

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМЕНИ ПАТРИСА
ЛУМУМБЫ»

На правах рукописи



Мохамед Мостафа Еззелдин Абделрахим

**ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И
КОНТРОЛЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ РАЙОНА ВАДИ-ВАТИР (ЕГИПЕТ)**

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Синиченко Евгений Константинович

Москва — 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ЕГИПТА: ПРОБЛЕМЫ И СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ	14
1.1 Основные проблемы управления водными ресурсами Египта и возможные способы их решения	17
1.1.1 Плотина великого возрождения Эфиопии.....	17
1.1.2 Рост численности населения	19
1.1.3 Орошение сельскохозяйственных земель и существенные потери воды	20
1.1.4 Значительное испарение воды и малое количество осадков	20
1.1.5 Отсутствие необходимой информации о водопользователях и водопотребителях ...	22
1.2 Альтернативные водные ресурсы.....	23
1.2.1 Проекты Верхнего Нила	23
1.2.2 Бурение колодцев.....	24
1.2.3 Опреснение морской воды	25
1.2.4 Повторное использование очищенных сточных и дренажных вод	25
1.3 Распределенное землепользование	25
1.3.1 Модель оптимизации	26
1.3.2 ГИС-модель распределения территории	26
Выводы по главе 1.....	27
ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИГОДНОСТИ СБОРА ДОЖДЕВОЙ ВОДЫ В ВАДИ-ВАТИР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГИС	28
2.1 Материалы и методы	30
2.1.1 Область исследования	30
2.1.2 Сбор данных	33
2.1.2.1 Цифровые данные	33
2.1.2.2 Многолетние метеорологические показания по метеостанциям	33
2.1.3 Расчеты стока	35
2.1.4 Выбор и подготовка тематического слоя	42
2.1.5 Многокритериальный анализ.....	45
2.1.6 Пригодность для сбора дождевой воды.....	46
2.1.7 Локализация оптимальных площадок для сооружений сбора дождевой воды	47
2.2 Результаты и анализ.....	49
2.2.1 Тематические слои для картирования пригодности сбора дождевой воды	49
2.2.1.1 Карта уклонов.....	49
2.2.1.2 Карта землепользования / почвенного покрова	50

2.2.1.3	Карта стока	52
2.2.1.4	Карта площадь бассейна.....	53
2.2.1.5	Карта максимального расстояния потока.....	54
2.2.1.6	Карта плотности дренажа.....	55
2.2.1.7	Карта топографического индекса влажности.....	56
2.2.1.8	Карта номера инфильтрации.....	57
2.2.1.9	Карта частотной плотности линеаментов.....	58
2.2.2	Назначение веса и многокритериальный анализ	59
2.2.3	Карта пригодности сбора дождевой воды	60
2.2.4	Размещение сооружений сбора дождевой воды	63
Выводы по главе 2.....		65
ГЛАВА 3. КАРТИРОВАНИЕ ОПАСНОСТЕЙ ВНЕЗАПНЫХ ПАВОДКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕТОДНОГО ПОДХОДА.....		66
3.1	Материалы и методы	68
3.1.1	Подход Эльшами.....	70
3.1.2	Метод морфометрического ранжирования	71
3.2	Результаты и анализ.....	74
Выводы по главе 3.....		78
ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕЗАПНЫХ НАВОДНЕНИЙ НА СБОР ДОЖДЕВОЙ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС		79
4.1	Материалы и методы	80
4.1.1	Определение пригодности сбора дождевой воды.....	80
4.1.2	Картирование опасностей внезапных наводнений	80
4.1.3	Влияние внезапных паводков на пригодность сбора дождевой воды.....	82
4.1.4	Влияние внезапных паводков на строительство сооружений СДВ.....	83
4.2	Результаты и анализ.....	83
4.2.1	Зона ограниченного доступа для сбора дождевой воды с картой опасностей внезапных наводнений	83
4.2.2	Очень низкая пригодность СДВ с картой опасностей внезапных наводнений	84
4.2.3	Низкая пригодность сбора дождевой воды с картой опасностей внезапных наводнений.....	85
4.2.4	Умеренная пригодность СДВ с картой опасностей внезапных наводнений	86
4.2.5	Высокая пригодность сбора дождевой воды с картой опасностей внезапных наводнений.....	87
4.2.6	Очень высокая пригодность СДВ с картой опасностей внезапных наводнений.....	88
4.2.7	Сооружения сбора дождевой воды, расположенные в районах с низкой степенью опасности внезапных наводнений	91

4.2.8	Сооружения СДВ, расположенные в районах с умеренной опасностью внезапных наводнений.....	92
4.2.9	Сооружения сбора дождевой воды, расположенные в зонах высокой опасности внезапных наводнений	93
4.3	Оценка объема собираемой воды сооружениями СДВ.....	95
4.4	Устойчивый план сбора дождевой воды	97
	Выводы по главе 4.....	100
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В пятой оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) говорится, что нехватка воды затрагивает 80% населения мира [42]. Кроме того, ожидается, что к 2025 году 1,8 миллиарда человек будут проживать в чрезвычайно засушливых районах по всему миру [114, 117]. В связи с ростом населения и изменением климата, особенно в полусушливых и пустынных регионах с сильно изменчивыми осадками, нехватка воды стала серьезной глобальной проблемой [66]. Как показал Мостафа [6], многие страны, особенно на Ближнем Востоке и в Северной Африке, находятся на пороге надвигающегося водного кризиса. Ближневосточная страна Египет классифицируется как чрезвычайно засушливая. Стране грозит серьезная катастрофа из-за нехватки воды. Генеральный план в Египте в настоящее время направлен на максимально эффективное использование нетрадиционных водных ресурсов, поскольку ожидается, что к 2025 году потребление воды в стране на душу населения достигнет 536 м³/год.

Уникальность Египта состоит в том, что основные водные ресурсы страны ограничены водами реки Нил, ливневыми паводками, низкой интенсивностью дождей и малым количеством подземных вод на территории западной пустыни, в Синае и в устье реки Нил [18]. Свыше 93% потребности в пресной воде покрывается за счет ресурсов самой длинной в мире реки Нил, которая обеспечивает водой одиннадцать стран и берет начало за пределами Египта [20, 43].

Пресная вода является ценным природным ресурсом для выживания и роста всех живых существ на планете, поскольку глобальные запасы пресной воды неуклонно истощаются из-за растущей урбанизации, быстрой индустриализации и чрезмерной эксплуатации подземных вод. Поэтому в масштабах водосбора необходимы оптимальное и устойчивое управление водными ресурсами и

эффективные стратегии [65, 96, 99]. Необходимо связать устойчивые стратегии с целями устойчивого развития, далее (ЦУР) [88].

Изменение климата и глобальное потепление являются основными причинами пожаров и внезапных наводнений. Внезапные наводнения очень опасны, поскольку они происходят в течение короткого периода времени и не могут быть предсказаны. Внезапные наводнения угрожают жизни людей и имуществу [107]. На внезапные наводнения влияют геоморфология, топограммы, инфраструктура и география [86]. Геоморфические исследования были проведены для улучшения методов предотвращения катастрофических последствий наводнений и подчеркивания важности геоморфологических исследований при планировании [116].

Сбор дождевой воды, далее (СДВ) — это актуальный и динамичный ответ на проблемы с водой. Накопление дождевой воды является эффективным методом аккумуляции пресной воды, который снижает вероятность возникновения внезапных наводнений и обеспечивает пополнение запасов подземных вод [58, 41].

Вади-Ватир является одним из самых важных водосборов на Синайском полуострове в Египте (рис. 1). Это засушливый регион, который страдает от небольшого количества осадков, особенно летом. Кроме того, Вади-Ватир уязвим для внезапных наводнений из-за больших возвышенностей и сложного рельефа. Наводнения угрожают жизни и имуществу жителей Вади-Ватир. Большая часть дождевой воды сбрасывается в море без её эксплуатации. Хранение осадков может стать хорошим решением проблемы дефицита воды в изучаемом районе.

Для определения пригодности СДВ и картирования опасностей наводнений используются две основные методологии: географическая информационная система, далее (ГИС) и дистанционное зондирование, далее (ДЗ). Они успешно использовались в различных исследованиях [1, 3, 24, 29, 34, 40, 64, 71, 97]. ГИС и ДЗ в настоящее время являются ключевыми инструментами для оценки геоэкологических рисков и основным источником данных для классификации

опасностей [106, 107]. Для идентификации допустимости аккумуляции дождевой воды сочетаются метод числа кривых службы охраны почв (SCS-CN), гидрологическое моделирование и многокритериальный анализ [11, 41, 61, 63, 97].

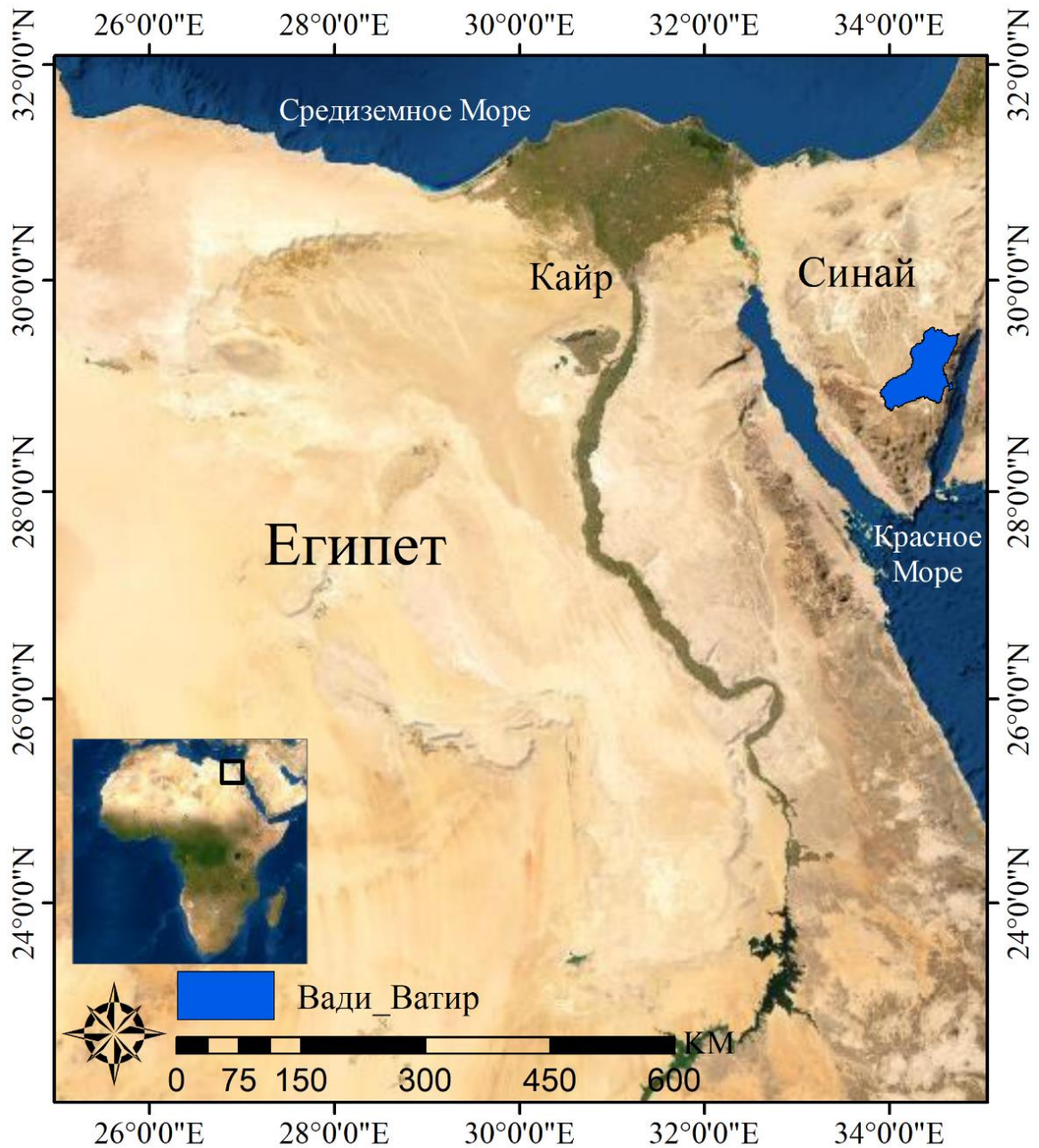


Рисунок 1 — Карта расположения Вади-Ватир

Степень разработанности темы исследования. Основные проблемы управления водными ресурсами Египта и способы их решения привлекают внимание многих исследователей, таких как: Abdeldayem S. [16], Abdelhaleem F., Helal E. [18], Abdelshafy H.I., Elsharty A.A., Regelsberger M., Platzer C. [19], Abdin

A.E., Gaafar I. [20], Abdrabbo M.A., Farag A.A., El-Desokey W.M.S. [21], Abuzeid M.A. [22], Allam M.N., Allam G.I. [26], Alnaggar D. [27], Diana R.K. [38], Elsayed M.R., Omima S.S., Maha R.F., Gamal M.A. [43], Elshemy M., Khadr M. [45], Emad E., Brigitte U., Dalia F. [46-47], Hamdy E., Slobodan D., Dragan A.S., Ioannis T. [55], Hamimi Z., El-Barkooky A., Frías J.M., Fritz H., El-Rahman Y.A. [56], Harby M., Naoya F. [57], Hvidt M. [60], Mohieeldin M.O., Ahmed M.A. [70], Randa E. [83], Wael M.E., Mona G.I., Wael E.M. [107], Wagdy A. [108], Walaa Y.E., Ahmed H.E. [109], Yasir S.A., Alessandra C., Yasir A.M., Nigel G.W., Roelvink J.A. [118] и др.

Коммерческое, туристическое и историческое значение Вади-Ватир сделало его объектом различных исследований, например: Мостафа Еззелдин, Синиченко, Е.К., Грицук, И.И. [12], Еззелдин, М., Синиченко, Е.К., Грицук, И.И. [7] Al-Zayed, I.S., Ribbe, L., Al-Salhi, A. [28], Eissa, M.A., Thomas, J.M., Pohl, G., Shouakar-Stash, O., Hershey, R.L., Dawoud, M. [39], Elewa, H.H., Zelenakova, M., Nosair, A.M. [41], Mostafa E., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. [71], Osama, M.S. [79], Sara, A., May, Y., Samia, I., Mona, K. [89] и др.

ГИС и дистанционное зондирование (ДЗ) применялись и доказали свою эффективность в различных исследованиях: Андреев Д.В. [1], Болданова Е.В. [3], Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А. [9], Студников С.Н., Войнова М.В. [14], Adham A., Sayl K.N., Abed R., Abdeladhim M.A., et al. [23], Campos A.F., Alava J., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. [34], Elbehiry M.G., Shedid A., Abukhadra A., Elhuseiny M. [40], Mahmoud M.M., Mona G.I., Manabu F., Mahmoud N. [64], Mostafa E., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. [71], Singh L.K., Jha M.K., Chowdary V.M. [97], Wael M.E., Mona G.I., Wael E.M. [106-107] и др. Для идентификации пригодности СДВ числа кривых службы охраны почв (SCS-CN), гидрологическое моделирование, далее (ГМ) и многокритериальный анализ, далее (МКА) объединяли во многих исследованиях: Кутлияров Д.Н., Кутлияров А.Н. [11], Elewa H.H., Zelenakova M., Nosair A.M. [41], Jha M.K., Chowdary V.M., Kulkarni Y., Mal B.C. [61], Krois J., Schulte A. [63].

Научная гипотеза. Исследование основных водных проблем Египта и предложение возможных решений. Выбор одного из перспективных решений проблемы недостатка воды и применение его к засушливому водосбору в Египте. Связь результатов исследования с целями устойчивого развития региона.

Цель и задачи. Целью данного исследования является повышение эффективности использования воды в Вади-Ватире посредством строительства сооружений СДВ и защиты людей и имущества от опасности ливневых паводков. Кроме того, подготовить долгосрочный план развития водосбора Вади-Ватир на Синайском полуострове.

В связи с этим основные задачи данной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Выявление основных проблем водных ресурсов Египта и методов, которые могут быть применены для решения проблемы дефицита воды.
2. Определение пригодности аккумуляции дождевой воды водосбора Вади-Ватир на Синайском полуострове в Египте.
3. Определение оптимальных мест для сооружений по накоплению дождевой воды.
4. Оценка опасности ливневых паводков в районе исследования.
5. Исследование влияния внезапных наводнений на целесообразность накопления дождевых вод и строительство сооружений для хранения осадков.
6. Оценка количества воды, которое может быть собрано предлагаемыми сооружениями.
7. Определение взаимосвязи результатов исследований с актуальным планом развития водных ресурсов региона Вади-Ватир.

Научная новизна исследования:

1. Впервые представлен новый метод определения пригодности СДВ для Вади-Ватир. Гидрологическое моделирование (WMS, HEC-1) сочетается с многокритериальным анализом (процесс аналитической иерархии) и ГИС.

2. Впервые внедрен новый метод определения оптимальных мест для сооружений аккумуляции дождевой воды, в котором техника глубины депрессии была объединена с методом логического анализа и методом взвешенной линейной комбинации, далее (ВЛК).

3. Впервые было исследовано влияние ливневых паводков на достаточность сбора дождевой воды и проектирование сооружений по накоплению дождевой воды для оптимального использования водных ресурсов Вади-Ватир.

4. Впервые выводы исследования связаны с ЦУР для составления плана развития Вади-Ватира. Предложенная стратегия предлагает решение для проектирования различных проблем (например, нехватки воды, экологических и социально-экономических).

Методология и методы исследования. Методы и методологии, которые были использованы для завершения данного исследования:

1. Дистанционное зондирование для получения необходимых данных для анализа.

2. Метод многоугольника Тиссена для ограничения области воздействия каждой метеостанции.

3. Метод числа кривых службы охраны почв (SCS-CN) (США) для преобразования данных об осадках в гидрограф стока.

4. Процесс аналитической иерархии и метод собственных векторов для вычисления нормированных весов используемых параметров.

5. Метод взвешенной линейной комбинации для создания агрегированных карт с использованием ГИС.

6. Индекс потенциала сбора дождевой воды для классификации соответствия накопления дождевой воды.

7. Метод логического анализа для исключения областей непригодных для сохранения пресной воды.

8. Метод глубины депрессии для выбора оптимальных мест для строительства накопительных сооружений.

9. Метод Стралера для классификации порядка водотока каждого подбассейна.

10. Метод морфометрического ранжирования для оценки степени опасности внезапных наводнений.

11. Географическая информационная система для обработки исходных данных и итогового картографирования областей сбора воды и строительства сооружений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты будут использованы Министерством водного хозяйства и ирригации Египта и Институтом водных ресурсов Египта, проектировщиками, лицами и частным сектором для устойчивого развития водосбора Вади-Ватир. Разработанные подходы могут применяться в различных регионах, испытывающих дефицит воды.

Разработанные методики используются для выявления пригодности СДВ и определения оптимальных мест размещения сооружений накопления дождевых вод, исследования опасности внезапных наводнений и оценка объема дождевой воды, которую возможно собрать. Наконец, увязка планов развития с ЦУР.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Основные проблемы управления водными ресурсами в Египте и возможные пути решения, а также их применение к актуальным засушливым площадям водосбора.

2. Методика определения пригодности СДВ на основе ГИС, дистанционного зондирования, гидрологического моделирования и многокритериального анализа.

3. Оптимальные места для сооружений аккумуляции дождевой воды с использованием методов глубины депрессии, логического анализа и взвешенной линейной комбинации.

4. Эффективное использование имеющихся водных ресурсов Вади-Ватир.

5. Комплексный план развития, основанный на целях устойчивого развития.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты исследований были доложены на 5 научных мероприятиях:

- Международный научно-практический форум «ASU SciTech Forum 2020» с докладом «Flash Flood Hazard Mapping Using Multi-Method Approach: Case Study Wadi Watir, Egypt» в Алтайском государственном университете (г. Барнаул, Россия) с 12 по 13 ноября 2020 года.
- International Conference and Expo on Recycling and Waste Management held on November 09-10, 2022.
- Международной научной конференции студентов и молодых ученых «В целях устойчивого развития цивилизации: сотрудничество, наука, образование, технологии» с 22 по 26 ноября 2022 года.
- Научный семинар по актуальным вопросам архитектуры и строительства в Департаменте строительства Инженерной академии РУДН. Мероприятие проводилось 23 марта 2023 года.
- VI Всероссийский научно-практический семинар посвященный 120-летию со дня рождения Андрея Васильевича Михайлова «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» 24 мая 2023 г., НИУ МГСУ, г. Москва.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов. Аналитический обзор научных достижений в исследуемой области, сбор метеорологических данных Института водных ресурсов Египта и цифровые материалы из открытых источников, при формулировке цели и постановке задач исследования, разработки и применении методологии работы, составление заключительных положений, написание основного текста четырех статей, связанных с исследованием.

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно изложены в 4 научных публикациях, из которых 3 работы опубликованы в журналах,

включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и 1 работа опубликовано в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и других.

Структура диссертации. Диссертация содержит: введение, 4 главы, заключение, Список литературы. Объем диссертации включает 122 страниц, среди которых 58 рисунков, 17 таблиц, 121 наименований литературы.

ГЛАВА 1. УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ЕГИПТА: ПРОБЛЕМЫ И СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ

Управление водными ресурсами представляет собой наиболее значимую область исследований во всем мире из-за дефицита водных ресурсов и роста потребности в воде во многих странах и государствах [5, 10, 13]. Существует мнение, что в будущем водные ресурсы станут основной причиной войн, поэтому вопросами управления водными ресурсами занимаются как исследователи, так и правительства разных стран мира. Их задача — решить проблему дефицита воды, а также разработать планы и стратегии, с помощью которых руководители смогут обеспечить защиту водных ресурсов [4, 8]. При этом управление водными ресурсами усложняется в результате непоследовательной постановки задач, урбанизации и стихийных бедствий, особенно на засушливых территориях [118]. Кроме того, основной проблемой, которую предстоит решить тем, кто будет заниматься планированием соответствующих мероприятий и принятием решений во многих развивающихся странах, является противоречие между защитой окружающей среды и вопросами экономического характера [35, 54, 76].

Итоги наблюдений показали, что многие территории, особенно Ближний Восток и Северная Африка, находятся на пороге кризиса водоснабжения, поскольку там объем воды на душу населения является минимальным в мире и составляет 247 м^3 в год, притом, что в США этот показатель составляет $18\,742 \text{ м}^3$, а в Латинской Америке — $23\,103 \text{ м}^3$. В двадцати пяти самых густонаселенных странах мира отсутствует доступ к чистой питьевой воде, при этом, девятнадцать из них находятся в Африке [38]. Египет является одной из стран Ближнего Востока и Африки, которая страдает от засухи, поскольку интенсивность осадков на его территории составляет менее 200 мм в год на прибрежных территориях [47].

Объем воды на душу населения сократился с 1893 м^3 в 1959 г. до 950 м^3 в 2000 г., а также прогнозируется его дальнейшее сокращение до 536 м^3 к 2025 [21, 68, 77, 101] (рис. 1.1). Суммарный объем водных ресурсов Египта составляет в

настоящее время 59,25 млрд м³, из которых 55,5 млрд м³ получают за счет воды реки Нил, 1,3 млрд м³ — за счет осадков на северном побережье и Синайском полуострове, 2,1 млрд м³ — за счет подземных вод глубокого залегания и невозобновляемых подземных вод, а 0,35 млрд — за счет опреснения воды, притом, что суммарная годовая потребность в воде составляет 80,25 млрд м³ [52, 111] (рис. 1.2). Разница между объемом спроса на воду и имеющимися водными ресурсами составляет 21 млрд м³, дефицит воды покрывается за счет повторного использования очищенных сточных вод [70]. Потребность в воде растет с течением времени в результате роста численности населения, уровня благосостояния, роста спроса на еду, расширения и обновления промышленности [108].

