам, суммарная потребность в воде для орошения составляла $4,6 \times 10^9$ м³/год и увеличилась до 92×10^9 м³/год в 2025 году (таблица 4.2).

Потребность в воде для животноводства значительно варьируется в зависимости от вида животных, возраста и продуктивности, при этом важную роль играют такие факторы, как температура, влажность и рацион питания. Потребность в воде для животноводства в Эфиопии значительна из-за большого поголовья животных (около 35 миллионов единиц скота, TLU) (Feleke et al., 2020). Такие факторы, как засуха, большое поголовье скота и изменение климата оказывают существенное влияние на состояние водных ресурсов.

По имеющимся оценкам потребность в воде для животноводства составляла примерно $233,5 \times 10^6$ м³/год в бассейне Рифт-Валли (Mulugeta, 2025). Оценка по суббассейну Аббай показывает, что потребность в воде для животноводства составляла $26,47 \times 10^6$ м³/год (документ отчета по оценке животноводства Амхарского региона), а при масштабировании на весь бассейн — 79×10^6 м³/год. Согласно стратегическому плану распределения воды бассейна Аваш 2017 года, потребность животноводства составляла $0,12 \times 10^6$ м³/год. По данным Adane et al. (2021), потребность в воде для животноводства составляла примерно 314,9 млн м³ и увеличилась до $6,3 \times 10^9$ м³/год в 2025 году (таблица 4.2).

Таблица 4.2- Объем разноцелевого водоснабжения в исследуемом регионе в настоящее время 2025г. Хозяйственно-питьевое, промышленное, водоснабжение для сельского хозяйства и животноводства

Целевое назначение	Объем водоснабжения, 109 м ³ /год
Хозяйственно-питьевое	13.6
Промышленное	2
Сельское хозяйство	92
Животноводство	6.3

Итак, Разноцелевой спрос на воду для исследуемого региона представлял собой сумму хозяйственно-питьевое водопотребление, промышленного водопотребления, водопотребления для животноводства и сельского хозяйства, что составляет $113,9 \approx 114$ млрд. м³/ год. На рисунке 4.1 показаны пространственное

распределение водопотребления в исследуемом регионе в соответствии с целевым использованием воды, м³/км².

Как показано на рисунке 4.1а, пространственное распределение водопотребления по секторам в пределах исследуемого региона характеризуется выраженной неоднородностью, отражающей различия в плотности населения, структуре землепользования, хозяйственной специализации и агроэкологических условиях. Хозяйственно-питьевое демонстрирует значительную вариабельность: очень высокий уровень спроса (около 50 000 м³/км²) сосредоточен в центральной и северной частях региона, что, вероятно, связано с более высокой плотностью населения и наличием урбанизированных территорий. Высокий уровень спроса (30 000 м³/км²) отмечается в восточной и юго-западной частях, тогда как средние значения (15 000 м³/км²) характерны для западных и южных районов. Низкий уровень (7 500 м³/км²) зафиксирован преимущественно на западе, а очень низкий (5 000 м³/км²) — в северо-западной и отдельных южных частях региона, что, вероятно, соответствует малонаселённым сельским территориям.

Как показано на рисунке 4.1в, сельскохозяйственное водопотребление отличается ещё большей пространственной контрастностью и является доминирующим компонентом общего водопотребления. Очень высокий спрос (500 000 м³/км²) сосредоточен в центральной и северо-восточной частях, а также на отдельных участках юга, что свидетельствует о развитии интенсивного орошаемого земледелия. Высокие значения (300 000 м³/км²) наблюдаются в северных и южных районах, средние (150 000 м³/км²) — в центральной части. Низкие (75 000 м³/км²) и очень низкие (50 000 м³/км²) показатели характерны соответственно для юго-восточных и западных территорий, где, вероятно, преобладает богарное земледелие или ограниченные площади сельхозугодий.

Как показано на рисунке 4.1г, промышленное водопотребление в целом ниже по сравнению с аграрным, однако также имеет выраженную пространственную дифференциацию: высокий уровень (7 000 м³/км²) отмечается в восточной, северной и центральной частях региона, средний (5 400 м³/км²) — на юге, низкий (3 600 м³/км²) — на юго-западе, а очень низкий — в западных и отдельных южных

районах. Как показано на рисунке 4.1б, водопотребление в животноводстве является очень высоким ($40\ 000\ \text{м}^3/\text{км}^2$) в центральной части, высоким ($25\ 000\ \text{м}^3/\text{км}^2$) — в центральных и северных районах, средним ($6\ 000\ \text{м}^3/\text{км}^2$) — в ряде субрегионов, и очень низким ($2\ 000\ \text{м}^3/\text{км}^2$) — на западе. В целом выявленные закономерности указывают на существенные пространственные дисбалансы водопотребления, при этом центральные районы выступают ключевыми зонами повышенной нагрузки на водные ресурсы и требуют приоритетного внимания в рамках интегрированного управления водными ресурсами.

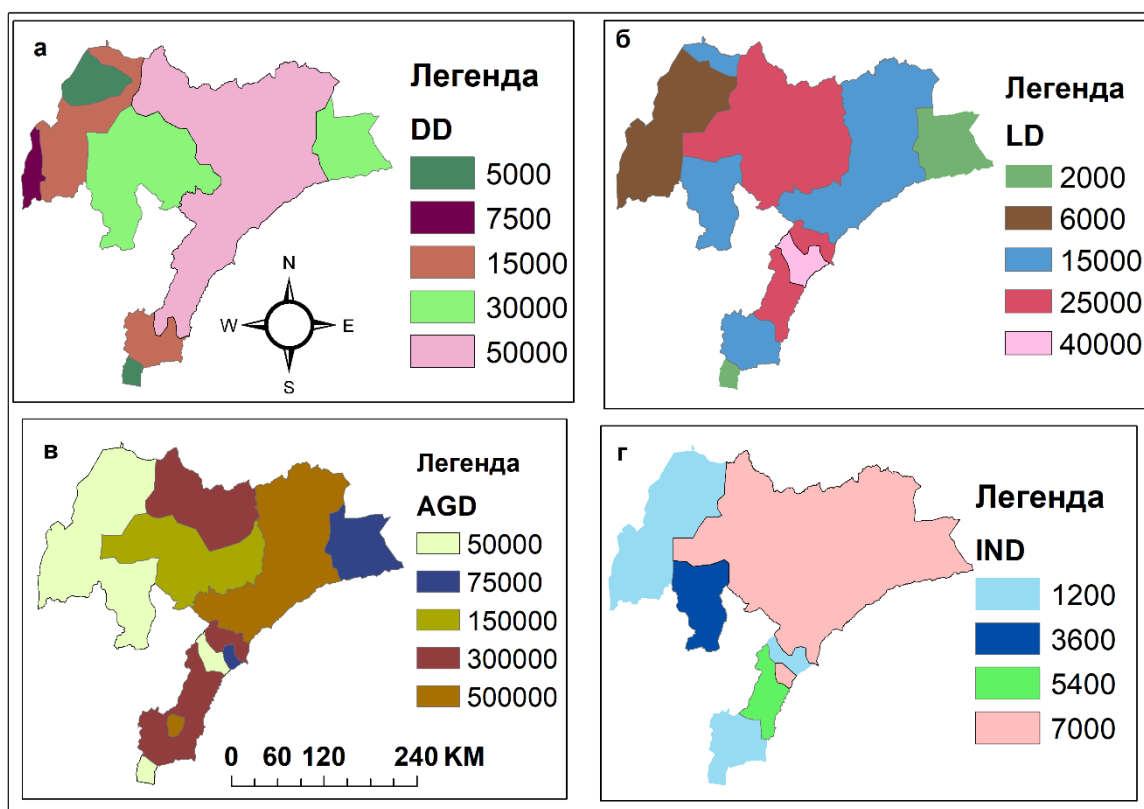


Рисунок 4.1- Разноцелевой спрос в исследуемом регионе: а. хозяйственно-питьевое водопотребление (DD), б. Водопотребление для сельского хозяйства (IRD), в. Водопотребление для животноводства (LD), и г. Промышленное водопотребление (IND). Все показатели приведены в $\text{м}^3/\text{км}^2$.

Как ясно показано на рисунке 4.2, спрос на воду для *хозяйственно-питьевое* в исследуемом регионе колеблется в пределах $5000\text{--}50000\ \text{м}^3/\text{км}^2$, при этом наивысшие значения спроса (розовый цвет) однозначно сосредоточены в центральных частях региона, тогда как минимальные значения (зелёный цвет) зафиксированы в северо-западной части исследуемой территории. Спрос на воду

для сельское хозяйство варьирует от 50000 до 500000 м³/км²: наименьшие значения (оливковый цвет) наблюдаются в западных и южных частях региона, тогда как максимальные значения (оранжевый цвет) отчётливо проявляются в центральных, северо-восточных и южных районах. Потребность в воде для животноводство составляет 2000–40000 м³/км²; минимальные значения (зелёный цвет) отмечены в юго-восточной и южной частях региона, тогда как наибольшие значения (фиолетовый цвет) наблюдаются в южных частях рифтовой долины. Спрос на воду промышленное изменяется в пределах 120–7000 м³/км²: наименьшие значения (синий цвет) характерны для западных, южных и некоторых центральных районов, тогда как наивысшие значения (розовый цвет) чётко фиксируются в центральных, северных и восточных частях исследуемого региона.

Вывод, на основе сезонного анализа водных ресурсов и водопотребления общий годовой водный спрос в исследуемом регионе, включая потребности хозяйственно-питьевое, промышленное, сельское хозяйство и животноводство, составил 114×10^9 м³/год.

Данное исследование охватывает три крупных речных бассейна, расположенных в центральной части Эфиопии, а именно: Аббай, Аваш и Рифт-Валли, которые описываются следующим образом.

Бассейн Аббай, более известный как бассейн Голубого Нила, является одним из крупнейших речных бассейнов Эфиопии, занимая площадь примерно 207 288 км², с 160 установленными гидрологическими постами наблюдения, из которых 131 функционирует. Он берёт начало в Эфиопском нагорье и течёт на северо-запад в Судан, внося значительный вклад в систему реки Нил. Высота бассейна колеблется от 467 м до 4266 м над уровнем моря. В верхнем водосборе наблюдается высокая осадковая обеспеченность, ведутся обширные сельскохозяйственные работы и многочисленные гидроэнергетические проекты, включая Гранд Эфиопскую Ренессансную плотину (GERD). Гидрологический режим бассейна характеризуется выраженной сезонностью с пиковыми стоками в дождливый сезон (июнь–сентябрь).

Бассейн Аваш расположен в центральной и северо-восточной частях Эфиопии и занимает площадь около 122 299 км², с 97 установленными гидрологическими постами, из которых 92 функционируют. Он является эндорейическим, то есть не имеет стока в океан, завершаясь в Афарской впадине. Высоты бассейна варьируются от 74 м до 4201 м над уровнем моря. Климат бассейна от полупустынного до пустынного. Он поддерживает интенсивное орошение, промышленную деятельность и городское водоснабжение. Водные ресурсы характеризуются сильной сезонностью, а бассейн подвержен повторяющимся засухам и проблемам дефицита воды.

Система бассейна Рифтовой-Долины состоит из ряда взаимосвязанных озёр, рек и водно-болотных угодий вдоль Великой Рифтовой долины Эфиопии, с 70 установленными гидрологическими постами, из которых 54 функционируют. Он охватывает разнообразные экологические зоны от нагорий до низменностей, с высотами от 450 м до 4190 м над уровнем моря, и занимает площадь около 53 187,3 км². Бассейн поддерживает сельское хозяйство, рыболовство и малые гидроэнергетические объекты. Водные ресурсы распределены неравномерно, а многие районы сталкиваются с проблемами чрезмерного использования, загрязнения и климатической изменчивости.

Общее количество функционирующих гидрометрических станций составляет 257. В рамках настоящего исследования за рассматриваемый период были использованы данные 26 гидрометрических станций, полученные из Министерства водных ресурсов и энергетики Эфиопии. В зависимости от доступности рядов наблюдений за речным стоком начальные и конечные годы данных для каждой станции представлены в таблице 4.3 ниже.

Таблица 4.3- Данные о речном стоке (расходе воды) на различных гидрометрических станциях

Название станции	Широта (N)	Долгота (E)	Начало года	Q ($\times 10^6$ л/с)	Конец года	Q ($\times 10^6$ л/с)
Gidabo Nr Aposto (082016)	9° 59'	38° 30'	2000	136.3	2020	237.6
Hammessa Nr. Wajifo (082030)	6° 27' 23"	37° 44' 40"	1998	29.1	2015	54.4
MEKI @ MEKI VILLAGE (081018)	8° 04' 5"	38° 52' 32"	2000	119.3	2020	550.2
CHIUFА Nr. ARATA (081025)	7°59'	39°04'	2000	58.4	2020	62.2
Worka Nr. Wondo Genet (082045)	8°26'	39°02'	2000	6.5	2020	13.1
Awash @ Station 7 kilo	8°59'	40°10'	2000	1877.9	2024	4958.5
Awash @ wonji	8°27'0"	39°14'0"	2000	1100.7	2024	2354.5
Awash @ hombole	8°23'0"	38°47'0"	2000	1095.8	2022	1549.7
mojo @ mojo village	8°36'0"	39°5'0"	1999	86.8	2015	89.4
Awash below koka dam	8°28'0"N	39°10'0"	1999	2216.7	2015	1174.3
Awash @ melka kuntire	8°42'0"N	38°36'0"	1999	816.7	2016	1078.4
Awash melka sedi	8°42'33"	38°36'30"	1998	2166.6	2014	2753.2
CHEMOGA near DEBREMARKOS (113008)	10°18'0"	37°44'0"	1990	294.8	2023	316.3
ABBAY near KESSIE (112001)	11°4'0"	38°11'0"	1990	9944.0	2022	14355.2
AMEN at DANGILA (111021)	11°16'0"	36°52'0"	1998	24.2	2014	20.0
AZUARI Nr MOTA (112018)	10°58'0"	38°1'0"	1998	193.4	2014	901.6
Gilgel Abay Nr. Chinba	11°22'	37°02'	2015	2399.4	2023	3393.1
MEGECH NR. AZEZO	12°29'0"	37°27'0"	1990	57.6	2015	437.8
AMEN at DANGILA (111021)	11°16'0"	36°52'0"	1998	24.2	2014	20.2
GELGEL A. NR. MARAWI	11°22'0"	37°2'0"	1988	1766.5	2006	2216.0
GILGEL BE. nr MANDURA B.town (116004)	11°10'0"	36°22'0"	1995	503.3	2014	492.6
BERESSA near DEBRE BERHAN (112007)	9°40'0"	39°31'0"	1995	157.8	2014	157.0
BIRR near JIGA (113013)	10°39'0"	37°23'0"	1985	452.9	2006	386.5
Dabana nr.Bunobedele	8°24'0"	36°17'17"	1990	368.1	2017	359.0
Dedessa nr. Dembi (Toba)	8°3'0"	36°27'0"	2000	1343.4	2017	1240.6
Guder Nr. Guder	8°57'0"	37°45'0"	1990	483.5	2009	325.3

Для гидрологического поста CHEMOGA near DEBREMARKOS (113008) данные наблюдений за период с 1990 по 2023 гг. свидетельствуют о выраженной межгодовой изменчивости речного стока. Анализ временного ряда демонстрирует значительные колебания годовых объёмов стока, отражающие как климатическую вариабельность, так и влияние процессов на уровне водосборного бассейна. Максимальный зарегистрированный годовой сток был зафиксирован в 2023 году и

составил 316,33 млн м³, тогда как минимальное значение наблюдалось в 1993 году и составило 79,5 млн м³ (рисунок 4.2). Существенная разница между максимальными и минимальными показателями подчёркивает динамичный характер гидрологического режима данной речной системы. Особенно заметное снижение стока отмечается в период между 1992 и 1993 гг. Резкое уменьшение объёма воды может быть обусловлено совокупностью природных факторов — таких как снижение количества атмосферных осадков, продолжительные засушливые условия и усиление процессов испарения — а также антропогенных воздействий, включая изменения землепользования, вырубку лесов, расширение сельскохозяйственных угодий и забор воды в верховьях реки. Совокупное действие этих факторов, вероятно, повлияло на процессы формирования поверхностного стока и привело к сокращению подпитки реки за счёт подземных вод в указанный период.

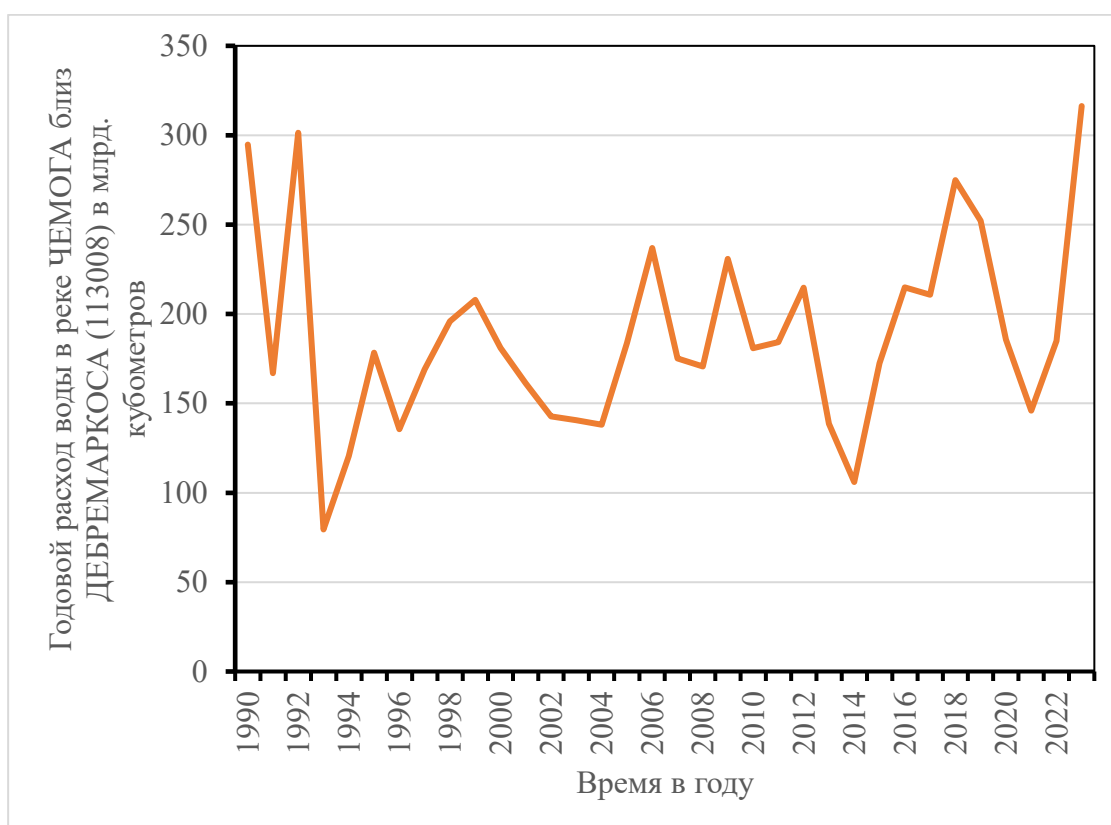


Рисунок 4.2- Годовое изменение речного стока на гидрологическом посту CHEMOGA near DEBREMAROKSA (113008) за период с 1990 по 2023 гг.

На гидрологическом посту ABBAY near KESSIE (112001) анализ годового речного стока показывает значительную межгодовую изменчивость за

рассматриваемый период наблюдений. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2007 году и составило 29 959,7 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 1990 году и составил 9 944,04 млн м³. Существенная разница между максимальными и минимальными значениями подчёркивает динамичный характер гидрологического режима реки. Как представлено на рисунке 4.3, временная динамика годового стока характеризуется выраженными и повторяющимися колебаниями, а не стабильной или равномерной тенденцией. Подобная изменчивость, вероятно, обусловлена совокупным воздействием климатических факторов — таких как вариабельность атмосферных осадков, частота засушливых периодов и температурные изменения, влияющие на процессы испарения, — а также особенностями водосборного бассейна и возможным антропогенным воздействием.

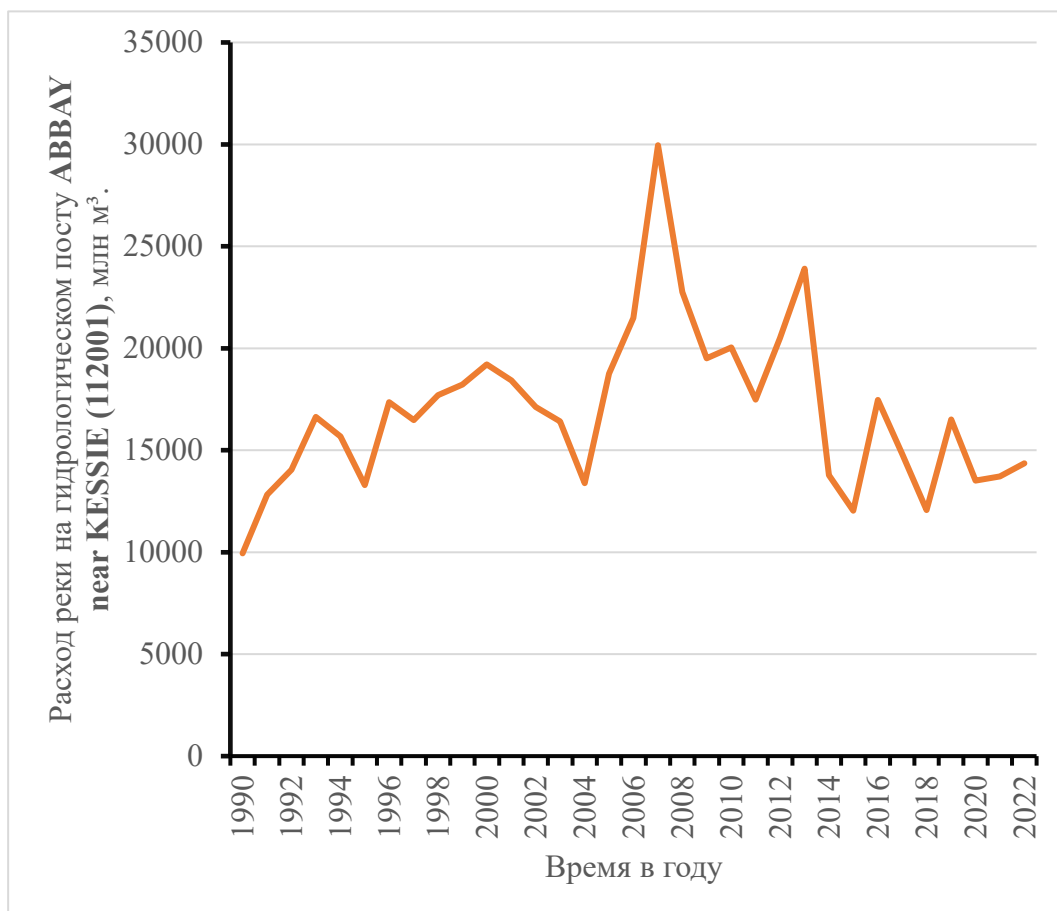


Рисунок 4.3- Расход реки на гидрологическом посту АBBAY near KESSIE (112001) в млн м³ за период с 1990 по 2022 гг.

Для гидрологического поста AMEN at DANGILA (111021) данные наблюдений за речным стоком доступны только за период с 1998 по 2014 гг. Несмотря на относительно короткий ряд наблюдений, представленные материалы позволяют получить важную информацию о характере изменчивости и динамике стока в пределах данного водосборного бассейна. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 1999 году и составило 30,01 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2002 году и составил 10,31 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными значениями свидетельствует о высокой чувствительности речной системы к межгодовой климатической изменчивости и возможному воздействию факторов на уровне бассейна. Как показано на рисунке 4.4, временная динамика стока характеризуется общей тенденцией к снижению в период с 1998 по 2014 гг. Несмотря на наличие межгодовых колебаний, в целом прослеживается постепенное уменьшение объёмов стока. Данная тенденция может быть обусловлена совокупностью факторов, включая сокращение количества атмосферных осадков, увеличение испарения вследствие повышения температуры воздуха, изменения в землепользовании, вырубку лесов, интенсификацию сельскохозяйственной деятельности, а также возможный забор воды в верховьях реки.

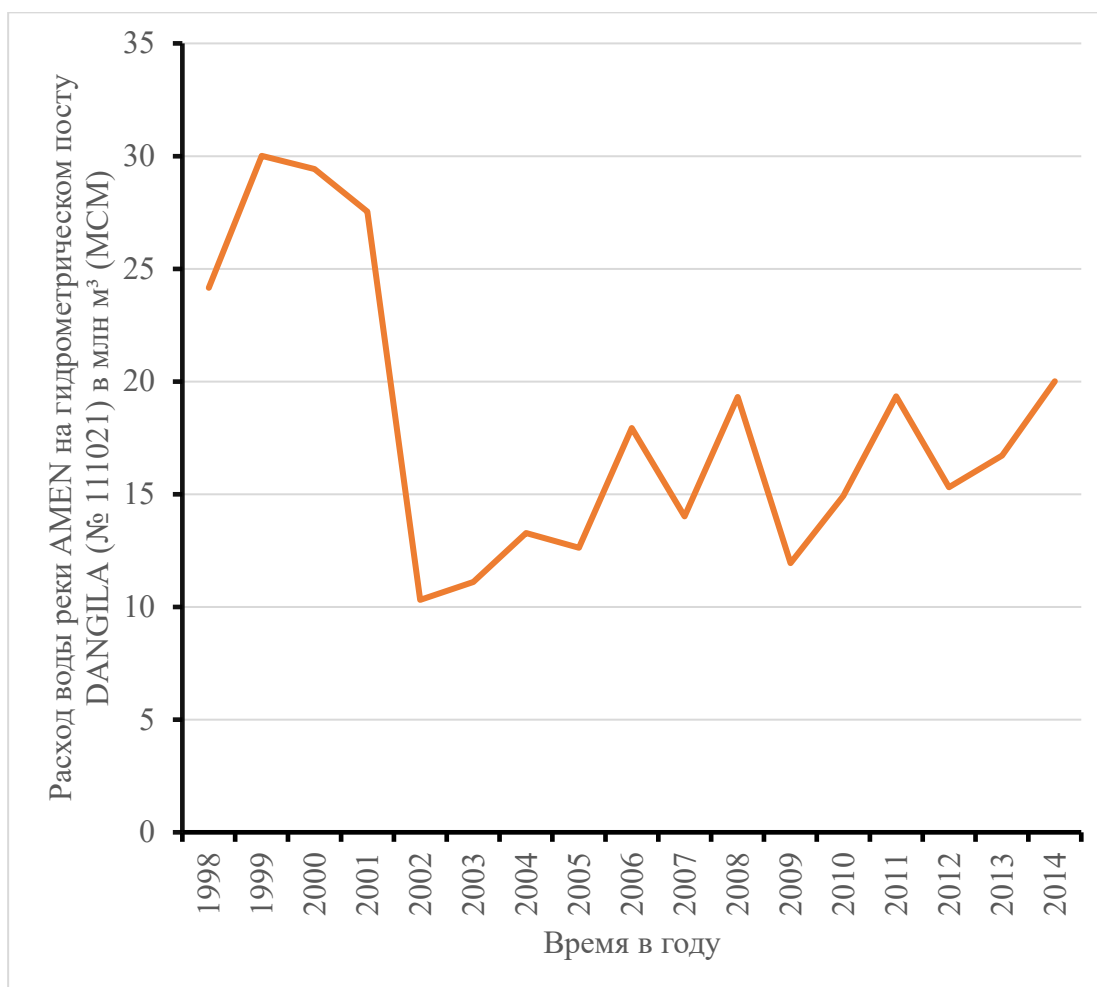


Рисунок 4.4- Расход реки на гидрологическом посту AMEN at DANGILA (111021) в млн м³ за период с 1998 по 2014 гг.

Для гидрологического поста AZUARI Nr MOTA (112018) данные о речном стоке были доступны за период с 1998 по 2014 гг. Представленный ряд наблюдений свидетельствует о выраженной межгодовой изменчивости расхода воды в течение рассматриваемого периода. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2014 году и составило 901,6 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2004 году, что указывает на значительный контраст между годами с наибольшей и наименьшей водностью. Как показано на рисунке 4.5, временная динамика речного стока характеризуется существенными колебаниями. Несмотря на то что доступные данные охватывают период 1998–2014 гг., анализ более широкого временного интервала указывает на значительные изменения водности в период с 1989 по 2011 гг., что свидетельствует о долгосрочной гидрологической изменчивости в пределах бассейна. Особенно

выраженная и стремительная тенденция к увеличению стока наблюдается в период с 2011 по 2014 гг., что привело к достижению максимального значения в 2014 году. Выявленные изменения могут быть обусловлены совокупным воздействием климатических факторов — таких как изменение количества и интенсивности атмосферных осадков, экстремальные дождевые события и засушливые циклы, — а также процессами на уровне водосборного бассейна, включая изменения землепользования, динамику растительного покрова и возможное регулирование стока в верховьях реки. Резкое увеличение объёмов стока в последние годы наблюдений, вероятно, связано с повышенной увлажнённостью или изменением характеристик формирования поверхностного стока.

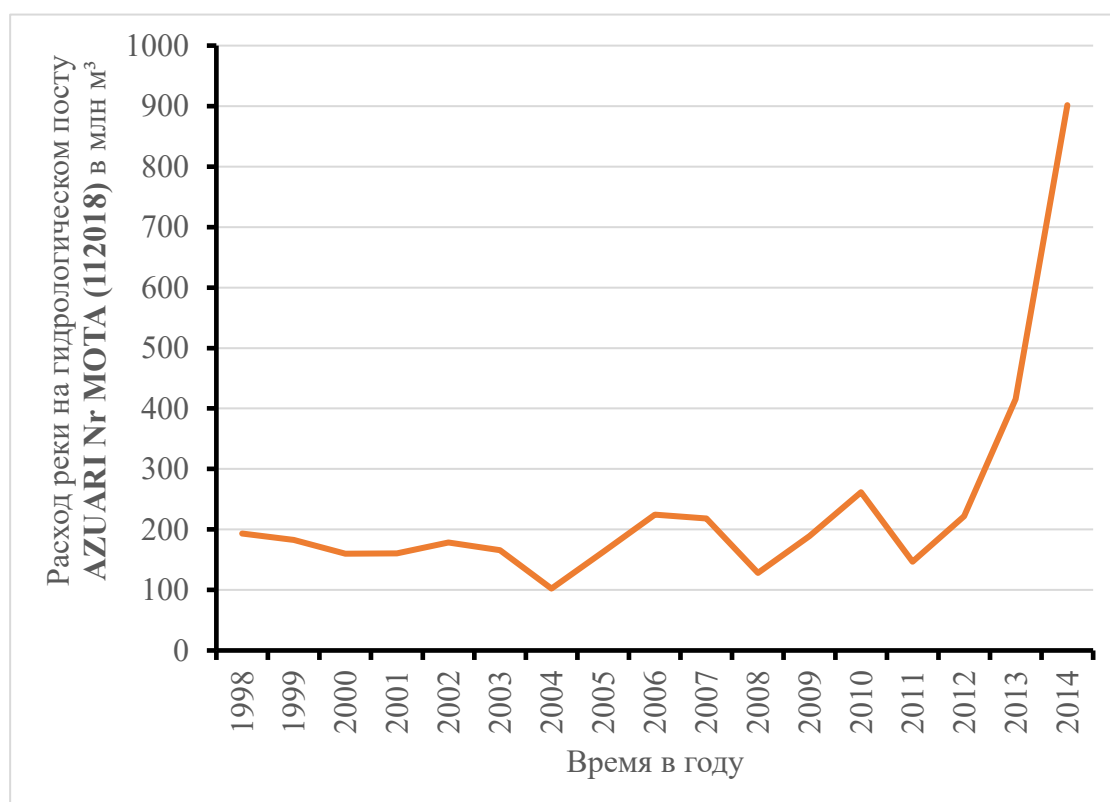


Рисунок 4.5- Расход реки на гидрологическом посту AZUARI Nr MOTA (112018) в млн м³ за период с 1998 по 2014 гг.

Для гидрологического поста Gilgel Abay Nr. Chinba данные о расходе воды доступны только за относительно короткий период с 2015 по 2023 гг. Несмотря на ограниченную продолжительность наблюдений, представленный ряд позволяет оценить краткосрочную гидрологическую изменчивость в пределах бассейна.

Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2017 году и составило 4 121,73 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2015 году — 2 399,42 млн м³. Существенная разница между этими значениями свидетельствует о заметной межгодовой изменчивости стока даже в рамках короткого периода наблюдений. Как показано на рисунке 4.6, в период с 2015 по 2017 гг. прослеживается чёткая тенденция к увеличению объёмов стока, достигшая пикового значения в 2017 году. Данный рост может быть связан с повышенным количеством атмосферных осадков, усилением процессов формирования поверхностного стока или благоприятными гидрометеорологическими условиями в указанные годы. Однако в период с 2017 по 2023 гг. режим стока характеризуется выраженными колебаниями, проявляющимися в чередовании увеличения и снижения годовых объёмов воды без устойчивой направленной тенденции. Наблюдаемая изменчивость, вероятно, обусловлена совокупным воздействием климатических факторов — таких как вариабельность распределения осадков, экстремальные погодные явления и изменения температуры, влияющие на процессы испарения, — а также процессами на уровне водосборного бассейна, включая изменения землепользования и возможное регулирование стока в верховьях реки. Несмотря на ограниченную продолжительность наблюдений, выявленные тенденции подчёркивают динамичный характер гидрологического режима реки Гилгел Абай.

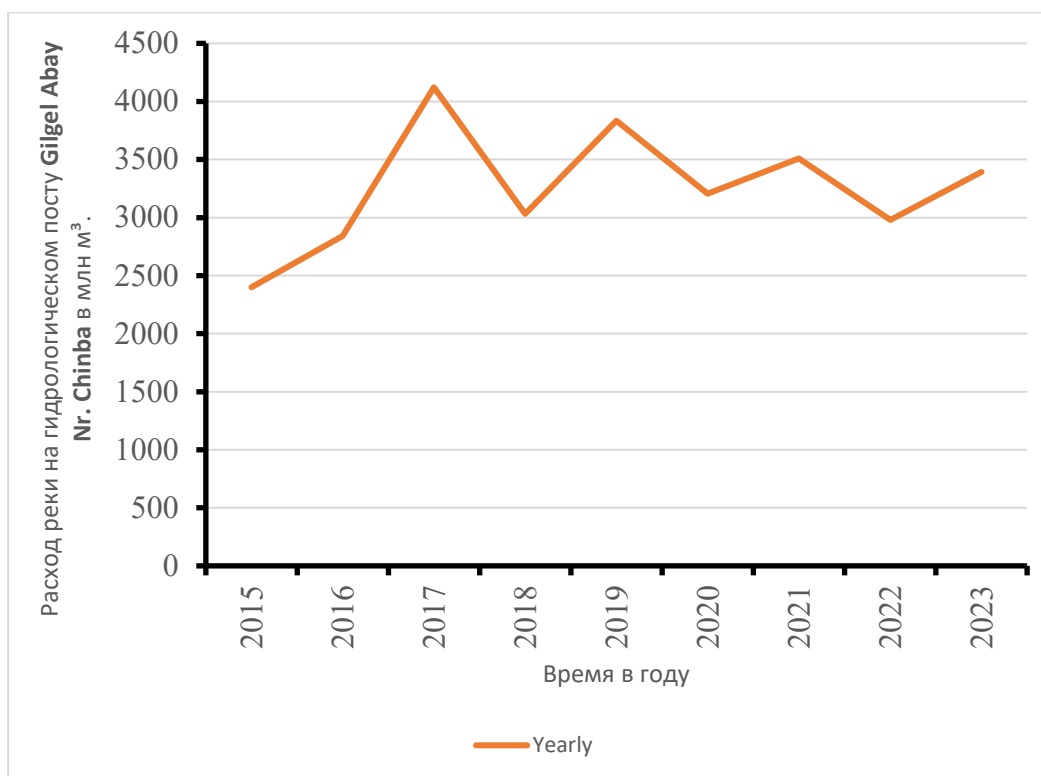


Рисунок 4.6- Расход реки на гидрологическом посту Gilgel Abay Nr. Chinba в млн м³ за период с 2015 по 2023 гг.

Для гидрологического поста Gidabo Nr Aposto (082016) данные о речном стоке были доступны за период с 2000 по 2020 гг. Анализ временного ряда свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости объёмов годового стока в течение рассматриваемого периода. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2020 году и составило 237,6 млн м³, тогда как минимальное значение наблюдалось в 2002 году и составило 112,13 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными показателями отражает динамичный характер гидрологического режима бассейна реки Gidabo. Как показано на рисунке 4.7, временная динамика стока характеризуется выраженными колебаниями на протяжении двух десятилетий наблюдений. Особенно резкое снижение расхода воды отмечается в период между 2001 и 2002 гг., что представляет собой одно из наиболее значительных краткосрочных уменьшений в пределах всего ряда данных. Данное сокращение может быть связано с уменьшением количества атмосферных осадков, засушливыми условиями или другими гидроклиматическими аномалиями, возможно усугублёнными изменениями землепользования или

водозабором в пределах водосборного бассейна. В противоположность этому, в период с 2017 по 2020 гг. прослеживается тенденция к увеличению речного стока, достигшая максимального значения в 2020 году. Подобный рост может быть обусловлен более благоприятными гидрометеорологическими условиями, такими как повышенное количество осадков или усиление процессов формирования поверхностного стока, а также изменениями характеристик водосбора. В целом высокая степень изменчивости, наблюдаемая на посту *Gidabo Nr Aposto*, подчёркивает чувствительность речной системы к климатической вариабельности и факторам, действующим на уровне бассейна.

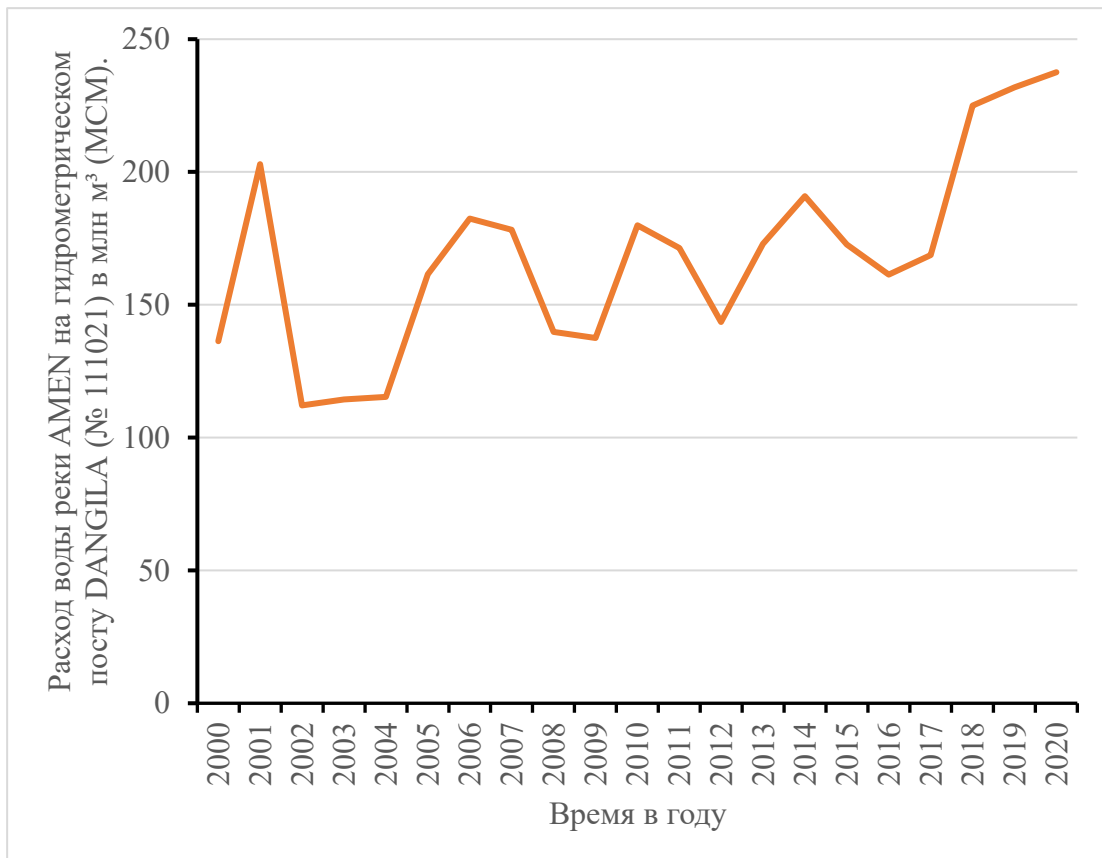


Рисунок 4.7- Расход реки на гидрологическом посту *Gidabo Nr Aposto* (082016) в млн м³ за период с 2000 по 2020 гг.

Для гидрологического поста *Hammessa Nr. Wajifo* (082030) данные о речном стоке были доступны за период с 1998 по 2015 гг. Представленный ряд наблюдений демонстрирует значительную межгодовую изменчивость расхода воды, предоставляя важную информацию о гидрологическом поведении бассейна. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2013 году и

составило 59,61 млн м³, тогда как минимальное значение наблюдалось в 1999 году и составило 16,4 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными показателями подчёркивает динамичный характер речной системы и её чувствительность к климатическим и бассейновым факторам. Как показано на рисунке 4.8, временная динамика стока демонстрирует общую тенденцию к увеличению на протяжении рассматриваемого периода, сопровождающуюся значительными колебаниями годового расхода. Эти изменения свидетельствуют о высокой реакции реки на краткосрочные гидрометеорологические условия, включая вариабельность осадков, сезонное распределение дождей и возможные экстремальные явления, такие как наводнения или засухи. Кроме того, факторы на уровне водосборного бассейна, включая изменения землепользования, вырубку лесов, сельскохозяйственную деятельность и водозабор, могли способствовать наблюдаемым изменениям гидрологического режима.

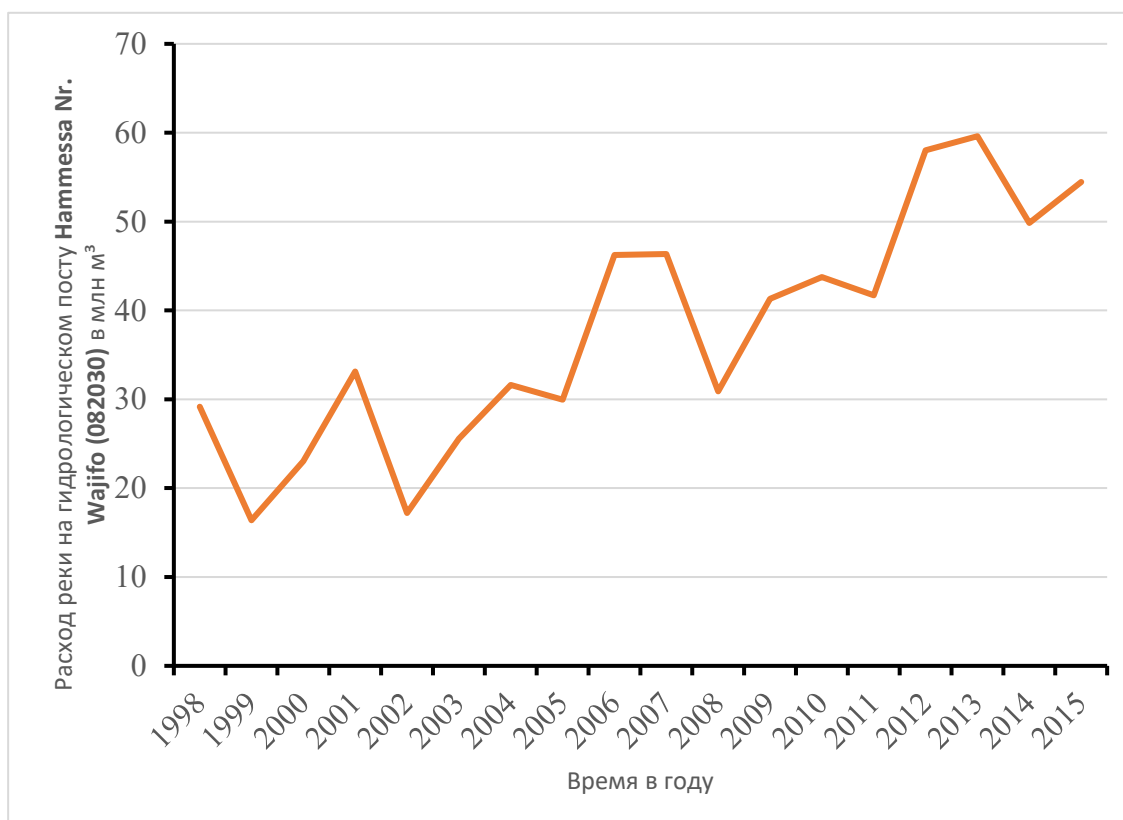


Рисунок 4.8- Расход реки на гидрологическом посту Hammessa Nr. Wajifo (082030) в млн м³ за период с 1998 по 2015 гг.

Для гидрологического поста МЕКИ @ МЕКИ VILLAGE (081018) данные о речном стоке были доступны за период с 2000 по 2020 гг., что позволило получить комплексное представление о гидрологической изменчивости бассейна в течение двух десятилетий. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2020 году и составило 550,2 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2009 году и составил 72,7 млн м³. Широкий диапазон между этими экстремальными значениями подчёркивает выраженную межгодовую изменчивость расхода воды в бассейне, отражающую влияние как климатических факторов, так и особенностей водосборного бассейна. Как показано на рисунке 4.9, временная динамика речного стока демонстрирует колебательную структуру на протяжении всего периода наблюдений. Река характеризуется чередованием периодов высокого и низкого стока, что указывает на её чувствительность к краткосрочным гидроклиматическим условиям, включая вариабельность распределения осадков, интенсивность сезонных дождей и проявления экстремальных гидрологических явлений, таких как наводнения или засухи. Кроме того, антропогенные факторы — изменения землепользования, вырубка лесов, сельскохозяйственная деятельность и забор воды в верховьях реки — также могли способствовать наблюдаемой изменчивости стока.

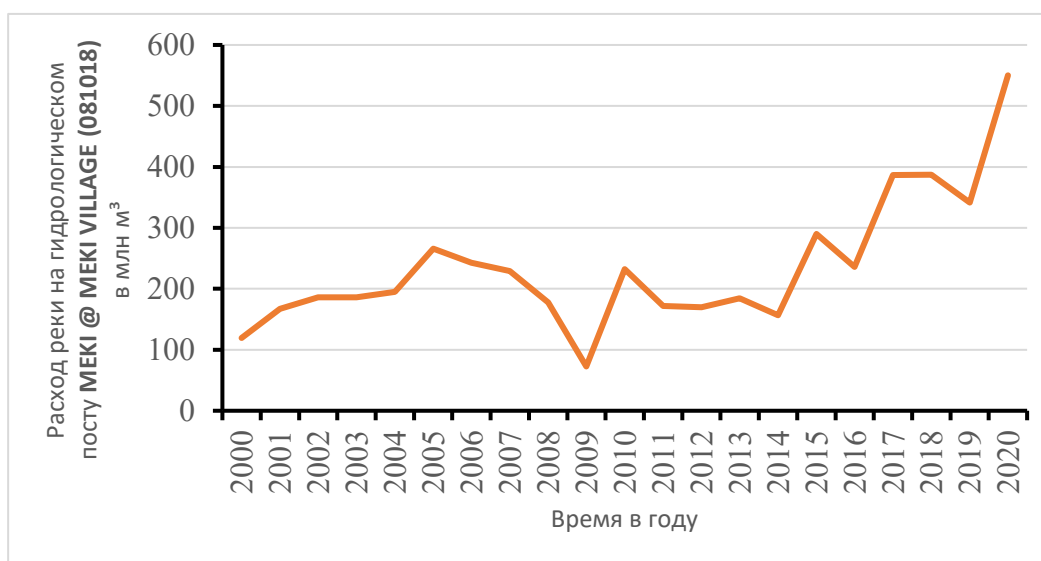


Рисунок 4.9- Расход реки на гидрологическом посту МЕКИ @ МЕКИ VILLAGE (081018) в млн м³ за период с 2000 по 2020 гг.

Для гидрологического поста CHIUFA Nr. ARATA (081025) данные о речном стоке были доступны за период с 2000 по 2020 гг., что позволило получить детальное представление о гидрологической изменчивости бассейна в течение двух десятилетий. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2020 году и составило 62,2 млн м³, тогда как минимальное значение наблюдалось в 2002 году и составило 27,2 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными значениями отражает значительную межгодовую изменчивость стока, подчёркивая динамичный характер речной системы и её чувствительность как к климатическим, так и к бассейновым факторам. Как показано на рисунке 4.10, временная динамика речного стока демонстрирует тенденцию к снижению в период с 2001 по 2002 гг., а затем — общий рост с 2003 по 2020 гг. Первоначальное снижение может быть связано с низким уровнем осадков, засушливыми условиями или другими гидрометеорологическими аномалиями, влияющими на формирование поверхностного стока. Напротив, постепенный рост, наблюдаемый в последующие годы, может отражать улучшение гидрологических условий, включая повышенное количество осадков, усиление поверхностного стока или изменения в землепользовании в пределах бассейна, которые повлияли на режим водного стока.

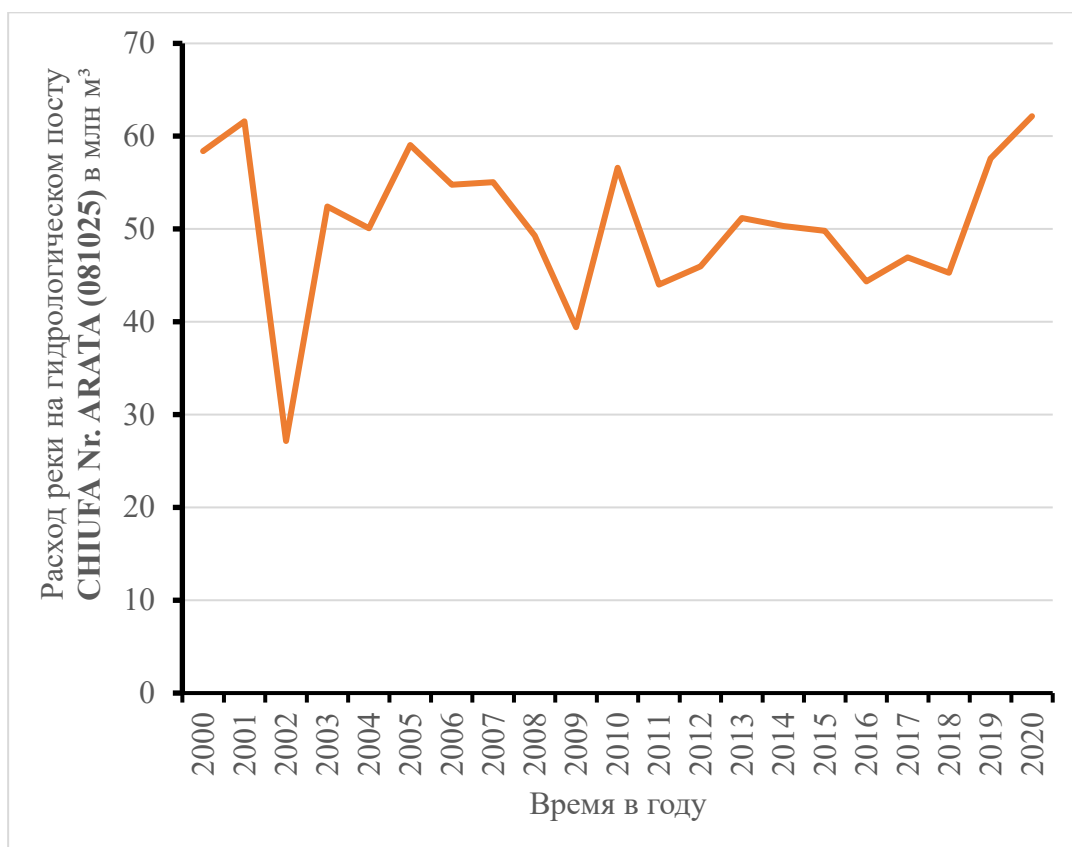


Рисунок 4.10- Расход реки на гидрологическом посту CHIUFА Nr. ARATA (081025) в млн м³ за период с 2000 по 2020 гг.

Для гидрологического поста Worka Nr. Wondo Genet (082045) данные о речном стоке были доступны за период с 2000 по 2020 гг., что позволило получить обзор гидрологической изменчивости бассейна за два десятилетия. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2019 году и составило 13,3 млн м³, тогда как минимальное значение наблюдалось в 2000 году и составило 6,5 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными показателями отражает значительную межгодовую изменчивость стока и подчёркивает чувствительность речной системы Worka к климатическим условиям и факторам на уровне бассейна.

Как показано на рисунке 4.11, временная динамика речного стока демонстрирует общую тенденцию к увеличению на протяжении периода наблюдений, хотя заметны и небольшие колебания от года к году. Такая динамика свидетельствует о том, что бассейн постепенно восстанавливался или получал увеличенные гидрологические притоки, при этом оставался чувствительным к краткосрочным гидроклиматическим вариациям, включая изменения

интенсивности осадков, сезонное распределение дождей, а также периодические засухи или периоды высоких стоков.

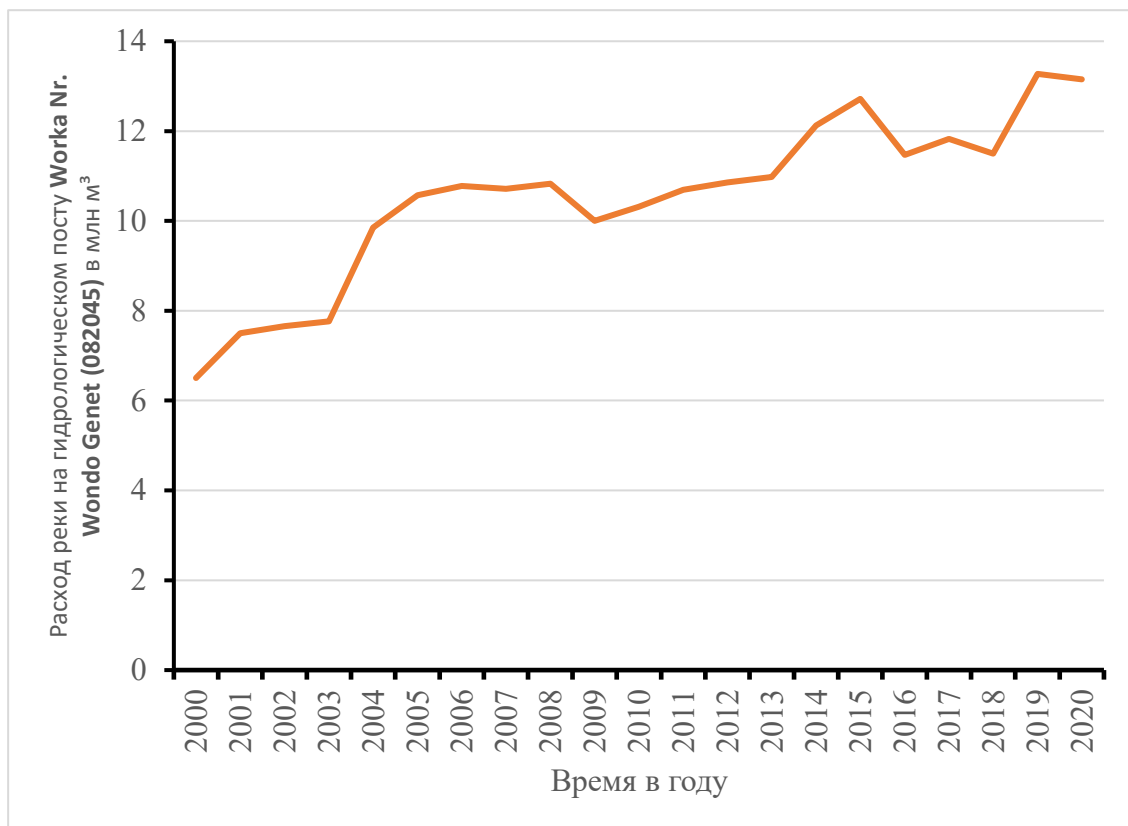


Рисунок 4.11- Расход реки на гидрологическом посту Worka Nr. Wondo Genet (082045) в млн м³ за период с 2000 по 2020 гг.

Для гидрологического поста Awash @ Station 7 kilo данные о речном стоке были доступны за период с 2000 по 2024 гг., что позволило получить комплексное представление о гидрологической изменчивости бассейна реки Аваш почти за четверть века. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2020 году и составило 6 255,6 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2015 году и составил 606,1 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными значениями подчёркивает выраженную межгодовую изменчивость речного стока, отражая динамичный гидрологический режим бассейна. Как показано на рисунке 4.12, временной ряд речного стока демонстрирует значительные колебания на протяжении всего периода наблюдений. Данные свидетельствуют о чередовании периодов увеличения и снижения расхода воды, что указывает на высокую чувствительность реки как к

краткосрочным гидроклиматическим вариациям, так и к долгосрочным гидрологическим факторам. Такая изменчивость может быть обусловлена изменениями в режиме осадков, экстремальными дождевыми событиями, засухами, а также сезонными колебаниями формирования поверхностного стока. Кроме того, антропогенные факторы, включая забор воды для ирригации, изменения землепользования и регулирование стока посредством водохранилищ в пределах бассейна, также могли способствовать наблюдаемой изменчивости.

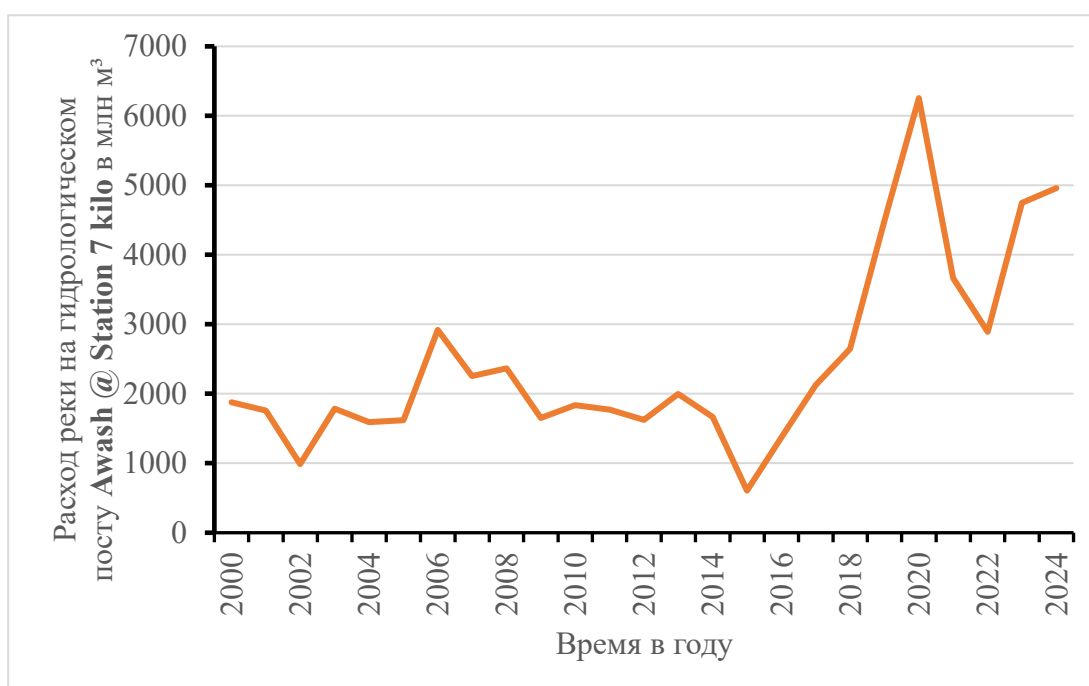


Рисунок 4.12- Расход реки на гидрологическом посту Awash @ Station 7 kilo в млн м³ за период с 2000 по 2024 гг.

Для гидрологического поста Awash @ Wonji данные о речном стоке были доступны за период с 2000 по 2024 гг., что позволило получить подробный обзор гидрологической изменчивости за почти четверть века. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2024 году и составило 2 387,1 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2003 году и составил 1 073,4 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными значениями подчёркивает значительную межгодовую изменчивость речного стока, отражая как климатические влияния, так и гидрологические процессы на уровне водосборного бассейна.

Как показано на рисунке 4.13, временной ряд речного стока демонстрирует выраженную изменчивость на протяжении всего периода наблюдений, характеризующуюся чередованием периодов низкого и высокого расхода. Несмотря на эти колебания, за 24-летний период наблюдается общая тенденция к увеличению стока. Такая динамика свидетельствует о высокой чувствительности реки к краткосрочным гидроклиматическим вариациям, включая годовое распределение осадков, сезонные колебания дождей и экстремальные гидрологические явления, такие как засухи или наводнения. Кроме того, на наблюдаемую изменчивость могли влиять антропогенные факторы, включая забор воды в верховьях, ирригационные потребности, изменения землепользования и регулирование стока посредством водохранилищ.