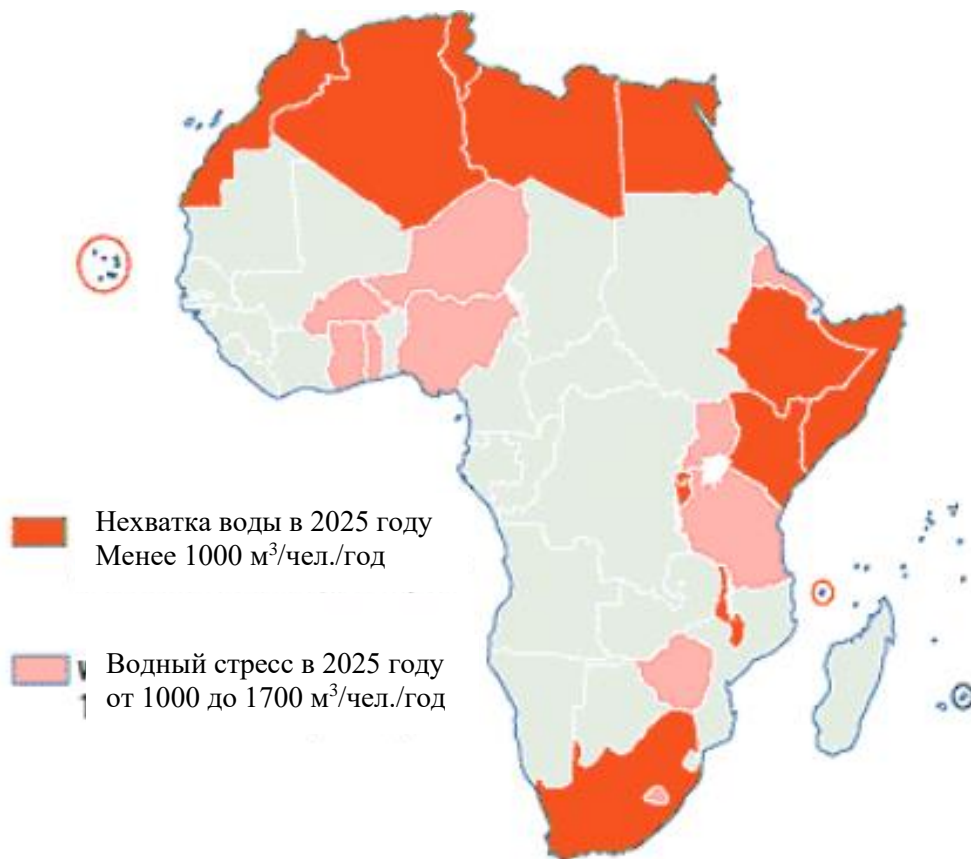
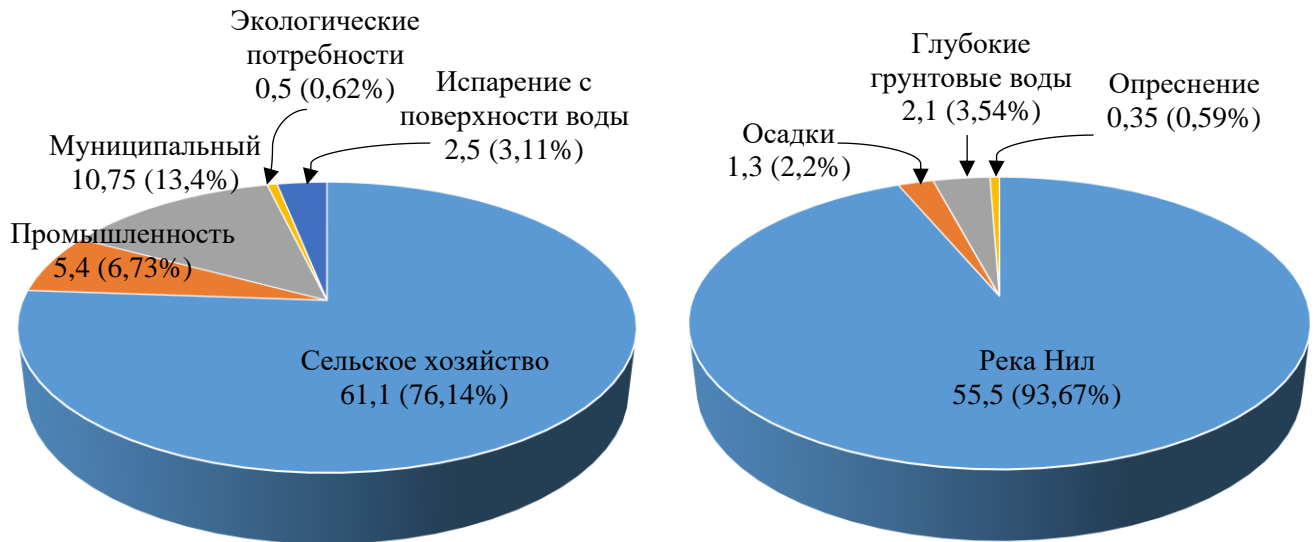


Рисунок 1.1 — Водный стресс в Африке [38]



Потребление воды = 80,25 млрд м³/год

Водные ресурсы = 59,25 млрд м³/год

Рисунок 1.2 — Водные ресурсы и водопотребление в Египте [52]

Река Нил является источником жизненной силы Египта и считается основным источником водных ресурсов в Египте, который используется во многих целях, таких как сельское хозяйство, бытовое использование. Вода Нила перекачивается из двух притоков: Белого Нила, главного потока, который берет начало из Великих озер в Центральной Африке, и Голубого Нила, впадающего в озеро Тана в Эфиопии [18].

Исторически сложилось так, что права Египта на воды Нила были установлены соглашением между Египтом и Великобританией, которое было заключено от имени Судана в 1929 г. [26]. В 1959 г., по завершении строительства Асуанской плотины, между Египтом и Суданом было подписано соглашение об оптимальном использовании вод Нила. Это соглашение стало неотъемлемой частью соглашения 1929 года [60]. На основании заключенного соглашения Египет получал 55,5 млрд м³ воды в год, а Судан — 18,5 м³, соответственно. Около 86% воды поступало за счет воды рек Голубой Нил и Атбара (притока реки Эфиопия) [18].

Задача настоящей главы — выяснить основные проблемы, связанные с управлением водными ресурсами в Египте, а также определиться с основными

способами их решения, выявить эффективные способы охраны водного фонда Египта.

1.1 Основные проблемы управления водными ресурсами Египта и возможные способы их решения

Управление водными ресурсами Египта сопровождается многочисленными проблемами, решение которых требует применения следующих мер:

1.1.1 Плотина великого возрождения Эфиопии

Можно сказать, что основной проблемой водных ресурсов Египта является строительство плотины великого возрождения Эфиопии (рис. 1.3).

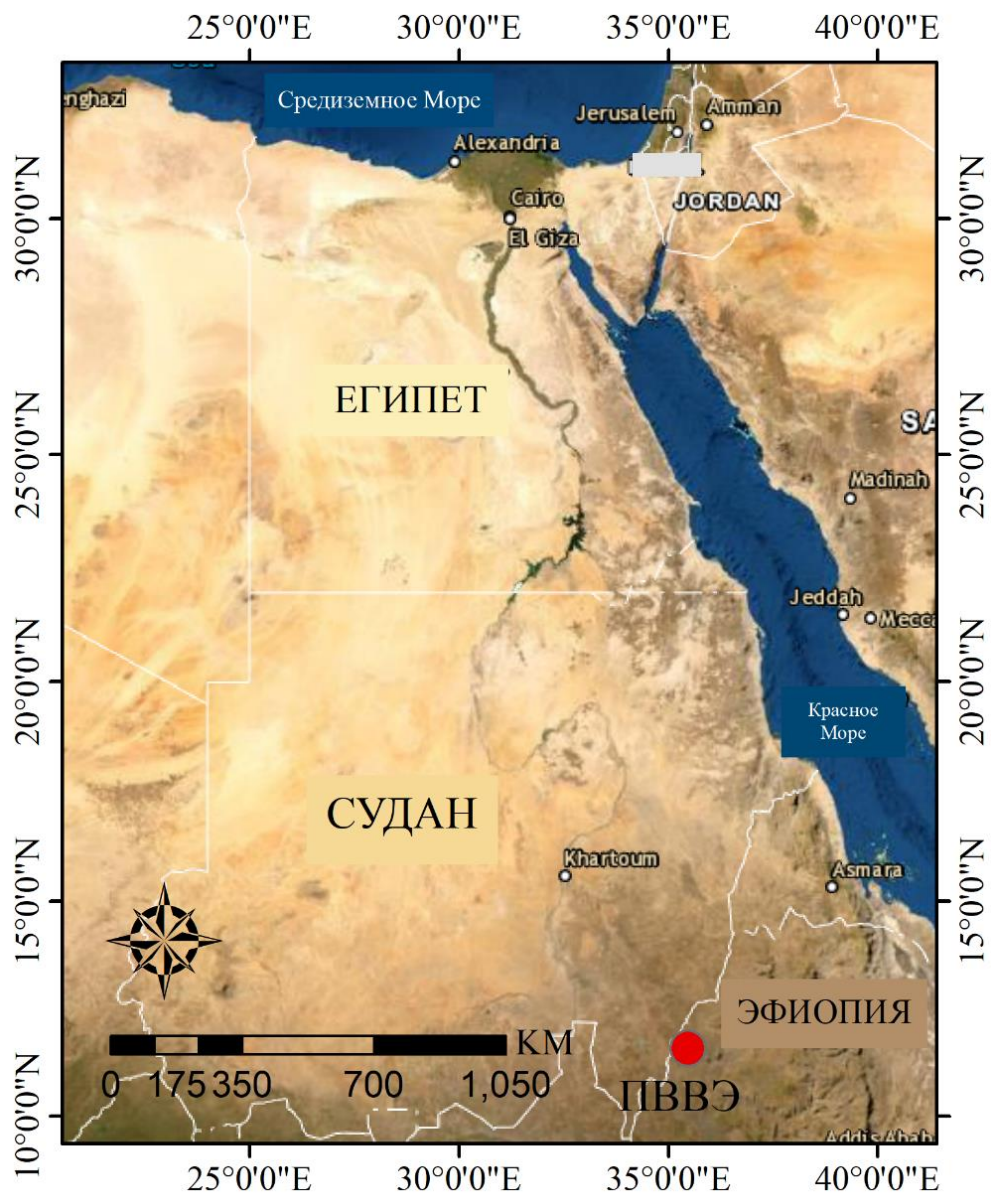


Рисунок 1.3 — Плотина великого возрождения Эфиопии (ГВВЭ)

Строительство плотины великого возрождения Эфиопии на реке Голубой Нил началось в 2011 г. по инициативе правительства Эфиопии в регионе Куба (Эфиопия). Плотина будет располагаться в 60 км от границы с Суданом и 750 км от столицы Эфиопии Аддис-Абебы. Площадь поверхности водохранилища предположительно составит 1874 км², уровень воды будет располагаться на высоте 640 м над уровнем моря, а Объем водохранилища составит 74 млрд кубометров [33].

Строительство плотины великого возрождения Эфиопии сопряжено со следующими рисками: поспешность при наполнении водохранилища, увеличение емкости водохранилища, прорыв плотины в результате ошибки, допущенной при ее проектировании или строительстве, а также стихийные бедствия, в результате которых объем воды голубого Нила, причитающийся Египту, будет сокращен, что приведет к сокращению выработки электроэнергии Асуанской плотинной и отразится на качестве воды в реке Нил, приведет к сокращению площади пахотных земель, подземных вод, вызовет климатические изменения, отразится на навигации и рыбной ловле в водах Нила, скажется на состоянии здоровья населения и в будущем может привести к возникновению конфликта между Египтом и Эфиопией [55, 82, 106]

Эфиопия вправе развиваться без ущерба для других стран. Данный вопрос необходимо решить путем заключения договора между двумя странами, на основании чего правительство Эфиопии будет вправе строить плотину, не сокращая причитающийся Египту объем воды голубого Нила [83]. Такое соглашение поможет предотвратить потенциальный вооруженный конфликт между двумя странами, что может иметь негативные последствия для всего региона. Известно, что переговоры между Египтом и Эфиопией откладывались уже несколько раз, при этом не были достигнуты никакие значимые результаты. Последний раунд переговоров проводился в Вашингтоне в феврале 2020 г., но правительство Эфиопии заявило, что не признает его результаты [103].

1.1.2 Рост численности населения

По данным организации объединенных наций (ООН), в 1980 г. население Египта составляло 43,4 млн человек, в 2000 г. — 68,8 млн, а в 2019 г. — 100,4 млн. К 2050 г. оно вырастет до 160 млн человек [102] (рис. 1.4). Рост численности населения означает рост спроса на воду, которая необходима для удовлетворения разных потребностей, в частности, для выращивания сельскохозяйственных культур и удовлетворения хозяйственно-бытовых нужд. Недостаточная информированность населения только усугубляет проблему, особенно в развивающихся странах.

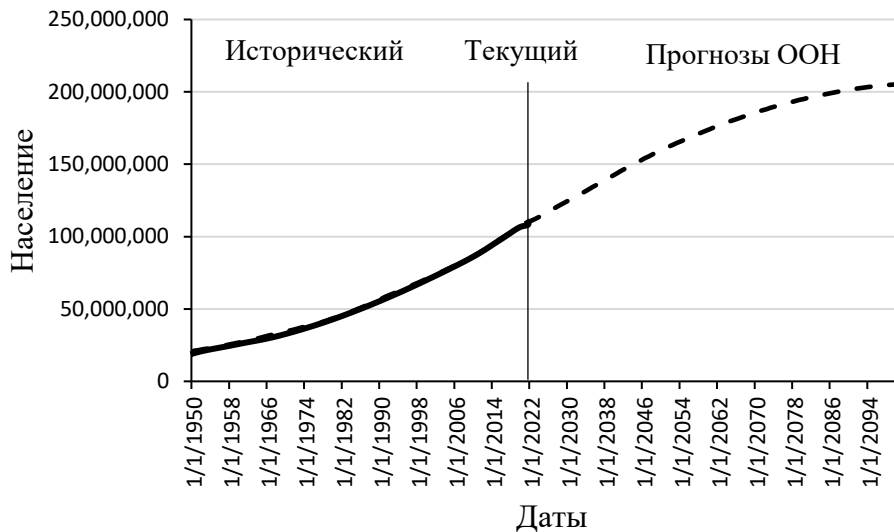


Рисунок 1.4 — Рост населения Египта с 1950 по 2100 гг [102].

Программы информирования населения исключительно важны для распространения среди общественности информации о важности водоохраны и применения новых технологий использования воды для бытовых нужд и орошения сельскохозяйственных земель. Иными словами, речь идет о распространении культуры экономного потребления воды и ее пользе для населения [83]. Население Египта, которое, согласно распространенному мнению, только усугубляет проблему воды, может самостоятельно ее решить, если предоставить надлежащие разъяснения и призвать действовать должным образом.

1.1.3 Орошение сельскохозяйственных земель и существенные потери воды

Большая часть воды реки Нил расходуется на орошение. Около 85% воды, поступающей из водохранилища Асуанской плотины, расходуется на орошение, а оставшиеся 15% — на другие цели [16]. Рост численности населения и качества жизни привели к росту спроса на продукты питания, что осложнило ситуацию с количеством воды, необходимой для сельскохозяйственных нужд [83]. Например, для рисовых полей в дельте Нила требуется около 11 млрд м³ воды [57]. Кроме того, потеря воды происходит в результате поверхностного испарения, утечек из каналов и арык, и инфильтрация воды в сельскохозяйственный грунт [70].

Использование оросительных систем с низким уровнем потребления воды, в том числе систем капельного полива и спринклерных систем, удаление водорослей, облицовка каналов и канав, минимизация испарений путем укрывания определенных участков оросительных каналов, уравнивание дневных и ночных оросительных мероприятий, постепенное сокращение рисовых полей, использование высокопродуктивных сельскохозяйственных культур с низкой потребностью в воде — все эти мероприятия помогут эффективно решить проблемы этой жизненно-важной отрасли [18].

1.1.4 Значительное испарение воды и малое количество осадков

Египет расположен в засушливой местности, где суммарное среднегодовое количество осадков составляет менее 200 мм вдоль северного побережья, а на территории Верхнего Египта количество осадков стремится к нулю [22] (рис. 1.5). Кроме того, для Египта характерна высокая испаряемость воды, которая продолжает расти из-за климатических изменений. Испаряемость достигает максимальных показателей на территории водохранилища у Асуанской плотины, где среднегодовой объем испарений составляет 15 млрд м³ воды [19, 21, 45, 70] (рис. 1.6).

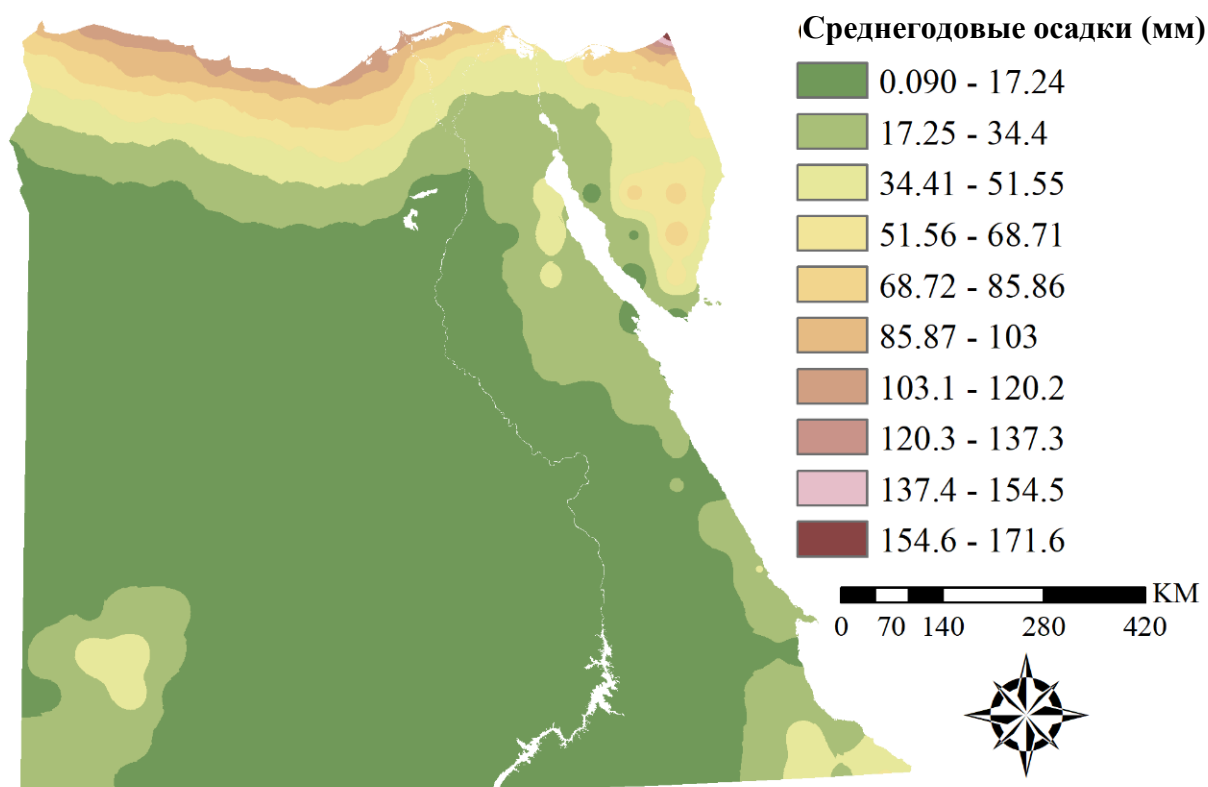


Рисунок 1.5 — Карта среднегодовых осадков на территории Египта

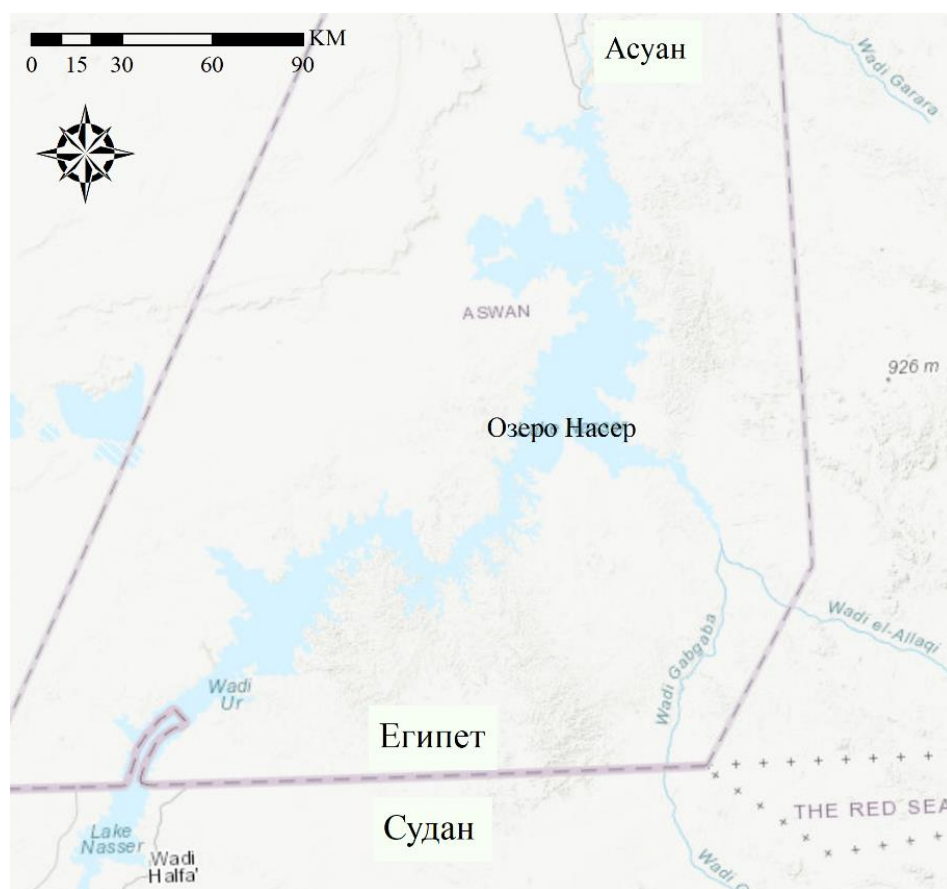


Рисунок 1.6 — Асуанское водохранилище, абсолютная высота расположения которого над уровнем моря составляет 181,56 м

Как уже говорилось, строительство плотин в определенных створах, необходимое для наполнения Асуанского водохранилища, может сэкономить до трех миллиардов кубометров воды (5,5% причитающейся Египту воды реки Нил) [47]. Результаты исследования прояснили, что удаление отложений со дна Асуанского водохранилища сократит испарения на 6,5% [46]. Несмотря на это, необходимо провести дополнительные исследования для достоверного подтверждения предлагаемых решений. Установка конденсаторов воды в местах испарений на Асуанском водохранилище, вдоль побережья и на территории сельскохозяйственных угодий может сократить испарение воды [77]. Странам, расположенным на территории бассейна реки Нил, следует заняться разработкой планов и стратегий сокращения последствий прогнозируемых климатических изменений, которые могут отрицательно отразиться на водных ресурсах в бассейне Нила [56].

1.1.5 Отсутствие необходимой информации о водопользователях и водопотребителях

Египет страдает от недостатка информации в разных областях жизни, особенно в части водных ресурсов. Единственная информация, предоставленная в числовом выражении — это причитающаяся Египту доля воды реки Нил. Вся прочая информация, выраженная в числах, является неточной, ее объем ограничен, измерения проводятся с большими интервалами, и не все параметры подвергаются измерению. Например, отсутствует информация об объеме промышленного и домашнего водопользования, а также о водопотребителях при доставке воды в разные регионы. Все это препятствует успешному управлению водными ресурсами Египта [26].

Процесс комплексного управления водными ресурсами требует эффективного управления с использованием информационных средств и баз данных [77], поэтому правительственным органам и научно-исследовательским институтам необходимо разработать и представить научному сообществу мощные и максимально исчерпывающие базы данных. Работа по передаче информации и

результатов прикладных исследований должна быть организована для изучения результатов местных исследований источников воды и обеспечения роста эффективности программы консалтинговых услуг, предусмотренной региональным центром обучения и исследования воды [27].

1.2 Альтернативные водные ресурсы

Египту необходимо изыскать альтернативные водные ресурсы. Данной тематике посвящены всевозможные исследования, на основании которых выдвинуты следующие предложения:

1.2.1 Проекты Верхнего Нила

В Верхнем Ниле запланированы три крупных проекта. Задача проектов — увеличить полноводность реки путем сокращения водопотерь на территории болотистой местности в южном Судане. Среди таких проектов:

- 1) Канал Жонглей (Jonglei Canal) (этапы I и II) (рис. 1.7);
- 2) Работы в болотистой местности Бахр Эль-Газаль;
- 3) Реки Собат, где расположены болота Машар (Machar Marshes).

В результате таких мероприятий объем воды в реке Нил увеличится на 18 млрд м³ в год. Этим объемом воды Египет и Судан смогут воспользоваться на паритетных началах [120].

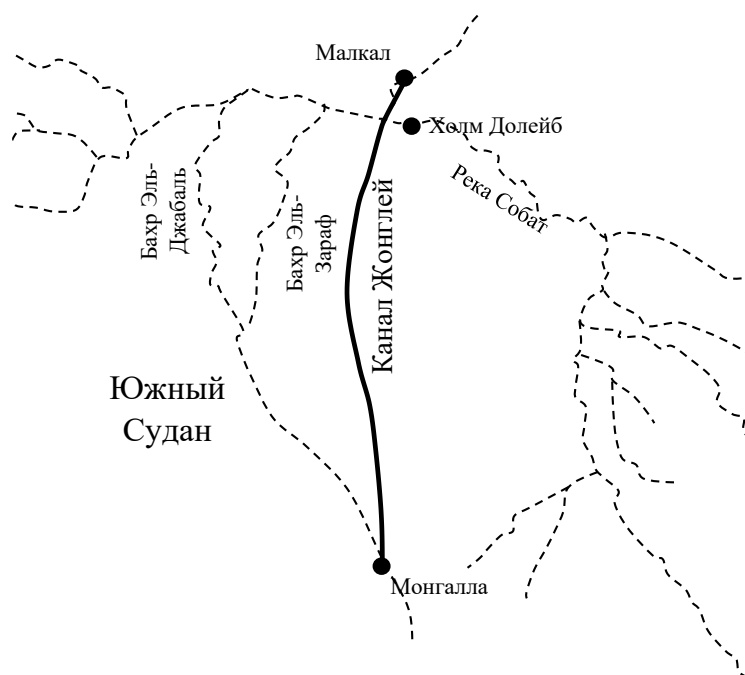


Рисунок 1.7— Схема канала Жонглей

Еще одно предложение заключается в объединении бассейнов рек Конго и Нил. Река Конго — самая полноводная река в Африке, ежегодно свыше тысячи миллиардов кубометров ее вод попадает в океан. Проектирование данного проекта сопряжена с рядом сложностей, среди которых — отсутствие информации, огромная стоимость осуществления, экологические последствия и необходимость проведения дополнительных исследований.

1.2.2 Бурение колодцев

В Египте есть два источника подземных вод. Первый представляет собой глубокий водоносный слой в пустыне, который в большинстве случаев является невозобновляемым источником воды. В настоящее время объем добычи подземных вод составляет от 1,5 до 1,85 млрд м³ в год, при этом, его можно увеличить до 3,5 млрд м³. Второй источник — это подземные воды Нила, которые располагаются под сельскохозяйственными угодьями в дельте и долине Нила. Эти воды неглубокого залегания, они представляют собой возобновляемый источник воды более низкого качества по сравнению с подземными водами пустыни, ежегодный объем их добычи составляет 3 млрд м³ [17] (рис. 1.8).

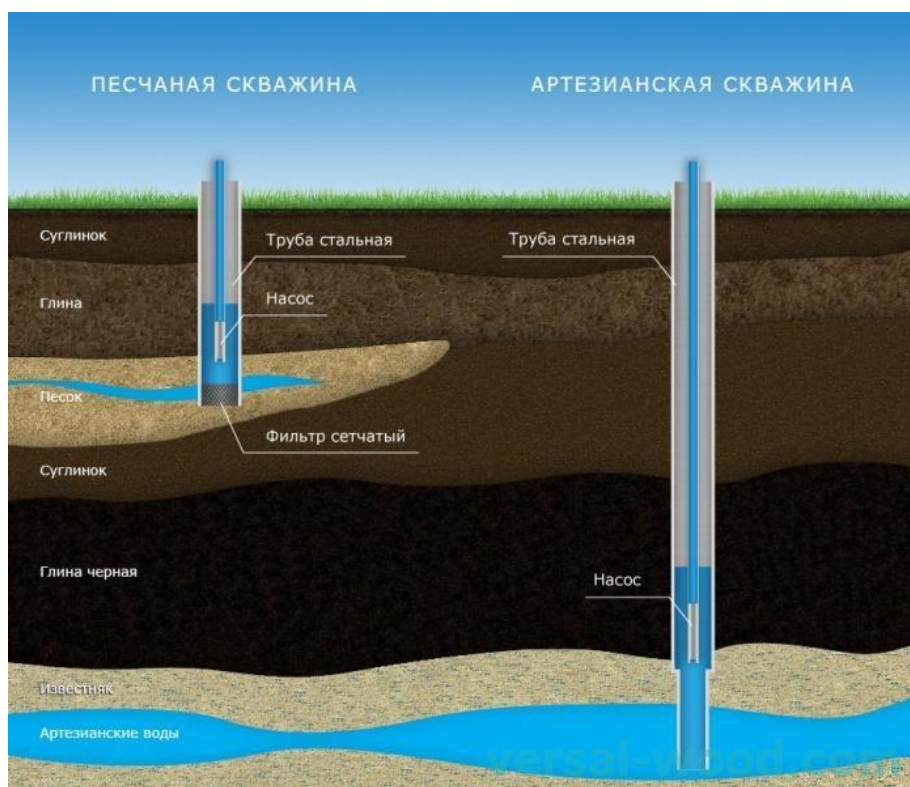


Рисунок 1.8 — Песчаная и артезианская скважины [2]

1.2.3 Опреснение морской воды

Опреснение морской воды — возможный вариант получения воды для сельскохозяйственных и бытовых нужд. Этот вариант является исключительно дорогостоящим, поскольку опреснение 1 м³ морской воды стоит около 15 египетских фунтов.

1.2.4 Повторное использование очищенных сточных и дренажных вод

Запланированный объем использования очищенных дренажных вод для целей орошения составляет 8,3 млрд м³ в год к 2017 г. Объем повторного использования бытовых и промышленных вод должен достичь 1,5 млрд м³ к 2025 г. Необходимо провести дополнительные исследования с целью обеспечения простой и дешевой технологии опреснения воды [17].

1.3 Распределенное землепользование

В Египте на протяжении длительного времени уделяется достаточно внимания вопросам управления водными ресурсами, при этом, одним из важных методов водоохраны является распределенное землепользование, которое состоит в моделировании оптимизации землепользования и использовании ГИС, которые уже успешно применяются во многих регионах. Этот метод мало используется в Египте, хотя и может применяться в разных регионах.

Землепользование неотделимо от проблемы водных ресурсов. Одно из важнейших решений проблемы воды — оптимально использовать каждый участок земли, поскольку отсутствие единой системы планирования землепользования приведет к чрезмерному потреблению водных ресурсов. Кроме того, землепользование влияет на экологию, окружающую среду, а также имеет социально-экономические последствия, например, стихийное развитие городов и дефицит экологической и общественной инфраструктуры.

Как правило, исследователи осуществляют проекты по управлению землепользованием в пределах определенных территорий, которые обладают определенными характеристиками в своих границах. В центр внимания обычно

попадают городские территории, сельскохозяйственные земли и леса. Применяются всевозможные подходы, в том числе определение пригодности земель, прогнозирование изменения назначения земель, оценка стоимости земель и распределение земель по видам землепользования [119].

Комплексный и последовательный анализ необходим для обеспечения оптимального использования воды и земель. По мнению многих исследователей, ГИС-технологии — это собой мощный инструмент комплексного землепользования, и водных ресурсов. Модель оптимизации и система ГИС становится основой комплексной системы распределения земель [11, 107].

1.3.1 Модель оптимизации

Можно сформулировать общую проблему разработки программного обеспечения: это наличие множества задач и неопределенных параметров. Необходимо произвести распределение вероятностей для устранения неопределенностей системы и ее взаимосвязей.

Данный метод служит для обеспечения эффективного расчета, выявления, оценки и распространения информации о разных типах неопределенностей и связанных с ними рисках.

С помощью различных сценариев можно разработать модель оптимизации, способную учитывать разные экономические, экологические и физические условия. Что касается экологических и экономических компромиссов, необходимо, чтобы указанные сценарии коррелировались с разными объективными функциями, связанными с принимаемыми решениями.

1.3.2 ГИС-модель распределения территории

На вопрос «что делать?» можно дать ответ с помощью модели оптимизации, которая применяется для разных видов деятельности человека с учетом единиц времени и пространства. Применимые в процессе оптимизационного моделирования единицы пространства являются недостаточно четкими и не

позволяют представителям властей и проектировщикам принимать решения для обеспечения оптимальных изменений в сфере землепользования.

На вопрос «как я могу это сделать?» ГИС-модель распределения земель применима для выбора оптимальной стратегии осуществления результатов.

Выводы по главе 1

Проблема управления водными ресурсами Египта является сложной, поскольку на нее оказывают воздействие многочисленные факторы. С 2000 года Египет испытывает дефицит воды, который нарастает с каждым годом в силу множества причин, среди которых рост численности населения страны и повышение уровня жизни.

Управление водными ресурсами в Египте сопряжено с рядом проблем. Основная из них — строительство огромной плотины возрождения Эфиопии. Кроме того, следует отметить орошение сельскохозяйственных земель, а значит потери воды на фильтрацию и испарение, а также малое количество осадков.

Согласно многочисленным исследованиям, все указанные проблемы можно решить путем применения необходимых мер, среди которых особое место занимают альтернативные водные ресурсы: проекты Верхнего Нила, бурение колодцев на воду, опреснение морской воды, а также использование очищенных сточных и дренажных вод.

Для обеспечения охраны водных ресурсов используются разные технологии, среди которых — распределенное землепользование на основе оптимизационного моделирования и ГИС систем.

Сбор дождевой воды с использованием ГИС – ключевое решение вопросов управления водными ресурсами.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИГОДНОСТИ СБОРА ДОЖДЕВОЙ ВОДЫ В ВАДИ-ВАТИР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГИС

В отчете Всемирного экономического форума «Глобальные риски за 2015 год» и 17 целей устойчивого развития, принятых организации объединенных наций (ООН), необходимо комплексное решение управления водными ресурсами, экологическими, социальными и экономическими показателями одновременно [42, 65, 96, 100].

Сбор дождевой воды имеет много преимуществ и может использоваться для различных целей, таких как сельское хозяйство, выпас скота, муниципальные нужды и другие [41, 58]. Собранная дождевая вода является устойчивым источником чистой воды, которую можно использовать для различных производственных целей и для пополнения запасов подземных вод [99]. Более того, на богарное земледелие приходится 90% производства зерна в полузасушливых и засушливых регионах [66]. Мероприятия аккумуляции дождевой воды уже давно используются в качестве динамического метода поддержки людей перед лицом непредсказуемых и непостоянных осадков [32]. Накопительные плотины, резервуары, пруды - являются важными сооружениями хранения осадков и уже давно используются для пополнения и защиты подземных вод, часто истощенных в полузасушливых и засушливых регионах [97].

Методы ГИС, дистанционного зондирования, модели сохранения почв использовались для оценки стока, по данным об осадках во многих исследованиях накопления дождевых вод [74, 97, 99], оказались эффективными во многих исследованиях и широко использовались для картирования наиболее подходящих участков СДВ [9, 14, 24, 34, 41, 87, 97]. Модели сохранения почв использовались для оценки стока по данным об осадках во многих исследованиях накопления дождевых вод [74, 97, 99]. Кроме того, в различных исследованиях для определения пригодности аккумуляции дождевой воды использовался метод числа кривых службы охраны почвы (SCS-CN) с многокритериальным анализом и

гидрологическим моделированием [11, 41, 61, 63, 97]. Примером МКА является процесс аналитической иерархии, далее (ПАИ), который применялся во многих исследованиях [62, 63]. Кроме того, несколько исследователей применяли метод взвешенной линейной комбинации для определения лучших участков накопления дождевых вод [32, 61, 78, 121]. Метод логического анализа также используется для определения пригодности участка. Этот метод имеет ограничения, поскольку он делит районы только на две категории: подходящие и неподходящие [25]. Остаются сомнения в отношении наилучшего подхода к выбору мест размещения СДВ, поскольку ресурсы данных предоставили мало информации об успешности предлагаемых участков аккумуляции дождевой воды [23]. Комбинация метода ВЛК и метода логического анализа не получила широкого распространения [66].

Этот раздел направлен на определение пригодности сбора дождевой воды для Вади-Ватир на Синайском полуострове с помощью комбинации ГИС, дистанционного зондирования, многокритериального анализа и гидрологического моделирования, а также наметить конкретные места для сооружений СДВ. Интеграция социально-экономических и биофизических параметров повышает эффективность выбора места для хранения осадков [23, 58, 114]. В этом разделе используются как биофизические (например, сток, площадь бассейна, уклон и землепользование), так и социально-экономические параметры (например, расстояние до населенных пунктов и бедуинских общин, а также расстояние до дорог) для улучшения процесса отбора.

Перколяционные (фильтрационные) резервуары, накопительные плотины и фермерские пруды играют важную роль в управлении водосбором. Они снижают риск внезапных наводнений, минимизируют эрозию почвы за счет уменьшения поверхностного стока, ускоряют рост растительности, улучшают пополнение запасов грунтовых вод и снижают интенсивность испарения [97]. Впервые в Вади-Ватир метод глубины депрессии [66, 99] сочетается с взвешенной линейной комбинацией и методом логического анализа для определения оптимальных участков для сооружений хранения осадков.

В Вади-Ватир были проведены различные исследования с использованием аналогичных инструментов для выбора участков аккумуляции дождевой воды. Аль-Зайед и др. [28] использовали ГИС и ГМ для оценки потенциала сбора воды. Они рассчитали количество воды, которое можно собрать, и предложили системы сбора воды. Однако многокритериальный анализ в их работу не включался, а карты пригодности СДВ не предоставлялись. Элева и др. [41] объединили дистанционное зондирование, ГИС, систему моделирования водосборов и процесс аналитической иерархии для определения потенциала накопления дождевых вод. Были предложены подходящие места для сооружений хранения осадков (плотин и цистерн). Однако социально-экономические аспекты не были включены в их анализ. Окончательные карты сбора дождевой воды их исследования и текущего исследования отличались, так как все используемые параметры в их работе (даже карта уклона) были рассчитаны для каждого подбассейна, а затем интерполированы для всего бассейна. Предыдущие исследования предоставили полезную информацию для выбора места СДВ. Однако метод логического анализа (зона ограниченного доступа для сбора дождевой воды), метод глубины депрессии (оптимальные участки для сооружений хранения осадков) и достижение ЦУР не рассматривались. Настоящая глава призвана восполнить эти пробелы, применяя упомянутую структуру.

2.1 Материалы и методы

2.1.1 Область исследования

Водосбор Вади-Ватир, выбранный в качестве исследуемой территории, расположен между $33^{\circ}53'$ и $34^{\circ}44'$ восточной долготы и $28^{\circ}46'$ и $29^{\circ}33'$ северной широты на площади 3580 км^2 (рис. 2.1). Вади-Ватир является основным водосборным бассейном залива Акаба. Город Нувейба расположен на выходе из водосбора. Это очень значимый исторический и туристический город на Синайском полуострове. Кроме того, гавань Нувейба соединяет Египет,

Иорданию и Саудовскую Аравию. Из-за важности Вади-Ватир его изучали многие исследователи [6, 41, 79, 89].

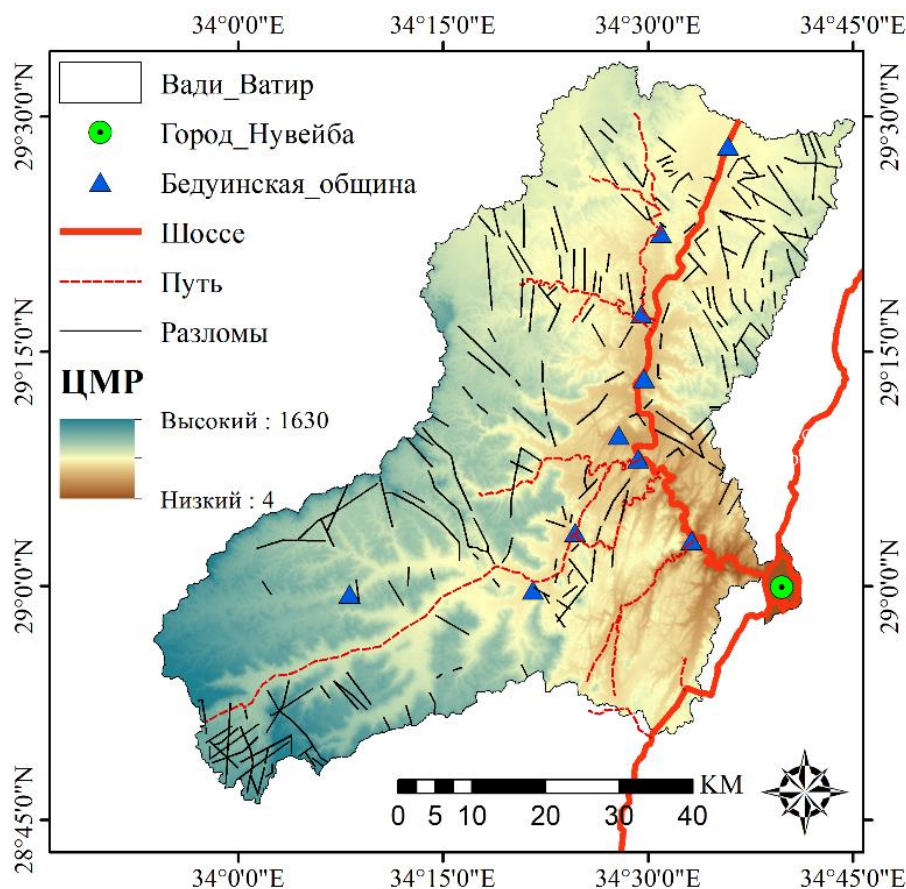


Рисунок 2.1 — Карта основных свойств изучаемой территории

В Вади-Ватир проживает около 50,000 человек, и потребность в воде в среднем составляет 55 млн м³/год (таблица 1). Количество осадков в Вади-Ватир составляет 200 млн м³ в год [79], или 55,86 мм/год. Жители страдают от нехватки воды, уничтожения овец и посевов [28, 79]. Объем воды, сбрасываемой в море во время паводков, колеблется от 30 до 63,5 млн м³. Эксплуатация этой воды посредством строительства сооружений СДВ позволит решить проблемы населения и территории Вади-Ватир. Аль-Зайед и др. [28] провели полевое исследование путем опроса жителей Вади-Ватир. 91% бедуинов поддерживают проектирование систем хранения осадков, и готовы помочь в строительстве и сохранении сооружений аккумуляции пресной воды. Бедуины предпочитают использовать собранную воду для бытовых нужд, выпаса скота и ведения сельского хозяйства соответственно.

Таблица 1 — Ориентировочная потребность в воде Вади-Ватир

Население Вади-Ватир	Годовая потребность в воде на душу населения (ООН)	Уровень водного стресса		Ориентировочная потребность в воде Вади-Ватир
		Абсолютный дефицит воды	<25 млн м ³	
50000	<500 м ³	Абсолютный дефицит воды	<25 млн м ³	55 млн м ³
	500-1000 м ³	Хроническая нехватка воды	25-50 млн м ³	
	1000-1700 м ³	Регулярный водный стресс	50-85 млн м ³	
	>1700 м ³	Периодический водный стресс	>85 млн м ³	

Дадамуни и Шнитлер [37] продемонстрировали быстрое изменение климата на Синайском полуострове. Анализ показал явную тенденцию к повышению средней температуры и уменьшению количества осадков. Эта тенденция привела к сильным засухам, которые резко прерывались обильными и неожиданными дождями. Они показали, что сохранение нынешних тенденций температуры и количества осадков негативно повлияет на социально-экономические и экологические системы в регионе. Они рекомендовали строительство плотин в разных районах Синая, таких как Вади-Ватир.

В водосборе преобладают докембрийские гранитные, метаморфические и вулканические породы. Основные источники сброса подземных вод находятся в Главном канале (Эль-Шейх Аттия) и источниках Фуртага, которые расположены выше аллювиальных водоносных горизонтов. Отложения дельты Ватира состоят в основном из четвертичных мелкозернистых и крупных песков, гравия и валунов, обычно смешанных с илом и глиной [39, 41, 79]. Поэтому очень важны экспериментальные исследования гранулометрического состава почв любой изучаемой территории [59].

В районе Вади-Ватир такие структурные элементы, как разломы, трещины и стыки, вносят свой вклад в гидрогеологическую обстановку. Воды поверхностного стока инфильтруются в основном через эти сооружения и составляют значительную часть подземных вод водосбора. Рельеф местности

варьируется от плоских равнин до крутых гор. Высота над уровнем моря колеблется от 4 до 1630 м.

2.1.2 Сбор данных

Для решения задачи о выборе наиболее подходящих створов и определения конкретных мест для строительства сооружений по сбору дождевой воды проводится аналитический сбор информационных данных по различным аспектам, влияющим на пригодность территории для строительства водонакопительных сооружений по СДВ. Данные, использованные в исследовании, были собраны с разных ресурсов.

2.1.2.1 Цифровые данные

- Цифровая модель рельефа, далее (ЦМР) была получена с веб-сайта USGS Earth Explorer. Он имеет разрешение 30 м по данным Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [104].
- Данные о почве были получены с веб-сайта геологической службы США (USGS) на основе национальной базы данных геологических карт [75].
- Данные о землепользовании/почвенном покрове были получены из спутниковых изображений Landsat (Landsat 8, разрешение 30 м) [104].
- Данные для частотного анализа линеаментов, далее (ЧПЛ) (линейные объекты на земной поверхности, такие как разломы) были извлечены из Landsat 8 OLI/TIRS [104].

2.1.2.2 Многолетние метеорологические показания по метеостанциям

За период с 1934 по 2014 годы были собраны метеорологические данные по трем основным метеостанциям вокруг исследуемой зоны: Рак-эль-Накб, Святая Екатерина и Нувейба (рис 2.2). Источником этих данных является научно-исследовательский институт водных ресурсов Египта [113] и уже опубликованные исследования [39, 79, 89] (рис. 2.3–2.5) (таблицы 2–4).