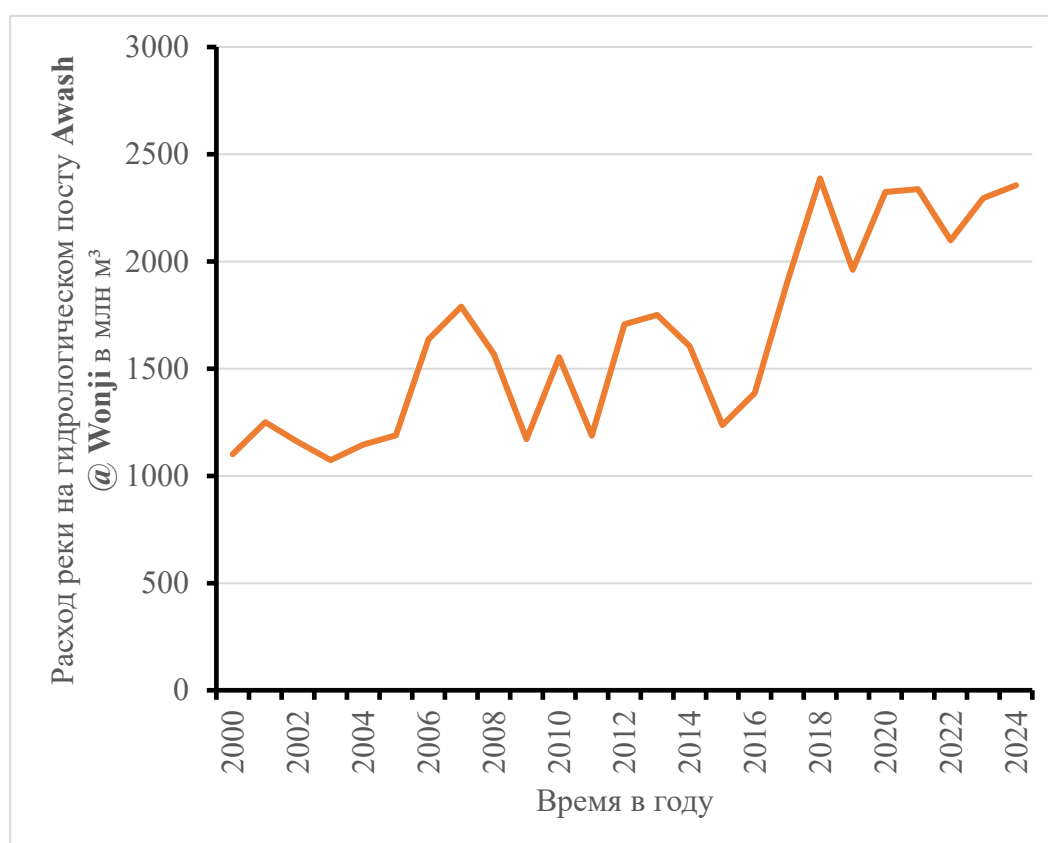


Рисунок 4.13- Расход реки на гидрологическом посту Awash @ Wonji в млн м³ за период с 2000 по 2024 гг.

Для гидрологического поста Awash @ Hombole данные о речном стоке были доступны за период с 2000 по 2022 гг., что позволило получить подробный ряд наблюдений гидрологической изменчивости на протяжении более чем двух

десятилетий. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2006 году и составило 1 809,7 млн м³, тогда как минимальное значение наблюдалось в 2015 году и составило 786,9 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными показателями подчёркивает выраженную межгодовую изменчивость речного стока, отражая динамичный и сложный гидрологический режим бассейна реки Аваш.

Как показано на рисунке 4.14, временной ряд стока демонстрирует значительные колебания на протяжении всего периода наблюдений. Данные показывают чередование периодов высокого и низкого расхода, что указывает на высокую чувствительность реки как к краткосрочным гидроклиматическим вариациям, так и к долгосрочным процессам на уровне водосборного бассейна. Эти колебания могут быть обусловлены изменчивостью интенсивности и распределения осадков, возникновением экстремальных гидрологических явлений, таких как наводнения или засухи, а также сезонными изменениями в формировании поверхностного стока. Кроме того, антропогенные воздействия — включая забор воды для ирригации, изменения землепользования и регулирование стока посредством водохранилищ — также могли способствовать наблюдаемой изменчивости.

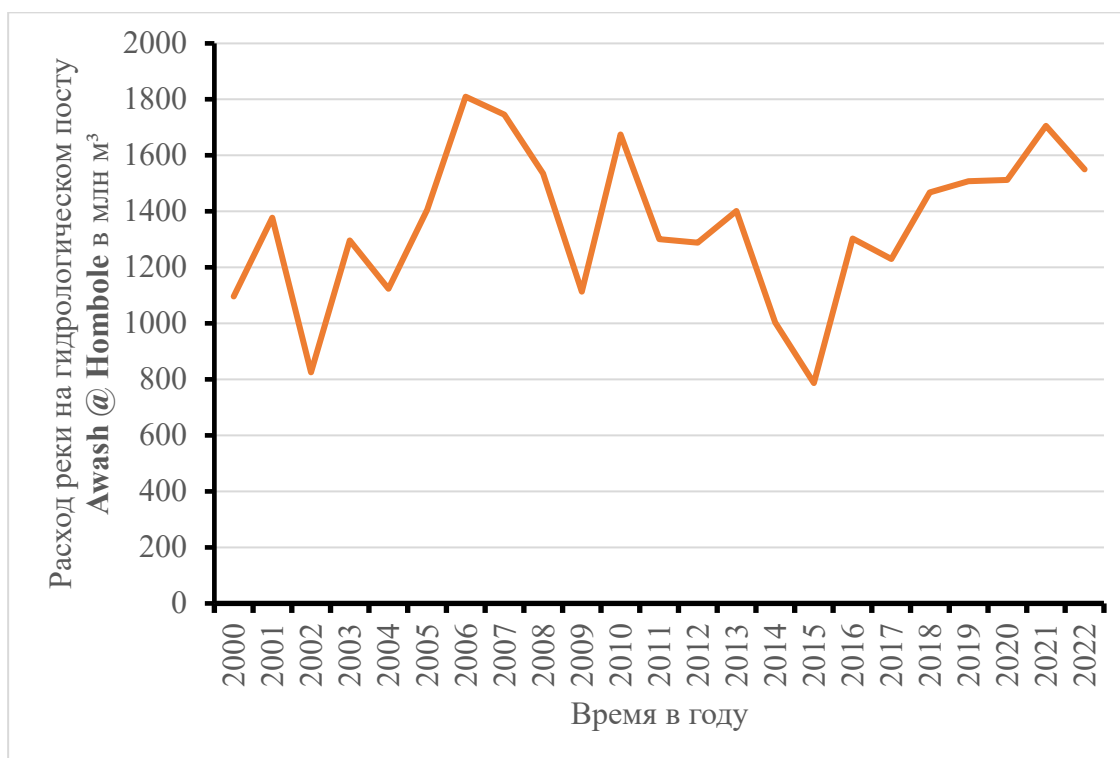


Рисунок 4.14- Расход реки на гидрологическом посту Awash @ Hombole в млн м³ за период с 2000 по 2022 гг.

Для гидрологического поста Mojo @ Mojo Village данные о речном стоке были доступны за период с 1999 по 2015 гг., что позволило получить ценные сведения о гидрологической изменчивости бассейна за 16 лет. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 1999 году и составило 886,84 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2008 году и составил 66,9 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными значениями подчёркивает выраженную межгодовую изменчивость речного стока и отражает чувствительность системы реки Mojo к климатическим условиям и процессам на уровне водосборного бассейна.

Как показано на рисунке 4.15, временной ряд речного стока демонстрирует резкое снижение в период с 1999 по 2002 гг., что указывает на период сокращения гидрологического притока, возможно обусловленного ниже среднего количества осадков, засушливыми условиями или изменениями процессов в пределах водосбора. После этого первоначального снижения расход реки характеризуется чередованием периодов увеличения и уменьшения, отражая динамичный отклик системы как на краткосрочные гидроклиматические вариации, так и на

антропогенные воздействия, включая изменения землепользования, забор воды для орошения и локальные практики управления водными ресурсами. Резкое первоначальное снижение и последующие колебания стока могут существенно влиять на планирование ирригационных мероприятий, водоснабжение населения и состояние водных экосистем.

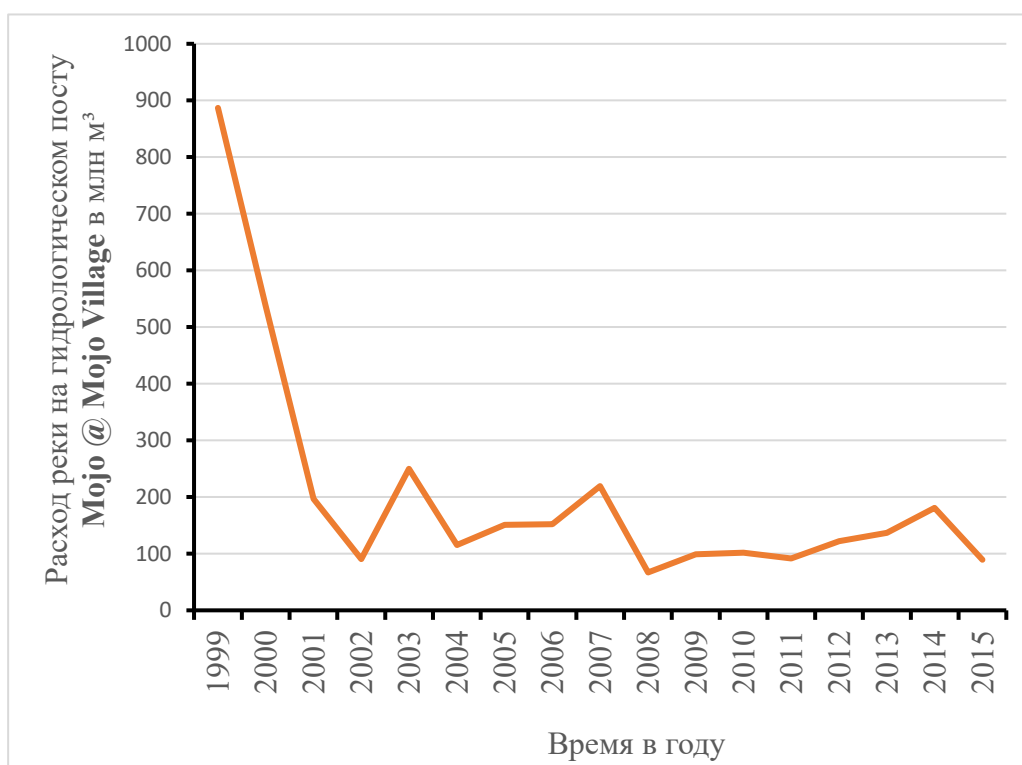


Рисунок 4.15- Годовой расход реки на гидрологическом посту Mojo @ Mojo Village в млн м³ за период с 1999 по 2015 гг.

Для гидрологического поста Awash @ Melka Kuntire данные о речном стоке были доступны за период с 1999 по 2016 гг., что позволило получить важную информацию о гидрологической изменчивости бассейна за почти два десятилетия. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 2007 году и составило 1 431,73 млн м³, тогда как минимальный показатель наблюдался в 2014 году и составил 642,1 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными значениями подчёркивает выраженную межгодовую изменчивость речного стока, отражая динамичный гидрологический режим системы реки Аваш.

Как показано на рисунке 4.16, временной ряд речного стока демонстрирует как периоды снижения, так и повышения расхода на протяжении всего периода наблюдений с 1999 по 2016 гг. Периоды уменьшения стока могут быть связаны с ниже среднего уровня осадков, засушливыми условиями или изменениями процессов в пределах водосбора, влияющими на формирование поверхностного стока, тогда как периоды увеличения расхода, вероятно, отражают усиление осадков, увеличение поверхностного стока или другие гидрометеорологические факторы.

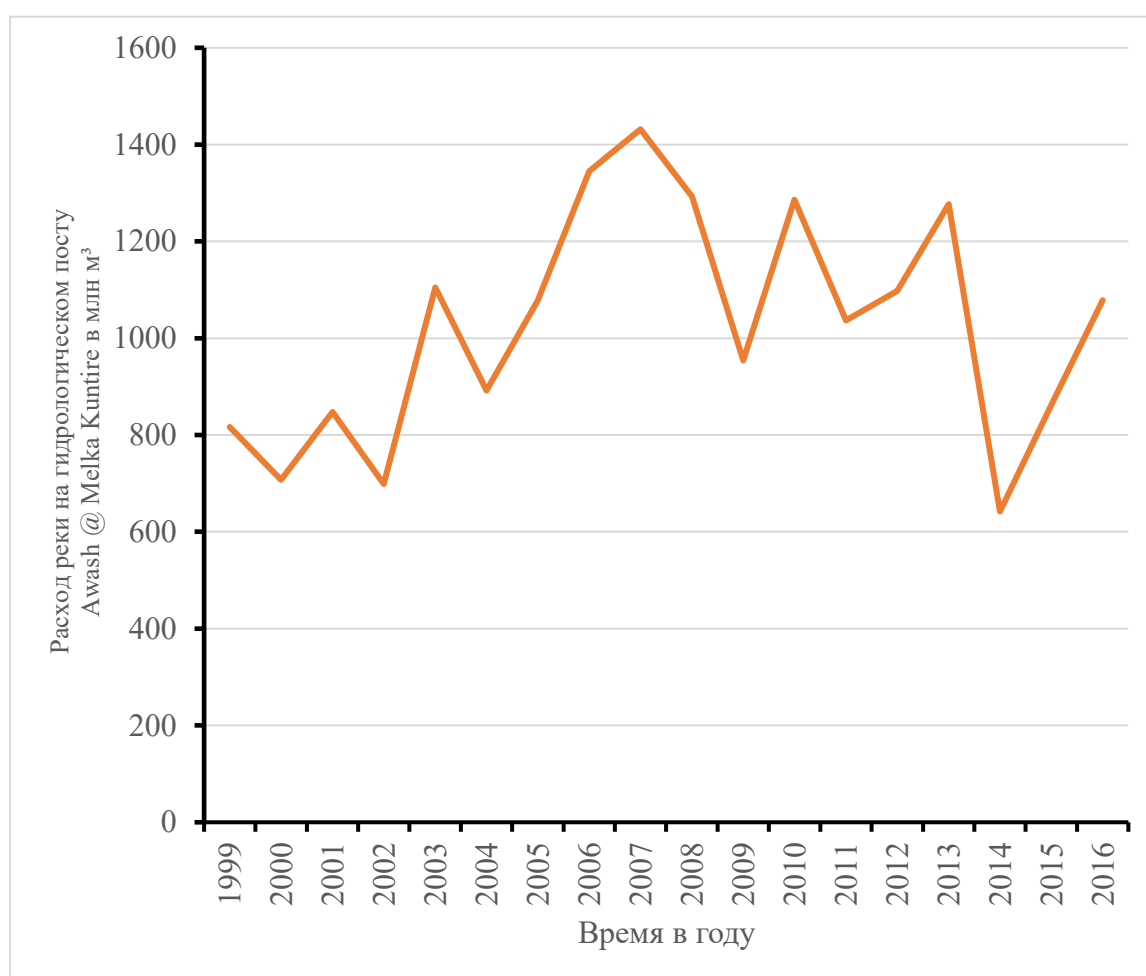


Рисунок 4.16- Расход реки на гидрологическом посту Awash @ Melka Kuntire в млн м³ за период с 1990 по 2016 гг.

Для гидрологического поста Awash ниже плотины Кока данные о речном стоке были доступны за период с 1999 по 2015 гг., что позволило получить ценную информацию о гидрологическом поведении нижнего течения реки Аваш. Максимальное значение годового стока было зафиксировано в 1999 году и

составило 2 216,7 млн м³, тогда как минимальное значение наблюдалось в 2009 году и составило 708,14 млн м³. Существенная разница между этими экстремальными значениями подчёркивает выраженную межгодовую изменчивость речного стока, отражая динамичные гидрологические условия, обусловленные как климатической вариабельностью, так и антропогенными воздействиями в пределах водосбора.

Как показано на рисунке 4.17, временной ряд стока демонстрирует периоды как снижения, так и увеличения расхода воды. Значительное уменьшение стока наблюдалось в период с 1999 по 2005 гг., с 2006 по 2009 гг. и с 2013 по 2014 гг., в то время как краткосрочные увеличения происходили между 2005 и 2006 гг., а также между 2014 и 2015 гг. Несмотря на эти отдельные повышения, общий тренд для доступного ряда данных показывает тенденцию к уменьшению речного стока на протяжении 16-летнего периода наблюдений. Сокращение объёмов стока может оказывать влияние на доступность воды для сельского хозяйства, бытового потребления и промышленного использования, а также затрагивать водные экосистемы и среду обитания водно-болотных угодий в нижнем течении. Понимание факторов, определяющих эти изменения — таких как сезонное распределение осадков, забор воды в верховьях и работа водохранилищ — имеет ключевое значение для разработки адаптивных стратегий управления.

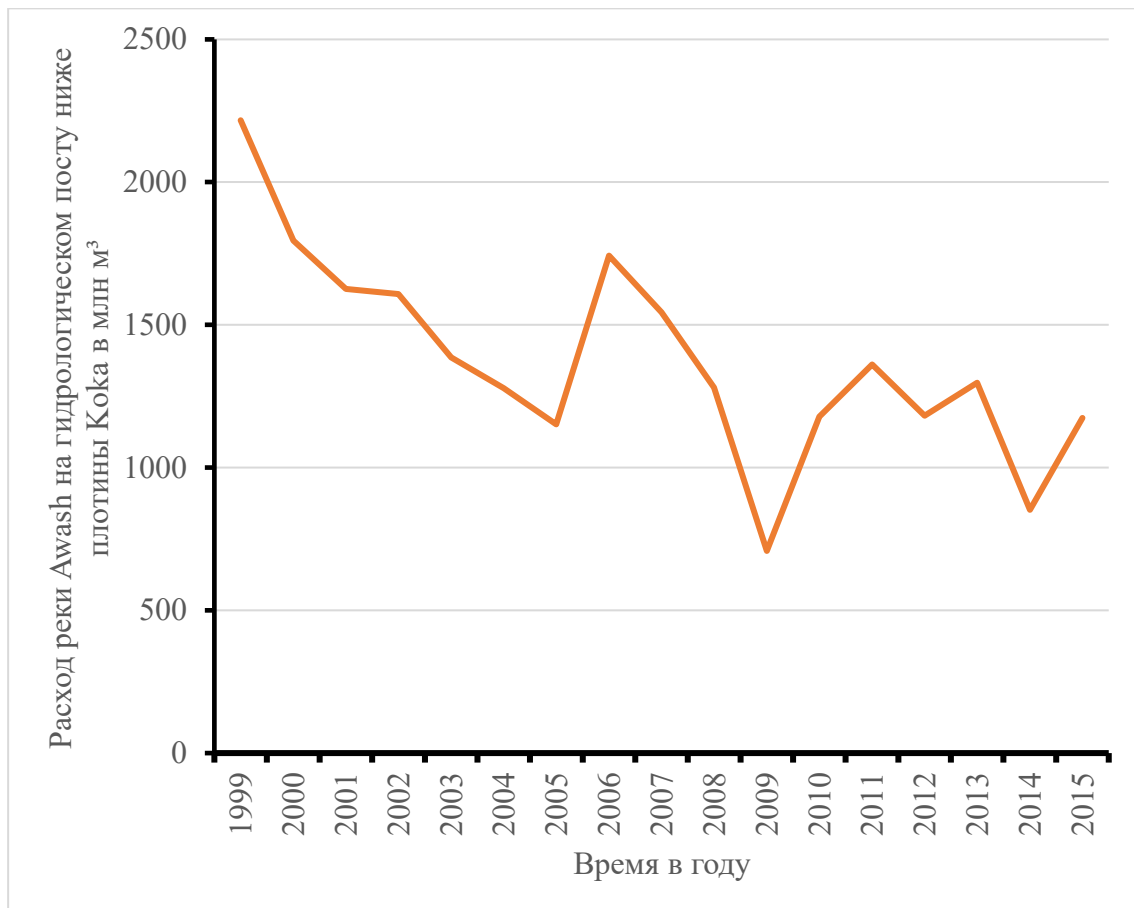


Рисунок 4.17- Расход реки на гидрологическом посту Awash ниже плотины Кока в млн м³ за период с 1999 по 2015 гг.

Аналогичные аналитические подходы были применены для оценки изменчивости речного стока по всем собранным наборам данных, что выявило высокую степень межгодовой изменчивости расхода воды. Во всех наборах данных наблюдались как тенденции к увеличению, так и к уменьшению стока, в зависимости от временной и пространственной доступности информации. Такая изменчивость, вероятно, отражает интегрированное воздействие множества факторов, включая климатические драйверы — такие как пространственно-временная изменчивость осадков, возникновение экстремальных гидрометеорологических явлений и изменения испарения, связанные с температурой, а также факторы на уровне водосборного бассейна, включая динамику землепользования, меры по сохранению почвы и управление водными ресурсами в верховьях.

Кроме природных и климатических факторов, на режимы речного стока в исследуемом регионе значительное влияние оказывают антропогенные вмешательства — забор воды для ирригации, промышленного и бытового водопользования, регулирование стока с помощью водохранилищ и процессы урбанизации. Наблюдаемые тенденции к увеличению и снижению речного стока имеют важное значение для управления водными ресурсами на региональном и локальном уровнях, продуктивности сельского хозяйства и стабильности функционирования водных экосистем.

Тщательное понимание этой временной изменчивости является критически важным для эффективного планирования распределения воды, снижения рисков наводнений и засух, а также для разработки устойчивых стратегий управления водными ресурсами. Интеграция гидрологического мониторинга с данными о климате и управлении водосборными бассейнами позволяет принимать адаптивные управленческие решения, обеспечивающие водную безопасность, поддержку сельскохозяйственной и экономической деятельности, а также сохранение экологической целостности исследуемых речных бассейнов.

Вывод, взаимодействие между подземными водами и речной системой является ключевым фактором для понимания процессов питания и разгрузки подземных вод в исследуемом регионе. Однако из-за отсутствия продольных измерений речного стока в данном разделе взаимосвязь между разгрузкой подземных вод в русла рек и подпиткой подземных вод за счёт речной системы не была оценена. Для корректного определения этих процессов необходим детальный, отдельный анализ по каждой речной сети.

Поверхностные водные источники играют жизненно важную роль в обеспечении питьевой водой, орошении, промышленности и экосистем в Эфиопии, включая её центральные регионы. К этим источникам относятся естественные и искусственные водоемы, такие как реки, озера, водохранилища и болота, которые собирают и аккумулируют пресную воду на поверхности Земли.

Поэтому оценка ресурсов поверхностных вод имеет ключевое значение для управления водными ресурсами и включает сочетание различных методов, таких

как дистанционное зондирование, гидрологическое моделирование и полевые работы на ключевых участках, включающий замеры Сток реки (Papa & Frappart, 2021).

Для оценки ресурсов поверхностных вод применяются различные методы от традиционных расчетов стока до современных спутниковых технологий, таких как: SPHY (Spatial Processes in Hydrology) применяется для рек, питаемых ледниками и снегом (Terink et al., 2015); HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) основан на параметрах осадков, температуры и потенциальной испаряемости (Bergström, 1992); HEC-Series (Hydrologic Engineering Center) используется для картирования наводнений (Feldman, 2020); SWAT (Soil and Water Assessment Tool) моделирует отложение осадков, сельскохозяйственные химические вещества и влияние землепользования на водохранилища (Chathuranika et al., 2022); MIKE SHE- интегрирует все компоненты гидрологического цикла (Abbott et al., 1986); SRM (Snowmelt Runoff Model) применяется в горных районах (Bhagwat et al., 2025); J2000- работает с дневным временным шагом (Krause, 2001); HEC-HMS (Chathuranika et al., 2022); Методы Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) оценивают прямой поверхностный сток (USDA-NRCS, 2009); Методы Rational (Chow et al., 1988) и Horner (1882) для оценки пиковых расходов в небольших городских районах; Модель Green-Ampt (Vélez et al., 1998) и модель Horton (1933)- применяются для проницаемых сельских территорий.

Метод SCS-CN был разработан в 1986 году Службой охраны почв США (USDA SCS) (USDA-NRCS, 2009; USDA-NRCS, 2010) и является наиболее популярной эмпирической моделью для оценки поверхностного стока от осадков, широко используемой на практике (Shadeed & Almasri, 2010; Abdel-Fattah et al., 2018; Yoshe et al., 2024; Yoshe, 2025c). По сравнению с другими гидрологическими моделями, метод SCS-CN требует относительно небольшого числа входных данных (глубина осадков (RF) и численный показатель (CN)), адаптируется к различным условиям водосбора, интегрируется с современными гидрологическими моделями (HEC-HMS, SWAT и др.) и широко признан при проектировании и разработке водной политики (Huo et al., 2019; Soulis, 2021).

Таким образом, в данном исследовании, учитывая доступность данных и широко используемый метод, для расчета ресурсов поверхностных вод в исследуемом регионе был применен метод SCS-CN. Эта модель основана на оценке водного баланса и использует два входных параметра: осадки и численный показатель (CN) для оценки прямого стока с водосборного бассейна (Abdel-Fattah et al., 2018; Caletka et al., 2020; Kumar et al., 2021; Herath et al., 2024). Модель присваивает определенной территории значение числа кривой (CN) в диапазоне от 0 до 100, которое отражает потенциал стока. Более высокое значение CN указывает на больший потенциал стока. Этот метод известен своей простотой, гибкостью и наличием обширных данных.

В результате расчет ресурсов поверхностных вод для исследуемого региона выполнялся следующим образом (Chow et al., 1988; Yoshe et al., 2024; Yoshe, 2025c).

$$Q = \frac{h * S}{t * 1000} \quad (4.3)$$

где t — продолжительность расчетного периода в годах, Q — средний сток за исследуемый период в кубических метрах в год, S — площадь водосбора в квадратных метрах, 1000 — коэффициент для перевода м в мм, а h — глубина стока в мм, которая рассчитывается следующим образом (USDA-NRCS, 2009; USDA-NRCS, 2010).

$$h = \frac{(RF - I_a)^2}{(RF - I_a + S_r)} \quad (4.4)$$

где RF — среднегодовое количество осадков в мм, S_r — потенциальная максимальная задержка воды в мм, I_a — потери на начальное абсорбирование. Начальное абсорбирование (I_a) — это объем осадков, который перехватывается, инфильтруется или иным образом задерживается до начала поверхностного стока, и оценивается как 20% от S (USDA-NRCS, 2009; USDA-NRCS, 2010).

$$I_a = 0.2 * S_r \quad (4.5)$$

Потенциальная максимальная задержка воды представляет собой максимальный объем воды, который почва может удержать до начала

поверхностного стока, и оценивается следующим образом (USDA-NRCS, 2009; USDA-NRCS, 2010).

$$S_r = \frac{25400}{CN} - 254 = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \quad (4.6)$$

Где 254 -константа 254 используется для выражения S_r , мм. CN — показатель, учитывающий характер землепользования, тип почвы и естественное увлажнение почв (AMC) (Antecedent Moisture Conditions, AMC) исследуемой территории, CN рассчитывается следующим образом (USDA-NRCS, 2009; USDA-NRCS, 2010).

$$CN = \frac{\sum(CN_i \times S_i)}{S} \quad (4.7)$$

где S_i — площадь каждой SPG, A — общая площадь участка. Согласно USDA-NRCS (2009 & 2010), типичные значения CN для средних условий для различных гидрологических групп почв с соответствующим покрытием землепользования представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4- Типичные значения CN для различных групп почв по проницаемости в зависимости от основных видов социально-экономической функции (USDA-NRCS (1986, revised 2009; USDA-NRCS (2004, revised 2010).

Ландшафты (в соответствии с ГОСТ 17.8.02-88)	Значения численный показатель для каждой группы почв по уровню проницаемости (SPG)			
	SPG A	SPG B	SPG C	SPG D
Лесохозяйственные	30	55	70	77
Степные	39	61	74	80
Сельскохозяйственные ландшафты	62	71	78	81
Промышленные ландшафты и ландшафты поселений	98	98	98	88
Не используемые в настоящее время (Пустыни, полупустыни, вулканические сооружения)	77	86	91	94

Группы почв по уровню проницаемости (SPG) и естественное увлажнение почв (AMC): Почвы классифицируются на четыре гидрологические группы (A, B, C и D) (USDA-NRCS 1986, revised 2009; USDA-NRCS 2004, revised 2010) в зависимости от скорости инфильтрации. Группа A — высокая скорость инфильтрации, например, песок и гравий (USDA-NRCS, 2009; USDA-NRCS, 2010). Группа B — умеренная скорость инфильтрации, например, суглинок. Группа C — медленная скорость инфильтрации, например, супесчаный суглинок. Группа D — очень медленная скорость инфильтрации, например, глина и глинистый суглинок. Почвы с высокой скоростью инфильтрации имеют более низкие значения CN и меньший потенциал стока, в то время как почвы с медленной инфильтрацией имеют более высокие значения CN и больший потенциал стока (USDA-NRCS, 2009; USDA-NRCS, 2010).

Естественное увлажнение почв (AMC) — это содержание влаги в почве до выпадения осадков, почвы объединяются в 3 группы (USDA-NRCS 2009; USDA-NRCS 2010): Сухие почвенные условия с высокой водопоглощаемостью (AMC I); Среднее увлажнение почвы (AMC II); Влажные почвенные условия, близкие к насыщению, с повышенным потенциалом стока (AMC III). Значение CN для AMC I рассчитывается следующим образом.

$$CNI = \frac{4.2 \times CNII}{10 - 0.058 \times CNII} \quad (4.8)$$

где CNI — численный показатель для AMC I, а значение CN для AMC III рассчитывается следующим образом.

$$CNIII = \frac{23 \times CNII}{10 + 0.13 \times CNII} \quad (4.9)$$

где CNIII — численный показатель для AMC III.

Группы почв по уровню проницаемости (SPG) исследуемого региона была получена с использованием цифровой карты почв мира FAO с масштабом 1:500 000 (FAO-UNESCO(1974-1981)). Текстуры почв исследуемого региона были классифицированы как глина, глинистый суглинок, суглинок, супесчаный

глинистый суглинок, песчаный суглинок, супесь и водные объекты (Beuene et al., 2010). В исследуемом регионе были выделены три Группы почв проницаемости (SPG) группы почв: B, C и D HSG (Рисунок 4.18).

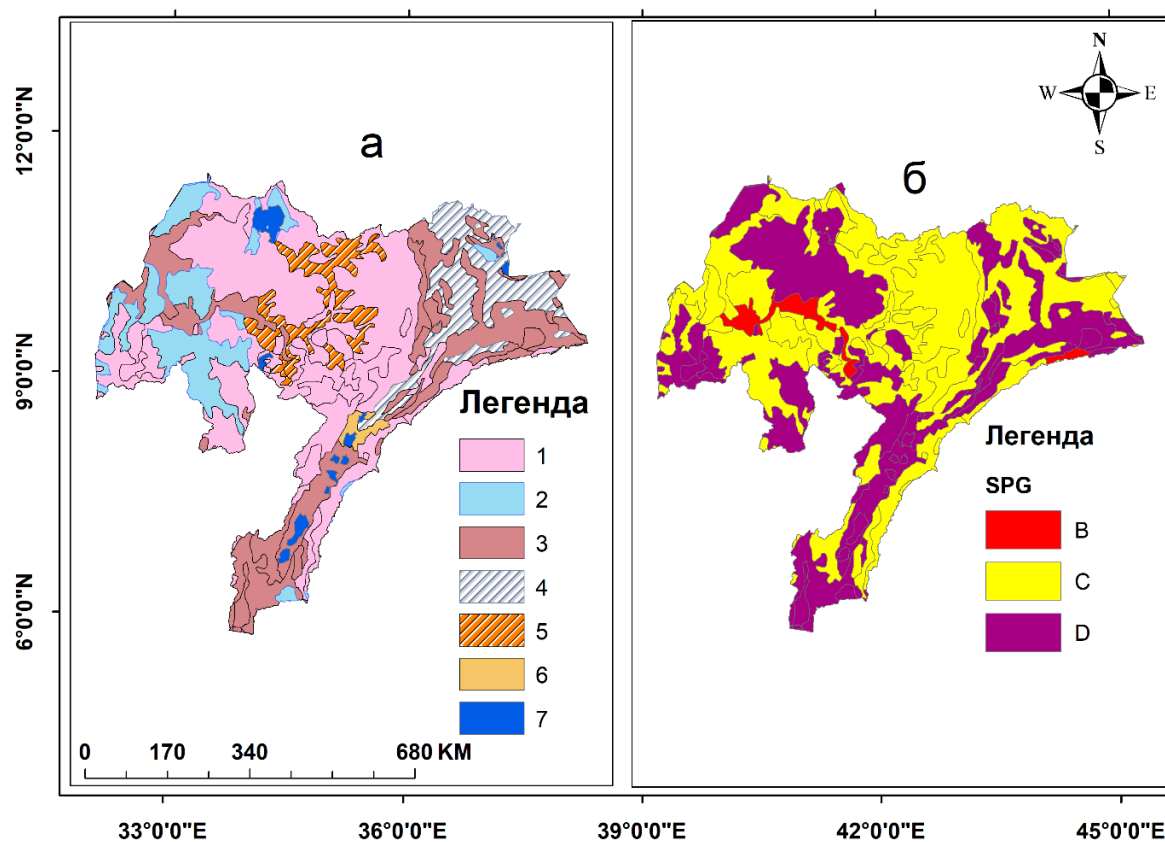


Рисунок 4.18-Почвы типы (а) схема распределения текстурная классификация почв на исследуемой территории: 1. Глина, 2. Глинистый суглинок, 3. Суглинок, 4. Супесчаный глинистый суглинок, 5. Песчаный суглинок, 6. Супесь, 7. Водные объекты, (б) группы почв по уровню проницаемости (SPG)(B, C, D)

Естественное увлажнение почв (АМС) исследуемого региона оценивалось путем суммирования осадков за пятидневный период перед выпадением осадков с использованием сезонных лимитов осадков для периода покоя и вегетационного периода и классифицировалось как сухое, среднее и влажное в соответствии с USDA-NRCS (2009 & 2010).

Согласно различным исследованиям, проведенным в Эфиопии, включая её центральную часть, естественное увлажнение почв (АМС) является критическим фактором при определении поверхностного стока и скорости эрозии почвы (Bewket & Sterk, 2005; Walega et al., 2015; Lakew et al., 2017; Takele et al., 2022). Исследования подтверждают, что высокий уровень АМС приводит к более

быстрому формированию стока и снижению скорости инфильтрации во время последующих осадков, а пороговые значения АМС устанавливаются с учетом сезонные осадки (таблица 4.5) (Lakew et al., 2017; Takele et al., 2022).

Таблица 4.5- Региональная классификация пороговых значений АМС на основе осадков за пятидневный Июнь–сентябрь для влажного (Июнь–сентябрь) и сухого (октябрь–январь) периода в 2024 году

Сезон	АМСI	АМСII	АМСIII
сухого периода	Менее 12,5 мм	От 12,7 до 27,9 мм	Более 27,9 мм, осадки за 5 дней
Вегетационного	Менее 35.6 мм	От 35,6 до 53,3 мм	Более 53,3 мм, осадки за 5 дней

Ландшафт существенно влияет на оценку стока, так как определяет, как вода взаимодействует с поверхностью земли (Mwanga et al., 2024). Территории с большим количеством естественной растительности, такой как леса и степи, как правило, имеют меньший сток из-за перехвата осадков и более высокой инфильтрации, тогда как расширение непроницаемых поверхностей, таких как городские территории и уплотненные сельскохозяйственные земли, увеличивает сток и риск наводнений, поскольку меньше воды впитывается в почву (Yoshe, 2025c).

Ландшафт исследуемого региона в предыдущих исследованиях в основном занимали сельскохозяйственные земли и степи (Йоше и Аузина, 2025). Таким образом, естественные и антропогенные ландшафты центральной части Эфиопии (в соответствии с GOST 17.8.02-88) представлены следующим образом: Природные факторы: 1. Лесохозяйственные, 2. Вода: озера, реки, затопленные территории 3. Степные 4. Не используемые в настоящее время (Пустыни, полупустыни, вулканические сооружения), . Рукотворные: 5. Промышленные ландшафты и ландшафты поселений, 6. Сельскохозяйственные ландшафты (в соответствии с ГОСТ 17.8.02-88)(рисунок 4.19)(Goldblatt et al., 2016).

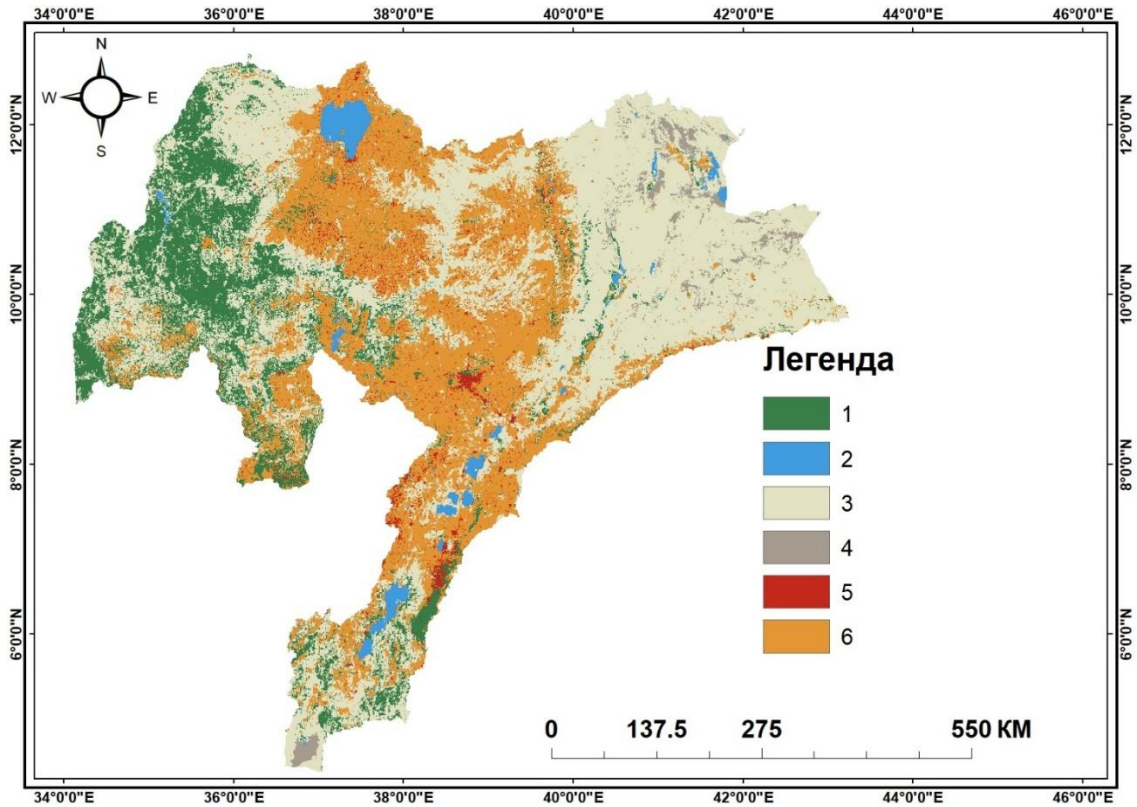


Рисунок 4.19- Схема распространения природно-техногенных ландшафтов центральной части Эфиопии (в соответствии с ГОСТ 17.8.02-88)

Природные факторы: 1. Лесохозяйственные, 2. Вода: озера, реки, затопленные территории
3. Степные 4. Не используемые в настоящее время (пустыни, полупустыни, вулканические сооружения). Рукотворные: 5. Промышленные ландшафты и ландшафты поселений, 6. Сельскохозяйственные ландшафты

В соответствии с ГОСТ 17.8.02-88 (ГОСТ 17.8.1.02-88), лесной ландшафт занимает 17,5 %; водные объекты: озера, реки и затопленные участки — 2,2 %; Степные — 44,8 %; пустыни, полупустыни и вулканические структуры— 1,7 %; промышленные и поселковые ландшафты урбанизированные территории — 3,4 %; сельскохозяйственные ландшафты — 30,4 % от общей площади (таблица 4.6) и связаны с гидрологическими группами почв В, С и D для оценки числа кривой с учетом типа почвы и ландшафта. В таблице 4.6 присвоенное значение числа кривой указано для средних условий (СНИ).

Таблица 4.6- Группы почв по проницаемости (SPG) для каждого типа землепользования: 1. Лесохозяйственные, 2. Вода: озера, реки, затопленные территории 3. Степные 4. Не используемые в настоящее время (Пустыни, полупустыни, вулканическиеструктуры), 5. Промышленные ландшафты и ландшафты поселений, 6. Сельскохозяйственные ландшафты.

Тип	1	2	3	4	5	6
Площадь, км ²	71407.	8688.	182464.	6768.	1399	124013.
	8	3	4	3	1	3
процент покрытия землепользования территории	17.5	2.2	44.8	1.7	3.4	30.4
Группы почв проницаемости (SPG)	C	D	C		C	B
численный показатель CN	79	98.5	65	93	94	78

На основе проведенного анализа, оценочные значения числа кривой CN составили 53,9; 73,6; 86,5, тогда как потенциальная максимальная задержка воды (Sr) составила 217,2 мм, 91,1 мм и 39,64 мм, а потери на начальное абсорбирование (Ia) — 43,5 мм, 18,2 мм и 7,9 мм соответственно для АМС I, II и III (таблица 4.5). Сезонное распределение осадков в Эфиопии, включая её центральную часть, подробно рассмотрено в первой главе данной работы. Среднегодовое количество осадков в сухой период составило 350 мм, тогда как в влажный период — 907,12 мм (Elzory et al., 2020; Yoshe, 2025c). В результате анализа, оценочная глубина стока (h) составила 260,3 мм, 690,1 мм и 806,3 мм для АМС I, II и III соответственно (таблица 4.7).

Таблица 4.7- Гидрологические параметры для трех типов почв в различные сезоны года

				Сухой сезон (месяцы октября по май)		Сезон дождей (месяцы июня по сентябрь)	
				RF = 350 мм		RF = 907.12 мм	
	CN	S _r (мм)	I _a (мм)	h (мм)	Q(10 ⁹ м ³ /год)	h(мм)	Q (10 ⁹ м ³ /год)
АМСI	53.9	217.2	43.5	179.4	73	690.1	280
АМСII	73.6	91.1	18.2	260.3	110	806.3	330
АМСIII	86.5	39.64	7.9	306.6	120	861.3	350

Таким образом, расчетные поверхностных вод составили $(73 - 120) \times 10^9$ м³/сезон для сухого сезона и $(280-350) \times 10^9$ м³/сезон для влажного сезона (таблица 4.6). Оценка ресурсов поверхностных вод для сухих была важна для мониторинга засухи, что позволяет планировать сооружения для сбора воды, тогда как ресурсы поверхностных вод, оцененные с использованием АМС III, применялись для оценки гидрологических рисков, таких как проектирование инфраструктуры (например, плотин), планирование мероприятий по контролю наводнений и изучение эрозии почв, что согласуется с аналогичными исследованиями в других регионах (Herath et al., 2024; Afra et al., 2025).

На рисунке 4.20 показана изменчивость ресурсов поверхностных вод в исследуемом регионе. Ресурсы поверхностных вод в сухой период сухого сезона варьируются от 25 000 до 550 000 м³/км² (рис 4.20б), тогда как в диапазоне от 7 431 739 до 163 498 260 м³/км² в Сезон дождей (рисунок 4.20а).

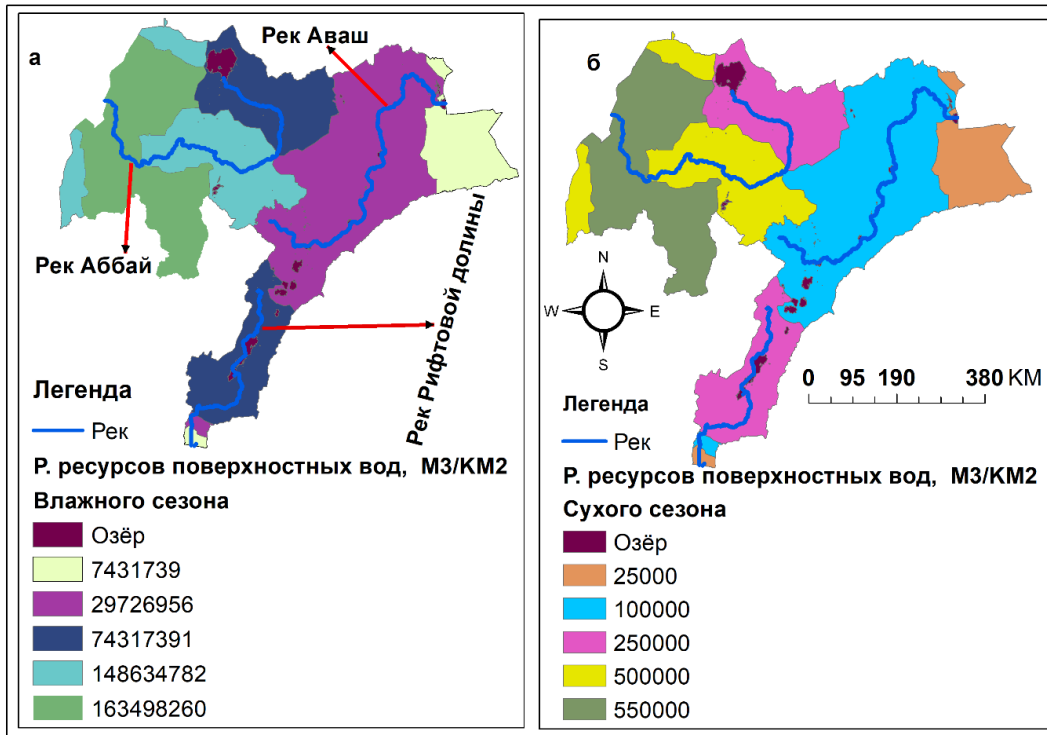


Рисунок 4.20- Схематическая карта распределение ресурсов поверхностных вод, м³/км²: а. Для влажного сезона; и б. Для сухого сезона.

Как однозначно показано на рисунке 4.20а, пространственное распределение водных ресурсов влажного сезона в исследуемом регионе варьирует от 7 431 739 до 163 498 260 м³/км². Минимальные значения водных ресурсов (оливковый цвет) чётко зафиксированы в юго-восточных, северо-восточных и южных частях региона, тогда как максимальные значения (зелёный цвет) уверенно сосредоточены в западных и юго-западных районах. Остальная территория региона характеризуется низким и средним уровнем водных ресурсов. Как ясно видно на рисунке 4.20б, ресурсы поверхностных вод сухого сезона в исследуемом регионе составляют от 25 000 до 550 000 м³/км² и демонстрируют практически аналогичную пространственную тенденцию распределения, наблюдаемую для поверхностных вод влажного сезона.

Ресурсы поверхностных вод в исследуемом регионе основаны на сочетании полевых измерений и данных дистанционного зондирования, что позволяет обеспечить точность и надёжность результатов для целей управления водными ресурсами. Валидация направлена на подтверждение корректности методов сбора

и анализа гидрологических данных, тогда как верификация заключается в проверке того, насколько полученные результаты отражают реальные условия на местности.

На основе анализа измерений речного стока, собранных на отдельных гидрометрических станциях, для практически всех контролируемых рек была выявлена критическая прерывистость рядов наблюдений. Данная прерывистость привела к повсеместному дефициту точных и надёжных данных о расходах воды в режиме реального времени, что подтверждается устойчивыми пробелами в суточных рядах стока. Невозможность непрерывного измерения текущих расходов воды существенно снижает точность расчётов водного баланса и ограничивает возможности проведения гидрологических оценок на уровне речных бассейнов. Наблюдаемые пробелы в данных обусловлены главным образом рядом факторов, включая ограниченную доступность удалённых пунктов наблюдений во время экстремальных гидрологических событий, физические повреждения гидрометрического оборудования вследствие переноса наносов или обломочного материала, а также технические или эксплуатационные неисправности. Эти пробелы в сборе данных увеличивают неопределённость гидрологического моделирования, особенно при моделировании и прогнозировании экстремальных явлений, таких как наводнения и засухи.

Для устранения пропусков в рядах наблюдений на затронутых гидрометрических станциях заполнение недостающих данных осуществлялось с использованием метода среднего арифметического. Несмотря на то что данный подход обеспечивает непрерывность набора данных, он не всегда позволяет в полной мере отразить кратковременную изменчивость или экстремальные условия стока. В связи с этим непрерывный мониторинг ресурсов наземных вод и речного стока остаётся необходимым для повышения надёжности гидрологических анализов и обеспечения рационального использования водных ресурсов. Кроме того, анализ исторических, долгосрочных и доступных оперативных данных гидрометрических наблюдений выявляет устойчивые сезонные колебания речного стока на всех станциях мониторинга. Речные системы демонстрируют характерные закономерности подъёма и снижения уровней воды, которые в значительной

степени обусловлены сезонными режимами осадков и динамикой испарения и транспирации. Полученные результаты подчёркивают важность функционирования устойчивых и высококачественных сетей наблюдений для понимания гидрологических процессов и управления водными ресурсами как в нормальных, так и в экстремальных условиях.

Изменчивость речного стока в пределах водосборной территории — от верхнего течения реки к нижнему — представляет собой одну из наиболее значимых гидрологических проблем речного бассейна. Данная изменчивость в первую очередь определяется взаимодействием поверхностных и подземных вод, а также климатическими и геоморфологическими факторами. Так, в случаях, когда в верховьях реки происходит питание подземных вод за счёт инфильтрации воды из русла, расход воды в нижнем течении, как правило, демонстрирует тенденцию к снижению вследствие инфильтрационных потерь. Напротив, при разгрузке подземных вод в реку в верхнем течении сток в нижних участках реки имеет тенденцию к увеличению за счёт базисного питания. Кроме того, в районах, характеризующихся высокими значениями испарения и транспирации, речной сток в нижнем течении часто уменьшается вследствие возросших потерь воды в атмосферу.

В настоящем исследовании данные о расходе воды в реке были доступны лишь по одной гидрометрической станции, расположенного в одной точке на каждой реке. Такая ограниченность исходных данных затруднила полноценную характеристику продольной изменчивости стока вдоль всего участка реки. Тем не менее в общем виде пространственная изменчивость речного стока в пределах бассейна определяется совокупным воздействием взаимодействия поверхностных и подземных вод, процессов испарения и транспирации, а также других ключевых факторов, действующих в пределах исследуемой территории. В результате среднемесячный речной сток бассейнов рек Эфиопии, включая её центральные районы, характеризуется ярко выраженной сезонной изменчивостью. Река Аббай демонстрирует чётко выраженный одномодальный режим стока (рисунок 4.21), с очень низкими расходами в сухой сезон (январь–май) и пиковыми значениями в

период основного сезона дождей (июль–сентябрь), при этом максимальный сток, как правило, наблюдается в августе. Река Аваш характеризуется сравнительно более низкими значениями стока в течение всего года, однако в дождливые месяцы наблюдается резкое увеличение расходов воды, с пиком в августе–сентябре. Реки бассейна озёр Рифтовой долины также проявляют отчётливую сезонность, для которой характерны низкие расходы в сухой сезон и максимальные значения стока в период дождей Киремт. В целом речной сток в исследуемом регионе тесно связан с сезонным распределением атмосферных осадков в центральных районах Эфиопии, что также подтверждается результатами предыдущих исследований (MoWE-2013; Verhanu et al., 2014). Особенно в удалённых или малоизученных регионах технологии дистанционного зондирования приобретают всё большее значение для устранения критических пробелов в данных о расходе воды в реках на гидрометрических станциях. Современные методы, такие как спутниковая альтиметрия, оптическое дистанционное зондирование и радар с синтетической апертурой (SAR), позволяют косвенно оценивать расход воды в реке посредством измерения ключевых гидравлических параметров, включая уровень воды, ширину русла, уклон поверхности и скорость течения.

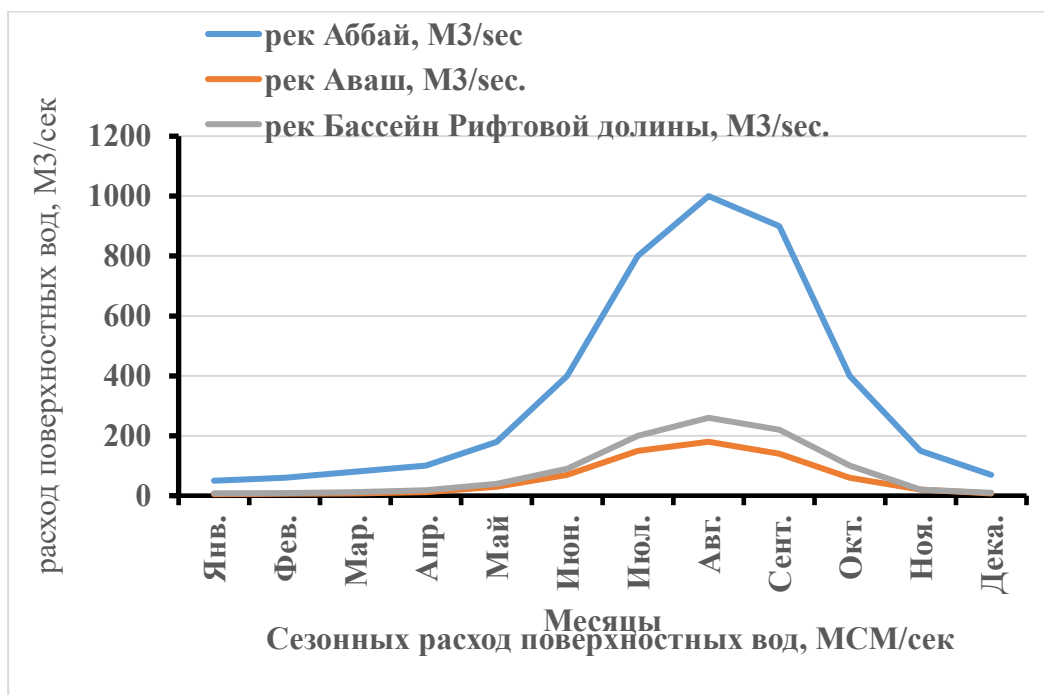


Рисунок 4.21- Сезонное распределение расхода рек Аббай (Голубой Нил), Аваш и рек Рифтовой долины

В данном исследовании изменения ресурсов поверхностных вод оценивались на уровне бассейна с использованием нескольких наборов данных дистанционного зондирования. В частности, данные проекта совместной спутниковой миссией NASA и Германским центром авиации и космонавтики (GRACE), интегрировались с продуктами Глобальной системы ассимиляции земельных данных (GLDAS) для оценки пространственно-временных вариаций ресурсов поверхностных вод с учётом основных контролирующих факторов (Yoshe, 2024a; Yoshe, 2024b). Результаты показывают ярко выраженные сезонные закономерности динамики ресурсов поверхностных вод по всей территории Эфиопии, включая её центральные районы, отражая совокупное влияние климатической изменчивости, изменения климата и антропогенной деятельности (Yoshe, 2024a; Yoshe, 2024b). Наибольшие ресурсы наземной воды наблюдались в осенний сезон, высокие летом, средние зимой и низкие весной. Такие различия в запасах наземной воды обусловлены изменением осадков, колебаниями температуры, изменениями землепользования и различной человеческой деятельностью. Это объясняется тем, что исследуемая территория получает наибольшее количество осадков осенью, высокое летом, среднее зимой и минимальное весной. Увеличение количества осадков в сезон дождей оказывает значительное влияние на гидрологическую систему и поставки водных ресурсов для экологических систем и общества.

В рамках данного исследования была оценена пространственно-временная изменчивость ресурсов поверхностных вод в речном бассейне. Результаты показывают высокий уровень водных ресурсов в юго-западной части исследуемого региона, средний уровень в центральной части, и низкий уровень в восточной и северо-западной частях региона (рисунок 4.22). Как наглядно и однозначно показано на рисунке 4.6, пространственное распределение ресурсов поверхностных вод строго соответствует пространственному распределению осадков. Во все рассматриваемые периоды исследования высокие ресурсы поверхностных вод устойчиво сосредоточены в юго-западной части исследуемого региона, тогда как низкие значения ресурсов поверхностных вод последовательно и чётко проявляются в восточных, южных и западных районах региона.

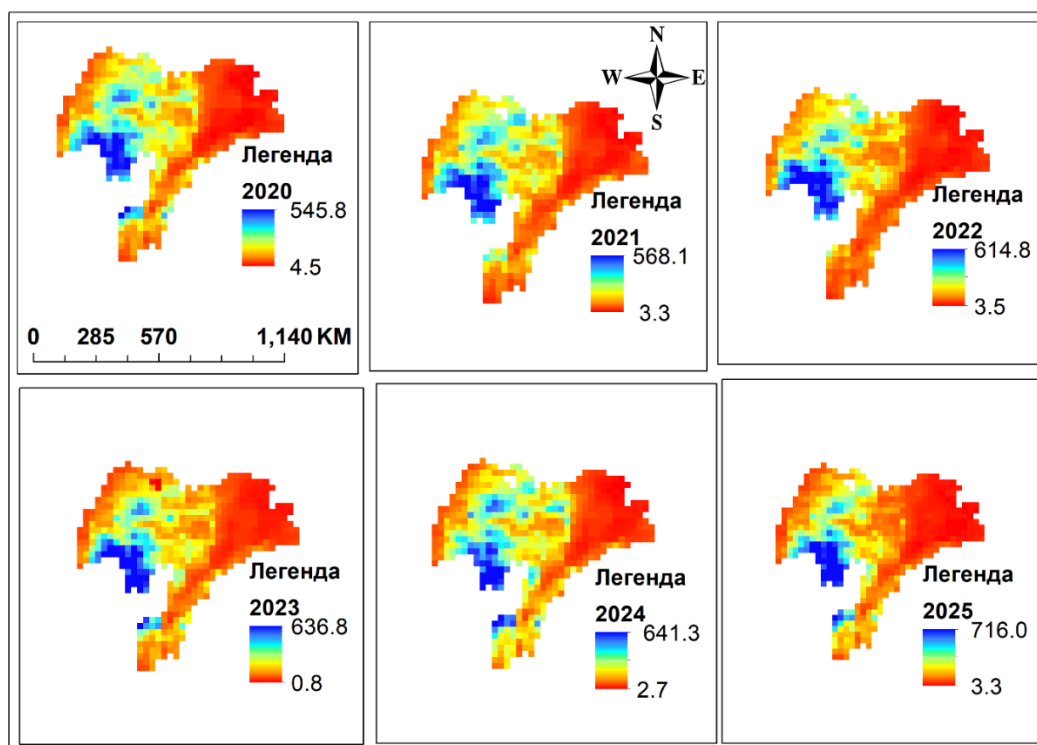


Рисунок 4.22- Пространственно-временные изменения ресурсов поверхностных вод в исследуемом регионе с 2020 по 2025 год

Как показано на рисунке 4.22, пространственное распределение ресурсов поверхностных вод, полученное с использованием данных дистанционного зондирования, демонстрирует выраженную пространственно-временную изменчивость в период с 2020 по 2025 год. Пространственно-временные карты отражают как многолетнюю, так и пространственную неоднородность ресурсов поверхностных вод, демонстрируя различную гидрологическую реакцию в разных частях исследуемой территории. Оценки поверхностных водных ресурсов, полученные по данным дистанционного зондирования Земли, убедительно показывают, что их объем составил соответственно $93,1 \times 10^9$, 104×10^9 , $99,6 \times 10^9$, 106×10^9 , 101×10^9 и 115×10^9 м³ в год в период с 2020 по 2025 годы.

В количественном выражении ресурсов поверхностных вод, оцененные по данным дистанционного зондирования, варьируются примерно от 0,8 мм до 716 мм в год в течение исследуемого периода. Эти колебания подчеркивают чувствительность ресурсов поверхностных вод к климатическим воздействиям, особенно к изменчивости осадков, и акцентируют значимость применения методов

дистанционного зондирования для изучения крупномасштабной гидрологической динамики в регионах с ограниченными полевыми наблюдениями.

Рисунок 4.20 иллюстрирует схему сезонных изменений ресурсов поверхностных вод ($\text{м}^3/\text{км}^2$), полученных на основе измерений речного стока, тогда как рисунок 4.22 показывает схему годовое пространственное распределение ресурсов поверхностных вод, рассчитанное по данным дистанционного зондирования, в мм/год.

Таким образом, расчетный ресурсы поверхностных вод составили $(73 - 120) \times 10^9 \text{ м}^3/\text{сезон}$ для сухого сезона и $(280-350) \times 10^9 \text{ м}^3/\text{сезон}$ для влажного сезона

Подземные воды являются одним из наиболее ценных природных ресурсов и играют жизненно важную роль в поддержании жизни человека и развитии экономики (Shyam et al., 2021; Saranya & Saravanan, 2020). Они служат важнейшим источником водоснабжения как в городских, так и в сельских районах (Murmu et al., 2019).

Количественная оценка ресурсов подземных вод осуществляется с использованием различных методов. К ним относятся водобалансовые подходы, применяемые для расчёта питания подземных вод на основе анализа притока и оттока в пределах водосборного бассейна; метод колебаний уровня грунтовых вод, используемый для не напорных (безнапорных) водоносных горизонтов; геохимические методы с применением хлорида в качестве трассера для оценки подземного питания; численное моделирование подземных вод с использованием программного комплекса MODFLOW; метод разделения базового стока на основе анализа временных рядов речного стока для оценки вклада подземных вод в речной сток; методы дистанционного зондирования Земли и геоинформационных систем (ГИС); изотопные трассерные методы; а также аналитические решения, такие как уравнение Тейса, применяемое для оценки параметров водоносных горизонтов.

В настоящем разделе для оценки ресурсов подземных вод используются исходные данные, включающие информацию о подземном водопитании из Программы всемирного гидрогеологического картирования и оценки (WHYMAP) (рис 4.23 а) (Richts et al., 2011), ресурсов подземных вод, л/с (рис 4.23 б), мощности

первых от поверхности водоносных подразделений, мм (рис 4.23 в), а также данные о глубины формирования уровня подземных вод, м, (УГВ) (рис 4.23 г), полученные из карты подземных вод Африки (MacDonald et al., 2012). Кроме того, для проведения статистического анализа используются данные об осадках (рис 4.23 д), рельефе (рис 4.23 е) и уклонах местности, полученные на основе дистанционного зондирования Земли.