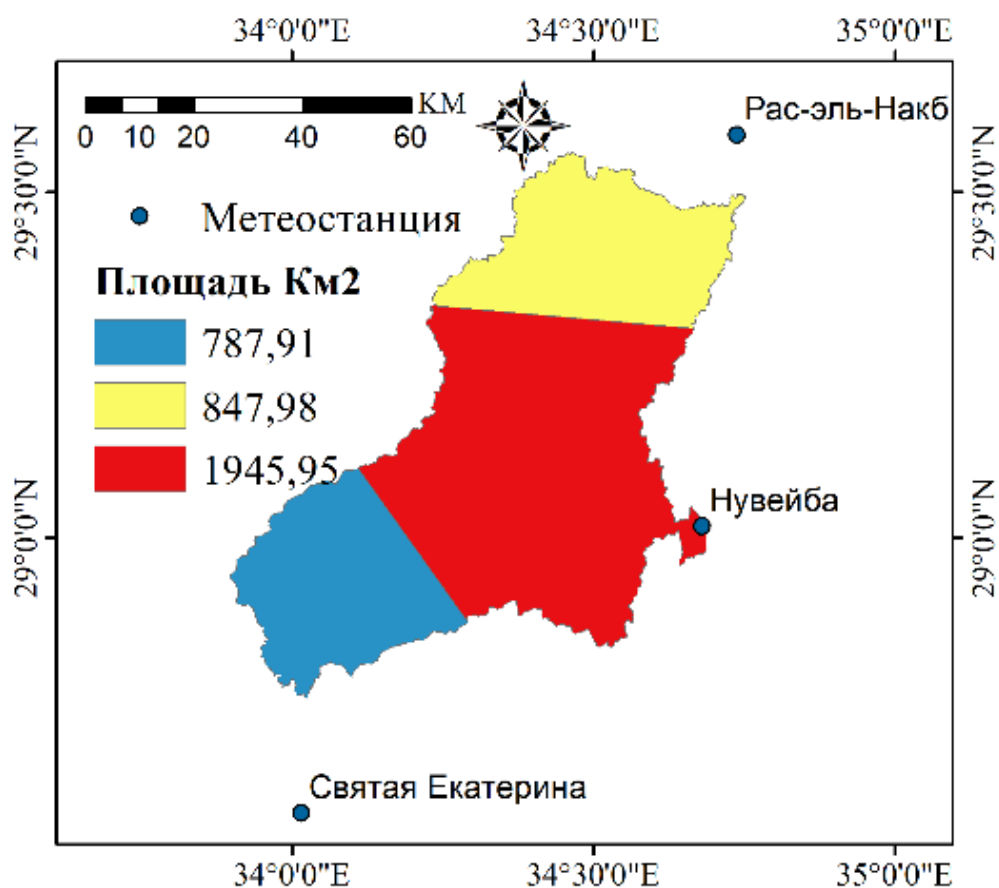


Рисунок 2.2 — Области воздействия метеостанций с использованием метода многоугольников Тиссена

Таблица 2 — Средние многолетние осадки для метеостанции Рас-эль-Накб за период (1941–2014 гг.) [68]

Год	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955
Осадки (мм)	5.9	10.1	5.1	11.3	8.2	6.3	4.8	2.2	0	4.8	3.9	0	7.1	12.9	10.4
Год	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1983	1984	1985	1986
Осадки (мм)	0	0	0	10.7	5.1	14.2	4.9	5.2	2.3	14.9	35	3.9	0	13.6	8.4
Год	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Осадки (мм)	2.9	9.4	3.8	9.2	19.4	10.5	9.8	35	20.2	19.9	7.8	2.4	12.1	7.6	11.3
Год	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014		
Осадки (мм)	9.5	2.1	10.4	2.9	2.5	9.1	8.2	1.9	20	3.5	3.1	5.03	20.2		

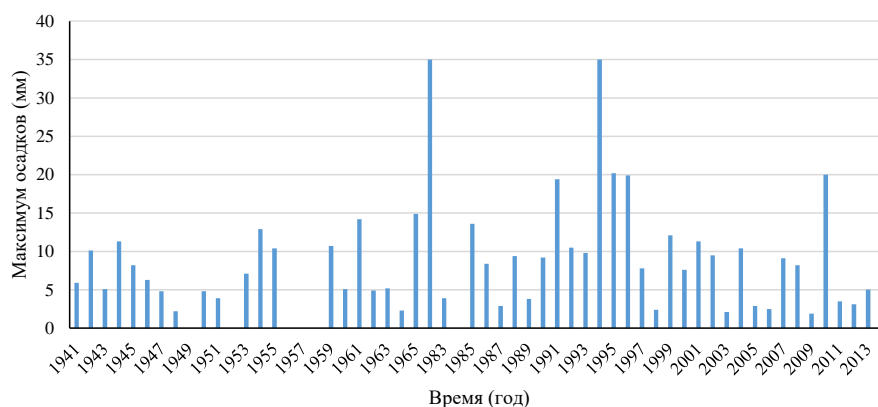


Рисунок 2.3 — Средние многолетние осадки для метеостанции Рас-эль-Накб за период (1941–2014 гг.)

Таблица 3 — Средние многолетние осадки для метеостанции Святая Екатерина за период (1934–2014 гг.) [68]

Год	1934	1935	1936	1937	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Осадки (мм)	31.6	7.2	9.3	77.5	18.9	12.2	12.9	4.8	2.4	2.1	10.9	7.1	7	10.7
Год	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Осадки (мм)	0.8	16.9	2.1	8.1	9.9	9.1	10.6	51.3	4.7	8.4	9.2	1.1	36.8	1.5
Год	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014			
Осадки (мм)	1.8	2.1	2.9	7.9	1.9	2.1	15	1.2	7.8	8.1	29.8			

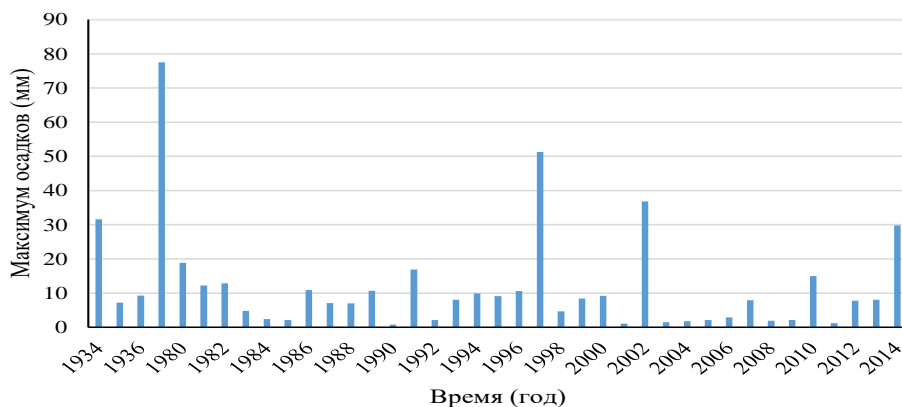


Рисунок 2.4 — Средние многолетние осадки для метеостанции Святая Екатерина за период (1934–2014 гг.)

Таблица 4 — Средние многолетние осадки для метеостанции Нувейба за период (1992–2014 гг.) [68]

Год	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Осадки (мм)	0	2.3	34.9	3.6	9.4	6.3	1.1	2.2	1.4	0.3	10.1	2.4
Год	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Осадки (мм)	4.1	0.9	0	10.9	1.1	0	16.8	2.1	2.6	5.6	8.1	

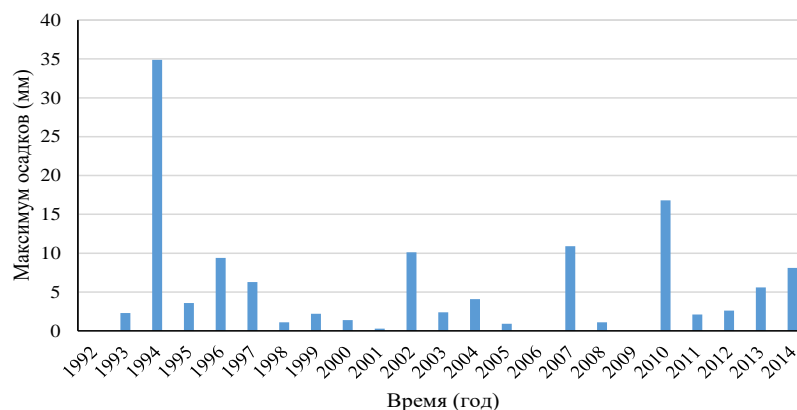


Рисунок 2.5 — Средние многолетние осадки для метеостанции Нувейба за период (1992–2014 гг.)

2.1.3 Расчеты стока

Метод числа кривых службы охраны почвы (SCS-CN) [95] использовался для получения годового объема паводка (глубины стока) с использованием

программного обеспечения системы моделирования водосборов (WMS 10.1) [48]. В различных исследованиях с помощью этого метода оценивался сток за счет данных об осадках [41, 53, 66, 97, 99]. Метод числа кривых службы охраны почвы (SCS-CN) в значительной степени зависит от безразмерных значений числа кривых, которые должны быть точно рассчитаны для получения надежных результатов. Оценка число кривой зависит от землепользования и гидрологической группы почвы. Номер взвешенной кривой для всего бассейна (CN_w) был рассчитан с использованием системы моделирования водосборов. Гидравлическая модель НЕС-1 преобразовывала данные об осадках в гидрограф стока (рис. 2.6–2.10) (таблицы 5–8). Зона воздействия каждой метеостанции определялась методом многоугольников Тиссена [93] (рис. 2.2). Данный метод используется для определения весов каждой метеостанции для соответствующей территории из общей площади Вади Ватир. В этом методе среднее количество осадков по площади рассчитывается по следующему уравнению [93]:

$$P = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^j A_j P_j , \quad (1)$$

где P — среднее количество осадков по площади; j — количество метеостанций; A_j — Зона влияния каждой метеостанции; P_j — Количество осадков, зафиксированных на метеостанции j ; A — площадь водосбора.

Числа кривых службы охраны почв (SCS-CN) обрабатывались для определения стока с помощью следующего уравнения [95]:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (P > 0.2S) , \quad (2)$$

где Q — объем прямого поверхностного стока (мощность прямого поверхностного стока в мм); P — сумма осадков (мм); S — максимальный потенциал бассейна почвой в (мм).

S вычислялась следующим образом:

$$S = \frac{25400}{CN_w} - 254 , \quad (3)$$

где CN_w — номер взвешенной кривой для всего бассейна.

CN_w определялся следующим образом:

$$CN_w = \frac{\sum(CN_i * A_i)}{A}, \quad (4)$$

где CN_i — номер кривой для каждого подбассейна; A_i — площадь каждого подбассейна; A — площадь всего бассейна.

Метод SCS-CN в зависимости от расчета времени задержки (время, необходимое стоку с определенного места в пределах площади водосбора, достичь точки ниже по течению). Уравнение для расчета времени задержки с использованием программы WMS выглядит следующим образом [48]:

$$T_{LAG} = C_t * (L * \frac{L_{ca}}{\sqrt{S}})^m, \quad (5)$$

где T_{LAG} — время задержка (час); C_t — коэффициент (1.2); L — длина водосбора (м); L_{ca} — Длина до центра водосбора (м); S — максимальное расстояние потока, уклон (м/м); m показательный коэффициент (0.38).

Эти параметры рассчитываются программой автоматически после разграничения подбассейнов.

Таблица 5 — Данные о расходе для юго-западной части водосбора

Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)
0	0	600	0	1200	92.284	1800	12.096	2400	0.165
15	0	615	0	1215	88.797	1815	10.912	2415	0.146
30	0	630	0	1230	85.465	1830	9.85	2430	0.128
45	0	645	0	1245	82.18	1845	8.901	2445	0.112
60	0	660	0	1260	79.04	1860	8.05	2460	0.097
75	0	675	0	1275	76.036	1875	7.275	2475	0.083
90	0	690	0	1290	73.059	1890	6.567	2490	0.071
105	0	705	0.142	1305	70.201	1905	5.919	2505	0.059
120	0	720	1.589	1320	67.682	1920	5.325	2520	0.049
135	0	735	4.01	1335	65.238	1935	4.779	2535	0.04
150	0	750	7.922	1350	62.864	1950	4.279	2550	0.031
165	0	765	12.924	1365	60.706	1965	3.854	2565	0.024
180	0	780	18.862	1380	58.64	1980	3.473	2580	0.018
195	0	795	26.537	1395	56.64	1995	3.13	2595	0.013
210	0	810	35.592	1410	54.787	2010	2.821	2610	0.009
225	0	825	46.458	1425	53.066	2025	2.544	2625	0.005
240	0	840	59.007	1440	51.414	2040	2.297	2640	0.002
255	0	855	72.551	1455	49.838	2055	2.071	2655	0.001
270	0	870	85.569	1470	48.387	2070	1.867	2670	0
285	0	885	97.994	1485	46.947	2085	1.684	2685	0
300	0	900	109.164	1500	45.505	2100	1.517	2700	0
315	0	915	118.685	1515	44.111	2115	1.366	2715	0
330	0	930	126.975	1530	42.679	2130	1.23	2730	0
345	0	945	132.997	1545	41.19	2145	1.108	2745	0
360	0	960	137.995	1560	39.649	2160	0.997	2760	0
375	0	975	141.822	1575	38.024	2175	0.897	2775	0
390	0	990	143.554	1590	36.286	2190	0.807	2790	0
405	0	1005	143.982	1605	34.465	2205	0.726	2805	0
420	0	1020	143.349	1620	32.589	2220	0.652	2820	0
435	0	1035	141.905	1635	30.659	2235	0.585	2835	0
450	0	1050	139.622	1650	28.703	2250	0.525	2850	0
465	0	1065	136.155	1665	26.77	2265	0.47	2865	0
480	0	1080	131.741	1680	24.867	2280	0.421	2880	0
495	0	1095	126.092	1695	22.996	2295	0.376	2895	0
510	0	1110	120.245	1710	21.184	2310	0.336	2910	0
525	0	1125	114.515	1725	19.455	2325	0.299	2925	0
540	0	1140	109.529	1740	17.808	2340	0.267	2940	0
555	0	1155	104.817	1755	16.246	2355	0.237	2955	0
570	0	1170	100.425	1770	14.77	2370	0.211	2970	0
585	0	1185	96.233	1785	13.383	2385	0.187	2985	0

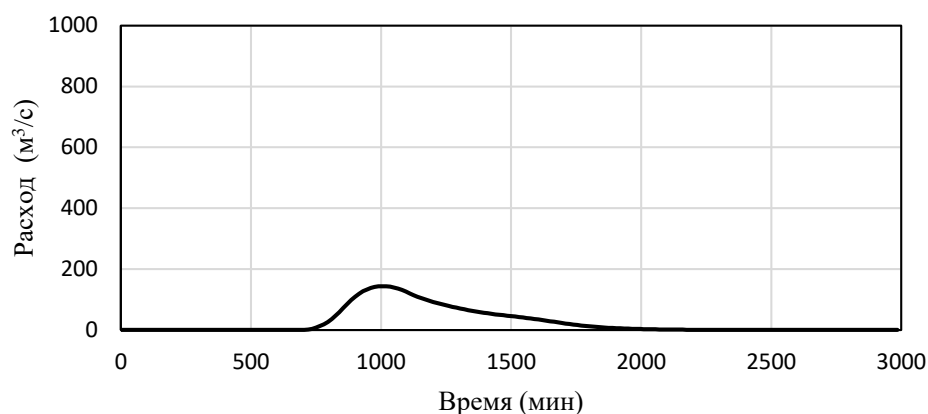


Рисунок 2.6 — Гидрограф стока для юго-западной части водосбора

Таблица 6 — Данные о расходе для южной части водосбора

Q (м ³ /с)	T (мин)	Q (м ³ /с)	T (мин)	Q (м ³ /с)	T (мин)	Q (м ³ /с)	T (мин)	Q (м ³ /с)	T (мин)
0	0	600	0	1200	309.126	1800	67.259	2400	2.887
15	0	615	0	1215	297.107	1815	63.439	2415	2.637
30	0	630	0	1230	284.595	1830	59.732	2430	2.408
45	0	645	0	1245	272.748	1845	56.136	2445	2.199
60	0	660	0	1260	261.451	1860	52.686	2460	2.007
75	0	675	0	1275	251.364	1875	49.402	2475	1.832
90	0	690	0	1290	241.863	1890	46.263	2490	1.672
105	0	705	0.082	1305	232.729	1905	43.262	2505	1.525
120	0	720	1.01	1320	223.93	1920	40.405	2520	1.39
135	0	735	2.519	1335	215.68	1935	37.71	2535	1.266
150	0	750	5.044	1350	208.096	1950	35.171	2550	1.153
165	0	765	8.236	1365	200.913	1965	32.766	2565	1.049
180	0	780	12.058	1380	193.976	1980	30.488	2580	0.954
195	0	795	16.914	1395	187.296	1995	28.356	2595	0.867
210	0	810	22.554	1410	180.742	2010	26.373	2610	0.787
225	0	825	29.552	1425	174.446	2025	24.524	2625	0.714
240	0	840	37.49	1440	168.534	2040	22.805	2640	0.648
255	0	855	46.346	1455	162.869	2055	21.215	2655	0.588
270	0	870	55.121	1470	157.454	2070	19.748	2670	0.533
285	0	885	63.831	1485	152.431	2085	18.396	2685	0.483
300	0	900	71.387	1500	147.666	2100	17.16	2700	0.438
315	0	915	78.375	1515	142.945	2115	15.904	2715	0.397
330	0	930	84.236	1530	138.39	2130	14.721	2730	0.36
345	0	945	89.189	1545	134.073	2145	13.625	2745	0.325
360	0	960	110.966	1560	129.897	2160	12.525	2760	0.294
375	0	975	167.804	1575	125.712	2175	11.44	2775	0.265
390	0	990	203.578	1590	121.682	2190	10.425	2790	0.239
405	0	1005	302.14	1605	117.755	2205	9.485	2805	0.214
420	0	1020	303.217	1620	113.84	2220	8.622	2820	0.191
435	0	1035	324.71	1635	109.936	2235	7.847	2835	0.17
450	0	1050	349.265	1650	106.119	2250	7.15	2850	0.151
465	0	1065	345.681	1665	102.322	2265	6.523	2865	0.133
480	0	1080	362.403	1680	98.482	2280	5.953	2880	0.117
495	0	1095	355.697	1695	94.639	2295	5.436	2895	0.102
510	0	1110	358.909	1710	90.815	2310	4.966	2910	0.089
525	0	1125	351.723	1725	86.926	2325	4.537	2925	0.076
540	0	1140	346.219	1740	82.992	2340	4.145	2940	0.063
555	0	1155	338.754	1755	79.05	2355	3.787	2955	0.051
570	0	1170	330.286	1770	75.113	2370	3.46	2970	0.037
585	0	1185	320.74	1785	71.175	2385	3.161	2985	0.026

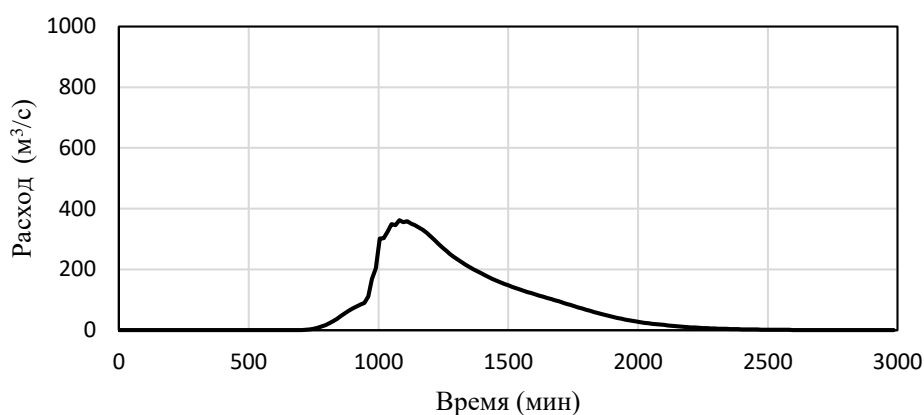


Рисунок 2.7 — Гидрограф стока для южной части водосбора

Таблица 7 — Данные о расходе для большей части водосбора

Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)
0	0	600	0	1200	741.106	1800	176.154	2400	12.373
15	0	615	0	1215	715.505	1815	167.077	2415	11.468
30	0	630	0	1230	697.27	1830	158.235	2430	10.631
45	0	645	0.002	1245	671.772	1845	149.689	2445	9.858
60	0	660	0.008	1260	650.988	1860	141.401	2460	9.125
75	0	675	0.017	1275	628.391	1875	133.39	2475	8.425
90	0	690	0.078	1290	606.933	1890	125.737	2490	7.772
105	0	705	0.315	1305	586.603	1905	118.435	2505	7.168
120	0	720	1.24	1320	565.548	1920	111.413	2520	6.61
135	0	735	8.131	1335	545.689	1935	104.727	2535	6.093
150	0	750	24.623	1350	525.663	1950	98.351	2550	5.614
165	0	765	37.921	1365	507.309	1965	92.322	2565	5.171
180	0	780	44.622	1380	489.52	1980	86.628	2580	4.766
195	0	795	48.875	1395	472.715	1995	81.249	2595	4.394
210	0	810	54.479	1410	456.524	2010	76.175	2610	4.052
225	0	825	65.634	1425	441.062	2025	71.413	2625	3.738
240	0	840	81.079	1440	426.247	2040	66.95	2640	3.449
255	0	855	105.639	1455	412.291	2055	62.704	2655	3.181
270	0	870	133.067	1470	399.044	2070	58.693	2670	2.933
285	0	885	158.982	1485	386.356	2085	54.948	2685	2.704
300	0	900	182.47	1500	374.253	2100	51.466	2700	2.491
315	0	915	203.487	1515	362.593	2115	48.219	2715	2.294
330	0	930	236.484	1530	351.218	2130	45.175	2730	2.112
345	0	945	277.378	1545	340.178	2145	42.234	2745	1.945
360	0	960	313.971	1560	329.661	2160	39.473	2760	1.791
375	0	975	434.232	1575	319.517	2175	36.898	2775	1.65
390	0	990	515.298	1590	309.54	2190	34.426	2790	1.519
405	0	1005	580.269	1605	299.702	2205	32.058	2805	1.396
420	0	1020	668.375	1620	290.076	2220	29.841	2820	1.283
435	0	1035	721.04	1635	280.499	2235	27.778	2835	1.18
450	0	1050	709.029	1650	270.98	2250	25.832	2850	1.086
465	0	1065	768.076	1665	261.509	2265	24.009	2865	1
480	0	1080	791.995	1680	252.09	2280	22.332	2880	0.92
495	0	1095	789.205	1695	242.605	2295	20.769	2895	0.846
510	0	1110	817.83	1710	233.059	2310	19.312	2910	0.778
525	0	1125	814.119	1725	223.525	2325	17.963	2925	0.714
540	0	1140	794.701	1740	213.975	2340	16.705	2940	0.656
555	0	1155	792.77	1755	204.369	2355	15.503	2955	0.601
570	0	1170	773.513	1770	194.823	2370	14.382	2970	0.55
585	0	1185	756.27	1785	185.405	2385	13.341	2985	0.502