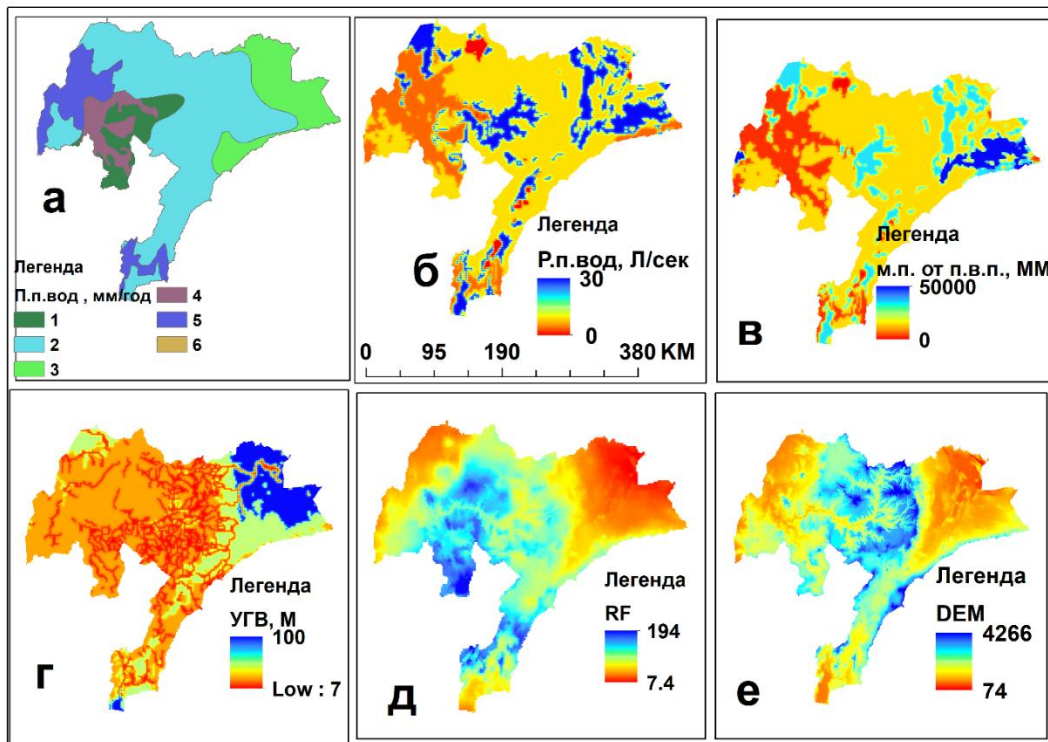


Рисунок 4.23- Схемы распределения:

- питания подземных вод за счет атмосферных осадков, мм/год (Таксоны 1-ого порядка: 1. высокий уровень питания (100 – 300), 2. средний уровень питания (20 - 100), 3. низкий уровень питания (< 20), 4. Таксоны 2-ого порядка: высокий уровень питания (> 100), 5. средний уровень питания (< 100), 6. основная зона питание (20 - 100)),
- ресурсов подземных вод, л/с; в. мощности первых от поверхности водоносных подразделений, мм, г. глубины формирования уровня подземных вод, м, д. атмосферных осадков, мм, е. рельефа, м

Распределение и формирование подземных вод в центральной части Эфиопии существенно определяется её структурно- тектоническими особенностями (Йоше и Аузина, 2025). Геологическая история региона и продолжающаяся тектоническая активность создают сложную среду, которая определяет, где накапливаются подземные воды, как они движутся и каково их

общее качество. Территория исследования покрыта вулканическими породами, в которых трещиноватость различного генезиса играет ключевую роль в распределении и формировании подземных вод региона, Естественные ресурсы подземных вод основных водоносных комплексов исследуемого района определяются с помощью уравнения водного баланса следующим образом (Pozdnyakov & Preobrazhenskaya, 2009).

Для расчёта общего годового стока, представленного на рисунке 4.23 б, при общей площади (S), равной $3.827743 \times 10^{11} \text{ м}^2$, размере ячейки сетки 30 м и расходе воды 30 л/с были выполнены следующие шаги.

Шаг 1: Число ячеек сетки было определено следующим образом. Площадь одной ячейки сетки (s): $1000 \text{ м} \times 1000 \text{ м} = 1000000 \text{ м}^2$.

Общее количество ячеек сетки (N) определяется следующим образом:

$$N = S/s = (3.827743 \times 10^{11} \text{ м}^2)/(1000000 \text{ м}^2) \approx 382,774.3 \text{ ячеек.} \quad (4.10)$$

Шаг 2: Перевод расхода воды из литров в секунду в кубические метры в секунду.

Расход на одну ячейку (q):

$$q = 30 \text{ л/с}/1000 = 0.03 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.11)$$

Шаг 3: Расчёт коэффициента перевода времени.

Количество секунд в году (T):

$$T = 365 \times 24 \times 3600 = 31\,536\,000 \text{ с/год}. \quad (4.12)$$

Шаг 4: Общий объём стока определяется как произведение числа ячеек сетки, расхода на одну ячейку и общего числа секунд в году.

Общий годовой сток (Q):

$$Q = N \times q \times T = 382774.3 \times 0.03 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \times 31\,536\,000 \text{ с/год} = 362,135,109,744.0 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.13)$$

Для расчёта общего годового стока подземных вод, представленного на рисунке 4.7в, при общей площади (S), равной $3.827743 \times 10^{11} \text{ м}^2$, размере ячейки сетки 30 м и глубине подземных вод 50 000 мм, были использованы следующие этапы.

Шаг 1: Заданная глубина подземных вод в миллиметрах была переведена в метры и для исследуемого региона составила 50 м.

Шаг 2: Общий объём стока для всей территории был рассчитан путём умножения общей площади поверхности на глубину подземных вод (с учётом размера ячейки сетки 30×30 м), с площадью 900 м^2 каждая.

Общий объём стока = площадь \times глубина = $3.827743 \times 10^{11} \text{ м}^2 \times 50 \text{ м}$.

Шаг 3: Общий годовой объём подземного стока для всей исследуемой территории составил $19138715000000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Глубина залегания подземных вод была определена с учётом осадков, типа водоносного горизонта, а также близости к рекам (рисунок 4.7 г) и варьирует от 7 до 100 метров ниже уровня земли. Как показано на рисунке 4.7 г, наибольшая глубина залегания подземных вод (синий цвет) наблюдается в восточных и южных частях исследуемого региона.

Для расчёта общего стока территории на основе подпитки подземных вод на площади (рисунок 4.23 а), результат определяется как произведение скорости подпитки на общую площадь поверхности с использованием следующих шагов.

Шаг 1: Общий сток исследуемого региона был рассчитан по следующему уравнению:

$$Q_g = h_g * S \quad (4.14)$$

где h_g — величина питания подземных вод, мм/год, принятая по данным Всемирной программы гидрогеологического картирования и оценки водных ресурсов (Worldwide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme (WHYMAP), карта гидрогеологических условий, масштаб 1:25 000 000) (WHYMAP)(Xin et al., 2022; Pozdniakov et al., 2020; Wrzesiński & Sobkowiak, 2022), и подтвержденная результатами инвентаризации гидрогеологических скважин, предоставленными Министерством водных ресурсов и энергетики Эфиопии; S — площадь поверхности, на которой происходит питание (площадь водосбора), м^2 ; Q_g — естественные ресурсы, $\text{м}^3/\text{год}$.

На основе факторов, влияющих на подземные воды (величина атмосферных осадков, градиент уклона склона и абсолютная отметка точки наблюдения) и данных набора WHYMAP, исследуемый район был разделен на три зоны: зона слабого питания подземных вод с h_g менее 20 мм/год, зона умеренного питания подземных вод с уровнем h_g от 20 до 100 мм/год и зона высокого питания подземных вод с h_g более 100 мм/год (таблица 4.8).

Таблица 4.8- Зоны с различным уровнем питания подземных вод

Зона	Площадь (S), м ²	$h_{\text{мин.}}$ мм/год	$h_{\text{макс.}}$ мм/год
Зона I	6.30E+10	<20	20
Зона II	2.67E+11	20-100	100
Зона III	5.60E+10	>100	300

Ресурсы подземных вод в каждой зоне были рассчитаны с использованием площади питания (таблица 4.9). Таким образом, суммарный объем подземных вод в исследуемом регионе составил $(16 - 42) \times 10^9$ м³/год, среднее значение $\approx 30 \times 10^9$ м³/год (таблица 4.9).

Таблица 4.9- Ресурсы подземных вод в исследуемом регионе

Зона	Площадь (S) в м ²	Qg мин. в 10 ⁹ м ³ /год	Qg макс. в 10 ⁹ м ³ /год	Qg среднее в 10 ⁹ м ³ /год
Зона I	6.30E+10	1.2	1.3	1.25
Зона II	2.67E+11	9.0	26.7	17.85
Зона III	5.60E+10	5.6	14.1	9.85
Итого	3.86E+11	16	42.1	29.1

На основе проведенной оценки 15 % исследуемого региона занимает зона с высоким ресурсным потенциалом подземных вод, 69 % — зона с умеренным потенциалом, а 16 % территории — зона с низким потенциалом подземных вод (рисунок 4.24), распространенная в основном в районах с плотными, слаботрециноватыми породами, которые обладают очень низкой проницаемостью, что приводит к затрудненной инфильтрации атмосферных осадков. Такая ситуация

контрастирует с зонами с высоким уровнем питания, приуроченными к районам с масштабным развитием зон тектонических нарушений, которые служат путями транзита потоков подземных вод, что подтверждается аналогичными исследованиями в других районах (Wang et al., 2023). Другие факторы, способствующие снижению уровня питания подземных вод включают недостаток осадков и непроницаемые поверхности, такие как асфальт и городские территории (Vinograd et al., 2019).

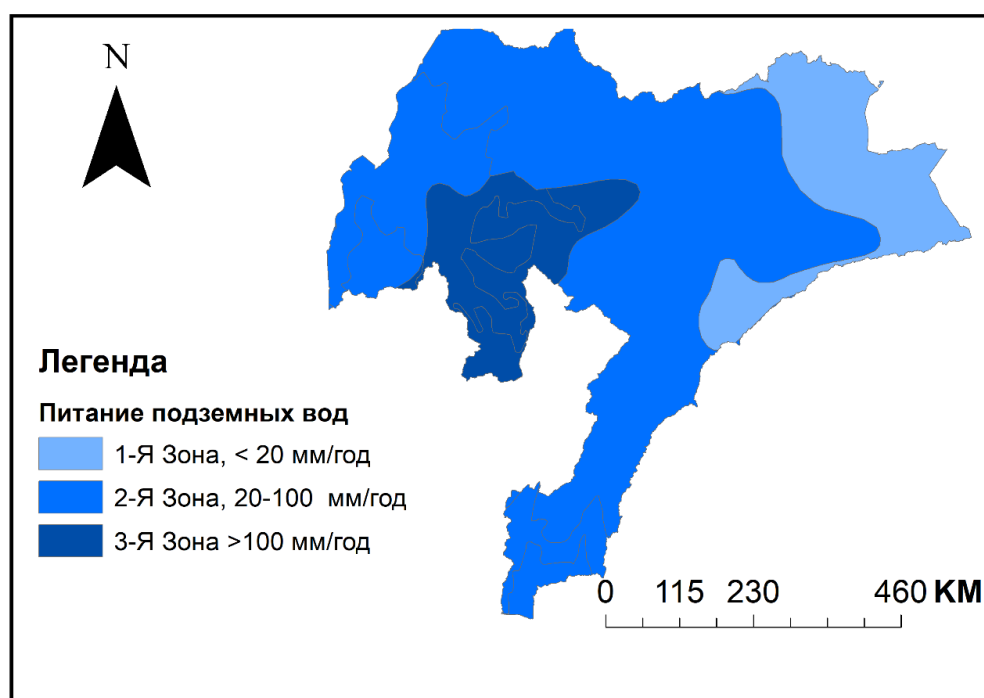


Рисунок 4.24- Схема распределения питания подземных вод, мм/год
 Питание подземных вод — это сложный процесс, на который влияют многочисленные факторы (Machiwal et al., 2011; Grinevskiy et al., 2021). Ключевые природные факторы, выделенные при оценке комплексного индекса, такие как рельеф, уклон и количество осадков, играют значительную роль (Machiwal et al., 2011; Panda et al., 2020; Grinevskiy et al., 2021). Количество, интенсивность, продолжительность и тип осадков напрямую определяют, сколько воды доступно для инфильтрации.

Рельеф также влияет на интенсивность питания подземных вод, коррелируя с другими критическими факторами, такими как осадки, температура и испарение, которые способствуют или препятствуют инфильтрации (Yoshe, 2024c).

В данном разделе такие параметры, как интенсивность атмосферных осадков, рельеф, выраженный в абсолютных отметках (далее – высота), и уклон поверхности, выделенные как наиболее значимые ранее (раздел комплексного индекса-Третья глава) использовались для статистического анализа зависимости питания подземных вод от этих факторов. Исследуемый регион был классифицирован на три зоны питания на основе полученных данных, контролирующих факторов питания подземных вод, и выявленной гидрогеологической структуры (бассейн, массив и обводненные разломы). Для каждой зоны выбранные факторы были объединены в три группы, в соответствии с чем составлены схемы распределения этих факторов в пределах исследуемой территории (рисунок 4.25).

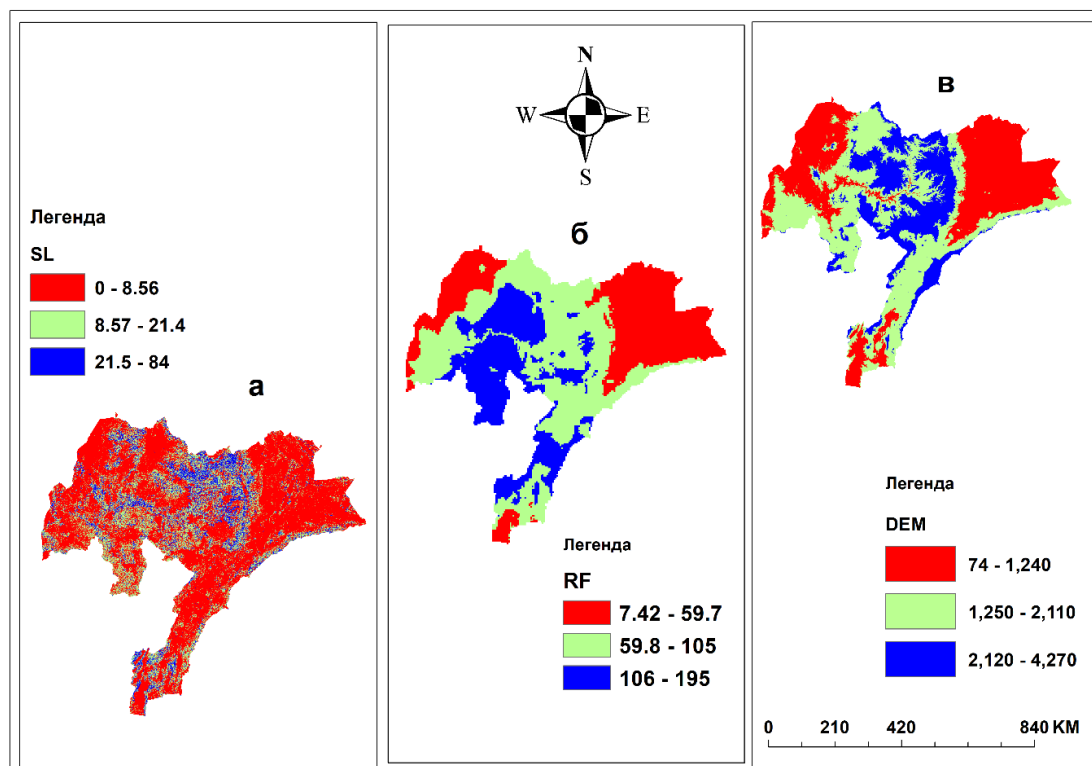


Рисунок 4.25- Схемы распределения параметров, влияющих на условия питания подземных вод: а. уклон (SL), % ($45^\circ = 100\%$); б. осадки (RF), мм; в. высота (DEM), м

На основе выбранных параметров для исследуемого региона была построена модель множественной линейной регрессии с целью установления количественной зависимости между зависимой переменной (питания подземных вод) и

независимыми переменными (высота, уклон и осадки). Были разработаны уравнения множественной регрессии для прогнозных, которая использует независимые переменные для оценки питания. В результате регрессионного анализа была получена математическая вероятностная в основном для каждой из трех зон исследуемого региона (таблица 4.8), что позволило прогнозировать питание подземных вод на основе выбранных независимых переменных, что также подтверждается другими исследованиями (Kumar et al., 2018; Khan & Elkishouty, 2022; Сократович, 2022; Handique et al., 2024).

Статистические показатели, стандартные ошибки и стандартное отклонение остатков были использованы для количественной оценки корреляции и комплексной проверки модели. Как показано в таблице 4.8, питание подземных вод имеет положительную корреляцию с высотой (DEM) и осадками (RF) для всех зон, тогда как корреляция с уклоном (SL) отрицательная.

Стандартная ошибка — это стандартное отклонение распределения выборки, которое измеряет, насколько точно среднее значение выборки оценивает среднее значение переменной. Меньшая стандартная ошибка указывает на то, что среднее значение выборки является более точной оценкой среднего значения переменной. Она рассчитывается путем деления стандартного отклонения выборки на квадратный корень из объема выборки следующим образом:

$$\Theta = \frac{SS}{\sqrt{n}} \quad (4.15)$$

где Θ — стандартная ошибка, SS — стандартное отклонение выборки, а n — размер выборки. σ (сигма) представляет собой стандартное отклонение остатков, или случайных ошибок, и рассчитывается как квадратный корень из среднеквадратичной ошибки (MSE) или как квадратный корень из суммы квадратов ошибок, делённой на количество степеней свободы остатков.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(Y - \hat{Y})^2}{N}} \quad (4.16)$$

где σ — стандартное отклонение остатков; Y — наблюдаемое значение; \hat{Y} — предсказанное значение; N — число степеней свободы ($n-2$ для простой линейной регрессии и $n(n-2)$ для множественной регрессии); n — количество наблюдений.

В результате оцененные стандартные ошибки для исследуемого региона составили 0,27; 0,4 и 5,2 соответственно для зон 1, 2 и 3 (таблица 4.10). Полученные результаты показывают небольшие значения стандартной ошибки, что указывает на то, что регрессионный анализ является более точной оценкой среднего значения переменной. Оцененные σ для исследуемого региона составили 0,4; 0,8 и 26,9 для зон 1, 2 и 3 соответственно.

Таблица 4.10- Уравнения множественной регрессии для выделенных зон в центральной части Эфиопии

	Зона	Уравнение для оценки подпитки подземных вод	Θ	σ
1	Зона I	$h_g = 0.004 * DEM + 0.21 * RF - 0.16 * SL - 2.8$ (4.17)	0.27	0.4
2	Зона II	$h_g = 0.06 * DEM + 0.05 * RF - 1.6 * SL - 29.3$ (4.18)	0.4	0.8
3	Зона III	$h_g = 0.27 * DEM + 0.3 * RF - 4.8 * SL - 265.8$ (4.19)	5.2	26.9

На основе математических уравнений, разработанных для трёх зон с использованием модели множественной линейной регрессии, ранее классифицированный исследуемый район был разделен на три зоны: зона слабого питания подземных вод с h_g менее 20 мм/год, зона умеренного питания подземных вод с уровнем h_g от 20 до 100 мм/год и зона высокого питания подземных вод с h_g более 100 мм/год, в зависимости от конкретного сочетания уклона (SL), высоты (DEM) и осадков (RF) в каждой зоне.

Впоследствии ресурсы подземных вод для каждой зоны были переоценены, чтобы проверить уточнённые оценки по сравнению с ранее установленной оценкой ресурсов подземных вод Балансовым методом. Обновлённый анализ показывает,

что общий объём подземных вод в исследуемом регионе варьируется от 16 до 42×10^9 м³/год, со средним значением $\approx 30 \times 10^9$ м³/год (таблица 4.11), что согласуется с предыдущими результатами.

Таблица 4.11- Ресурсы подземных вод, оцененные с использованием вероятностных моделей

Зона	Уравнение для оценки подпитки подземных вод	Площадь (S) в м ²	h _{мин.} в мм/год	h _{макс} в мм/год	Qg мин. X 10 ⁹ м ³ /год	Qg макс. X 10 ⁹ м ³ /год	Qg среднее X 10 ⁹ м ³ /год
Зона I	$h_g = 0.004 * DEM + 0.21 * RF - 0.16 * SL - 2.8$	6.30E+10	<20	20	1.2	1.3	1.25
Зона II	$h_g = 0.06 * DEM + 0.05 * RF - 1.6 * SL - 29.3$	2.67E+11	20-100	100	9.0	26.7	17.85
Зона III	$h_g = 0.27 * DEM + 0.3 * RF - 4.8 * SL - 265.8$	5.60E+10	>100	300	5.6	14.1	9.85
Итого		3.86E+11					29.1

В конечном итоге оцененные ресурсы подземных вод в исследуемом регионе варьируются от $(16-42) \times 10^9$ м³/год, а средний объём подземных вод в исследуемом регионе составил $29,1 (\approx 30) \times 10^9$ м³/год.

Результаты хорошо согласуются с выделенными гидрогеологическими структурами исследуемого района, показывая, что зоны высокого питания подземных вод соответствуют структурам обводненных разломов, зоны среднего питания связаны с гидрогеологическими бассейнами, а зоны низкого питания в основном совпадают с гидрогеологическими массивами, что отражено в публикациях автора (рисунок 4.26) (Йоше и Аузина, 2025).

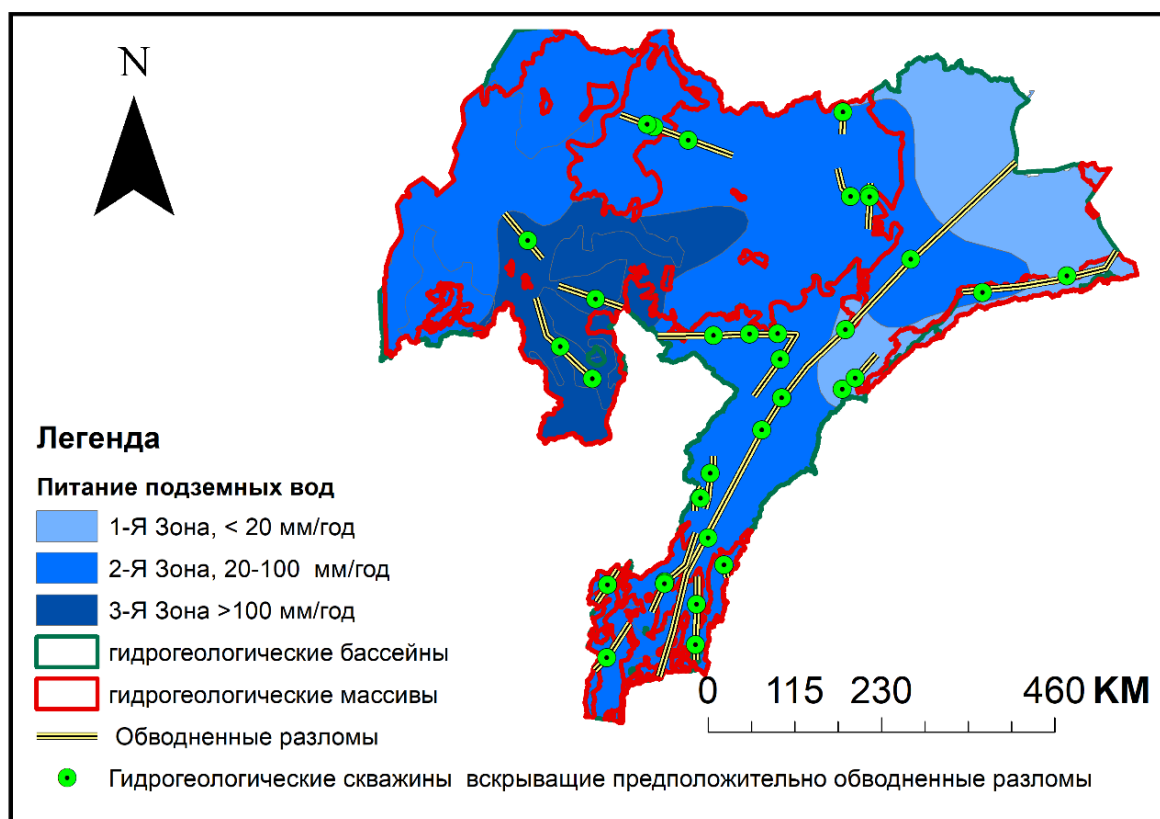


Рисунок 4.26-Схема распределения зон с различным питанием подземных вод, Совмещенная с ранее выделенными гидрогеологическими структурами

Выявленные пространственные закономерности хорошо отражают данные структурные особенности, что указывает на эффективность применённой методологии в определении природных факторов, контролирующих особенности распространения и формирования подземных вод. Кроме того, результаты дополнительно подтверждаются измеренными значениями дебита подземных вод из гидрогеологических скважин(рисунок 4.27), полученными из Министерства водных ресурсов и энергетики Эфиопии, что предоставляет независимые эмпирические данные, подтверждающие надёжность и точность проведённой оценки.

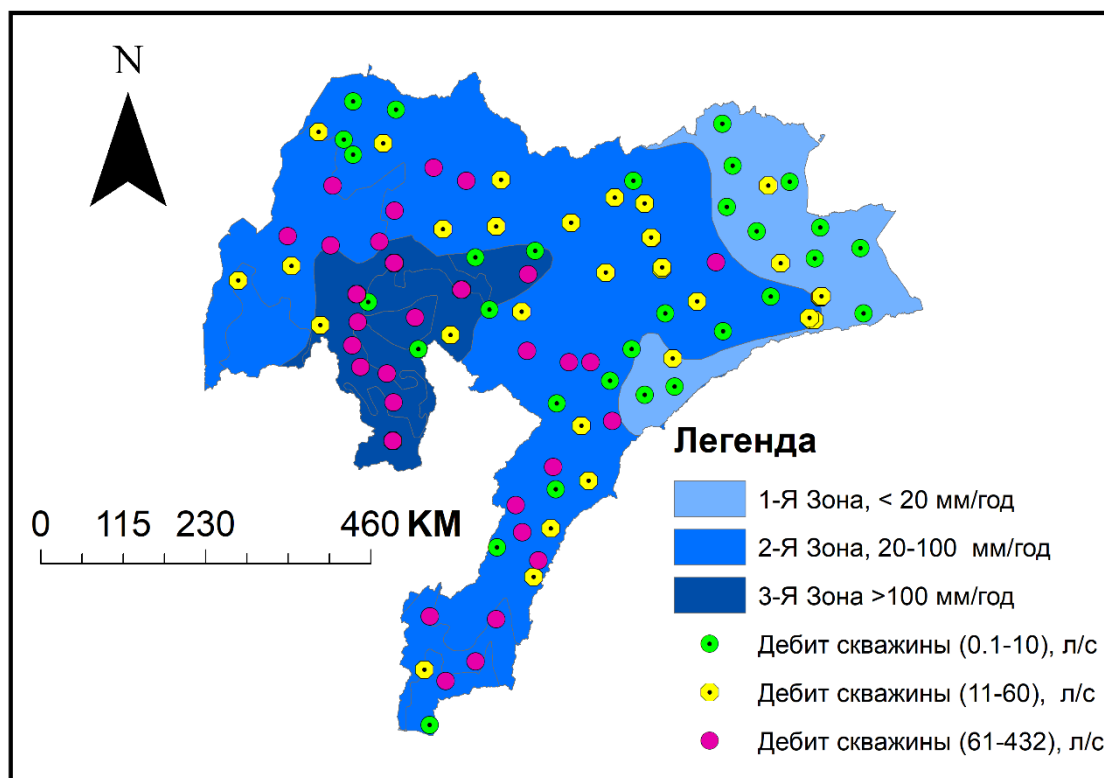


Рисунок 4.27- Схема распределения зон с различным питанием подземных вод, Совмещенная с картой фактического материала.

В районах с существенной нехваткой данных ресурсы подземных вод (GWS) оцениваются путем объединения аномалий общих водных ресурсов (TWS), полученных с помощью совместной спутниковой миссией NASA и Германским центром авиации и космонавтики (GRACE/GRACE-FO), с гидрологическими данными из Глобальной системы ассимиляции земельных данных (GLDAS). Этот метод, основанный на уравнении водного баланса, позволяет исследователям выделять изменения подземных вод путем вычитания смоделированных ресурсов влаги в почве, снежной воды и поверхностных вод из общего объема водных ресурсов, определяемого по данным гравитации, что обеспечивает важную информацию об истощении водоносных горизонтов в регионах, где отсутствуют полевые сети наблюдений. В рамках данного исследования была оценена пространственно-временная изменчивость ресурсов подземных вод в исследуемом регионе, и результаты показывают изменения ресурсов подземных вод в исследуемой территории (рисунок 4.28).

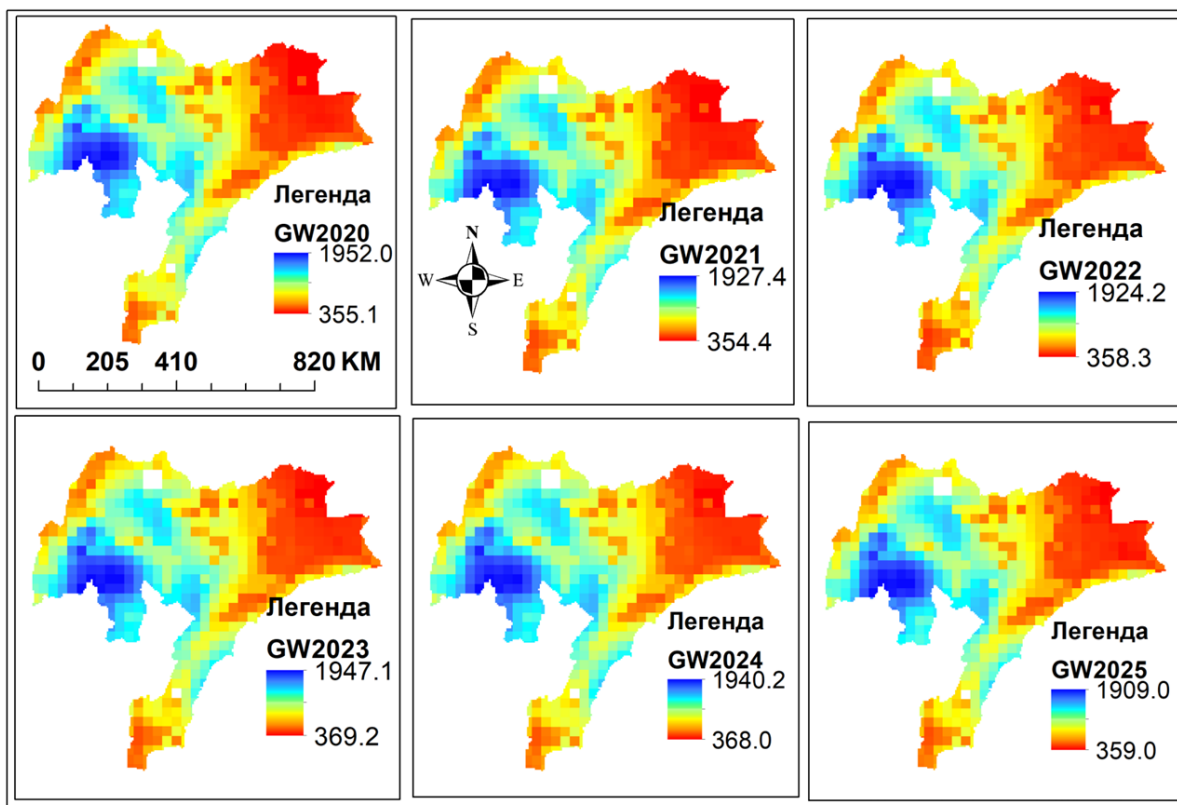


Рисунок 4.28- Пространственное распределение ресурсов ПВ в период с 2020г. по 2025г. (GWS-2020; GWS-2021; GWS-2022; GWS-2023; GWS-2024; GWS-2025).

Как показано на рисунке 4.28, пространственное распределение ресурсов подземных вод, полученное на основе данных GRACE и GLDAS, демонстрирует выраженную пространственно-временную изменчивость в период с 2020 по 2025 год. В исследуемом регионе наблюдаются заметные изменения, которые в значительной степени обусловлены колебаниями режима осадков, связанными с изменением климата. Пространственно-временные карты отражают как межгодовую, так и пространственную неоднородность ресурсов подземных вод, демонстрируя различную гидрологическую реакцию в разных частях исследуемой территории.

В количественном выражении ресурсы подземных вод, оцененные по данным GRACE и GLDAS, варьируются примерно от 354,4 мм до 1952 мм в год в течение исследуемого периода. Эти колебания подчеркивают чувствительность ресурсов подземных вод к климатическим воздействиям, особенно к изменчивости

осадков, и акцентируют значимость применения методов дистанционного зондирования для изучения крупномасштабной гидрологической динамики в регионах с ограниченными полевыми наблюдениями.

Как показано на рисунке 4.28, толщина ресурсов подземных вод в пределах исследуемого региона отчетливо возрастает с востока на запад. Наибольшие ресурсы подземных вод (синий цвет) однозначно фиксируются в юго-западной части исследуемой территории, тогда как наименьшие значения (красный цвет) четко наблюдаются в ее восточной части. Оценки ресурсов подземных вод, полученные на основе наборов данных GRACE и GLDAS, однозначно свидетельствуют, что их объем составил соответственно 442×10^9 , 437×10^9 , 437×10^9 , 443×10^9 , 442×10^9 и 434×10^9 м³ в год в период с 2020 по 2025 годы.

В данной диссертации всесторонне проанализированы все карты подземных вод, включая результаты комплексного индекса, оценки на основе наборов данных GRACE и GLDAS, а также карты продуктивности подземных вод Африки и карты ресурсов подземных вод Африки. Результаты, полученные по комплексному индексу и данным дистанционного зондирования, демонстрируют сходные закономерности, тогда как карты продуктивности подземных вод и карты ресурсов подземных вод Африки также показывают взаимно согласованные тенденции. В целом результаты, полученные всеми примененными методами, наглядно подтверждают их высокую согласованность, что подчеркивает их существенную значимость для надежной оценки ресурсов подземных вод в исследуемых регионах.

Вывод, ресурсы подземных вод, определенные по карте продуктивности подземных вод Африки, составляют $402\,372,3 \times 10^9$ м³/год, тогда как по карте ресурсов подземных вод Африки их объем оценивается в $19\,138,7 \times 10^9$ м³/год; при этом ресурсы подземных вод, рассчитанные на основе данных о питании, составляют лишь 30×10^9 м³/год, что однозначно указывает на существенные различия между примененными методами оценки. Исходя из результатов, полученных по всем использованным наборам данных, именно оценка ресурсов

подземных вод, рассчитанная на основе данных о питании, была принята в качестве базовой и использована для оценки многоцелевой потребности в водных ресурсах.

Управление водными ресурсами это устойчивое планирование, разработка, распределение и управление водными ресурсами для удовлетворения потребностей человека и экосистем, одновременно снижая риски, такие как наводнения и засухи (Hart et al., 2021). Это включает координированный подход для оптимизации использования водных ресурсов, который охватывает управление водоснабжением, качеством и сохранением воды с помощью методов, таких как управления водными ресурсами строительство инфраструктуры (плотины, водохранилища) и повторное оборотноеиспользование воды.

На основе сезонного анализа водных ресурсов и водопотребления общий годовой водный спрос в исследуемом регионе, включая потребности хозяйственно-питьевое, промышленное, сельское хозяйство и животноводство, составил 114×10^9 м³/год. Количественная оценка поверхностных водных ресурсов показала, что или ресурсы поверхностных вод в сезон дождей составили 330×10^9 м³, тогда как в сухой сезон — 110×10^9 м³. Из-за весьма неравномерного внутригодового и площадного распределения осадков, сложного рельефа, изменения климата, антропогенного воздействия и изменение климата наблюдался избыток воды в сезон дождей и нехватка поверхностной воды в сухой сезон. Избыток воды в сезон дождей, в основном обусловленный осадками, пополняющими поверхностные водные объекты (реки, озера, водохранилища), удовлетворяет многоцелевой водный спрос в исследуемом регионе. Однако дефицит воды в сухой сезон вызван отсутствием осадков, что приводит к уменьшению поверхностной воды (например, рек и озёр), увеличению испарения из-за высоких температур, чрезмерному потреблению водных ресурсов, что влияет на возможность использования хозяйственно-питьевое, промышленное, сельское хозяйство и животноводство, а также снижает выработку электроэнергии в регионе. Поэтому для исследуемого региона в сухой сезон рекомендована конъюнктивная система управления водными ресурсами, которая интегрирует поверхностные и подземные воды в единую систему для совместного управления с целью повышения надежности и

эффективности водоснабжения. Этот подход включает координированное управление обоими источниками для оптимизации разноцелевого использования водных ресурсов. Подход подтверждается аналогичными исследованиями (Sekar et al., 2024). Он способствует более устойчивому использованию воды, предотвращая отдельное управление.

Таким образом, страна испытывает отчетливые влажные периоды с июня по сентябрь и сухой период с октября по май (подробное описание см. в главе 2). В исследуемом регионе общий ежегодный многоцелевой спрос на воду составил 114×10^9 м³. Ресурсы поверхностных вод в сезон дождей составили 330 млрд м³, тогда как в сухой сезон – только 110×10^9 м³ (таблица 4.12). Общий годовой водный ресурс региона составил 440×10^9 м³, при этом средний потенциал подземных вод оценивался в $29,1 \times 10^9$ м³/год, что эквивалентно $2,5 \times 10^9$ м³/месяц.

Таблица 4.12- Ресурсы природных вод и потребность в Центральной Эфиопии

Источники водоснабжения	Ресурсы природных вод по сезонам года, $\times 10^9$, м ³		Потребность, $\times 10^9$, м ³ /год
	Сухой (октябрь-май)	Влажный (июнь-сентябрь)	
Поверхностные воды	110	330	
Подземные воды	30		
Подземные воды			
Итого:	140	330	114

Ресурсы поверхностных вод в сезон дождей полностью удовлетворяют многоцелевой спрос на водоснабжение, тогда как в сухой сезон их недостаточно. Для преодоления дефицита воды в сухой сезон подземные воды могут быть интегрированы с поверхностными. Потенциал подземных вод за восемь месяцев сухого сезона составил 20×10^9 м³, что, в сочетании с запасами поверхностных вод,

обеспечивает общий объем $130 \times 10^9 \text{ м}^3$, удовлетворяя суммарные потребности в воде в сухой сезон.

Для устойчивого управления водными ресурсами рекомендуется использовать поверхностные воды для многопрофильного водоснабжения в сезон дождей, а в сухой сезон – комбинированное использование поверхностных и подземных вод для обеспечения надежности и оптимизации водоснабжения.

Выводы. Таким образом, потребность в воде в центральной Эфиопии составляет $114 \times 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$. Годовой объем ресурсов поверхностных вод в исследуемом регионе составляет $440 \times 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$. Ресурсы во влажный сезон — $330 \times 10^9 \text{ м}^3$, в то время как в сухой сезон ресурсы поверхностных вод снижаются до $110 \times 10^9 \text{ м}^3$. Оцененный средний ресурсный потенциал подземных вод в исследуемом регионе составил $30 \times 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$. Таким образом, обеспечение круглогодичного разноцелевого водоснабжения в регионе возможно при условии реализации следующей стратегии: использование поверхностных вод в сезон дождей и сочетание поверхностных и подземных вод в сухой сезон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Структурно-тектоническое развитие Восточно-Африканского рифта предопределило формирование природных условий, включающих морфоструктурные, климатические и геолого-гидрогеологические особенности как в Эфиопии в целом, так и в её центральной части.

2. Проведенный анализ исходной информации позволил выделить 3 основные гидрогеологические структуры в регионе исследований: бассейны, массивы и обводненные разломы.

3. Разработан комплексный индекс водообильности, включающий ряд легко определяемых факторов и позволяющий выделить участки, наиболее перспективные для постановки геологоразведочных работ на подземные воды на начальных стадиях исследований, при этом наиболее перспективными являются зоны обводненных разломов;

4. Количественная оценка ресурсного потенциала природных вод Центральной Эфиопии свидетельствует о возможности обеспечения хозяйственно-питьевых и производственных потребностей при условии использования поверхностных вод в сезон дождей и сочетание поверхностных и подземных вод в сухой сезон, что может рассматриваться как основа стратегии устойчивого управления водными ресурсами в исследуемом регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A. & Hegewisch, K. C. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015: Scientific Data 2018; 5, 170191, <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>.
2. Abbate, E., Bruni, P., Ferretti, M. P., Delmer, C., Laurenzi, M. A., Hagos, M., Bedri, O., Rook, L., Sagri, M., Libsekal, Y. The Oligocene intertrappean beds: regional distribution, depositional environments and Afro/Arabian mammal dispersal corridors: *J Afr Earth Sci* 99:463–489, 2014.
3. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., Rasmussen, J. An introduction to the European Hydro-logical System-Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* 1986; 87, 45–59, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
4. Abdel-Fattah, M., Kantoush, S. A., Saber, M., Sumi, T. Rainfall-Runoff Modeling for Extreme Flash Floods in Wadi Samail, Oman. *J. Jpn. Soc. Civ. Eng. Ser. B1 (Hydraul. Eng.)* 2018; 74, I_691–I_696.
5. ABDO. Abay Basin Development Office (2020). *Basin Water Resources and Irrigation Potential Report: 2020*.
6. Abdullateef, L., Tijani, M. L., Nuru, N. A., John, S., Mustapha, A. Assessment of groundwater recharge potential in a typical geological transition zone in Bauchi, NE-Nigeria using remote sensing/GIS and MCDA approaches: *Heliyon*, 2021; Volume 7, issue 4, e06762, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06762>
7. Abera, K. A., Gebreyohannes, T., Abrha, B., Hagos, M., Berhane, G., Hussien, A., Belay, A. S., Van Camp, M., & Walraevens, K. Vulnerability Mapping of Groundwater Resources of Mekelle City and Surroundings, Tigray Region, Ethiopia: *Water*, 2022; 14(16), 2577, <https://doi.org/10.3390/w14162577>
8. Abraha, T. A., Assefa Woldeamanuel, T. & Gebremariam Beyene, E. Tracking and tracing water consumption for informed water sensitive intervention through

- machine learning approach: *npj Clean Water* 2024; 7, 28, <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00309-6>
9. Adane, Z., Yohannes, T., & Swedenborg, E. L. *Balancing Water Demands and Increasing Climate Resilience: Establishing a Baseline Water Risk Assessment Model in Ethiopia* (Technical Note): World Resources Institute, 2021, DOI: <https://doi.org/10.46830/writn.19.00123>
 10. Adeba, D. & Tafese, S. *Assessment of Surface Water Resources in Case of Muger Sub Basin, Ethiopia: Journal of Energy and Natural Resources*, 2021; 10(3), 53–64. <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20211003.11>
 11. Adesola, G. O., Thamaga, K. H., Gwavava, O., & Pharoe, B. K. Groundwater Potential Zones Assessment Using Geospatial Models in Semi-Arid Areas of South Africa: *Land*, 2023; 12(10), 1877. <https://doi.org/10.3390/land12101877>
 12. AfDB. African Development Bank. *Ethiopia Country Report – Manufacturing Sector* (November 2014): 2014; Link: [Ethiopia Country Report – Manufacturing Sector](#)
 13. Afra, A., Berrezel, Y. A., Abdelbaki, C., Megnounif, A., Saber, M., Benabdelkrim, M. E. A., & Kumar, N. Application of the Rainfall–Runoff–Inundation Model for Flood Risk Assessment in the Mekerra Basin, Algeria: *GeoHazards*, 2025; 6(1), 2. <https://doi.org/10.3390/geohazards6010002>
 14. Ahmed, B.Y., Tolera, S.T., Temesgen, L.M., & Temesegegn, L.M. Domestic water consumptions and associated factors in rural household of Harari region, Eastern Ethiopia; A cross sectional study: *Frontiers in Public Health*, 2025; 12. DOI: [10.3389/fpubh.2024.1395946](https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1395946), Corpus ID: 275746942
 15. Alemayehu, E. A., et al. *Review: groundwater research in the Ethiopian Rift Valley Lakes region: Frontiers in Water*, 2023; 5, 819568. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.819568>
 16. Alhamshry, A., Fenta, A. A., Yasuda, H., Kimura, R., & Shimizu, K. Seasonal Rainfall Variability in Ethiopia and Its Long-Term Link to Global Sea Surface Temperatures: *Water*, 2020; 12(1), 55. <https://doi.org/10.3390/w12010055>

17. Ali, M.M., & Terfa, A.B. State of Water Supply and Consumption in Urban Areas at Household Level: A Case Study of East Wollega Zone, Ethiopia. Corpus ID: 130248371
18. Ali, S. Climate Change and Economic Growth in a Rain-Fed Economy: How Much Does Rainfall Variability Cost Ethiopia? (February 8, 2012): 2012; Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2018233> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2018233>
19. Assefa, G. M., Abay, F. D., Kebede, G. A., & Abebe, S. Groundwater Suitability Mapping in Jimma and Borena Zones of Ethiopia Using GIS and Remote Sensing Techniques: *Water*, 2025; 17(9), 1356. <https://doi.org/10.3390/w17091356>
20. Аузина Л.И. Прогноз подъема уровня грунтовых вод в районе исторических построек города Иркутска. *Науки о Земле и недропользование*. 2022;45(2):172-183. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-172-183>
21. AwBA. Awash Basin Authority / Ministry of Wddwater (2017): *Awash Basin Water Allocation Strategic Plan (Main report)*. (Awash Basin Plan), 2017.
22. Awulachew, S.B. Abaya-Chamo lakes physical and water resources characteristics, including scenarios and impacts. Lake Abaya Research Symposium (LARS) 2007. University of Siegen and Arba Minch University 7th to 11th May 2007 Ethiopia. <http://hdl.handle.net/10568/25729>. Accessed 8 Aug 2013
23. Awulachew S.B. Water-centered growth challenges, innovations and interventions in Ethiopia: 2010; <http://publications.iwmi.org/pdf/H044260.pdf>. Accessed 2 March 2017
24. Awulachew, S. B., McCartney, M., Steenhuis, T. S., & Ahmed, A. A. *A review of hydrology, sediment and water resource use in the Blue Nile Basin*: International Water Management Institute (IWMI) Working Paper 131. Colombo, Sri Lanka. 2008.
25. Awulachew, S. B., Smakhtin, V., Molden, D., & Peden, D. (Eds.). *The Nile River Basin: Water, agriculture, governance and livelihoods*. International Water Management Institute (IWMI): 2012; <https://doi.org/10.22004/ag.econ.321897>

26. AWULACHEW, S. B., YILMA, A. D., LOULSEGED, M., LOISKANDL, W., AYANA, M., ALAMIREW, T. Water Resources and Irrigation Development in Ethiopia: Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 78p. (Working Paper 123), 2007.
27. Ayenew, T., Robert, B. Comparative study of the hydrology and hydrogeology of selected Ethio-Kenyan Rift lakes. Lake Abaya Research Symposium (LARS) 2007. University of Siegen and Arba Minch University 7th to 11th May 2007 Ethiopia. <http://hdl.handle.net/10568/25729>. Accessed 8 Aug 2013
28. Ayenew, T. The distribution and hydrogeological controls of fluoride in the groundwater of central Ethiopian rift and adjacent highlands. *Environ Geol.* 2008; 54, 1313–1324, <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0914-4>
29. Balcha, S. K., Hulluka, T. A., Yohannes, B., Bantider, A., & Negatu, A. *Review: groundwater research in the Ethiopian Rift Valley Lakes region: Frontiers in Water*, 2023; 5, 819568, <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.819568>
30. Balcha, S.K., Awass, A.A., Hulluka, T.A., Ayele, G.T., Bantider, A. Hydrological Simulation in a Rift-Bounded Lake System and Implication of Water Abstraction: Central Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia. *Water* 2022; 14, 3929. <https://doi.org/10.3390/w14233929>
31. Banwart, S., Gustafsson, E., Laaksharju, M. Hydrological and reactive processes during rapid recharge to fracture zones: The Äspö large scale redox experiment. *Applied Geochemistry*, 1999; Volume 14, Issue 7, Pages 873-892, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00029-3)
32. Bartczak, A., Krzemiński, M. & Arażny, A. Changes in evaporation patterns and their impact on Climatic Water Balance and river discharges in central Poland, 1961–2020: *Reg Environ Change* 2024; 24, 130, <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02296-3>
33. Bayabil, H. K., Tilahun, S. A., Collick, A.S., Yitaferu, B., Steenhuis, T.S. Are runoff processes ecologically or topographically driven in the (sub) humid Ethiopian highlands? The case of the Maybar watershed: 2010; Volume 3, Issue 4,

Special Issue: Biohydrology - coupling biology and soil hydrology from pores to landscapes, Pages 457-466, <https://doi.org/10.1002/eco.170>

34. Berehanu, B., Azagegn, T., Ayenew, T., & Masetti, M. *Inter-basin groundwater transfer and multiple-approach recharge estimation of the Upper Awash Basin, Ethiopia: Journal Name/TBD*. (This is a peer-reviewed study on groundwater dynamics and recharge in the Upper Awash Basin of Ethiopia), 2017.
35. Berghuijs, W.R., Luijendijk, E., Moeck, C., van der Velde, Y., Allen, S.T. Global Recharge Data Set Indicates Strengthened Groundwater Connection to Surface Fluxes. *Geophys. Res. Lett.* **2022**; *49*, e2022GL099010, <https://doi.org/10.1029/2022GL099010>
36. Bergström, S. *The HBV Model-Its Structure and Applications*; Swedish Meteorological and Hydrological Institute: Norrköping, Sweden, 1992
37. Berhane, A., Hadgu, G., Worku, W. *et al.* Trends in extreme temperature and rainfall indices in the semi-arid areas of Western Tigray, Ethiopia. *Environ Syst Res* 2020; **9**, 3. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00165-6>
38. Berhanu, B., Seleshi, Y., Melesse, A. Surface Water and Groundwater Resources of Ethiopia: Potentials and Challenges of Water Resources Development: In: Melesse, A., Abtew, W., Setegn, S. (eds) Nile River Basin. Springer, Cham. 2014; https://doi.org/10.1007/978-3-319-02720-3_6
39. Berhanu, Belete, Seleshi, Yilma, Demisse, Solomon S *et al.* Bias correction and characterization of climate forecast system re-analysis daily precipitation in Ethiopia using fuzzy overlay: *METEOROLOGICAL APPLICATIONS*, 2016; *23*(2), 230-243, DOI:10.1002/met.1549
40. Berihun, M.L., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N. *et al.* Examining the past 120 years' climate dynamics of Ethiopia: *Theor Appl Climatol* 2023; **154**, 535–566, <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04572-4>
41. Bewket, W., & Sterk, G. *Dynamics in land cover and its effect on streamflow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia: Hydrological Processes*, 2005; *19* (2). 445-458, <https://doi.org/10.1002/hyp.5542>

42. Beye, A. Y. Hydrogeological and hydrochemical framework of complex volcanic system in the Upper Awash River basin, Central Ethiopia: with special emphasis on inter-basins groundwater transfer between Blue Nile and Awash rivers: *Geology*, 2009; Corpus ID: 127324449
43. Beyene, A., Imam, H., & Abdelkader, A. *Hydrological impacts of climate change on the Nile River Basin: Implications of the 2007 IPCC scenarios*. *Climatic Change*, 2010; 100(3-4), 433–461. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9762-7>
44. Beyene, S., Regassa, A., Mishra, B. B., & Haile, M. *The Soils of Ethiopia*. Springer Nature (World Soils Book Series), 2023; ISBN 978-3-031-17011-9.
45. BGR & UNESCO. *Groundwater Resources of the World*, 1 : 25 000 000. Hannover, Paris, 2008.
46. BGR/UNESCO. *Groundwater Resources of the World – Transboundary Aquifer Systems*, 1: 50 000 000. Special Edition for the 4th World Water Forum, Mexico City, March 2006. Hannover, Paris, 2006.
47. Bhagwat, N., Zhou, X., Nagisetty, R. *et al.* Snowmelt runoff model (SRM) for regulated watersheds with regulation-correction. *Appl Water Sci.* 2025; 15, 220, <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02579-y>
48. Bird Life International. Important bird areas factsheet: lake ashenge. (2013) <http://www.birdlife.org>. Accessed 31 July 2013; (4:53:27 PM.)
49. Bonetto, S. M. R., Caselle, C., De Luca, D. A., & Lasagna, M. Groundwater Resources in the Main Ethiopian Rift Valley: An Overview for a Sustainable Development: *Sustainability*, 2021; 13(3), 1347. <https://doi.org/10.3390/su13031347>
50. Boretti, A., Rosa, L. Reassessing the projections of the World Water Development Report: *npj Clean Water* 2019; 2, 15; <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
51. Boru, G. F., & Regassa, F. D. *IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON IRRIGATED CROP WATER USE OF SELECTED MAJOR GROWN CROPS AND WATER DEMAND FOR IRRIGATION: A CASE OF ANGER SUB-BASIN, NILE BASIN OF ETHIOPIA*. *IJEAST*, 2020; Vol. 4, Issue 9, Page 452-464, <https://www.ijeast.com/papers/452-464,Tesma409,IJEAST.pdf>

52. Brovkin, V., Sanderson, B. M., Brizuela, N. G., Hajima, T., Ilyina, T., Jones, C. D., Koven, C., Lawrence, D., Lawrence, P., Li, H., Liddcoat, S., Romanou, A., Séférian, R., Sentman, L. T., Swann, A. L. S., Tjiputra, J., Ziehn, T., & Winkler, A. J. *On a simplified solution of climate-carbon dynamics in idealized flat10MIP simulations: Earth System Dynamics*, 2025; 16(6), 2021–2034. <https://doi.org/10.5194/esd-16-2021-2025>
53. Caletka, M., Šulc Michalková, M., Karásek, P., Fučík, P. Improvement of SCS-CN initial abstraction coefficient in the Czech Republic: a study of five catchments. *Water* 2020; 12 (7), 1964. <https://doi.org/10.3390/w12071964>
54. Chathuranika, I. M., Gunathilake, M. B., Baddewela, P. K., Sachinthanie, E., Babel, M. S., Shrestha, S., Jha, M. K., & Rathnayake, U. S. Comparison of Two Hydrological Models, HEC-HMS and SWAT in Runoff Estimation: Application to Huai Bang Sai Tropical Watershed, Thailand. *Fluids*, 2022; 7(8), 267. <https://doi.org/10.3390/fluids7080267>
55. Chebykin, E. P., Rasskazov, S. V., Vodneva, E. N., Ilyasova, A. M., Chuvashova, I. S., Bornyakov, S. A., Seminsky, A. K., & Snopkov, S. V. *First results of ²³⁴U/²³⁸U monitoring in water from active faults on the western coast of South Baikal*. *Doklady Earth Sciences*, 2015; 460(4), 464–467. DOI: **10.1134/S1028334X15020075**.
56. Chen, W., Li, H., Hou, E., Wang, S., Wang, G., Panahi, M., Li, T., Peng, T., Guo, C., Niu, C., Xiao, L., Wang, J., Xie, X., Ahmad, B.B. GIS-based groundwater potential analysis using novel ensemble weights-of-evidence with logistic regression and functional tree models. *Sci. Total Environ.* **2018**; 634, 853–867, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.055>
57. Chernet, T. Hydrogeology of Ethiopia and Water Resources Development. EIGS, Addis Ababa:1993
58. Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. Applied Hydrology. International Edition, McGraw-Hill Book Company, New York. 1988.

59. Conway, D. *The climate and hydrology of the Upper Blue Nile river*. The Geographical Journal, 2000; 166(1), 49–62. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2000.tb00006.x>
60. Conway, D., & Hulme, M. *The impacts of climate variability and future climate change in the Nile Basin on water resources in Egypt*: International Journal of Water Resources Development, 1996; 12(3), 277–296.
61. Conway, D., & Schipper, E. L. F. *Adaptation to climate change in Africa: Challenges and opportunities identified from Ethiopia*: Global Environmental Change, 2011; 21(1), 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.013>
62. Coulié, E., Quideteur, X., Gillot, P.Y., Courtillot, V., Lefevre, J.C., Chiesa, S. Comparative K–Ar and Ar/Ar dating of Ethiopian and Yemenite Oligocene volcanism: implications for timing and duration of the Ethiopian traps. Earth Planet Sci Lett 2003; 206:477–492.
63. Crosbie, R.S., Peeters, L.J.M., Herron, N., McVicar, T.R. Herr, A. Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: Use of regression kriging and the chloride mass balance method: Journal of Hydrology, 2018; Volume 561, Pages 1063-1080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.003>
64. Dao, P.U., Heuzard, A.G., Hoa Le, T.X., Zhao, J., Yin, Y., Shang, C., Fa, C. The impacts of climate change on groundwater quality: A review: Science of The Total Environment, 2024, Volume 912; 169241, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169241>
65. Debelo, M. C., & Muhye, H. K. Water supply and demand scenario of Dilla Town, Southern Ethiopia: International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 2017; Vol.9(12), pp. 270-276, <https://doi.org/10.5897/IJWREE2017.0748>
66. Decharme, B. and Colin, J. Influence of floodplains and groundwater dynamics on the present-day climate simulated by the CNRM climate model, Earth Syst. Dynam. 2025; 16, 729–752, <https://doi.org/10.5194/esd-16-729-2025>.

67. Dejene, A. The training and visit agricultural extension in rainfed agriculture: Lessons from Ethiopia. *World Development*, 1989; Volume 17, Issue 10, Pages 1647-1659, [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(89\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0305-750X(89)90034-X)
68. Demlie, M., Wohnlich, S., Wisotzky, F. *et al.* Groundwater recharge, flow and hydrogeochemical evolution in a complex volcanic aquifer system, central Ethiopia. *Hydrogeol J.* 2007; 15, 1169–1181, <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0163-3>
69. Di Paola, G.M. The Ethiopian Rift Valley (between 7° 00' and 8° 40' lat.). *Bull Volcanol* 1972; 36:517–560.
70. Diaz, C.L., Smerdon, B., Alessi, D.S., Faramarzi, M. Assessment of the impacts of climate change on groundwater evapotranspiration in mid-to-high latitude regions: *Journal of Hydrology*, 2025; Volume 660, Part A, 133294, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133294>
71. Dile, Y. T., et al. *Hydrological dynamics and water resource availability in the Rift Valley Lakes Basin using a WEAP model: Water Policy/Water Resources Research (WEAP applications)*, 2024.
72. Dile, Y.T., Berndtsson, R., Setegn, S.G. Hydrological Response to Climate Change for Gilgel Abay River, in the Lake Tana Basin - Upper Blue Nile Basin of Ethiopia. *PLoS ONE* , 2013; 8(10): e79296, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079296>
73. Dinka, M.O. Analysing the extent (size and shape) of Lake Basaka expansion (Main Ethiopian Rift Valley) using remote sensing and GIS. *Lakes Reserv: Res Manag* 2012; 17:131–141. doi:10.1111/j.1440-1770.2012.00500. Blackwell Publishing Asia Pty Ltd,
74. Dongare, C.U. Decisive significance of lineaments on groundwater occurrence in the Khapri watershed of Deccan Volcanic Province (DVP), district Dangs, Western India. *Discov Geosci* 2024; 2, 49 , <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00056-8>. EDN: VQFHHZ.
75. EIAR. Ethiopian Institute of Agricultural Research (2019). *Irrigation Scheduling for Cotton in Semi-Arid Zones (Melkassa & Tendaho Trials)*.

- 76.EIC-report: Ethiopian Investment Commission (EIC). *Manufacturing – Invest in Ethiopia*, (web page). 2019;
Link: [Manufacturing | Invest in Ethiopia](#)
- 77.EIGS. Hydrogeological map of Ethiopia. 1:2,000,000 scale. Ethiopian Institute of Geological Surveys, Addis Ababa. 1993.
- 78.EIGS. Explanation of the Geological Map of Ethiopia. Ethiopian Institute of Geological Survey. Addis Ababa. 1996.
- 79.Elzopy, K. A., Chaturvedi, A. K., Chandran, K. M., Gopinath, G., K, N., & Surendran, U. Trend analysis of long-term rainfall and temperature data for Ethiopia. *South African Geographical Journal*, 2020; 103(3), 381–394.
<https://doi.org/10.1080/03736245.2020.1835699>
- 80.ESC. Ethiopian Sugar Corporation (2020). *Annual Production and Irrigation Efficiency Report*. Addis Ababa. 2020
- 81.ESC. *Ethiopian Sugar Corporation (ESC 2021). Annual Sugar Development Report*. Addis Ababa. 2021
- 82.EVNR. Ethiopia Voluntary National Review (VNR): Federal Democratic Republic of Ethiopia. (2022). *Voluntary National Review 2022: Ethiopia – Implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. High-Level Political Forum on Sustainable Development. 2022.
- 83.Fanta, S.S., Namara, W.G. & Yesuf, M.B. Assessment of water supply and demand in Gilgel Gibe watershed, southwest Ethiopia. *Sustain. Water Resour. Manag.* 2022; 8, 104 <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00684-3>
- 84.FAO Irrigation potential in Africa: a basin approach, land and water division of FAO, FAO land and water bulletin 4, Rome, Italy. 1997.
- 85.FAO *Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling for Major Crops in Ethiopia*. Rome: FAO. (2012).
- 86.FAO-UNESCO. Food and Agriculture Organization of the United Nations & UNESCO. (1974-1981). *FAO-UNESCO Soil Map of the World* (1:5 000 000 scale). Rome: FAO.