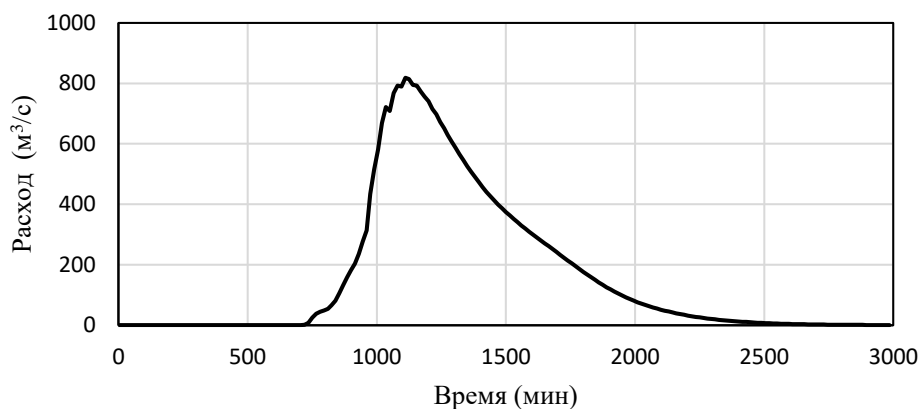


Рисунок 2.8 — Гидрограф стока для большей части водосбора

Таблица 8 — Данные о расходе на выходе с площади водосбора

Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)	Q (м³/с)	T (мин)
0	0	600	0	1200	741.106	1800	176.154	2400	12.373
15	0	615	0	1215	715.505	1815	167.077	2415	11.468
30	0	630	0	1230	697.27	1830	158.235	2430	10.631
45	0	645	0.002	1245	671.772	1845	149.689	2445	9.858
60	0	660	0.008	1260	650.988	1860	141.401	2460	9.125
75	0	675	0.017	1275	628.391	1875	133.39	2475	8.425
90	0	690	0.078	1290	606.933	1890	125.737	2490	7.772
105	0	705	0.315	1305	586.603	1905	118.435	2505	7.168
120	0	720	1.24	1320	565.548	1920	111.413	2520	6.61
135	0	735	8.131	1335	545.689	1935	104.727	2535	6.093
150	0	750	24.623	1350	525.663	1950	98.351	2550	5.614
165	0	765	37.921	1365	507.309	1965	92.322	2565	5.171
180	0	780	44.622	1380	489.52	1980	86.628	2580	4.766
195	0	795	48.875	1395	472.715	1995	81.249	2595	4.394
210	0	810	54.479	1410	456.524	2010	76.175	2610	4.052
225	0	825	65.634	1425	441.062	2025	71.413	2625	3.738
240	0	840	81.079	1440	426.247	2040	66.95	2640	3.449
255	0	855	105.639	1455	412.291	2055	62.704	2655	3.181
270	0	870	133.067	1470	399.044	2070	58.693	2670	2.933
285	0	885	158.982	1485	386.356	2085	54.948	2685	2.704
300	0	900	182.47	1500	374.253	2100	51.466	2700	2.491
315	0	915	203.487	1515	362.593	2115	48.219	2715	2.294
330	0	930	236.484	1530	351.218	2130	45.175	2730	2.112
345	0	945	277.378	1545	340.178	2145	42.234	2745	1.945
360	0	960	313.971	1560	329.661	2160	39.473	2760	1.791
375	0	975	434.232	1575	319.517	2175	36.898	2775	1.65
390	0	990	515.298	1590	309.54	2190	34.426	2790	1.519
405	0	1005	580.269	1605	299.702	2205	32.058	2805	1.396
420	0	1020	668.375	1620	290.076	2220	29.841	2820	1.283
435	0	1035	721.04	1635	280.499	2235	27.778	2835	1.18
450	0	1050	709.029	1650	270.98	2250	25.832	2850	1.086
465	0	1065	768.076	1665	261.509	2265	24.009	2865	1
480	0	1080	791.995	1680	252.09	2280	22.332	2880	0.92
495	0	1095	789.205	1695	242.605	2295	20.769	2895	0.846
510	0	1110	817.83	1710	233.059	2310	19.312	2910	0.778
525	0	1125	814.119	1725	223.525	2325	17.963	2925	0.714
540	0	1140	794.701	1740	213.975	2340	16.705	2940	0.656
555	0	1155	792.77	1755	204.369	2355	15.503	2955	0.601
570	0	1170	773.513	1770	194.823	2370	14.382	2970	0.55
585	0	1185	756.27	1785	185.405	2385	13.341	2985	0.502

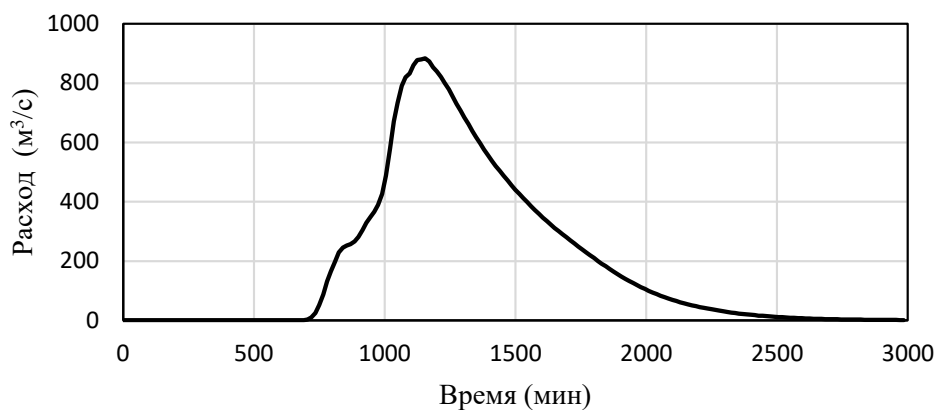


Рисунок 2.9 — Гидрограф стока на выходе с площади водосбора

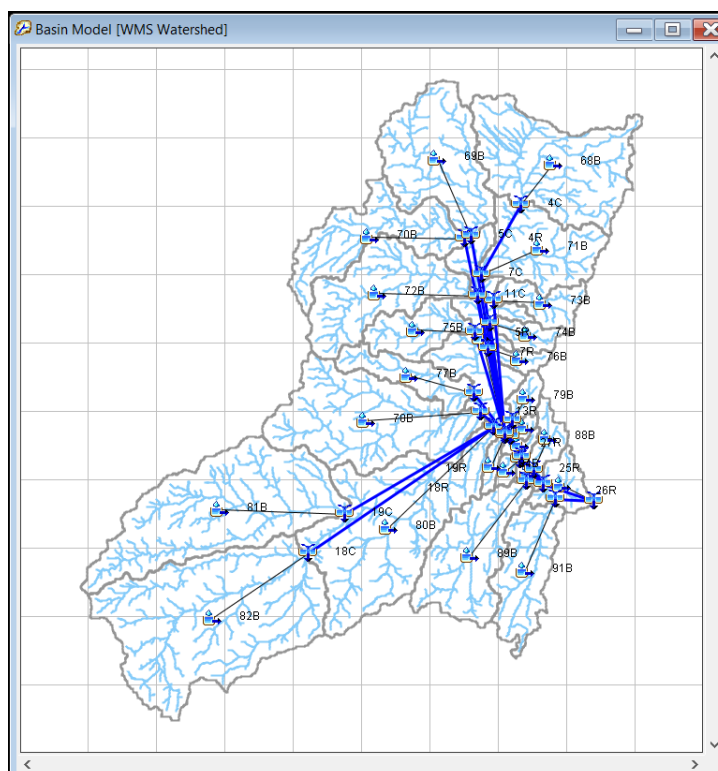


Рисунок 2.10 — Гидрологическая модель площади водосбора Вади-Ватир (WMS, НЕС-1)

2.1.4 Выбор и подготовка тематического слоя

Тематические слои, используемые в этом анализе, были выбраны из-за их доступности данных и научной достоверности. Кроме того, они были рекомендованы продовольственной и сельскохозяйственной организацией (FAO) и использовались во многих предыдущих исследованиях [23, 61, 66, 97]. Одиннадцать тематических слоев, выбранных для ВЛК, включают глубину стока, уклон (%), площадь бассейна, максимальное расстояние потока, далее (МРП), топографический индекс влажности, плотность дренажа, частотную плотность линеамента, землепользование, номер инфильтрации, расстояние до населенных пунктов и общин бедуинов, а также расстояние до дорог.

Тематические слои были подготовлены в ArcGIS 10.5 [50] для процесса выбора участков. Очерчивание границ Вади-Ватира было выполнено с использованием ЦМР (Shuttle Radar Topography Mission). Цифровая модель рельефа использовалась для создания карты уклонов, карты топографического индекса влажности и порядка водотоков. Затем порядки водотоков использовались для расчета плотности дренажа в районе исследований.

Коррекция радиометрических и геометрических ошибок снимков Landsat 8 применялась в среде ГИС. Для создания карты землепользования была проведена контролируемая классификация. Точность карты землепользования была повышена и проверена с помощью спутниковых снимков. Водосбор был разделен на подбассейнов в соответствии с разделением, сделанным научно-исследовательским институтом водных ресурсов Египта. Площадь бассейна, максимальное расстояние потока и количество инфильтрации были рассчитаны для каждого подбассейна, а затем интерполированы для всего водосбора в среде ГИС. Для подготовки тематического слоя для частотной плотности линейного элемента использовались ENVI 5.3 [49], Geomatica 2017 [80] и ArcGIS 10.5 [50].

Все тематические слои и их особенности были переклассифицированы, и им были присвоены веса в зависимости от степени их пригодности в качестве участков СДВ, как указано в таблице 9. Веса и критерии были приняты и обновлены из предыдущих исследований, чтобы устранить расхождения в присвоении весов [23, 25, 61, 66, 84, 97, 99].

Переменные в логическом наложении понятны (истина или ложь). Использование логических параметров имеет решающее значение для исключения непригодных местоположений, которые были выбраны с использованием метода ВЛК. Для улучшения пригодности участка были выбраны три слоя ограничений: расстояние до застроенных территорий и общин бедуинов, расстояние до разломов и расстояние до дорог. В таблице 10 показаны логические критерии и их обоснование.

Таблица 9 — Веса и обоснования выбранных критериев и классификации их признаков

Критерии	Вес слоя	критерии выбора класса объектов	Критерие пригодности	Вес класса
Глубина стока ¹ (мм)	9	6.487–10.00	Низкий	7
		10.01–12.05	Умеренный	8
		12.06–13.25	Высокий	9
Уклон ² (%)	8	<5	Высокий	8
		≥5 ≤10	Умеренный	6
		>10	Низкий	4
Площадь бассейна ³ (км ²)	7	9.33–84.71	Низкий	3
		84.72–226.51	Умеренный	5
		226.52–527.70	Высокий	7
Максимальное расстояние потока ⁴ (км)	6	6.18–15.10	Низкий	2
		15.20–29.90	Умеренный	4
		29.91–48.50	Высокий	6
Топографический индекс влажности ⁵	6	2.47–6.88	Низкий	2
		6.89–10.57	Умеренный	4
		10.58–25.4	Высокий	7
Плотность дренажа ⁶	5	0.04–1.86	Низкий	3
		1.87–3.67	Умеренный	5
		3.68–5.49	Высокий	8
Частотная плотность линеамента ⁷	4	0.00–0.52	Высокий	6
		0.53–1.05	Умеренный	4
		1.06–1.57	Низкий	2
Землепользование / почвенный покров ⁸	4	Поселения	Ограниченный	0
		Пустые	Умеренный	3
		Водные фонды	Ограниченный	0
		Сельскохозяйственные	Ограниченный	0
		Временные водотоки	Высокий	7

¹ Сток является показателем количества дождевой воды, которое может быть собрано. Поэтому он является основным фактором любой системы сбора дождевой воды [66].

² Аль-адамат и др. [25] уточнили, что участки с уклоном >5% не рекомендуются для аккумуляции дождевой воды из-за неравномерного распределения стока и большого объема требуемых земляных работ, которые являются дорогостоящими.

³ Значительное влияние на стоковые процессы оказывает площадь бассейна. Следовательно, это важный параметр при оценке потенциала СДВ. Увеличение площади бассейна увеличивает количество собранных дождевых осадков и пиковый сток паводков [81].

⁴ Максимальное расстояние потока является важным фактором в определении потенциала накопления дождевых вод, и более высокие значения максимального расстояния потока связаны с более высоким потенциалом сбора дождевой воды [41].

⁵ Более высокие значения топографического индекса влажности показывают большую площадь вклада в сочетании с низким уклоном, что указывает на более высокий потенциал концентрации воды и наоборот [31].

⁶ Водотоки являются основным источником поверхностных вод на любом водосборе. Плотность дренажа зависит от порядков водотока. Адхам и др. [24] заявили, что увеличение плотности дренажа снижает инфильтрацию и проницаемость.

⁷ Анализ частотной плотности линеаментов необходим для определения участков СДВ, поскольку стыки и трещины увеличивают скорость инфильтрации почвы. Следовательно, увеличение частотной плотности линеамента снижает потенциал аккумуляции дождевой воды [92].

⁸ Кройс и Шульте [63] обсудили, что землепользование накопления дождевых вод является одним из основных факторов, влияющих на сток и пригодность сбора воды. Сбор дождевой воды ограничен в застроенных и сельскохозяйственных районах по соображениям безопасности и экономическим соображениям, соответственно.

Номер инфильтрации	3	0.58–0.99	Высокий	5
		1.00–1.14	Умеренный	4
		1.15–1.35	Низкий	2
Расстояние до населенных пунктов и общины бедуинов ⁹ (м)	3	<500	Низкий	2
		$\geq 500 < 2,000$	Высокий	5
		$\geq 2,000$	Умеренный	3
Расстояние до дорог ¹⁰ (м)	2	<1,000	Высокий	5
		$\geq 1,000 < 1,500$	Умеренный	3
		$\geq 1,500$	Низкий	2

Таблица 10 — Логические критерии и их обоснования

Критерии	Ранжирование	Пригодность	Вес
Расстояние до населенных пунктов и общины бедуинов ¹¹ (м)	<250	Неподходящий	0
	>250	Подходящий	1
Расстояние до разломов ¹² (м)	<250	Неподходящий	0
	>250	Подходящий	1
Расстояние до дорог ¹³ (м)	<250	Неподходящий	0
	>250	Подходящий	1

2.1.5 Многокритериальный анализ

Пространственные данные в качестве входных включаются и преобразуются в растровый формат в качестве выходных данных с помощью многокритериального анализа. Шкала Саати [84] использовалась для преобразования качественных данных по каждой теме в количественные значения путем построения матрицы парных сравнений. Процесс аналитической иерархии Саати применялся для присвоения и нормализации весов критериев. Коэффициент согласованности, далее (КС), предложенный Виндом и Саати [112], был рассчитан для проверки соответствия весов, присвоенных различным темам.

⁹ Местное население находится под угрозой затопления, когда аккумуляции дождевой воды находится вблизи населенных пунктов. Доступность также будет проблемой, если СДВ находится слишком далеко от застроенных территорий. В результате предпочтение отдается умеренному расстоянию [25].

¹⁰ Дороги имеют большое социально-экономическое значение для местного населения в любом регионе. Жители могут перегонять свои грузовики и автоцистерны с одного места на другое по этим дорогам, перегоняя скот в поисках воды и трав [25].

¹¹ В целях безопасности из выборки исключены населенные пункты [25].

¹² Разломы выступают камнем преткновения при установке системы сбора дождевой воды. Область разлома должна быть исключена из процесса выбора площадки для СДВ [25].

¹³ Дороги были исключены, чтобы избежать любых потенциальных конфликтов между расширением дороги и сооружениями хранения осадков [66].

Следующее уравнение демонстрирует расчет коэффициента согласованности (КС) [112]:

$$КС = \frac{CI}{RCI}, \quad (6)$$

где CI — индекс согласованности; RCI — индекс случайной согласованности.

CI можно получить следующим образом:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (7)$$

где λ_{max} — существенное собственное значение, определяемое методом собственных векторов; n — общее количество слоев (критериев).

Винд и Саати [112] уточнили, что значение коэффициента согласованности (КС) должно быть $<0,1$; в противном случае назначенные веса должны быть скорректированы для сохранения согласованности.

2.1.6 Пригодность для сбора дождевой воды

Метод взвешенной линейной комбинации — это правило принятия решений для создания сводных карт с использованием ГИС. Метод ВЛК широко применяется для картографирования пригодности ГИС и многокритериального анализа. Метод ВЛК был объединен с логическими факторами, чтобы исключить некоторые особенности из процесса выбора площадки и создания карты пригодности. Используемое уравнение может быть выражено следующим образом:

$$\text{ИПСДВ} = \text{СТ}_{\text{нв}} \cdot \text{СТ}_{\text{ф}} + \text{УК}_{\text{нв}} \cdot \text{УК}_{\text{ф}} + \text{ПБ}_{\text{нв}} \cdot \text{ПБ}_{\text{ф}} + \text{МРП}_{\text{нв}} \cdot \text{МРП}_{\text{ф}} + \text{ТИВ}_{\text{нв}} \cdot \text{ТИВ}_{\text{ф}} + \text{ПД}_{\text{нв}} \cdot \text{ПД}_{\text{ф}} + \text{ЧПЛ}_{\text{нв}} \cdot \text{ЧПЛ}_{\text{ф}} + \text{ЗП}_{\text{нв}} \cdot \text{ЗП}_{\text{ф}} + \text{НФ}_{\text{нв}} \cdot \text{НФ}_{\text{ф}} + \text{Брос}_{\text{нв}} \cdot \text{Брос}_{\text{ф}} + \text{Дрос}_{\text{нв}} \cdot \text{Дрос}_{\text{ф}}, \quad (8)$$

где ИПСДВ — индекс потенциала сбора дождевой воды; $\text{СТ}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы стока; $\text{СТ}_{\text{ф}}$ — вес признака темы стока; $\text{УК}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы уклона; $\text{УК}_{\text{ф}}$ — вес признака темы уклона; $\text{ПБ}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы площади бассейна; $\text{ПБ}_{\text{ф}}$ — вес признака темы площади бассейна; $\text{МРП}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы максимальное

расстояние потока; MRP_{ϕ} — вес признака темы максимальное расстояние потока; TIB_{HB} — нормализованный вес темы топографический индекс влажности; TIB_{ϕ} — вес признака темы топографический индекс влажности; PL_{HB} — нормализованный вес темы плотности дренажа; PL_{ϕ} — вес признака темы плотности дренажа; $ЧПЛ_{HB}$ — нормализованный вес темы частотной плотности линеамента; $ЧПЛ_{\phi}$ — вес признака темы частотной плотности линеамента; $ЗП_{HB}$ — нормализованный вес темы землепользования; $ЗП_{\phi}$ — вес признака темы землепользования; $НФ_{HB}$ — нормализованный вес темы номер фильтрации; $НФ_{\phi}$ — вес признака темы номер фильтрации; $Брос_{HB}$ — нормализованный вес расстояния до населенных пунктов и темы бедуинских общин; $Брос_{\phi}$ — вес признака расстояния до населенных пунктов и темы бедуинских общин; $Дрос_{HB}$ — нормализованный вес темы расстояния до дорог; $Дрос_{\phi}$ — вес признака темы расстояния до дорог.

Уравнение (8) составляет растровую карту, показывающую пригодность области исследования для сбора дождевой воды. ИПСДВ представляет собой безразмерное значение, полученное из уравнения (8). Значения ИПСДВ подразделяются на пять категорий для определения пригодности земли аккумуляции дождевой воды для Вади-Ватир. Этот метод использовался в различных исследованиях и доказал свою эффективность [23, 25, 61, 66, 84, 99]. Логические критерии, классифицированные как неподходящие для накопления дождевых вод, были объединены в один слой ограничений. Этот слой был объединен с выходным слоем метода взвешенной линейной комбинации для создания окончательной карты пригодности СДВ.

2.1.7 Локализация оптимальных площадок для сооружений сбора дождевой воды

Глубина депрессии вычисляется путем вычитания исходной цифровой модели рельефа из заполненной ЦМР. Глубина депрессии и выходные слои из взвешенной линейной комбинации и логических критериев были объединены. Сооружения хранения осадков рекомендуются для участков с прилегающими

депресссионными зонами и высокой пригодностью для СДВ [66]. Топография, землепользование и характеристики почвы являются основными параметрами для определения местоположения сооружения для метода логического анализа. Применяемые критерии выбора места сооружения подробно описаны в таблице 11. ГИС использовалась для создания буферной зоны (50 м) вокруг водотоков второго и третьего порядка, чтобы определить подходящие места для перколяционных (фильтрационных) резервуаров и накопительных плотин [61, 66, 97]. На рис. 2.11 представлена блок-схема применяемой методики.

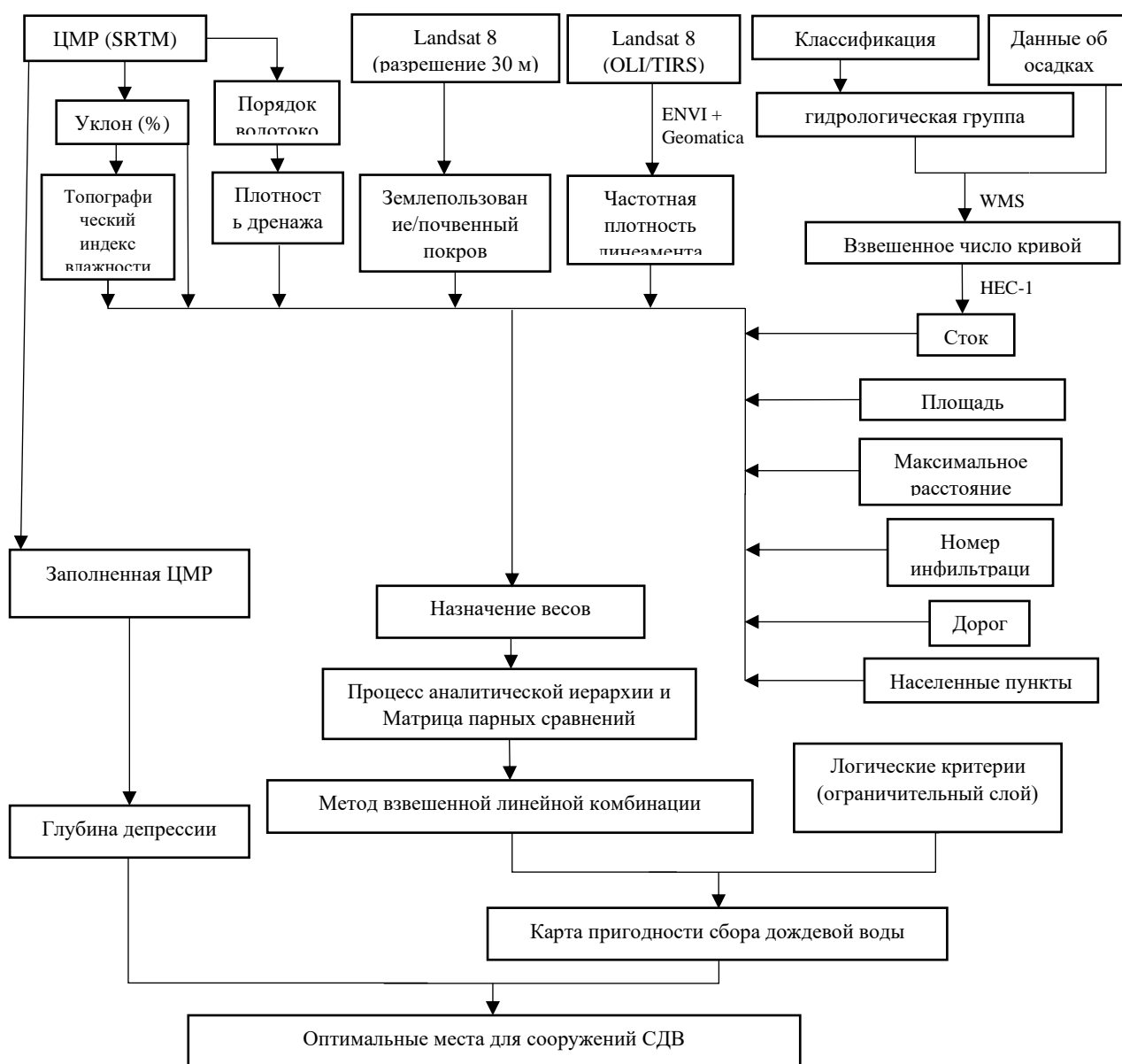


Рисунок 2.11 — Блок-схема применяемой методологии

Таблица 11 — Критерии выбора места строительства сооружений сбора дождевой воды (СДВ) [97]

Критерии	Фермерский пруд	Перколяционный резервуар (на земле)	Перколяционный резервуар (вдоль водотоков)	Накопительная плотина
Земельный уклон	<3%	<3%	<5%	<15%
Землепользование	Сельское хозяйство	Пустошь и деградированный лес	-	-
Текстура почвы	Мелкий	Крупный	Крупный	Мелкий
Порядок водотоков	-	-	2-й и 3-й порядок	2-й и 3-й порядок

2.2 Результаты и анализ

2.2.1 Тематические слои для картирования пригодности сбора дождевой воды

Ниже представлены тематические слои, выбранные на основе их эффективности для определения пригодности СДВ.

2.2.1.1 Карта уклонов

Цифровая модель рельефа (Shuttle Radar Topography Mission) использовался для создания карты уклонов в среде ГИС. Уклоны в исследуемой зоне сильно варьируют от пологих до очень крутых. Процент уклона делится на три части: легкий (<5%), умеренный (от 5% до 10%) и крутой (>10%) (рис. 2.12). Большая часть водосбора относится к категории крутых уклонов из-за изрезанности водосбора (2250 км² или 63%). Эта часть наименее пригодна для аккумуляции дождевой воды. Кроме того, пологие и умеренные уклоны имеют площадь покрытия 680 км² (19%) и 650 км² (18%), соответственно. Согласно Адхам и др. [24], уклон менее 5% является наиболее подходящим для СДВ. Таким образом, согласно карте уклонов, 19% площади исследований хорошо подходят для накопления дождевых вод.