87. Faramarzi, M., Yang, H., Mousavi, J., Schulin, R., Binder, C.R., Abbaspour, K.C. Analysis of intra-country virtual water trade strategy to alleviate water scarcity in Iran. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2010; 14 (8), 1417–1433. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1417-2010>
88. Feldman, A. *Hydrological Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*: Hydrologic Engineering Center HEC; US Army Corps of Engineers: Davis, CA, USA, 2020.
89. Feleke, M.M.M., Feleke, M.M.M., Gebrehiwot, S.G. Zeleke, G., Agumassie, T.A., Dejen, Z.A., Asfaw, T.D. Spatial and Temporal Water Demand Variabilities in the Awash Basin, Ethiopia: 2020; <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4533034/v1>
90. Fenta, A. A., **Addis, K., Tesfamichael, G., Gebrerufael, H.** *Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia*. *Hydrogeology Journal* (or similar peer-reviewed outlet, see exact publication details): 2015; DOI: [10.1007/s10040-014-1198-x](https://doi.org/10.1007/s10040-014-1198-x)
91. Fenta, M.C., Anteneh, Z.L., Szanyi, J., Walker, D. Hydrogeological framework of the volcanic aquifers and groundwater quality in Dangila Town and the surrounding area, Northwest Ethiopia. [*Groundwater for Sustainable Development*](#), 2020; [*Volume 11*](#), 100408, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100408>,
92. Fildes, S.G., Bruce, D., Clark, I.F., Raimondo, T., Keane, R., Batelaan, O. Integrating spatially explicit sensitivity and uncertainty analysis in a multi-criteria decision analysis-based groundwater potential zone model: *Journal of Hydrology*, 2022; Volume 610, 127837, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127837>
93. G/Mariam, F. *Legal and institutional framework governing sugar industry in Ethiopia: A comparative study* (Master's thesis). Jimma University. 2019.
94. Gasse, F., & Street, F. A. Late Quaternary lake-level fluctuations and environments of the Northern Rift Valley and Afar Region (Ethiopia and Djibouti): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1978; 24, 279-325

95. Gebrechorkos, S.H., Hülsmann, S. & Bernhofer, C. Long-term trends in rainfall and temperature using high-resolution climate datasets in East Africa. *Sci Rep* 2019; **9**, 11376 , <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47933-8>
96. Gebreeyesus, M., Gwenzi, W., Mwamila, T. *et al.* Mitigating freshwater supply shortages in regions of high demand in Ethiopia: integrated water resources management approach. *Environ Earth Sci.* 2025; **84**, 99 , <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12119-1>
97. Gebrehiwot, T., & van der Veen, A. *Assessing the evidence of climate variability in the northern part of Ethiopia.* Journal of Development and Agricultural Economics, 2013; **5**(3), 104–119. <https://doi.org/10.5897/JDAE12.056>
98. Gebremicael, T. G., Mohamed, Y. A., Van der Zaag, P., & Hagos, E. Y. *Attributing the hydrological impact of different land-use types and their long-term dynamics through combining parsimonious hydrological modelling, alteration analysis and PLSR analysis.* Science of the Total Environment, 2019; 660, 1155–1167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.085>
99. Gebreyohannes, T., De Smedt, F., Walraevens, K., Gebresilassie, S., Hussien, A., Hagos, M., Amare, K., Deckers, J., Gebrehiwot, K. Application of a spatially distributed water balance model for assessing surface water and groundwater resources in the Geba basin, Tigray, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2013; Volume 499, Pages 110-123, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.026>
100. Gedefaw, M., Wang, H., Yan, D., Qin, T., Wang, K., Girma, A., Batsuren, D., & Abiyu, A. Water Resources Allocation Systems under Irrigation Expansion and Climate Change Scenario in Awash River Basin of Ethiopia: *Water*, 2019; *11*(10), 1966. <https://doi.org/10.3390/w11101966>
101. Genjebo, M.G., Kemal, A., Nannawo, A.S. Assessment of surface water resource and allocation optimization for diverse demands in Ethiopia's upper Bilate Watershed: *Heliyon*, 2023; Volume 9, Issue 10, e20298.
102. Giroto, M., de Lannoy, G. J., Reichle, R. H. *et al.* *Geophysical Research Letters*, 2017; **44**, 4107–4115. DOI: 10.1002/2017GL072994.

103. Gizaw, B. Hydrochemical and environmental investigation of the Addis Ababa region, Ethiopia. Ph.D. Thesis, faculty of earth and Environmental Sciences, Ludwig-Maximilians-University of Munich, 157p. 2002.
104. Gnann, S., Baldwin, J. W., Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Schwanghart, W., & Wagener, T. The influence of topography on the global terrestrial water cycle. *Reviews of Geophysics*, 2025, 63, e2023RG000810. <https://doi.org/10.1029/2023RG000810>
105. Gobena, J.A. A Case Study on Water Storage Tank Design and Construction for Domestic Purpose in Shashemene Town, Ethiopia: *Civil and environmental research*, 2016; volume 8, page 66-69. Corpus ID: 113935620
106. Gobezie W.J., Teferi E., Dile Y.T., Bayabil H.K., Ayele G.T., & Ebrahim G.Y. *Modeling Surface Water–Groundwater Interactions: Evidence from Borkena Catchment, Awash River Basin, Ethiopia*, *Hydrology*, 2023; 10(2), 42. doi:10.3390/hydrology10020042
107. Goldblatt, R., You, W., Hanson, G., & Khandelwal, A. K. Detecting the Boundaries of Urban Areas in India: A Dataset for Pixel-Based Image Classification in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2016; 8(8), 634. <https://doi.org/10.3390/rs8080634>
108. Grinevskii, S. O. Structure and parameter schematization of the vadose zone for groundwater recharge modeling. *Moscow University Geology Bulletin*, 2010; 65 (6) 387-398, [doi:10.3103/s0145875210060062](https://doi.org/10.3103/s0145875210060062)
109. Grinevskii, S.O. and Pozdnyakov, S.P. Principles of regional estimation of infiltration groundwater recharge based on geohydrological models: *Vodn. Resur.*, 2010; vol. 37, no. 5, pp. 543–557.
110. Grinevskii, S.O. The effect of topography on the formation of groundwater recharge: *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2014; 69, 47–52, <https://doi.org/10.3103/S0145875214010025>
111. Grinevskiy, S. O., Pozdnyakov, S. P., & Dedulina, E. A. Regional-Scale Model Analysis of Climate Changes Impact on the Water Budget of the Critical

- Zone and Groundwater Recharge in the European Part of Russia. *Water*, 2021; 13(4), 428. <https://doi.org/10.3390/w13040428>
112. Hagos, M. and Koller, F. Geochemical characteristics of the alkaline basalts and the phonolite–trachyte plugs of the Axum area, northern Ethiopia. 2010; Corpus ID: 207877493.
113. Hamza, A.A., Getahun, B.A. Assessment of water resource and forecasting water demand using WEAP model in Beles river, Abbay river basin, Ethiopia. *Sustain. Water Resour. Manag.* 2022; **8**, 22, <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00615-2>
114. Handique, H., Pradyut Dey, Patnaik Santanu Kumar. Integration of geospatial techniques and analytical hierarchy process (AHP) ind demarcating groundwater potential zones in Lakhimpur district, Assam, India. *Environmental Science, Geography, Geology*, 2024; DOI:[10.24057/2071-9388-2024-3208](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3208). Corpus ID: 273298539
115. Hart, B.T., Alexandra, J.A., Bond, N.R., Byron, N., Marsh, R., Pollino, C.A., Stewardson, M.J. Chapter 18 - The way forward: Continuing policy and management reforms in the Murray–Darling Basin: Murray-Darling Basin, Australia Its Future Management, Volume 1, in *Ecohydrology from Catchment to Coast*, 2021; Pages 389-429. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818152-2.00019-X>
116. Herath, R.D., Pawar, U., Aththanayake, D.M. *et al.* Rainfall-runoff-inundation (RRI) model for Kalu River, Sri Lanka. *Model. Earth Syst. Environ.* 2024; **10**, 1825–1839 <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01877-1>
117. Hodgson, F.D.I. The Use of Multiple Linear Regression in Simulating Ground-Water Level Responses. *Groundwater*, 1978; Volume 16, Issue 4 Pages 249-253, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1978.tb03232.x>
118. Horner, W. *On the Determination of the Maximum Discharge from Rainfall.* *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 68, 334–376. London: Institution of Civil Engineers (ICE). 1882.

119. Horton, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 1933; *14*, 446–460.
120. Huang, CL., Hsu, NS., Yao, CH. *et al.* Identification of hydrogeological evolution using hydrogeology-seismology analysis of groundwater head fluctuation related to the 1999 $M_w = 7.5$ Chi-Chi earthquake. *Prog Earth Planet Sci* **7**, 51 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00346-y>
121. Hughes, R.H., Hughes, J.S. A directory of African Wetlands. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK/UNEP, Nairobi, Kenya WCMC, Cambridge, UK, 1992; ISBN: 2-88032-949-3
122. Hulluka, T.A., Balcha, S.K., Yohannes, B., Bantider, A., Negatu, A. Review: Groundwater research in the Ethiopian Rift Valley Lakes region. Sec. Water and Human Systems, 2023; Volume 5, <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.819568>
123. Huo, W. B. *et al.* Multiple hydrological models' comparison and an improved Bayesian model averaging approach for ensemble prediction over semi-humid regions. *Stoch. Env. Res. Risk Assess.* 2019; **33** (1), 217–238.
124. Hurni, H., Berhe, W. A., Chadhokar, P., Daniel, D., Gete, Z., Grunder, M., & Kassaye, G. *Soil and Water Conservation in Ethiopia: Guidelines for Development Agents* (2nd revised ed.). Bern, Switzerland: Centre for Development and Environment (CDE), University of Bern. (2016).
125. Jepson, D.H., Athearn, M.J. Land and water resources of the Blue Nile Basin. Appendix II Geology US Dept Interior, Addis Ababa, p 221, 1964.
126. Jha, M.K., Chowdary, V.M. & Chowdhury, A. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeol J*, 2010, **18**, 1713–1728, <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0631-z>
127. Kaur, L., Rishi, M.S., Singh, G., Thakur, S.N. Groundwater potential assessment of an alluvial aquifer in Yamuna sub-basin (Panipat region) using remote sensing and GIS techniques in conjunction with analytical hierarchy process (AHP) and catastrophe theory (CT): *Ecological Indicators*, 2020; [Volume 110](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105850), 105850, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105850>

128. Kazmin ,V., Shiferaw, A., Balcha, T. The Ethiopian basement, stratigraphy and possible manner of evolution: *Geol Rund* , 1978; 67: 531–546
129. Kebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T., Marc, V. Water balance of Lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile basin, Ethiopia: *J Hydrol*, 2005; 316(2006):233–247
130. Kebede, M. M., Kumar, M., Mekonnen, M. M., & Clement, T. P. Enhancing Groundwater Recharge Through Nature-Based Solutions: Benefits and Barriers: *Hydrology*, 2024; 11(11), 195. <https://doi.org/10.3390/hydrology11110195>
131. Kebede, S. *Groundwater in Ethiopia: Features, Numbers and Opportunities*: Springer Hydrogeology. 2013; <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30391-3>
132. Kebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T., & Ayenew, T. *Groundwater recharge, circulation and geochemical evolution in the source region of the Blue Nile River, Ethiopia*. **Applied Geochemistry**, 2005; **20**(9), 1658–1676.
133. Khan, M.Y.A., Elkashouty, M., Tian, F. Mapping groundwater potential zones using analytical hierarchical process and multi-criteria evaluation in the Central Eastern Desert, Egypt. *Water*, 2022; 14(7):1041
134. Kieffer, B., Srdt, N., Lapierre, H., Bastien, F., Bosh, D., Pecher, A., Yirgu, G., Ayalew, D., Weis, D., Jerram, D.A., Keller, F., Meugniot, C. Flood and shield basalts from Ethiopia: magmas from the African superswell: *J Petrol*, 2004; 45:793–834
135. Kim, U. and Kaluarachchi, J.J. Climate Change Impacts on Water Resources in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 2009; 45(6):1361-1378. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00369.x>
136. Kitessa, W. M., Kebede, A. B., Tufa, F. G., Gudeta, B. G., Yenehun, A., Chelkeba, B., Debela, S. K., Feyessa, F. F., & Walraevens, K. Hydrogeochemical Characterization and Processes Controlling Groundwater Chemistry of Complex Volcanic Rock of Jimma Area, Ethiopia. *Water*, 2024; 16(23), 3470. <https://doi.org/10.3390/w16233470>

137. Kobe, F. T., & Liu, A. *Analysis of seasonal and annual variations of extreme temperatures and precipitation in Ethiopia. International Journal of Big Data Mining for Global Warming*: November 16, 2022. <http://dx.doi.org/10.1142/S2630534822500024>
138. Koyra, I. *Challenges, Experiences and Opportunities of Water Resource Management in Ethiopia. Journal of Resources Development and Management*, 2020; **62**, 7–16. DOI: 10.7176/JRDM/62-01.
139. Krause, P. *Das hydrologische Modellsystem J2000-Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten (No. PreJuSER-37462)*; Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung: Jülich, Germany, 2001; ISBN 3-89336-283-5.
140. Kulakov, V.V., Shtengelov, R.S., Matveenکو, D.V. Interaction of ground and surface water in Khabarovsk water node area. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021; 44(2):151–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-151-158>
141. Kumar P., Thakur P.K., Bansod BKS. *et al.* Groundwater: a regional resource and a regional governance. *Environ Dev Sustain*, 2018; **20**, 1133–1151. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-9931-y>
142. Kumar, A. Kanga,S., Taloor, A.T., Singh,S.K., Đurin, B. Surface runoff estimation of Sind river basin using integrated SCS-CN and GIS techniques. *HydroResearch*, 2021; Volume 4, Pages 61-74, <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2021.08.001>
143. Kummu,M., Ward, P.J., de Moel, H. and Varis, O. Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia. *Environmental Research Letters*, 2010; Volume 5, Number 3, DOI 10.1088/1748-9326/5/3/034006
144. Кураничева А.И., Ланкин Ю.К., Наумова О.О. Неотектонические условия формирования и локализация запасов подземных вод переуглубленных участков долины реки Китой. *Науки о Земле и*

- недропользование. 2021;44(3):253-260. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-253-260>.
145. Lakew, H. B., Moges, S. A., & Asfaw, D. H. Hydrological Evaluation of Satellite and Reanalysis Precipitation Products in the Upper Blue Nile Basin: A Case Study of Gilgel Abbay. *Hydrology*, 2017; 4(3), 39. <https://doi.org/10.3390/hydrology4030039>
146. Landerer, F. W. & Swenson, S. C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research* 2012; 48, W04531. <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
147. Lencha, S.M., Babore, T.A. Modelling of the water distribution system and determination of losses: the case of Halaba Kulito town, Central Ethiopia: *Discov Sustain* 2025; 6, 92, <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00889-4>
148. Li, C., Shan, X., Li, C., Hao, S., Cheng, B., Lu, C., Zhao, J., Wang, X., & Su, Z. Analysis of the Occurrence Conditions and Formation Mechanism of Mineral Water in the Southern Region of Yaoquan Mountain, Wudalianchi. *Water*, 2024; 16(21), 3130. <https://doi.org/10.3390/w16213130>
149. Li, M., Zeng, Y., Lubczynski, M. W., Roy, J., Yu, L., Qian, H., Li, Z., Chen, J., Han, L., Zheng, H., Veldkamp, T., Schoorl, J. M., Hendricks Franssen, H.-J., Hou, K., Zhang, Q., Xu, P., & Su, Z. *A first investigation of hydrogeology and hydrogeophysics of the Maqu catchment in the Yellow River source region. Earth System Science Data*, 2021; 13, 4727–4757. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4727-2021>
150. Lin, L., Tang, C., Liang, Q., Wu, Z., Wang, X., Zhao, S. Rapid urban flood risk mapping for data-scarce environments using social sensing and region-stable deep neural network. *J. Hydrol.* **2023**; 617, 128758, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128758>
151. Long, D., Yang, Y., Wada, Y. et al. *Remote Sensing of Environment*, 2015; 168, 177–193. DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.003

152. MacDonald, A. M., Bonsor, H.C., Dochartaigh, B. E., Taylor, R .G. Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters* 2012; 7, 024009.
153. MacDonald, A. M., Bell, R. A., Kebede, S., Azagegn, T., Tadesse, Y., McKenzie, D., & Calow, R. C. *Groundwater and resilience to drought in the Ethiopian Highlands*. *Environmental Research Letters*, 2019; 14(10), 105006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab282>
154. MacDonald, A. M., Calow, R. C., Nicol, A. L., Hope, B., & Robins, N. S. *Ethiopia: water security and drought* (BGS Technical Report WC/01/002). British Geological Survey. 2001.
155. Machiwal, D., Jha, M.K. & Mal, B.C. Assessment of Groundwater Potential in a Semi-Arid Region of India Using Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques. *Water Resour Manage*, 2011; **25**, 1359–1386, <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9749-y>
156. Мальковский В.И., Петров В.А., Минаев В.А. Влияние ориентации активизирующихся тектонических разломов на безопасность системы изоляции радиоактивных отходов. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле Официальный сайт журнала на журнальной платформе РЦНИ, Том 508, № 1 (2023), Страницы: 144-150, <https://doi.org/10.31857/S268673972260196X>
157. Mandal, U., Sahoo, S., Munusamy, S.B., Dhar, A., Panda, S.N., Kar, A., Mishra, P.K. Delineation of groundwater potential zones of coastal groundwater basin using multi-criteria decision-making technique: *Water Resour Manag*, 2016, 30:4293–4310
158. Marti, E., Leray, S., and Roques, C. Catchment landforms predict groundwater-dependent wetland sensitivity to recharge changes, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2025; (29) 5665–5676, <https://doi.org/10.5194/hess-29-5665-2025>.
159. März, S. Assessing the fuel poverty vulnerability of urban neighbourhoods using a spatial multi-criteria decision analysis for the German city of Oberhausen.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018; Volume 82, Part 2, Pages 1701-1711, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.006>
160. McNally, A., S. McCartney, A.C. Ruane, I.E. Mladenova, A.K. Whitcraft, I. Becker-Resher, J.D. Bolten, C.D. Peters-Lidard, C. Rosenzweig, and S. Schollaert Uz, Hydrologic and agricultural Earth observations and modeling for the water-food nexus: *Front. Environ. Sci.*, 2019; 7, 23, doi:10.3389/fenvs.2019.00023
161. Mekuriaw, T. *Analysis of Current and Future Water Demand Scenario in Yejube Town, Ethiopia: Difficulties of acceptable water supply and reduction of non-revenue water* [Article]. *International Journal of Advanced Science and Engineering*, 2019; 6(2), 1291-1304. <https://doi.org/10.29294/IJASE.6.2.2019.1291-1304>
162. Mengesha, T., Chernet, T., Haro, W. Geological map of Ethiopia (1:2,000,000). Geological Survey of Ethiopia, Addis Ababa, Ethiopia. 1996.
163. Mengistu, Y. Anthropogenic impact on surface and ground water system in Bahir Ar, Ethiopia: MSc Thesis, Addis Ababa University, Ethiopia. 2003.
164. Mengistu, H.A., Demlie, M.B. & Abiye, T.A. Review: Groundwater resource potential and status of groundwater resource development in Ethiopia. *Hydrogeol J*, 2019; 27, 1051–1065, <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01928-x>
165. Mengistu, T. D., Chung, I.-M., Chang, S. W., Yifru, B. A., Kim, M.-G., Lee, J., Ware, H. H., & Kim, I.-H. Challenges and Prospects of Advancing Groundwater Research in Ethiopian Aquifers: A Review: *Sustainability*, 2021; 13(20), 11500. <https://doi.org/10.3390/su132011500>
166. Merga, D. D., Adeba, D., Regasa, M. S., & Leta, M. K. Evaluation of Surface Water Resource Availability under the Impact of Climate Change in the Dhidhessa Sub-Basin, Ethiopia. *Atmosphere*, 2022; 13(8), 1296. <https://doi.org/10.3390/atmos13081296>
167. Merla, G., Abbate, E., Azzaroli, A., Bruni, P., Canuti, P., Fazzuoli, M., Sagri, M., Tacconi, P. A geological map of the Ethiopia and Somalia and comment with a map of major landforms (scale 1:2,000,000). Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 1979; 95 pp.

168. Mersha, A.N., de Fraiture, C., Mehari, A., Masih, I., Alamirew, T. Integrated Water Resources Management: contrasting principles, policy, and practice, Awash River Basin, Ethiopia. *Water Policy* 2016; 18 (2): 335–354, <https://doi.org/10.2166/wp.2015.049>
169. Mesfin, M. Mekonnen Arjen Y. Hoekstra. Four billion people facing severe water scarcity. *Sci.* 2016; Adv.2,e1500323(2016).DOI:10.1126/sciadv.1500323
170. Miheretu, B. A. Temporal variability and trend analysis of temperature and rainfall in the Northern highlands of Ethiopia. *Physical Geography*, 2021; 42(5), 434–451. <https://doi.org/10.1080/02723646.2020.1806674>
171. Mihret, B. and Wuletaw, A. The impact of geological structures on groundwater potential assessment in volcanic rocks in the Borena Sayint district, northwestern Ethiopian Plateau: a review, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2025; 29, 2951–2959, <https://doi.org/10.5194/hess-29-2951-2025>.
172. Mishra, B.K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., Gautam, A. Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*. 2021; 13 (4) <https://doi.org/10.3390/w13040490>.
173. Moges, D.M., Bhat, H.G. & Thrivikramji, K.P. Investigation of groundwater resources in highland Ethiopia using a geospatial technology. *Model. Earth Syst. Environ.* 2019; 5, 1333–1345, <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00603-0>
174. Mohamed, H.Y., Alamirew, T., Melesse, A.M., Assen, M. Bathymetric study of Lake Hayq, Ethiopia. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 2013; 18:155–165. doi:10.1111/lre.12024, Wiley Publishing Asia Pty Ltd
175. Mohan, C., Western, A. W., Wei, Y., and Saft, M. Predicting groundwater recharge for varying land cover and climate conditions – a global meta-study, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, 22, 2689–2703, <https://doi.org/10.5194/hess-22-2689-2018>.
176. MoWE. Ethiopia: strategic framework for managed groundwater development. MoWR-GMATE report. (2011) http://metameta.nl/wp-content/uploads/2012/10/2011_03_08_eth_frwrk_FINALSF.pdf. Accessed 6 March 2017

177. MoWE and FAO. Coping with water scarcity—the role of agriculture: developing a water audit for Awash Basin, part 4: water resources modelling. Ethiopia, GCP/INT/072/ITA. (2012).
178. MoWE-Report. Supplement to task force report on aquifer management for Addis Abeba and vicinity. Updated version. Strategic Framework for Managed Groundwater Development (SFMGD) Task Force. http://metameta.nl/wp-content/uploads/2013/03/Task_Force_Report_Supplement.pdf. 2013; Accessed Aug 2017
179. MoWIE. Ministry of Water, Irrigation and Energy (MoWIE), 2015. *Ethiopia Water Sector Development Programme (2015–2020)*. Addis Ababa: Ministry of Water, Irrigation and Energy. 2015.
180. Mulu B.A., Zimale, F.Z., Kebede, M.G. Remote Sensing-Based Long-Term Assessment of Water Dynamics and Influencing Factors in Abaya and Chamo Lakes, East African Rift Valley, Ethiopia. *Air, Soil and Water Research*. 2024; 17, <https://doi.org/10.1177/11786221241299932>
181. Mulugeta, M. *Optimization of Water Resource System for Productivity: Assessment, Evaluation, and Allocation in Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia*. Addis Ababa University. 2025.
182. Murmu, P., Kumar, M., Lal, D., Sonker, I., Singh, S.K. Delineation of groundwater potential zones using geospatial techniques and analytical hierarchy process in Dumka district, Jharkhand, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019; Volume 9, 100239, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100239>
183. Mussa, M.M., Lohani, T.K., Eshete, A.A. Evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in the Gidabo watershed, Ethiopia: *Heliyon*, 2025; Volume 11, Issue 15, e44063, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e44063>
184. Mwanga, E., Shaibu, A.G., Issaka, Z. Assessing the impact of land use and land cover (LULC) changes on the surface runoff downstream of an ungauged Bontanga watershed in Northern Ghana: *Water Practice and Technology*, 2024; 19 (4): 1348–1364, <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.061>
185. MWR. National Water and Sanitation Masterplan. Ministry of Water Resources. Addis Ababa, Ethiopia. 2002.

186. Nesru, M., Shetty, A., Nagaraj, M.K. Multi-variable calibration of hydrological model in the upper Omo-Gibe basin, Ethiopia. *Acta Geophysica* 2020; 68(3), DOI: [10.1007/s11600-020-00417-0](https://doi.org/10.1007/s11600-020-00417-0)
187. NestereHKO, Yu. M. *Influence of relief on surface and groundwater runoff in the Southern Urals*. (regional study): Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (electronic journal), 2017; No. 4
188. Nigussie, A. G., Baye, G., & Berhane, G. *Mapping groundwater potential zones using geospatial techniques in the Ethiopian context*. *Applied Water Science*. (Exact volume/issue to be added based on source. 2019.
189. Olaka, L. A., Kasemann, S. A., Sültenfuß, J., Wilke, F. D. H., Olago, D. O., Mulch, A., & Musolff, A. Tectonic control of groundwater recharge and flow in faulted volcanic aquifers. *Water Resources Research*, 2022; 58, e2022WR032016. <https://doi.org/10.1029/2022WR032016>
190. Opoku, P. A., Shu, L., & Amoako-Nimako, G. K. Assessment of Groundwater Potential Zones by Integrating Hydrogeological Data, Geographic Information Systems, Remote Sensing, and Analytical Hierarchical Process Techniques in the Jinan Karst Spring Basin of China. *Water*, 2024; 16(4), 566. <https://doi.org/10.3390/w16040566>
191. Orolbaeva, L. E. *Formation of groundwater in river valleys of the intermontane basins of Tian-Shan and Pamir-Alay*. *Izvestiya of Uzhgorod State University* (or conference proceedings). 2017; DOI: **10.21440/2307-2091-2017-2-23-27**.
192. Panda, B., Sabarathinam, C., Nagappan, G. *et al*. Multiple thematic spatial integration technique to identify the groundwater recharge potential zones—a case study along the Courtallam region, Tamil Nadu, India. *Arab J Geosci* 2020; 13, 1284, <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06223-8> Rodell, M., I. Velicogna, and J.S. Famiglietti (2009), Satellite-based estimates of groundwater depletion in India, *Nature*, 460, 999-1002, doi:10.1038/460789a.

193. Papa, F., & Frappart, F. Surface Water Storage in Rivers and Wetlands Derived from Satellite Observations: A Review of Current Advances and Future Opportunities for Hydrological Sciences. *Remote Sensing*, 2021; 13(20), 4162. <https://doi.org/10.3390/rs13204162>
194. Pavitt, N. Africa's Great Rift Valley: Indiana University Press, 2001; ISBN 0-8109-0602-3. MLA (9th edition)
195. Pavlova, N., Ogonerov, V., Danzanova, M., & Popov, V. Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in A Permafrost Area, Yakutsk, Russia. *Geosciences*, 2020, 10(5), 192. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050192>
196. Platt, N. H. & Wright, V. P. *Flooding of a carbonate platform: the Sian Ka'an Wetlands, Yucatán, Mexico – a model for the formation and evolution of palustrine carbonate factories around the modern Caribbean Sea and in the depositional record. The Depositional Record*, 2023; 9, 99–151.
197. Pozdniakov, S. P., Vasilevsky, P. Y., Grinevskiy, S. O., Lekhov, V. A., Sizov, N. E., & Wang, P. Variability in spatial-temporal recharge under the observed and projected climate: A site-specific simulation in the black soil region of Russia. *Journal of Hydrology*, 2020; 590, 125247. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125247.
198. Pozdniakov, S.P., Vasilevsky, P.Y., Grinevskiy, S.O., Lekhov, V.A., Sizov, N.E., Wang, P. Variability in spatial–temporal recharge under the observed and projected climate: A site-specific simulation in the black soil region of Russia. *Journal of Hydrology*, 2020; Volume 590, 125247, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125247>
199. Pozdnyakov, S.P. and Preobrazhenskaya, A.E. Assessment of evapotranspiration groundwater discharge using numerical modeling, *Geokolog., Inzh. Geol., Gidro geol., Geokriol.*, 2009; no. 5, pp. 457–469.
200. Prior, G.T. On Aegirite and Riebeckite Anorthoclase rocks related to the “Gorudite-Tinguaite” series, from the neighborhood of Aodowa and Axuma, Abyssinia. *Min Mag* 1900; 12:255–273

201. Rasskazov, S. V., Ilyasova, A. M., Bornyakov, S. A., Chuvashova, I. S., Chebykin, E. P. *Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia*. *Frontiers of Earth Science*, 2020; 14(4), 711–737. DOI: [10.1007/s11707-020-0821-5](https://doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5).
202. Raventós Vilalta, E. *Water Resources Management in the Central Rift Valley of Ethiopia*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2010.
203. Richts, A., Struckmeier, W.F., Zaepke, M. WHYMAP and the Groundwater Resources Map of the World 1:25,000,000. In: Jones, J. (eds) *Sustaining Groundwater Resources*. International Year of Planet Earth. Springer, Dordrecht. 2011; https://doi.org/10.1007/978-90-481-3426-7_10
204. Rieß, A., Dietrich, P. Investigation of hydrogeological structures in carbonate rock with ground penetrating radar. *Environ Earth Sci*, 2025; **84**, 202 <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12162-y>
205. Rochette, P., Tamrat, E., Féraud, G., Pik, R., Courtillot, V., Ketefo, E., Coulon, C., Hoffmann, C., Vandamme, D., Yirgu, G. Magnetostratigraphy and timing of the Oligocene Ethiopian traps. *Earth Planet Sci Lett* 1998; 164:497–510
206. Rodell, M., Famiglietti, J., Chen, J., Seneviratne, S., Viterbo, P., Holl, S. & Wilson, C. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations. *Geophysical Research Letters* 2004a; 31, L20504. <https://doi.org/10.1029/2004GL020873>.
207. Rodell, M., Velicogna, I., & Famiglietti, J. S. *Satellite-based estimates of groundwater depletion in India*. *Nature*, 2009; 460(7258), 999–1002. <https://doi.org/10.1038/nature08238>
208. Rosa, L., Chiarelli, D.D., Rulli, M.C., Angelo, J.D. and D’Odorico, P. Global agricultural economic water scarcity. *Sci. Adv.*, 2020; Vol 6, Issue 18, eaaz6031, [DOI: 10.1126/sciadv.aaz6031](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031)
209. Saaty R (1987) The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Math Model* 9:161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

210. Sadoff, Claudia. Managing Water Resources to Maximize Sustainable Growth : A World Bank Water Resources Assistance Strategy for Ethiopia. Water P-Notes; No. 13. © World Bank. 2008; <http://hdl.handle.net/10986/11758>
211. Salehi, M. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International*, Volume 158, 2022, 106936, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936>
212. Salman, S. M. A. Evolution and Context of International Water Resources Law. In S. M. A. Salman, & L. Boisson de Chazournes (Eds.), *Les ressources en eau et le droit international* (pp. 66-68). The Hague: Hague Academy of International Law. 2005; <http://dx.doi.org/10.1163/ej.9789004137028.3-756.2>
213. Saranya, T., Saravanan, S. Groundwater potential zone mapping using analytical hierarchy process (AHP) and GIS for Kancheepuram District, Tamilnadu, India. *Model. Earth Syst. Environ.* 2020; **6**, 1105–1122, <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00744-7>
214. Scanlon, B.R., Mukherjee, A., Gates, J. *et al.* Groundwater recharge in natural dune systems and agricultural ecosystems in the Thar Desert region, Rajasthan, India. *Hydrogeol J*, 2010; **18**, 959–972, <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0555-7>
215. Schlamovitz, J.L., Becker, P. Differentiated vulnerabilities and capacities for adaptation to water shortage in Gaborone, Botswana. *Int. J. Water Resour. Dev.* 2021; 37 (2), 278–299. <https://doi.org/10.1080/07900627.2020.1756752>
216. Sekar, A., Valliammai, A., Nagarajan, M., Sivakumar, S.D., Baskar, M., Sujitha, E. Conjunctive use in water resource management: current trends and future directions. *Water Supply*, 2024; 24 (11): 3881–3904, <https://doi.org/10.2166/ws.2024.215>
217. Semyachkov, A. I. *Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal sites*. *Journal of Mining Institute (PMI)*. 2023, DOI: **10.31897/PMI.2023.24**.
218. Setegn, S. G., Rayner, D., Melesse, A. M., Dargahi, B., & Srinivasan, R. *Impact of climate change on the hydroclimatology of Lake Tana Basin, Ethiopia*.