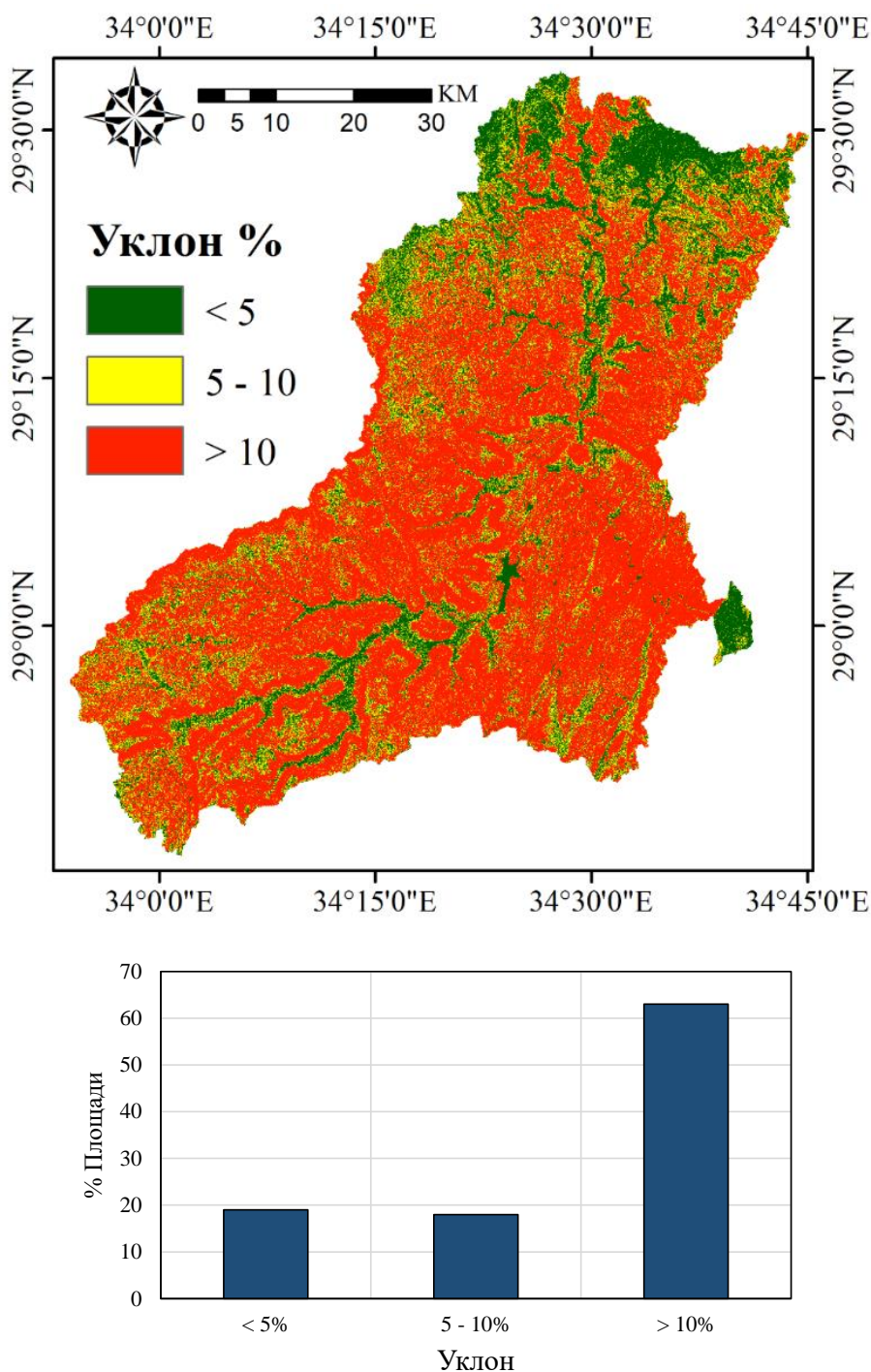


Рисунок 2.12 — Карта и гистограмма уклонов

2.2.1.2 Карта землепользования / почвенного покрова

Карта землепользования была создана по снимкам Landsat 8 с разрешением 30 м. Землепользование Вади-Ватир делится на пять категорий: поселения, пустые, водные фонды, сельскохозяйственные, и временные водотоки. Как показано на рис. 2.13, большая часть района исследований представляет собой пустую землю с площадью покрытия 3330 км² (93%). Общая площадь водотоков

составляет 224 км² (6,28%), тогда как площади сельскохозяйственных, поселений и водных фондов составляют 18 км² (0,5%), 7,3 км² (0,2%) и 0,7 км² (0,02%) соответственно. Карта землепользования была усовершенствована и проверена по спутниковым снимкам. Водотоки лучше всего подходят для аккумуляции дождевой воды, а пустая земля подходит умеренно. Судя по карте землепользования/почвенного покрова, 99% водосбора пригодно для СДВ.

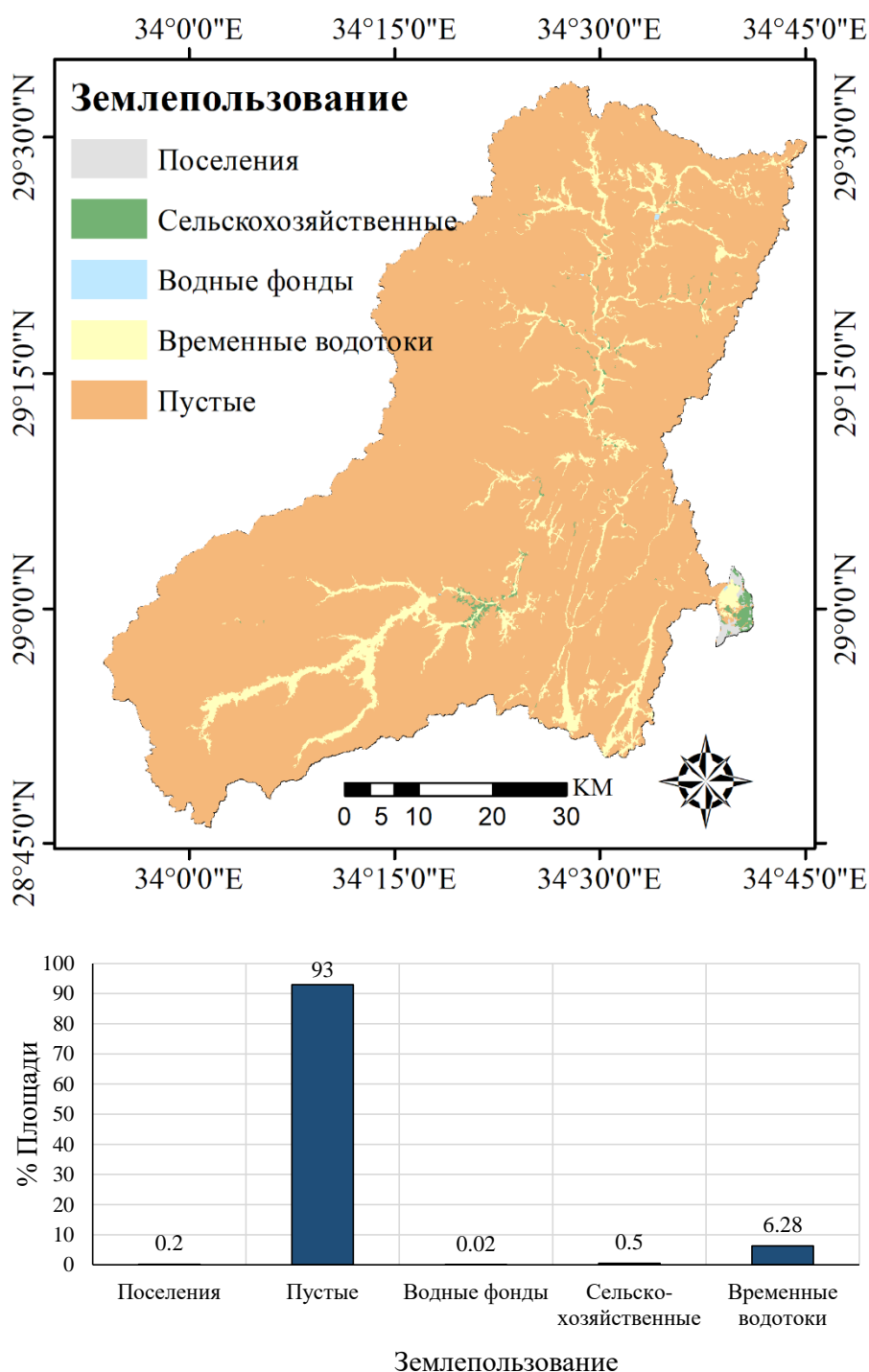


Рисунок 2.13 — Карта и гистограмма землепользования/почвенного покрова

2.2.1.3 Карта стока

Сток является основным критерием, определяющим применимость территории для накопления дождевых вод, так как чем выше глубина стока, тем больше пригодность СДВ. Для создания карты гидрологической группы почв использовалась карта классификации почв. Карты землепользования и гидрологической группы почв использовались для получения CN_w с использованием программного обеспечения WMS. Как показано на рис. 2.14 и 2.15, глубина стока (мм) делится на три класса: низкий (6,50–10,00), умеренный (10,01–12,05) и высокий (12,06–13,25). Максимальная глубина стока 13,25 мм, минимальная 6,5 мм. Наибольшие глубины стока приурочены к северной и южной частям изучаемой территории. Самые низкие глубины находятся в середине.

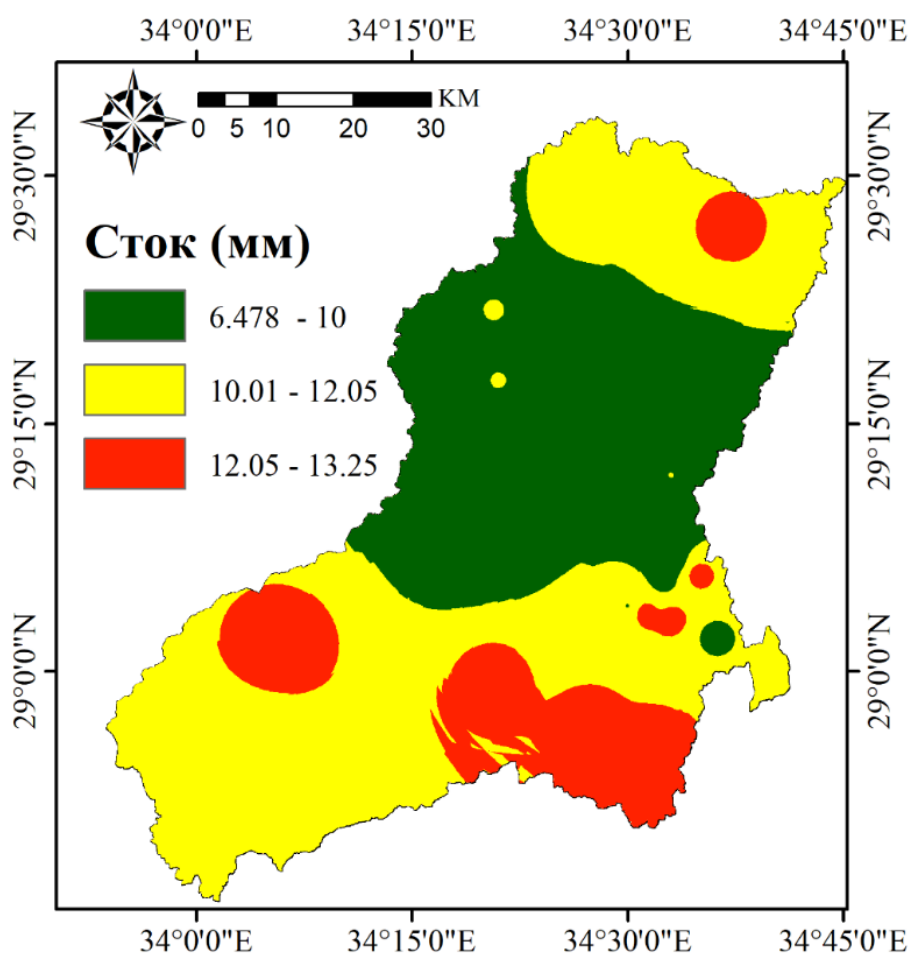


Рисунок 2.14 — Карта стока

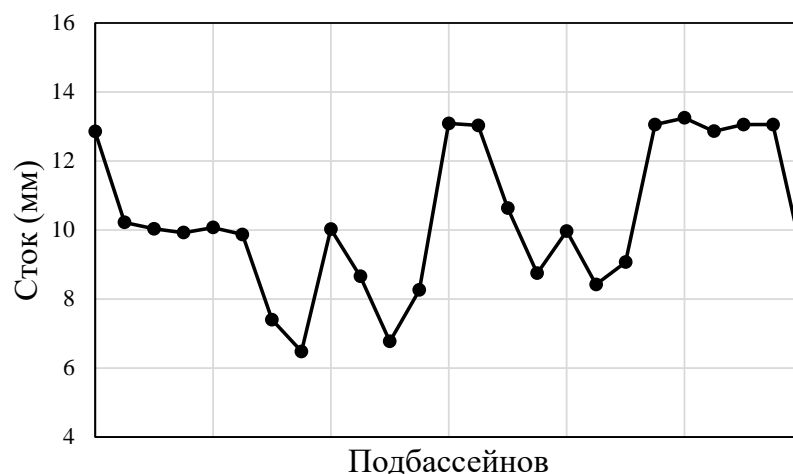


Рисунок 2.15 — Глубина стока для каждого подбассейна

2.2.1.4 Карта площадь бассейна

Площадь бассейна является важным фактором для СДВ. Увеличение площади бассейна увеличивает объем собранного дождя, что приводит к более высоким пиковым стокам паводков. Площадь каждого подбассейна была рассчитана и интерполирована с помощью ArcGIS. Площадь бассейна подразделяется на три категории: низкая (9,3–84,7) км², умеренная (84,7–226,5) км² и высокая (226,5–527,7) км². Высокие участки котловины находятся в юго-западной части изучаемой территории и небольшой участок в северной части, а пониженные — в восточной части (рис. 2.16).

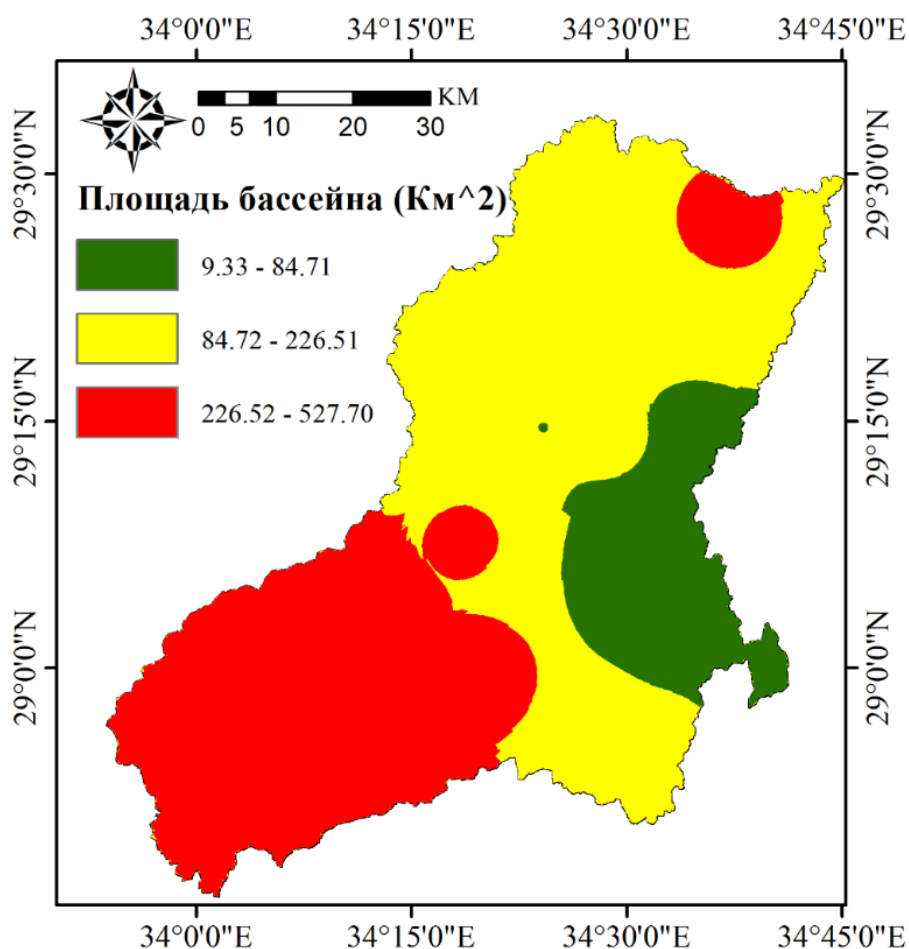


Рисунок 2.16 — Карта площадь бассейна

2.2.1.5 Карта максимального расстояния потока

Значения максимального расстояния потока (МРП) были рассчитаны для каждого подбассейна с использованием программного обеспечения WMS. Известно, что чем выше МРП, тем выше потенциал сбора дождевой воды. Как показано на рис. 2.17, максимальное расстояние потока делится на три категории. Самые высокие значения МРП отмечаются вдоль западной стороны водосбора, а самые низкие – в середине восточного участка. Результаты максимального расстояния потока тесно связаны с площадью бассейна, что продемонстрировано на картах двух тематических слоев.

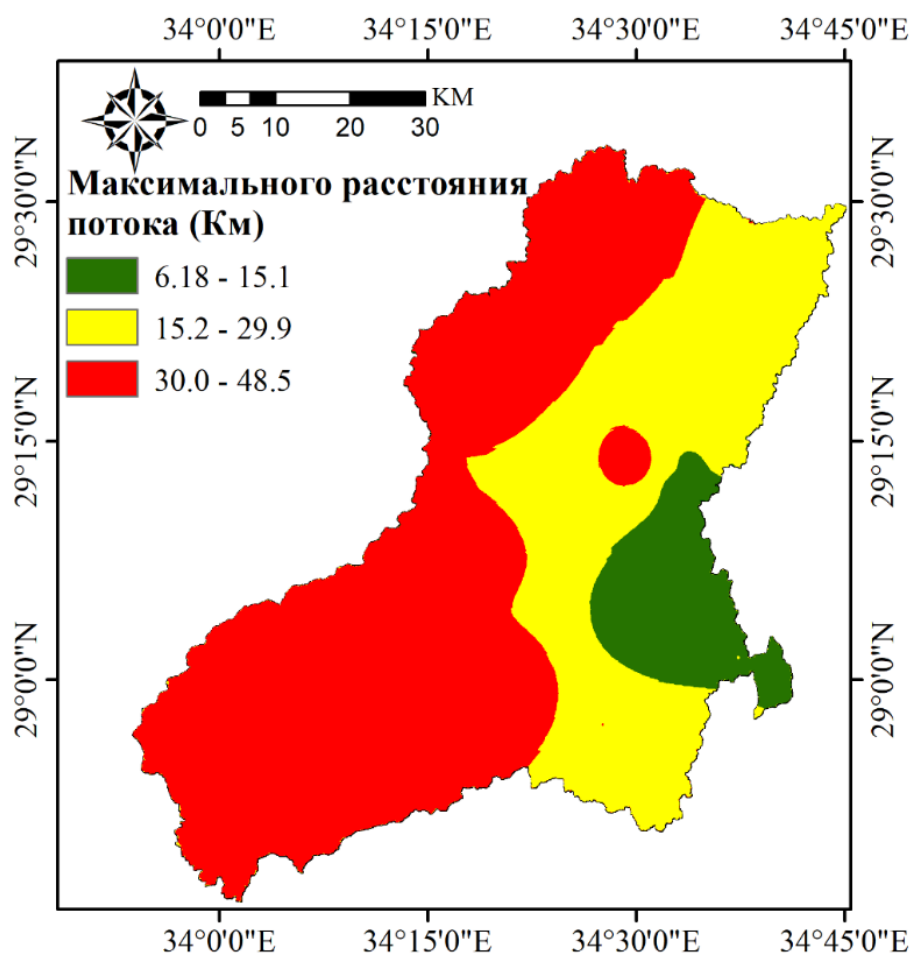


Рисунок 2.17 — Карта максимального расстояния потока

2.2.1.6 Карта плотности дренажа

Плотность дренажа Вади-Ватир была оценена с использованием цифровой модели рельефа (Shuttle Radar Topography Mission) путем определения порядков водотоков в среде ГИС. Плотность дренажа является важным фактором для пригодности СДВ и выбора лучших площадок для хранения осадков. Увеличение плотности дренажа приводит к увеличению образования стока [72]. Плотность дренажа области исследований делится на три класса, как показано на рис. 2.18. Значения плотности дренажа для 1,619 км² и 1,850 км² водосбора классифицируются как низкие и умеренные соответственно. Только 111 км² Вади-Ватир имеют высокие значения плотности дренажа, что очень подходит для аккумуляции дождевой воды.

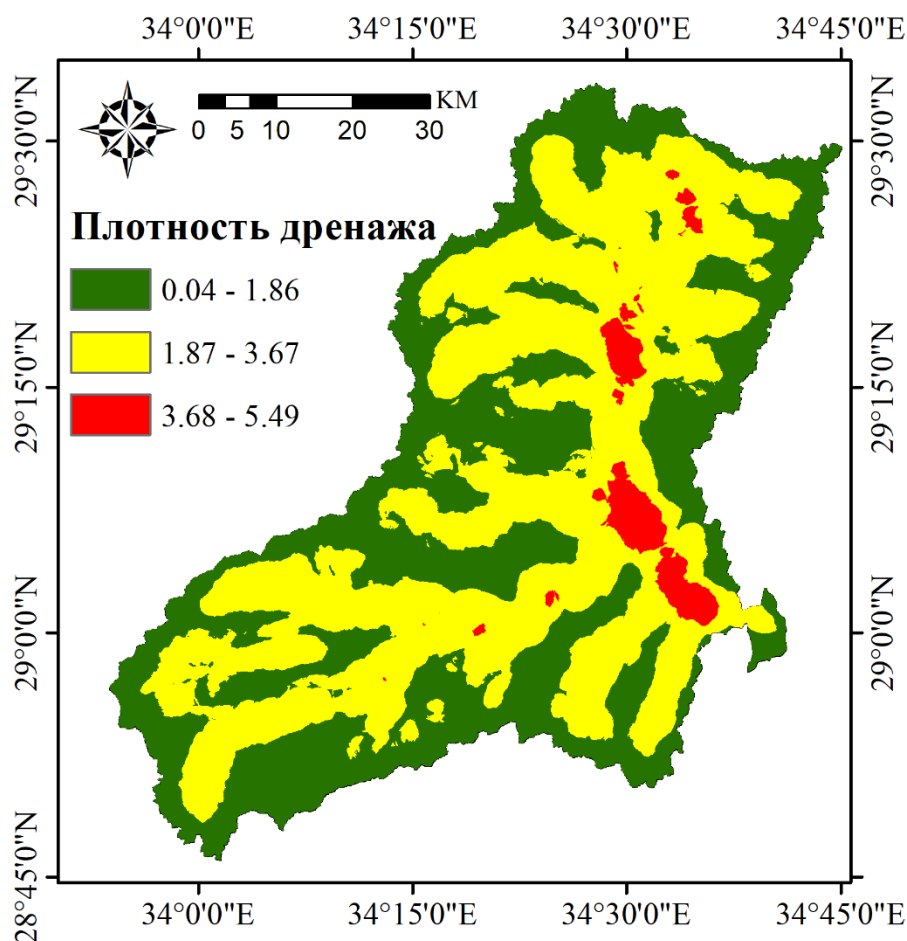


Рисунок 2.18 — Карта плотности дренажа

2.2.1.7 Карта топографического индекса влажности

Карта топографического индекса влажности была сгенерирована из карты склонов с использованием инструментов пространственного анализа в ArcGIS. Более высокие значения топографического индекса влажности указывают на высокую вероятность концентрации воды и, следовательно, на высокий потенциал сбора дождевой воды [31]. Как показано на рис. 2.19, значения топографического индекса влажности делятся на три класса: низкий (2,47–6,88) (63%), умеренный (6,89–10,60) (30%) и высокий (10,61–25,4) (7%). Высокие значения топографического индекса влажности являются наиболее подходящими для СДВ.