- Water Resources Research**, 2011; **47**, W04511.
<https://doi.org/10.1029/2010WR009248>
219. Shadeed, S., Almasri, M. Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. *Water Sci. Eng.* 2010, 3 (1), 1–13.
<https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.001>
220. Shako, G.M., Ping, F. Ethiopia Water Resources Quantitative Potentials, Management Issues and Challenges. A literature Review Article Paper; *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)* 2021; 11(2) (ISSN: 2250-3153), DOI: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.11.02.2021.p11008>
221. Shaw, S.K., Sharma, A. Assessing groundwater potential zones in Sundargarh district: a comparative study using AHP and FR models. *Sustain. Water Resour. Manag.* 2024; **10**, 132, <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01111-5>
222. Shitu, K., Hymiro, A. Outlook Water Resource Potential and Irrigation Agriculture Practice in Ethiopia. *J Soil Water Sci* 2022, 6(1):253-261
223. Shyam, G.M., Taloor, A. K., Sudhanshu, Singh, S.K., Kanga, S. Sustainable water management using rainfall-runoff modeling: A geospatial approach. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021; Volume 15, 100676, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100676>
224. Siyad, S.A., Mohamed, Z.H. A systematic literature review on groundwater recharge dynamics under climate variability, land use change and sea level rise. *Discov Sustain* 2025; **6**, 1331, <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02232-3>
225. Sophocleous, M. Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeol J*, 2005; **13**, 351–365, <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0385-6>
226. Soulis, K. X. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Method: Current Applications, Remaining Challenges, and Future Perspectives. *Water*, 2021; **13**(2), 192. <https://doi.org/10.3390/w13020192>
227. Stroebel, D.H., Thiart, C., de Wit, M. Towards defining a baseline status of scarce groundwater resources in anticipation of hydraulic fracturing in the Eastern

- Cape Karoo, South Africa: Salinity, aquifer yields and groundwater levels: *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2019; 479(1), 129–145, <https://doi.org/10.1144/sp479.3>
228. Surmaajav D. Features of the thermal water phenomena in the Khangai arch uplift (Mongolia). *Earth sciences and subsoil use.* 2019;42(4):529-538. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-529-538>
229. Swenson, S. GRACE Monthly Land Water Mass Grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA, USA. 2012; <https://doi.org/10.5067/TELND-NC005>.
230. Taddesse et al. *Water Productivity of Sorghum under Deficit Irrigation in the Central Rift Valley, Ethiopia. Journal of Arid Environments,* 2020; 182, 104256.
231. Tagil'tsev, S. N., Kibanova, T. N., Tagil'tsev, V. S., & Surganov, S. V. *Geomechanical analysis of the hydrogeological properties of tectonic fault. Mining Information & Analytical Bulletin (MIAB).* 2022; DOI: **10.25018/0236_1493_2022_51_0_145.**
232. Takele, G.S., Gebre, G.S., Gebremariam, A.G. *et al.* Hydrological modeling in the Upper Blue Nile basin using soil and water analysis tool (SWAT). *Model. Earth Syst. Environ.* 2022; **8**, 277–292, <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01085-9>
233. Talovina I.V., Krikun N.S., Yurchenko Y.Y., Ageev A.S. Remote sensing techniques in the study of structural and geotectonic features of Iturup Island (the Kuril Islands) // *Journal of Mining Institute.* 2022; Vol. 254. p. 158-172. DOI: 10.31897/PMI.2022.45
234. Taye, A. Hydrogeological and Hydrogeochemical Assessment in the Adama (Nazareth)-Dera Area, Central Ethiopia. *Environmental Science, Geology,* 2007; Corpus ID: 134734631
235. Taye, M. T., Dyer, E., Hirpa, F. A., & Charles, K. Climate Change Impact on Water Resources in the Awash Basin, Ethiopia. *Water,* 2018; *10*(11), 1560. <https://doi.org/10.3390/w10111560>
236. Tefera, M., Chernet, T., Haro, W. Geological map of Ethiopia, scale 1:2,000,000. Ethiopian Mapping Authority, Ethiopia. 1996

237. Tegegn, M.G., Berlie, A. & Utallo, A.U. Spatiotemporal variability and trends of intra-seasonal rainfall and temperature in the drought-prone districts of Northwestern Ethiopia. *Discov Sustain*, 2024; 5, 230, <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00445-6>
238. Tekleab, S., Mohamed, Y., & Uhlenbrook, S. *Hydro-climatic trends in the Abay/Upper Blue Nile basin, Ethiopia. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2013; 61-62, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.04.017>
239. Terink, W., Lutz, A. F., Simons, G. W. H., Immerzeel, W. W., and Droogers, P. SPHY v2.0: Spatial Processes in HYdrology, *Geosci. Model Dev.*, 2015; 8, 2009–2034, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2009-2015>
240. Tesfaye, M., Breuer, L. Performance of water indices for large-scale water resources monitoring using Sentinel-2 data in Ethiopia. *Environ Monit Assess* 2024; 196, 467, <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12630-1>
241. Thomas, B. F., Behrangi, A., & Famiglietti, J. S. Precipitation Intensity Effects on Groundwater Recharge in the Southwestern United States. *Water*, 2016; 8(3), 90. <https://doi.org/10.3390/w8030090>
242. Tigabu, T.B., Wagner, P.D., Hörmann, G., Kiesel, J., Fohrer, N. Climate change impacts on the water and groundwater resources of the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change* 2021; 12 (5): 1544–1563. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.126>
243. Tilahun, R.A., Worku, H. & Mengistu, A.F. *Modeling and Quantifying Surface Water Resource Potential in Awash Bello Watershed Using SWAT Model, Upper Awash River Basin, Ethiopia, Frontiers in Water*. 2025.
244. Timotewos, M. T., & Barjenbruch, M. Examining the Prospects of Residential Water Demand Management Policy Regulations in Ethiopia: Implications for Sustainable Water Resource Management. *Sustainability*, 2024; 16(13), 5625. <https://doi.org/10.3390/su16135625>
245. Ukstins, I.A., Renne, P.R., Wolfenden, E., Baker, J., Ayalew, D., Menzies, M. Matching conjugate volcanic rifted margins: 40/39Ar chrono-stratigraphy of

- pre-and syn rift bimodal flood volcanism in Ethiopia and Yemen. *Earth Planet Sci Lett* 2002; 198:289–306
246. UNDP. *Geology, geochemistry and hydrology of hot springs of the East African Rift system within Ethiopia* (Technical Report DD/SF/ON-11). United Nations Development Programme. 1973.
247. UNESCO. National water development report for Ethiopia: Final . Report UN-WATER/WWAP/2006/7, Addis Ababa, December 2004.
248. UNICEF Ethiopia. Groundwater mapping for climate resilient WASH in arid and semi-arid areas of Ethiopia. Project (2018-2020). Project outputs at: GW4E online viewer. 2020.
249. USDA-NRCS. *Urban Hydrology for Small Watersheds (Technical Release No. 55, TR-55)*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture. (1986, revised 2009).
250. USDA-NRCS. *National Engineering Handbook, Part 630: Hydrology, Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*. Washington, D.C. (2004, revised 2010).
251. Valli K.S., Kozai, P.S., Nguyen, T., Q.T., et al. Growth and Water Relations of *Paulownia fortunei* under Photomixotrophic and Photoautotrophic Conditions. *Biologia Plantarum*, 2003; 46, 161-166. <https://doi.org/10.1023/A:1022844720795>
252. Vélez, O.L.P., Bernasconi, W.G., Renaud, B.C. Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 1998; Volume 211, Issues 1–4, Pages 266-274, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00196-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00196-6)
253. Vijayan, D.S., Tadesse, H.T., Yokamo, Y., Divahar, R., Bezabih Bashe, T., Jebasingh Daniel, J. A Brief Data on Water Demand Assessment for Sustainable Potable Water Supply in Yergalem Tula Kebele, Ethiopia. *J Environ Public Health*. 2022 Aug 18;2022:1606590. doi: 10.1155/2022/1606590. Retraction in: *J Environ Public Health*. 2023 Dec 6;2023:9782061. doi: 10.1155/2023/9782061. PMID: 36034616; PMCID: PMC9410813.

254. Vinograd, A., Zaady, E., and Kigel, J. Dynamics of soil nutrients in abandoned sheep corrals in semi-arid mediterranean planted forests under grazing. *J. Arid Environ.* 164 (MAY), 2019; 38–45. doi:10.1016/j.jaridenv.2019.02.007
255. Vollmer, D., Harrison, I.J. H₂O=CO₂: Framing and responding to the global water crisis. *Environ. Res. Lett.* 2021; 16 (1) <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd6aa>
256. Vörösmarty CJ, Green P, Salisbury J, Lammers RB. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*. 2000 Jul 14; 289(5477):284-8. doi: 10.1126/science.289.5477.284. PMID: 10894773.
257. Walega, A., Michalec, B., Cupak, A. *et al.* Comparison of SCS-CN determination methodologies in a heterogeneous catchment. *J. Mt. Sci.* 2015; **12**, 1084–1094, <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3592-9>
258. Walker, D., Parkin, G., Gowing, J., Haile, A.T. Development of a hydrogeological conceptual model for shallow aquifers in the data scarce upper Blue Nile basin. *Hydrology* 2019a; 6 (43), 1–24. <https://doi.org/10.3390/hydrology6020043>.
259. Wang, L., Cao, Y., & Infante, D. M. Disentangling Effects of Natural Factors and Human Disturbances on Aquatic Systems—Needs and Approaches. *Water*, 2023; 15(7), 1387. <https://doi.org/10.3390/w15071387>
260. Wang, S.-J., Lee, C.-H., Yeh, C.-F., Choo, Y. F., & Tseng, H.-W. Evaluation of climate change impact on groundwater recharge in groundwater regions in Taiwan. *Water (Switzerland)*, 2021, **13**(9), Article 1153. <https://doi.org/10.3390/w13091153>
261. WAPCOS. Preliminary Water Resources Development Master Plan for Ethiopia, Ministry of Water Resources, Addis Ababa. 1990.
262. Williams, F. M. *Understanding Ethiopia: Geology and Scenery*. Springer International Publishing. 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-02180-5
263. WLRC. Water and Land Resource Centre (2022). *Rift Valley Lakes Basin Water Use Assessment*. 2022

264. WLRC. Water and Land Resource Centre (WLRC). *Water Resource Management Situation Assessment (Ethiopia)*. 2024.
265. WoldeGabriel, G., Aronson, J.L., Walter, R.C. Geology, geochronology, and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopia Rift. *Geol Soc Am Bull*, 1990;102:439–458
266. Worajo, W.E., & Sodo, W. Water Supply and Demand Status of Areka Town, Southern Ethiopia. *Journal of Resources Development and Management*. 2021; DOI:[10.7176/jrdm/77-02](https://doi.org/10.7176/jrdm/77-02). Corpus ID: 240943474
267. World Bank. *High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy*. World Bank, Washington, DC. 2016.
268. World Bank. *Promoting sustainable and equitable WASH in Ethiopia*. World Bank. 2023; Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2023/11/10/promoting-sustainable-and-equitable-wash-in-ethiopia>
269. Worqlul, A. W., Dile, Y. T., Ayana, E. K., Jeong, J., Adem, A. A., & Gerik, T. *Impact of climate change on streamflow hydrology in headwater catchments of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia*. *Water*, 2018; 10(2), 120.
270. Worqlul, A.W., Dile, Y.T., Schmitter,P., Jeong,J., Meki,M.N., Gerik,T.J., Srinivasan, R., Lefore, N.,Clarke, N. Water resource assessment, gaps, and constraints of vegetable production in Robit and Dangishta watersheds, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Agricultural Water Management*, 2019; Volume 226, 105767, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105767>
271. Worqlul, A.W., Jeong, J., Dile, Y.T., Osorio, J., Schmitter, P., Gerik, T., Srinivasan,R., Clark, N. Assessing potential land suitable for surface irrigation using groundwater in Ethiopia. *Applied Geography* 2017; Volume 85, Pages 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.010>
272. WRI. *Balancing Water Demands and Increasing Climate Resilience: Establishing a Baseline Water Risk Assessment Model in Ethiopia*. Technical Note. World Resources Institute. 2021.

273. Wrzesiński, D., & Sobkowiak, L. Climate Change and Human Impact on Freshwater Water Resources: Rivers and Lakes. *Water*, 2022; 14(8), 1279. <https://doi.org/10.3390/w14081279>
274. Wu, Y., Yin, X., Zhou, G. *et al.* Rising rainfall intensity induces spatially divergent hydrological changes within a large river basin. *Nat Commun* 2024, 15, 823 , <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44562-8>
275. Xin, P., Wilson, A., Shen, C., Ge, Z., Moffett, K. B., Santos, I. R., et al. Surface water and groundwater interactions in salt marshes and their impact on plant ecology and coastal biogeochemistry. *Reviews of Geophysics*, 2022; 60, e2021RG000740. <https://doi.org/10.1029/2021RG000740>
276. Yeh, HF., Lee, CH., Hsu, KC. *et al.* GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environ Geol* 2009; 58, 185–195, <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1504-9>
277. Yeh, Y.-L., Wu, C.-Y., Chen, Z.-M., & Chiu, T.-P. Safe Groundwater Level Estimation in Pingtung Plain, Taiwan. *Water*, 2023; 15(16), 2947. <https://doi.org/10.3390/w15162947>
278. Yitbarek, A., Razack, M., Ayenew, T., Zemedagegnehu, E., Azagegn, T. Hydrogeological and hydrochemical framework of Upper Awash River basin, Ethiopia: With special emphasis on inter-basins groundwater transfer between Blue Nile and Awash Rivers. *Journal of African Earth Sciences*, April 2012; Volume 65, 9 Pages 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.01.002>
279. Yoshe AK. Sustainable Water Management Using Rainfall-Runoff Modelling in Rift Valley Basin, East Africa. *Adv Environ Eng Res* 2025; 6(1): 003; doi:10.21926/aeer.2501003.
280. Йоше А., Аузина Л.И. Анализ условий формирования и распределения ресурсов природных вод на территории Центральной Эфиопии. *Науки о Земле и недропользование*. 2025;48(1):65-76. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-65-76>. EDN: VQFHZZ
281. Yoshe A.K., Sutyryna E.N., Chupin V.R., Shelekhov I.Yu. Estimation of inflow discharge to Lake Baikal at upstream section using different satellite-based

precipitation and runoff datasets from Upper Angara and Kichera River basins in East Siberia, Russia. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost.* 2024;14(3):487-500. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-487-500>.

EDN: [MCPXAC](#)

282. Yoshe, A. K. Water availability identification from GRACE dataset and GLDAS hydrological model over data-scarce river basins of Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 2024; 69(6), 721–745. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2333852>
283. Yoshe, A. K. Integrated study of GRACE-based groundwater storage variability across Ethiopia for sustainable economic development. *African Geographical Review*, 2025; 1–24. <https://doi.org/10.1080/19376812.2025.2528730>
284. Yoshe, A. K. Assessment of anthropogenic and climate-driven water storage variations over water-stressed river basins of Ethiopia. *Hydrology Research*, 2024; 55 (3): 351–379, <https://doi.org/10.2166/nh.2024.169>
285. Yoshe, A. K. Assessment of anthropogenic and climate-driven water storage variations over water-stressed river basins of Ethiopia. *Hydrology Research*, 2024; 55 (3): 351–379, <https://doi.org/10.2166/nh.2024.169>
286. Yoshe, A.K. Integrated approach for groundwater potential exploration in Abbay River Basin, East Africa. *Sustain. Water Resour. Manag.* 2024; **10**, 93 <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01026-7>
287. Zanettin, B., Justin Visentin, E., Nicoletti, M., Piccirillo, E.M. Correlations among Ethiopian volcanic formations with special references to the chronological and stratigraphical problems of the “Trap Series”. *Atti Convegni Acc Lincei Roma* 1980; 47:231–252
288. Zaurbekov Sh. Sh., Shaipov A. A., Ozdieva T. Kh., Batukaev A. A. Hydrological Conditions of Underflow Aquifer in the Argun, Sharo-Argun and Khulkhulau River Valleys Incision in the Eastern Caucasus. *Dagestan State*

- Pedagogical University. Journal. Natural and exact sciences. 2018; Vol. 12. No. 4. Pp. 53- 61. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-4-53-61 (In Russian)
289. Zghibi, A., Mirchi, A., Msaddek, M. H., Merzougui, A., Zouhri, L., Taupin, J.-D., Chekirbane, A., Chenini, I., & Tarhouni, J. Using Analytical Hierarchy Process and Multi-Influencing Factors to Map Groundwater Recharge Zones in a Semi-Arid Mediterranean Coastal Aquifer. *Water*, 2020; 12(9), 2525. <https://doi.org/10.3390/w12092525>
290. Zhang, Q., Zhang, S., Zhang, Y., Li, M., Wei, Y., Chen, M., Zhang, Z., Dai, Z. GIS-Based Groundwater Potential Assessment in Varied Topographic Areas of Mianyang City, Southwestern China, Using AHP. *Remote Sens.* 2021; 13, 4684. <https://doi.org/10.3390/rs13224684>
291. Zhang, J., Felzer, B. S., and Troy, T. J. Extreme precipitation drives groundwater recharge: the Northern High Plains Aquifer, central United States, 1950–2010. *Hydrol. Process.*, 2016; 30: 2533–2545. doi: [10.1002/hyp.10809](https://doi.org/10.1002/hyp.10809).
292. Zhao, F., Feng, S., Xie, F., Zhu, S., Zhang, S. Extraction of long time series wetland information based on Google Earth Engine and random forest algorithm for a plateau lake basin—A case study of Dianchi Lake, Yunnan Province, China. *Ecol. Indic.* 2023; 146, 109813, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109813>
293. Zwaan, F., Corti, G., Sani, F., Keir, D., Muluneh, A. A., Illsley-Kemp, F., Papini, M. Geological data from the Western Afar Margin, East Africa. GFZ Data Services. 2020; <https://doi.org/10.5880/fidgeo.2020.017>
294. Аузина Л.И. ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К ОПТИМИЗАЦИИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТ НА ВОДУ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ. 2014.
295. Бадминов, П.С. **ПОДЗЕМНЫЙ СТОК ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО САЯНА, Специальность 1.6.6. Гидрогеология**, диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, ФГБУН ИЗК СО РАН, г. Иркутск, 2022.

296. ГОСТ 17.8.1.02-88. Охрана природы. ЛАНДШ АФТЫ. Классификация. Дата введения 01.07.89
297. Диденков Ю.Н. Формирование гидросферы Байкальского региона в связи с процессами рифтогенеза. – В. кн.: Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Иркутск, 1998, с. 68-77
298. КУРБАНОВА Л.М., БАЗМАНОВА П.М. РОЛЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПИТАНИИ РЕК ДАГЕСТАНА. [ТРУДЫ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ ДАГЕСТАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН](#), 2020; [4 \(83\)](#), 22-27, DOI: [10.33580/2541-9684-2020-83-4-22-27](#)
299. Устюгов Д. Л., Ноа Сегура Э. Л., Ряховский М. С., ИССЛУДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИИ АТОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ПОПОЛНЕНИЕ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНА ЛА ЯНАБ КУБА. горный журнал, 2024; 9(97)
300. Степанов, В.М. Региональная гидрогеология Восточной Сибири и Дальнего Востока. Иркутск 1981. 95 с.
301. Астраханцев, В.И., 1971 Г. Гидрогеодинамические Процессы в Бассейне Байкала и Ангары и Методы их Исследования. Издательство Наука Москва. Академия наук СССР Сибирское отделение институт земной коры
302. Степанов, В.М., Дитрих П.Г., Мартынова М.А. Гидрогеодинамические Структуры Рифтовых Систем. Учебное Пособие, Иркутск, 1989 Г.
303. Stepanov V.M. On the principles of systematization of hydrogeological structures. - News of universities. Geology and exploration, 1985, No. 3. P. 88-93.
304. Stepanov V.M. Flooded faults. IPI, 1988. 83 p.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Йоше А., Аузина Л.И. Анализ условий формирования и распределения ресурсов природных вод на территории Центральной Эфиопии. Науки о Земле и недропользование. 2025;48(1):65-76. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-65-76>. EDN: VQFHNZ
2. Auzina, L.I., Yoshe, A.K., and Didenkov, Yu.N “Hydrothermal systems of lithospheric plates margins» // Proceedings of the 3rd IAGC International Conference Water-Rock Interaction - 18 & Applied Isotope Geochemistry – 15, Cagliari, Italy, 16-21 June 2025, p.53-54, <https://doi.org/10.13125/unicapress.978-88-3312-187-1>
3. Yoshe A.K., Аузина Л.И., Паршин А.В. 2025 COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF WATER RESOURCES FOR MULTIPURPOSE WATER SUPPLY IN CENTRAL ETHIOPIA. The XXXI All-Russian Youth Conference "Structure of the Lithosphere and Geodynamics", page 46-48, <https://elibrary.ru/item.asp?id=82985590>
4. Йоше А.К., Сутырина Е.Н., Чупин В.Р., Шелехов И.Ю. Оценка антропогенного суммарного испарения с помощью спутников GRACE в водосборном бассейне озера Байкал. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024;14(4):695-707. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-4-695-707>. EDN: BAWZYM
5. Йоше А.К., Сутырина Е.Н., Чупин В.Р., Шелехов И.Ю. Оценка расхода притока воды в озеро Байкал на участке выше по течению с использованием различных спутниковых наборов данных об осадках и стоке из верховий бассейнов рек Ангара и Кичера в Восточной Сибири, Россия. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024;14(3):487-500. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-487-500>. EDN: MCPXAC
6. Чупин В.Р., Йоше А.К. Оценка баланса подземных вод и их пространственного распределения в рамках миссии НАСА GRACE для р. Голубой Нил в Эфиопии (Восточная Африка). Известия вузов. Инвестиции.

Строительство. Недвижимость. 2023;13(1):76-89.
<https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-76-89>

7. Чупин В.Р., Йоше А.К. Оценка сезонного водного баланса бассейна реки Абай в Эфиопии с использованием спутниковых баз данных и специализированной гидрологической модели. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022;12(4):606-616. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-606-616>
8. Yoshe AK. Characterization of Drought Severity Using GRACE and TerraClimate Dataset in the Rift Valley Basin, Ethiopia. *Adv Environ Eng Res* 2026; 7(1): 003; doi:10.21926/aeer.2601003.
9. Yoshe A.K. 2025 Assessment of drought vulnerability in the Nile River basin using satellite remote sensing, Africa. *Hydrology Research* nh2025007, <https://doi.org/10.2166/nh.2025.007>
10. Yoshe, A. K. (2025). Integrated study of GRACE-based groundwater storage variability across Ethiopia for sustainable economic development. *African Geographical Review*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/19376812.2025.2528730>
11. Yoshe AK. 2025 Sustainable Water Management Using Rainfall-Runoff Modelling in Rift Valley Basin, East Africa. *Adv Environ Eng Res*, 6(1): 003; <http://dx.doi.org/10.21926/aeer.2501003>
12. Yoshe A.K. 2025 Land use land cover detections using MODIS MCD12Q1 V6.1 and ESRI Sentinel-2 datasets in the Lake Chamo catchment. *H2Open Journal*, 8 (1): 20–41, <https://doi.org/10.2166/h2oj.2024.038>
13. Yoshe, A. K. (2024). Water availability identification from GRACE dataset and GLDAS hydrological model over data-scarce river basins of Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 69(6), 721–745. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2333852>
14. Yoshe, A. K. 2024 Assessment of anthropogenic and climate-driven water storage variations over water-stressed river basins of Ethiopia. *Hydrology Research*, 55 (3): 351–379, <https://doi.org/10.2166/nh.2024.169>

15. Yoshe, A. K. 2023 Estimation of change in terrestrial water storage for Abbay River Basin, Ethiopia. *Hydrology Research*, 54 (11): 1451–1475, <https://doi.org/10.2166/nh.2023.119>
16. Yoshe, A.K. 1403(2025), Evaluation of rainfall-runoff using SCS-CN and GIS approach for Lake Chamo catchment in Ethiopia, East Africa, 1ST International congress of Nature-based ecological restoration (Emphasizing the conservation of Bactrian camels), Ardabil, <https://civilica.com/doc/2189808>
17. Yoshe AK (2023) Groundwater potential zone identification using remote-sensing/GIS-based machine and Analytical Hierarchy Process (AHP) for Abbay Watershed East Africa. *Eng Heritage J (GWK)* 4(1):10–25. <https://doi.org/10.26480/gwk.01.2023.10.25>
18. Yoshe AK. 2022 Watershed delineation for lake chamo basin, Ethiopia. *Int J Hydro.* 6(6):208-211. <https://doi.org/10.15406/ijh.2022.06.00328>
19. Yoshe, A.K. Integrated approach for groundwater potential exploration in Abbay River Basin, East Africa. *Sustain. Water Resour. Manag.* 10, 93 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01026-7>
20. Chupin, V.R. Optimizing the structure and parameters of local wastewater disposal system based on flow models / V.R. Chupin, M.V. Moroz, V.A. Beaver, Yoshe A.K./ *Mathematical models and methods of the analysis and optimal synthesis of the developing pipeline and hydraulic systems 2022. Altai, 12–18 сентября 2022 года в сборнике: е3s.*

Доклады на конференции

1. Yoshe A.K.: Groundwater potential mapping report. English Scientific Discussion Club. INRTU, March 13, 2023.
2. Yoshe A.K. Assessment of the seasonal water balance of the Abbay River basin in Ethiopia using satellite databases and a hydrological model. Environment and Society Conference. 2023 International Conference on Nile River Basin and The Sudd Wetlands: Climate Change Adaptability and Sustainability March 20-21, 2023, Florida International University, Miami, Florida
3. Yoshe A.K. Integrated study of GRACE-based groundwater storage variability across Ethiopia for sustainable economic development. Session 6. Water Resources Management, Floods, and Risk Mitigation. sciforum-092946: Water Academic Open Access Publishing since 1996. ECWS-8 (2024 conference): the 8th International Electronic Conference on Water Sciences online from 14 to 16 October 2024.
4. Yoshe A.K., Sutyryna E.N., Chupin V.R., Shelekhov I.Y. Assessment of human-induced evapotranspiration with GRACE satellites in the catchment area of Lake Baikal. Multidisciplinary Youth Research Conference “Science of the Present and Future: The Research Landscape in the 21st Century” (Irkutsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024).
5. Yoshe A.K. Evaluation of rainfall-runoff using the SCS-CN and GIS approach for Lake Chamo catchment in Ethiopia. 1st International Congress on Ecological Nature Restoration (with a focus on the conservation of Bactrian camels), organized by Mohaghegh Ardabili University, Iran, on August 27–28, 2024.
6. Yoshe, A. K. Terrestrial water storage assessment in Abbay river basin. The Third Asian International Water Week, held on September 23–28, 2024, in Beijing, China.
7. Yoshe, A.K. Assessment of Drought vulnerability in the Nile River basin. The 7th International Symposium on Water Resource and Environmental Management (WREM 2024), December 6, 2024 by Zhejiang University, China

8. Yoshe A.K. Land use/land cover (LULC) and land surface temperature (LST) in assessment in Ethiopia. The Fourth International Youth Forum on Soil and Water Conservation (IYFSWC-IV), held on September 21–24, 2024, and organized by Shenyang Agricultural University, Shenyang, China.
9. Yoshe, A.K. Land use land cover change estimation in Lake chamo catchment. The 4th International Electronic Conference on Forests (Science, Society and Innovation Nexus in Forestry: Pathways to global sustainability. Part of the International Electronic Conference on Forests series, 23–25 September 2024, organized by Water an open access Journal from MDPI
10. Yoshe A.K., Auzina L.I. Assessment of the current state of water resources in Central Ethiopia using remote sensing data. The II International Scientific and Practical Conference of the Russian Federal University, “The Contribution of Russian and African Universities to the Sustainable Development of Regions (RAFU),” December 17, 2024.
11. Yoshe A.K. Thesis report (Assessment of the current state of water resources in Central Ethiopia for the development of a water management strategy). Academic Council of the Siberian School of Earth Sciences, May 12, 2025, IRNTU, Russia
12. Yoshe A.K., Auzina L.I. Integrated groundwater resources assessment for multipurpose water supply in Central Ethiopia. The International Youth Seminar-Conference within the framework of the “International Joint Research Centre for Clean Water,” May 30, 2025, organized by Harbin University
13. Auzina L.I., Yoshe A.K., Didenkov Yu.N. “Hydrothermal systems of lithospheric plate margins.” 18th International Symposium Water–Rock Interaction and 15th International Symposium Applied Isotope Geochemistry, Cagliari, Italy, June 16–21, 2025.
14. Yoshe A.K. Hydrological Response to Land Use/Land Cover (LULC) change in Ethiopia. The 9th International Electronic Conference on Water Sciences Recent Advances in Water Sciences under a Variable and Changing Environment Part of the International Electronic Conference on Water Sciences series 11–14 November 2025, organized by Water an open access Journal from MDPI

15. Yoshe A.K., Auzina L.I. Количественная оценка ресурсов поверхностных и подземных вод Центральных регионов Эфиопии; на Игошинские чтения – 2025, 4-5 декабря 2025 года, в Сибирской школы геонаук ИРНИТУ