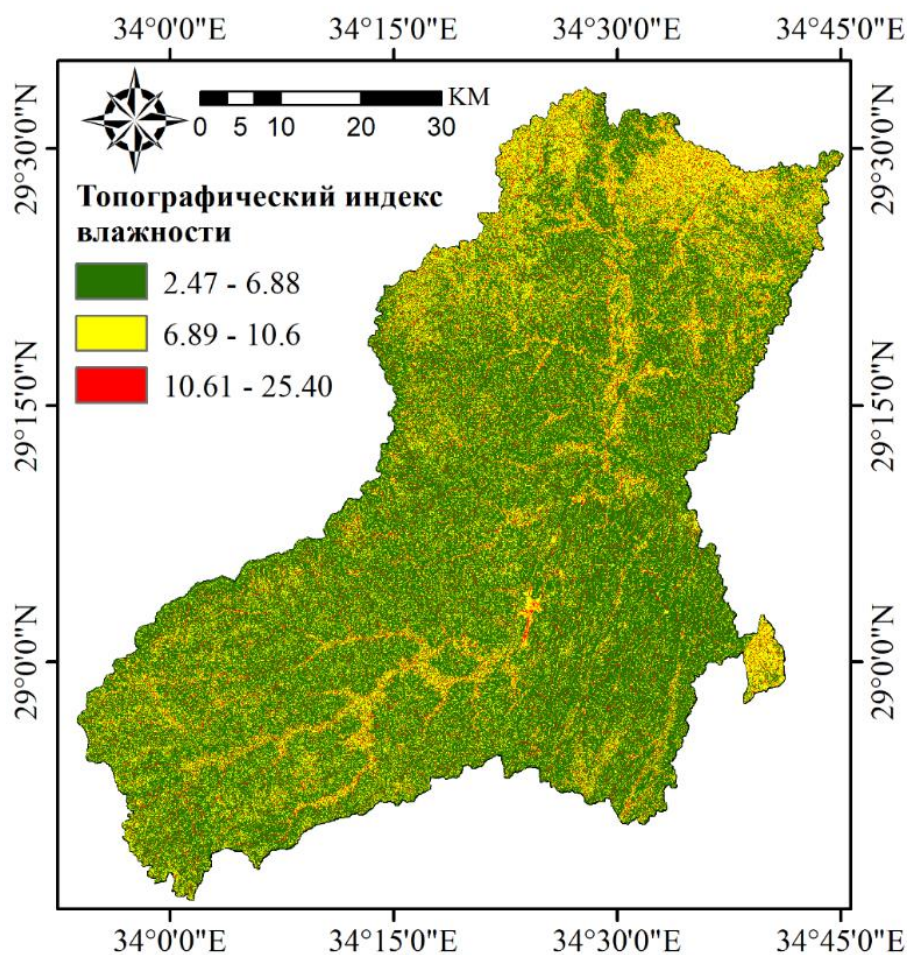


Рисунок 2.19 — Карта топографического индекса влажности

2.2.1.8 Карта номера инфильтрации

Номер инфильтрации зависит главным образом от распределения водотоков водосбора. Номер инфильтрации является произведением частоты водотока и плотности дренажа, тогда как высокие значения номера инфильтрации указывают на низкий потенциал для СДВ. Большая часть изучаемой территории имеет высокие значения номера инфильтрации. Умеренные и низкие значения имеют относительно небольшие площади в средней и южной частях водосбора (рис. 2.20).

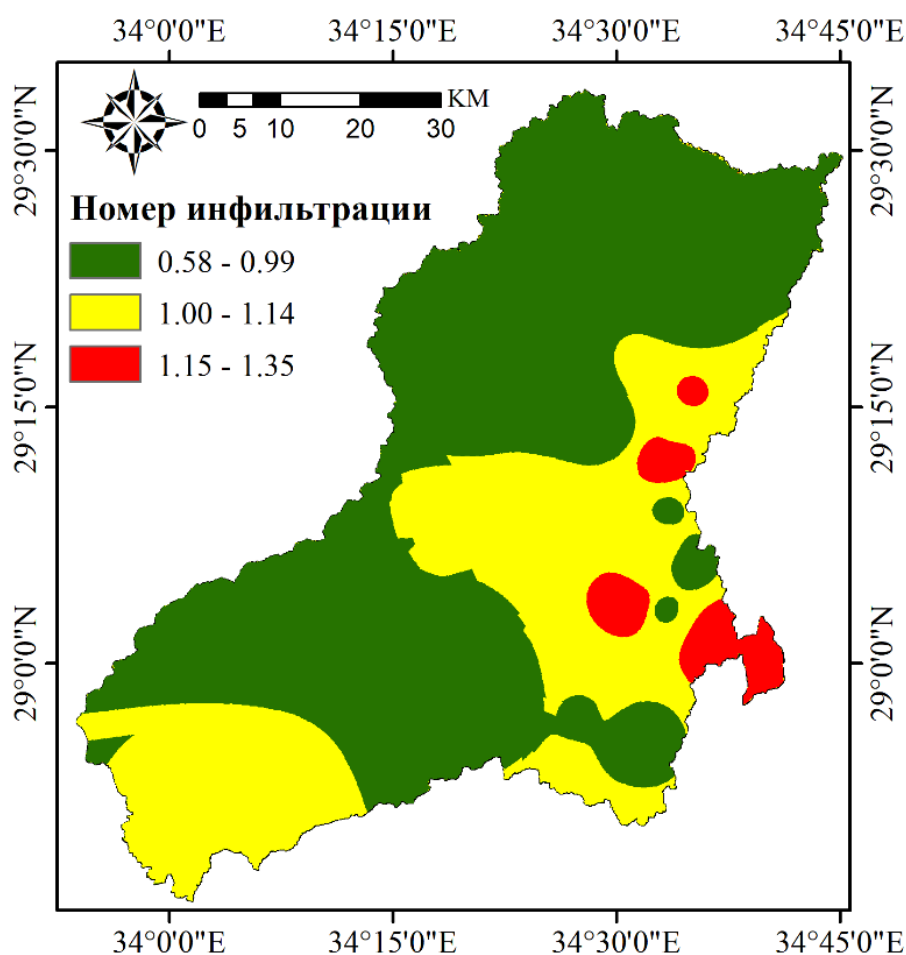


Рисунок 2.20 — Карта номера инфильтрации

2.2.1.9 Карта частотной плотности линеамента

Исследование частотной плотности линеамента (ЧПЛ) (линеAMENT: линейные объекты на земной поверхности, такие как разломы) необходимо для определения сбора дождевой воды. Потенциал аккумуляции дождевой воды снижается за счет увеличения ЧПЛ. Данные Landsat 8 OLI/TIRS были обработаны в ENVI 5.3 и Geomatica 2017 для выделения линеаментов изучаемой территории. ArcGIS использовался для создания карты частотной плотности линеамента. Значения ЧПЛ делятся на три класса: низкие (0,0–0,52), умеренные (0,53–1,05) и высокие (1,06–1,57), как показано на рис. 2.21. Большая часть Вади-Ватир имеет низкие значения частотной плотности линеамента (73%). Значения ЧПЛ умеренные или высокие в 24% и 3% водосбора соответственно. Примерно все эти площади распределены в восточной половине водосбора.

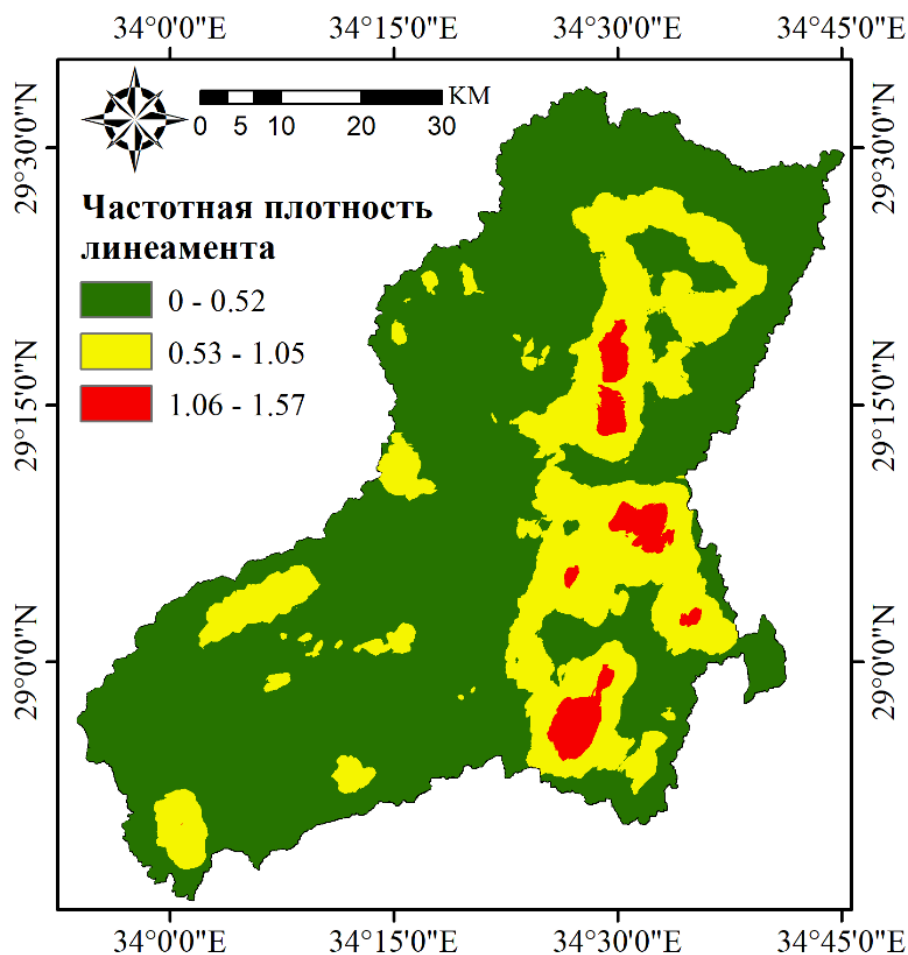


Рисунок 2.21 — Карта частотной плотности линеамента

2.2.2 Назначение веса и многокритериальный анализ

Согласно Саати [84] тематическим слоям и функциям были присвоены веса от 1 до 9 (таблица 9). Для критериев исследования была создана матрица парных сравнений (таблица 12). Нормализованные веса были рассчитаны с использованием метода процесса аналитической иерархии и собственного вектора. Был рассчитан коэффициент согласованности (КС), и его значение составило 0,002, что находится в пределах, указанных Саати ($<0,1$). Значение КС уточнило, что выбранные критерии непротиворечивы.

Таблица 12 — Матрица парных сравнений для используемых критериев

Критерии ¹⁴	ГС	У	ПБ	МРП	ТИВ	ПД	ЧПЛ	З	НИ	РНПОБ	РД	НВ
ГС	9/9	9/8	9/7	9/6	9/6	9/5	9/4	9/4	9/3	9/3	9/2	0.16
У	8/9	8/8	8/7	8/6	8/6	8/5	8/4	8/4	8/3	8/3	8/2	0.14
ПБ	7/9	7/8	7/7	7/6	7/6	7/5	7/4	7/4	7/3	7/3	7/2	0.12
МРП	6/9	6/8	6/7	6/6	6/6	6/5	6/4	6/4	6/3	6/3	6/2	0.11
ТИВ	6/9	6/8	6/7	6/6	6/6	6/5	6/4	6/4	6/3	6/3	6/2	0.11
ПД	5/9	5/8	5/7	5/6	5/6	5/5	5/4	5/4	5/3	5/3	5/2	0.09
ЧПЛ	4/9	4/8	4/7	4/6	4/6	4/5	4/4	4/4	4/3	4/3	4/2	0.07
З	4/9	4/8	4/7	4/6	4/6	4/5	4/4	4/4	4/3	4/3	4/2	0.07
НИ	3/9	3/8	3/7	3/6	3/6	3/5	3/4	3/4	3/3	3/3	3/2	0.05
РНПОБ	3/9	3/8	3/7	3/6	3/6	3/5	3/4	3/4	3/3	3/3	3/2	0.05
РД	2/9	2/8	2/7	2/6	2/6	2/5	2/4	2/4	2/3	2/3	2/2	0.03

2.2.3 Карта пригодности сбора дождевой воды

Анализ взвешенной линейной комбинации одиннадцати тематических слоев был реализован с использованием уравнения (8). Этот метод был применен в среде ГИС для создания карты пригодности СДВ, как показано на рис. 2.22. Пригодность аккумуляции дождевой воды подразделяется на пять категорий в соответствии со значением ИПСДВ: очень низкая (3,41–4,38), низкая (4,39–4,79), умеренная (4,80–5,18), высокая (5,19–5,62) и очень высокая (5,63–6,70). Был применен метод логического анализа с использованием трех ограничений, показанных в таблице 10. Все ограничения были объединены в одну карту и классифицированы по двум категориям, а именно подходящие и неподходящие, как показано на рис. 2.23.

¹⁴ Где ГС — глубина стока, У — уклон, МРП — максимальное расстояние потока, ТИВ — топографического индекса влажности, ЧПЛ — частотная плотность линеамента, ПД — плотность дренажа, З — землепользование, НИ — номер инфильтрации, РНПОБ — расстояние до населенных пунктов и общин бедуинов, РД — расстояние до дорог, а НВ — нормализованный вес.

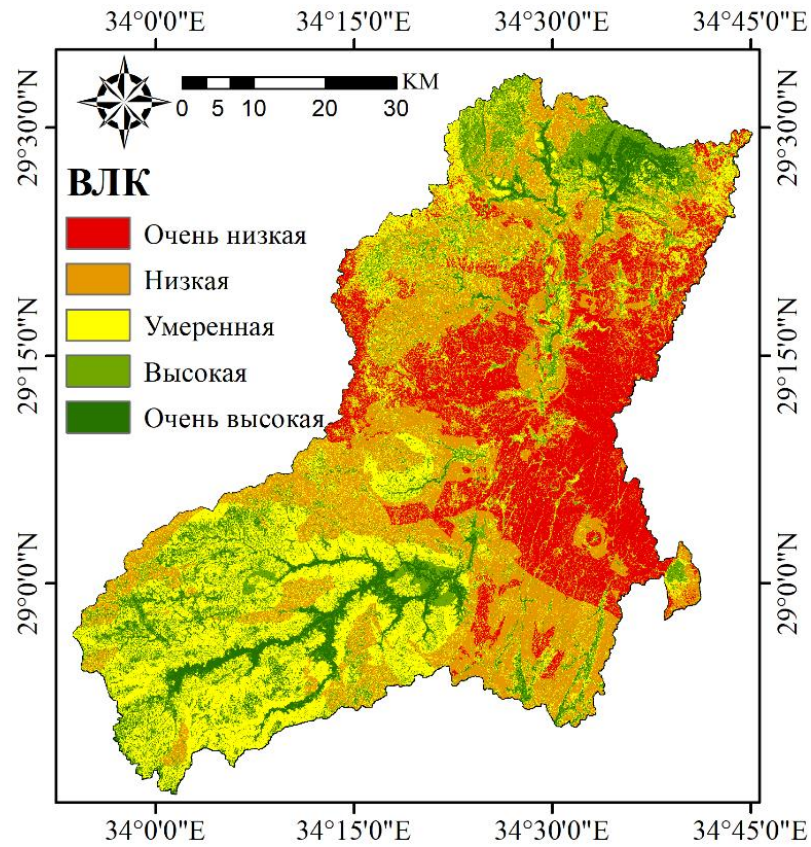


Рисунок 2.22 — Карта пригодности сбора дождевой воды после взвешенной линейной комбинации

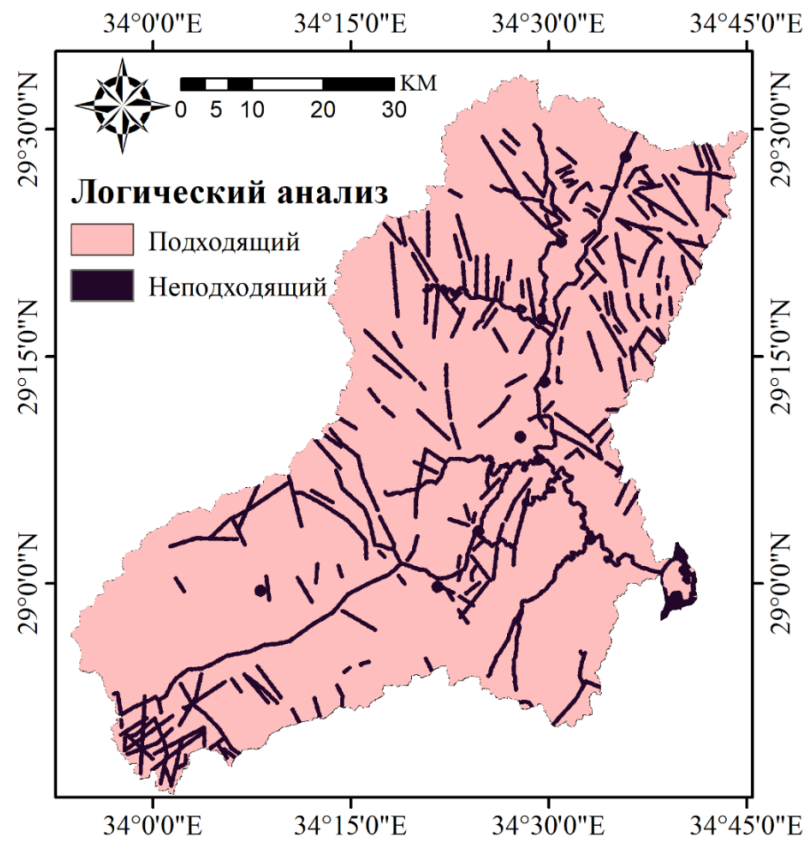


Рисунок 2.23 — Карта логического анализа

Карты ВЛК и логического анализа были объединены для получения окончательной карты пригодности СДВ (рис. 2.24). Результаты показали, что 7% (236 км²) Вади-Ватир очень высоко подходят для аккумуляции дождевой воды, а 12% (430 км²) очень подходят. Примерно вся эта территория расположена вдоль водотоков в водосборе. Сбор дождевой воды ограничивается 16% (573 км²) исследуемой зоны. Пригодность низкая (23%; 832 км²) и очень низкая (17%; 618 км²) для 40% (1450 км²) Вади-Ватир. Район, наименее пригодный для накопления дождевых вод, находится в середине водосбора. Умеренная пригодность наблюдается на 25% (891 км²) площади исследований. Пригодность СДВ для водосбора Вади-Ватир распределена нормально (рис. 2.25).

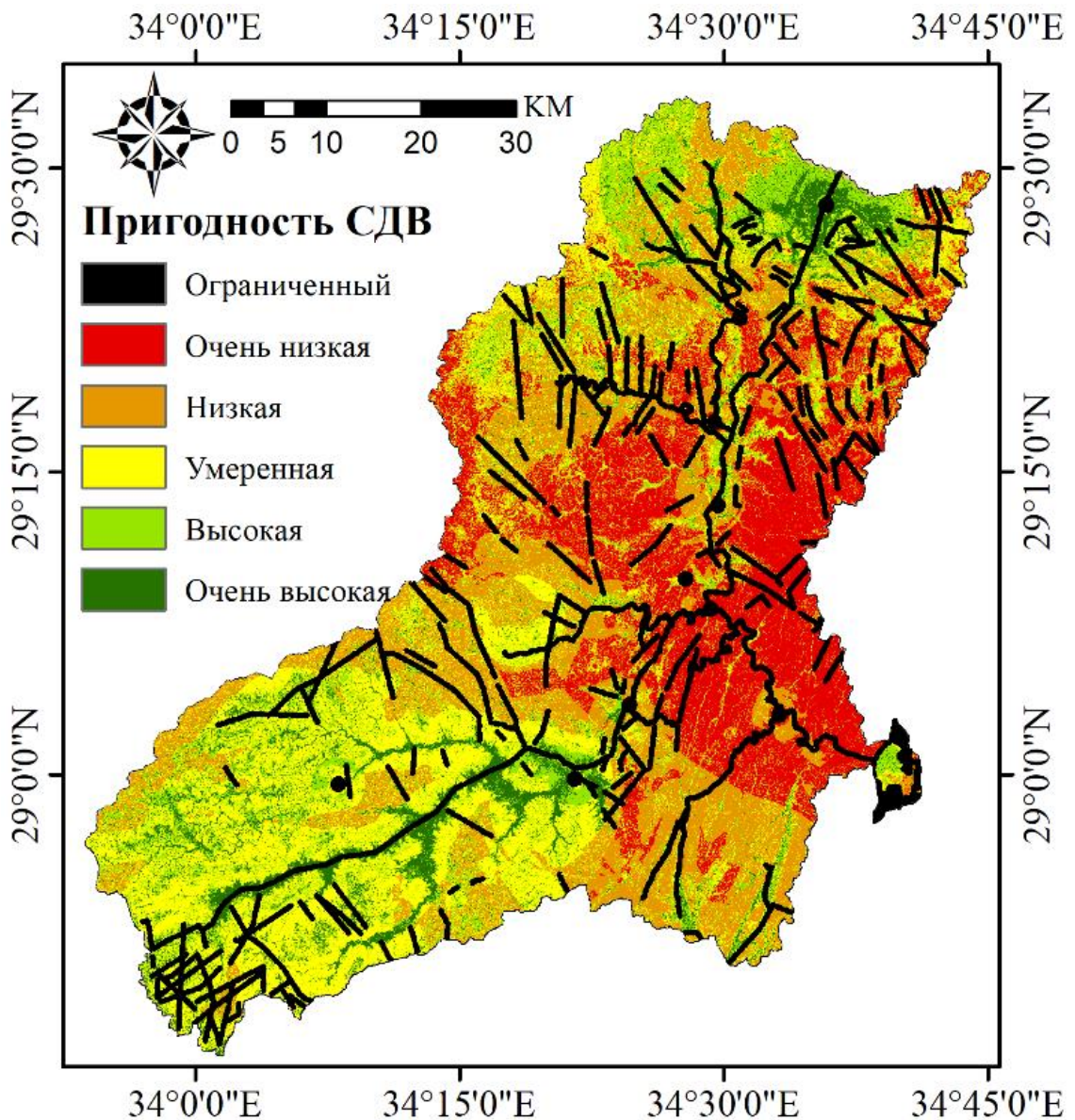


Рисунок 2.24 — Окончательная карта пригодности СДВ

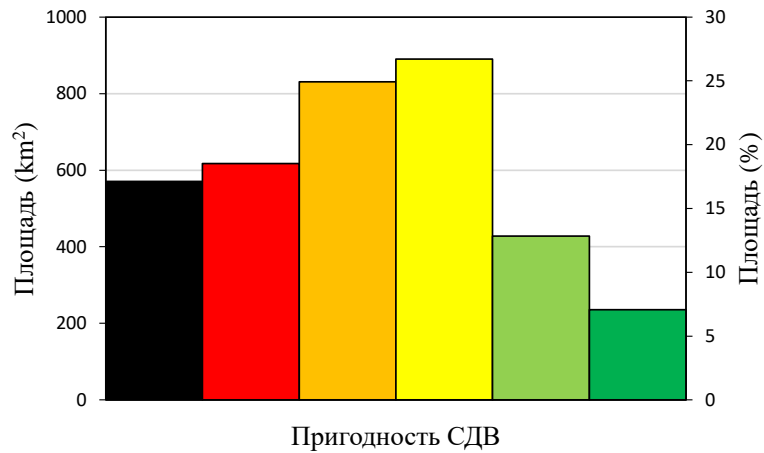


Рисунок 2.25 — Гистограмма пригодности сбора дождевой воды

Сегментация пригодности сбора дождевой воды обусловлена гористой природой и крутыми склонами Вади-Ватир. Около 31% (178 км²) территории ограниченного использования аккумуляции дождевой воды находится в зонах высокой и очень высокой адекватности. Таким образом, процент высоко- и очень высоко пригодных территорий для СДВ относительно невелик (17%) по сравнению с предыдущими исследованиями. Однако ограниченная область необходима из-за социально-экономической значимости метода логического анализа. Водотоки являются лучшими зонами для накопления дождевых вод из-за их пологого уклона, высокого стока и доступности. Большая часть города Нувейба ограничена сбора дождевой воды из-за застроенных территорий и основных дорог города.

2.2.4 Размещение сооружений сбора дождевой воды

Оптимальные места для сооружений хранения осадков были определены с использованием ранее упомянутой методологии и в соответствии с критериями, описанными в таблице 11. Смежные глубины депрессии, полученные в результате цифровой модели рельефа, были объединены с областями высокой и очень высокой пригодности для аккумуляции дождевой воды для определения оптимальных мест для сооружений хранения осадков. К рассматриваемым в исследовании сооружениям относятся отстойники (наземные и вдоль водотоков), накопительные плотины и фермерские пруды. Метод логического анализа, созданный Сингхом и др. [97], был использован для уточнения участков

сооружения СДВ. Участки были выбраны вдали от существующих сооружений, как показано на рис. 2.26. Эффективность этого метода была проверена на существующих сооружениях, так как эти сооружения находятся на пересечении глубин депрессии и областей высокой и очень высокой пригодности.

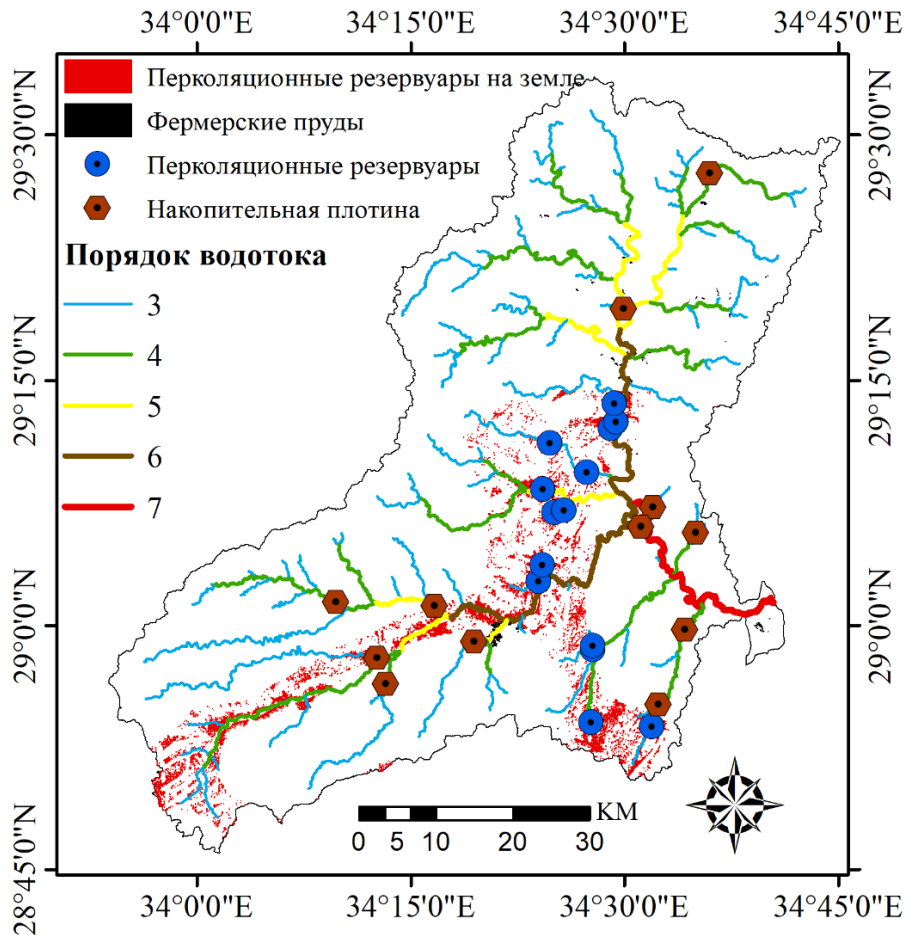


Рисунок 2.26 — Размещение сооружений сбора дождевой воды

Двенадцать участков пригодны для накопительных плотин: пять в юго-западной части, три в средней, две в юго-восточной части и две в северной части. Для перколяционных (фильтрационных) резервуаров вдоль водотоков оптимально 14 участков: четыре в юго-восточной части и остальные в середине Вади-Ватир. Площадь, считающаяся идеальной для перколяционных (фильтрационных) резервуаров, составляет 25,9 км². Эта зона преимущественно расположена в центральной и южной частях изучаемой территории. Оптимальное пространство для фермерских прудов составляет 1,34 км², близко к сельскохозяйственным угодьям.

Текстура почвы является основным параметром, влияющим на размещение сооружений СДВ. Некоторые из предлагаемых построек находятся рядом с нынешними бедуинскими общинами. Эти сооружения могут быть использованы для восполнения текущего дефицита воды и повышения уровня жизни бедуинов. Районы вокруг построек вдали от существующих общин бедуинов являются потенциальными местами для новых общин. Сооружения хранения осадков могут широко влиять на экологическую систему водосбора. Хотя в настоящем исследовании рассматриваются социально-экономические параметры, перед строительством систем аккумуляции дождевой воды следует изучить потенциальные воздействия выше и ниже по течению.

Выводы по главе 2

В этой главе были определены оптимальные места и зоны для сооружений хранения осадков. Сочетание ГИС (т. е. ВЛК и логического анализа), ГМ (т. е. WMS и НЕС-1), МКА (т. е. ПАИ) и метода глубины депрессии подтвердило точность результатов. При этом коэффициент согласованности рассмотренных параметров показал, что разработанные критерии являются состоятельными.

Основные выводы из этой главы можно резюмировать следующим образом:

- Окончательная карта сбора дождевой воды показала, что 19% (666 км²) территории Вади-Ватир вполне подходят для накопления дождевых вод. Эта территория почти полностью расположена вдоль водотоков водосбора. Такие результаты обусловлены крутыми склонами и горным характером исследуемой территории.

- Двенадцать участков признаны подходящими для установки накопительных плотин. Для оптимального размещения перколяционных (фильтрационных) резервуаров вдоль водотоков определены четырнадцать площадок. Площадь, считающаяся идеальной для наземных перколяционных резервуаров, составляет 25,9 км². Оптимальная площадь для фермерских прудов – 1,34 км².

ГЛАВА 3. КАРТИРОВАНИЕ ОПАСНОСТЕЙ ВНЕЗАПНЫХ ПАВОДКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕТОДНОГО ПОДХОДА

Внезапное наводнение можно определить как наводнение, которое происходит в течение короткого периода, обычно менее шести часов, из-за сильных или экстремальных осадков. Это явление характеризуется сильными ливнями, проносящимися над водотоками, городскими улицами или горными каньонами. Чрезмерное количество осадков может произойти в течение нескольких минут или часов. Кроме того, внезапные паводки могут возникать даже без дождя, например, при прорыве дамбы или плотины или при неожиданном выбросе воды из пустыря или ледяного затора. Внезапные наводнения являются непредсказуемыми и, следовательно, чрезвычайно опасными природными катастрофами. Из-за ухудшения состояния окружающей среды в последние десятилетия значительно возросло воздействие и частота стихийных бедствий [107].

Наводнения зависят от многих факторов, таких как топограммы, география, инфраструктура, геоморфология, дренаж и изменение климата. В пустынных районах внезапные наводнения вызывают многие факторы, в том числе антропогенные и экологические процессы, характеристики и схемы дренажа, потери воды (инфильтрация и испарение) и осадки [86].

За последние несколько десятилетий в засушливых районах по всему миру было проведено множество геоморфологических исследований, которые улучшили геоморфологические методы предотвращения разрушительных опасностей и повысили осведомленность о геоморфологии наводнений, а также о ценности геоморфологических исследований и знаний, используемых при планировании [116]. Выявление и прогнозирование районов, подверженных риску затопления, может уменьшить ущерб, наносимый городам. Кроме того, эти шаги могут помочь в планировании новых городов для предотвращения этих опасностей [85].

ГИС и дистанционное зондирование — отличные технологии, которые позволяют быстро исследовать основные области. Подробную информацию можно получить из спутниковых изображений геологии поверхности, почв, растительности, землепользования, ландшафта, структур и узоров, которые невозможно увидеть с земли. Эти функции предоставляют важные знания, которые могут способствовать поиску новых инструментов и более глубокому пониманию существующих инструментов и вариантов разработки [40]. В последние годы эти технологии стали еще более актуальными для анализа геоэкологических рисков и главного ресурса информации для оценки опасностей и стихийных бедствий. Данные радиолокационного дистанционного зондирования широко используются в наблюдениях за наводнениями по всему миру. В то же время в других тематических исследованиях использовались ГИС и нейронные сети для картирования подверженности наводнениям [106, 107].

Внезапные наводнения распространены в Египте во многих районах, включая Верхний Египет, Восточную пустыню, прибрежные районы и пересохшие впадины [106]. Вади-Ватир - важный водосборный бассейн в Египте, который подвержен внезапным наводнениям из-за гористого ландшафта и обильных внезапных зимних осадков. Каньон водосбора проходит по руслу высокоскоростного паводкового водотока с высокой степенью осадконакопления во время паводков. Высота паводковой волны достигает 1–2 метров, что приводит к сильному повреждению главной автомобильной дороги, которая на некоторых участках полностью размыва (рис. 3.1). Кроме того, наводнения угрожают городу Нувейба, расположенному в устье каньона [36].



Рисунок 3.1 — Главная автомагистраль, проходящая через выезд из Вади-Ватир, в нормальном состоянии и после наводнения в октябре 2008 года [36].

Вади-Ватир был в центре внимания многих исследований. Например, Мохамед и Фатахалла [69] объединили технологии ДЗ и ГИС в качестве основы для геоморфологии, классификации и оценки почв Вади-Ватир. Кулс и др. [36] разработали систему раннего предупреждения о внезапных наводнениях для Вади-Ватир. Засоление и пополнение подземных вод на засушливой прибрежной равнине водоносного горизонта дельты Вади-Ватир изучались Мустафа и др. [73]. Кроме того, Сара и др. [89] провели геопространственную оценку риска внезапных наводнений в регионе Нувейба. Сара [90] использовала дистанционное зондирование и ГИС для анализа потенциальной зоны подземных вод в районе Вади-Ватир. Возможность хранения и восстановления водоносного горизонта была оценена Осамой [79] с использованием численных моделей подземных вод в дельте Вади-Ватир.

В этой главе исследовалась степень опасности внезапных наводнений во Вади-Ватир с использованием технологий дистанционного зондирования и ГИС, а также двух различных методов: морфометрического ранжирования, далее (МР) и подхода Эльшами для сравнения результатов.

3.1 Материалы и методы

Топография изучалась на основе цифровой модели рельефа с разрешением 90 метров с использованием (Shuttle Radar Topography Mission). Затем ЦМР была

обработана в среде ГИС для расчета морфометрических параметров, таких как площадь (A), длина бассейна (L_b), коэффициент рельефа (R_h), длина водотока (L_u), номер водотока (N_u) и многие другие (таблица 13). Бассейн был разделен на 37 подбассейнов для анализа его потенциальной опасности затопления с использованием статистики их морфометрических и геоморфологических параметров в соответствии с распределением водотоков и порядками водотоков. Порядок водотока подбассейнов определялся методом Стралера [98]. Водотоки были разделены на семь порядков, как показано на рис. 3.2.

Таблица 13 — Морфометрические параметры и их формулы.

Параметр	Символ/формула	Метод расчета	Использованная литература
Площадь (км)	A	ArcGis	[94]
Периметр (км)	P	ArcGis	[94]
Длина бассейна (км)	L_b	ArcGis	[94]
Коэффициент формы	$R_f=A/(L_b)^2$		[89]
Коэффициент округлости	$R_y=4\pi A/P^2$		[116]
Коэффициент удлинения	$R_e=2(A/\pi)^{0.5}/L_b$		[94]
Шейп-фактор	$F_s=L_b^2/A$		[89]
Коэффициент компактности	$R_c=P/2(\pi A)^{0.5}$		[116]
Порядок водотоков	u	Иерархический ранг	[98]
Длина водотока (км)	L_u	ArcGis	[116]
Номер водотока	N_u	ArcGis	[116]
Плотность дренажа (км ⁻¹)	$D_d=\Sigma L_u/A$		[116]
Частота водотоков	$F_q=\Sigma N_u/A$		[116]
Коэффициент бифуркации	$B_r=N_u/N_{u+1}$	(N_u) количество водотоков указанного порядка и (N_{u+1}) количество водотоков следующего порядка	[94]
Коэффициент текстуры	$R_t=\Sigma N_u/P$		[116]
Коэффициент рельефа	$R_h=R/L_b$	(R) Рельеф в км	[94]
Относительный коэффициент рельефа	$R_v=R/P$		[89]
Индекс прочности	$R_I=R \times D_d$		[94]
Гипсометрический индекс	$H_I=(E_{mean}-E_{min})/(E_{max}-E_{min})$	(E) Высота в км	[89]
Уклон бассейна (градусы)	$S_B=(R/L_b) * 60$		[94]

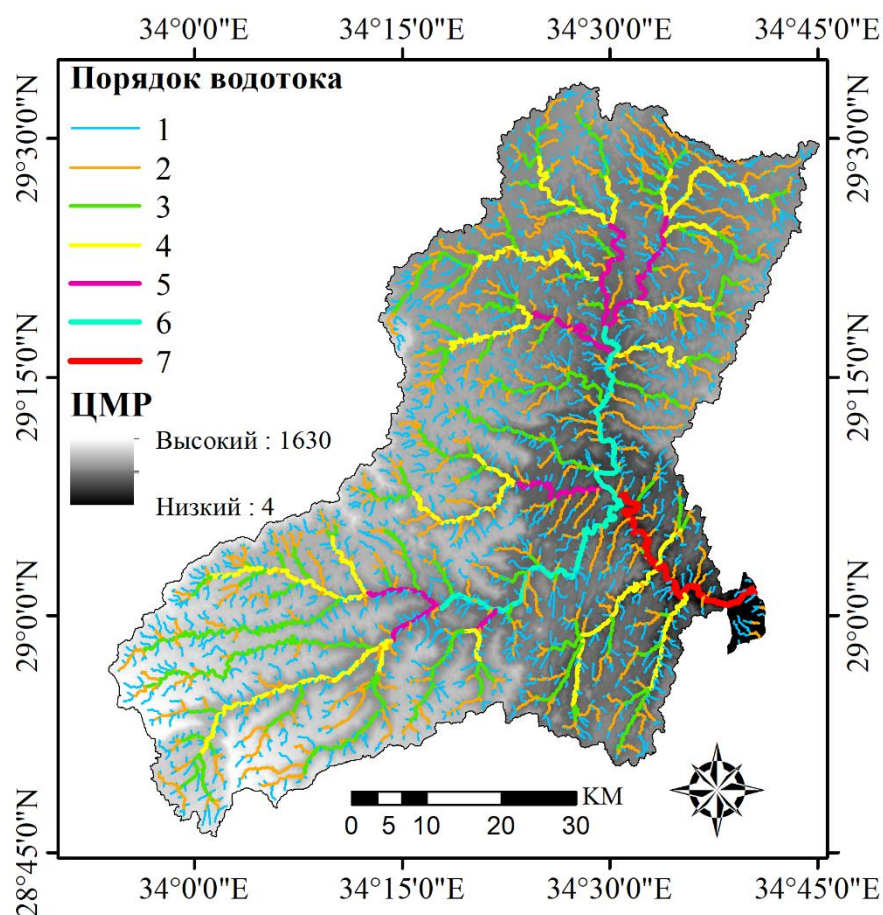


Рисунок 3.2 — Порядок водотоков с фоном цифровой модели рельефа

Для изучения уязвимости подбассейнов к быстроразвивающимся паводкам можно использовать несколько альтернатив, включая подход Эльшами, индекс потенциала быстроразвивающихся паводков и морфометрическое ранжирование (МР) [106]. В настоящем исследовании подход Эльшами и метод МР применялись для проверки согласованности результатов двух методов.

3.1.1 Подход Эльшами

Эльшами разработал подход к оценке уязвимости подбассейнов к опасности внезапных наводнений [44]. Он описывает четкий морфометрический способ оценки опасности внезапных паводков и степени опасности для каждого подбассейна. Для определения степени опасности подбассейнов использовались два различных подхода. Первый подход основан на отношении коэффициента бифуркации (B_r) к плотности дренажа (D_d). Второй подход основан на отношении коэффициента бифуркации (B_r) к частоте водотока (F_q). Отношения должны быть

представлены графически, где каждый график разделен на три сектора двумя кривыми. Сектор (А) указывает на низкую опасность наводнений, сектор (В) указывает на среднюю опасность, а сектор (С) указывает на высокую опасность. Оба подхода предполагают окончательную оценку риска (рис. 3.3).

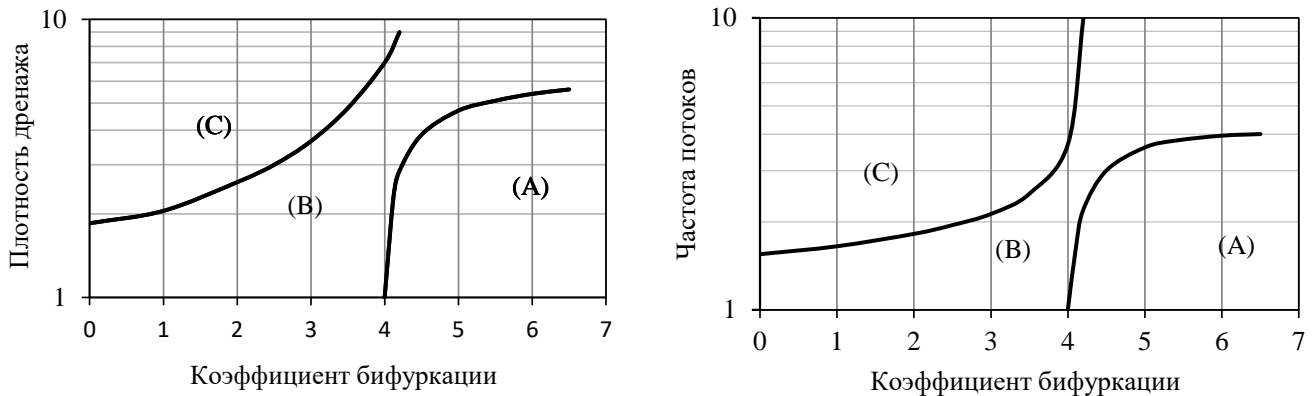


Рисунок 3.3 — Взаимосвязь между коэффициентом бифуркации, и плотностью дренажа и частотой водотока

3.1.2 Метод морфометрического ранжирования

Морфометрическая интерпретация изучаемой территории в первую очередь ориентируется на морфологические параметры. Было использовано 17 параметров для проведения морфометрического анализа и расчета их, как описано в таблице 13. Параметры варьировались в зависимости от размеров, формы и поверхности дренажной сети и бассейна (например, площадь $[A]$, периметр $[P]$, длина бассейна $[L_b]$, коэффициент округлости $[R_y]$, коэффициент удлинения $[R_e]$, коэффициент текстуры $[R_t]$, коэффициент формы $[R_f]$, частота водотока $[F_q]$, коэффициент компактности $[R_c]$, плотность дренажа $[D_d]$, коэффициент рельефа $[R_h]$, относительный коэффициент рельефа $[R_v]$, индекс прочности $[R_l]$, гипсометрический индекс $[H_l]$ и уклон бассейна $[S_B]$). Выборка расчетных параметров для каждого подбассейна представлена на рис. 3.4 и 3.5 [12].

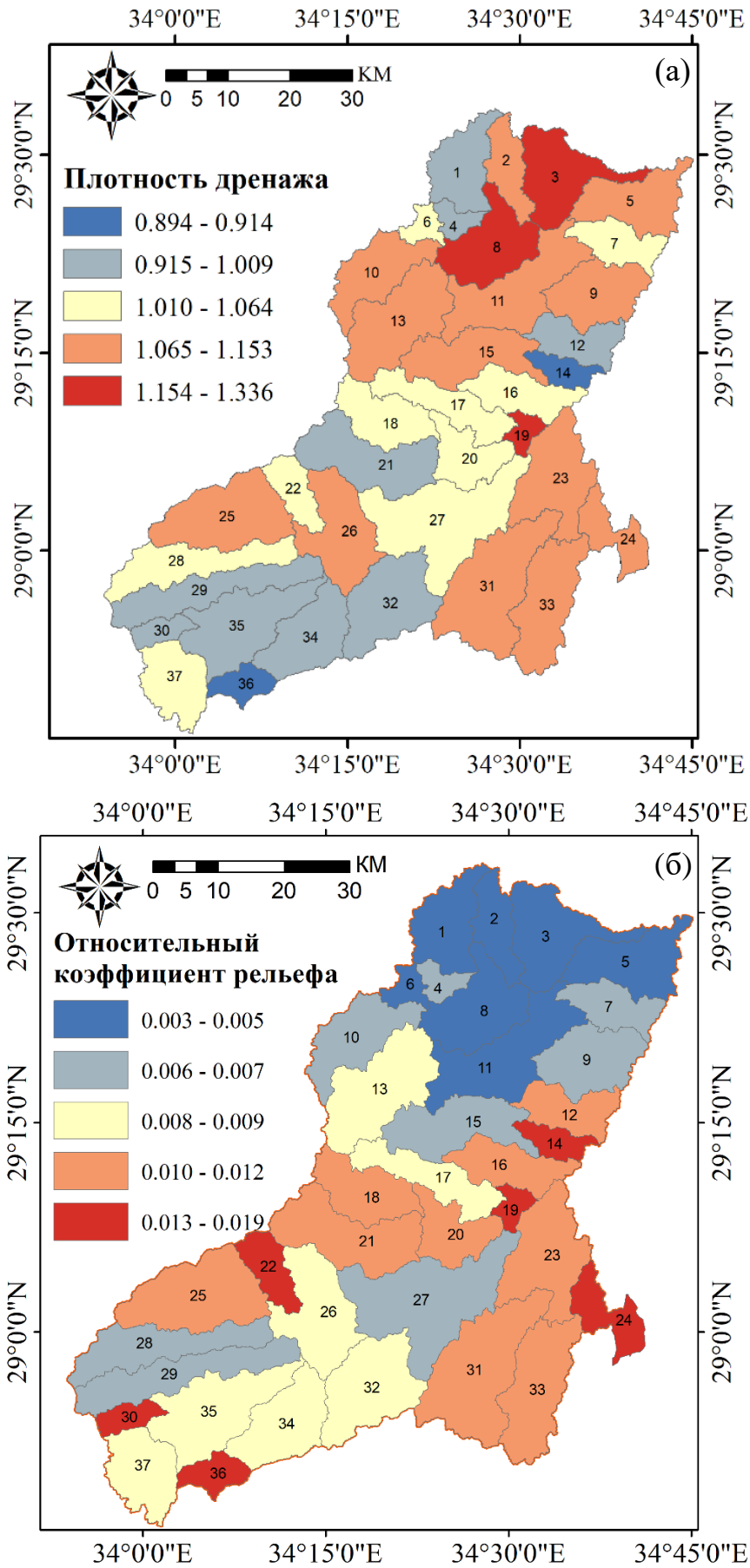


Рисунок 3.4 — Образцы карт рассчитанных морфометрических параметров: (а) плотность дренажа; (б) относительный коэффициент рельефа

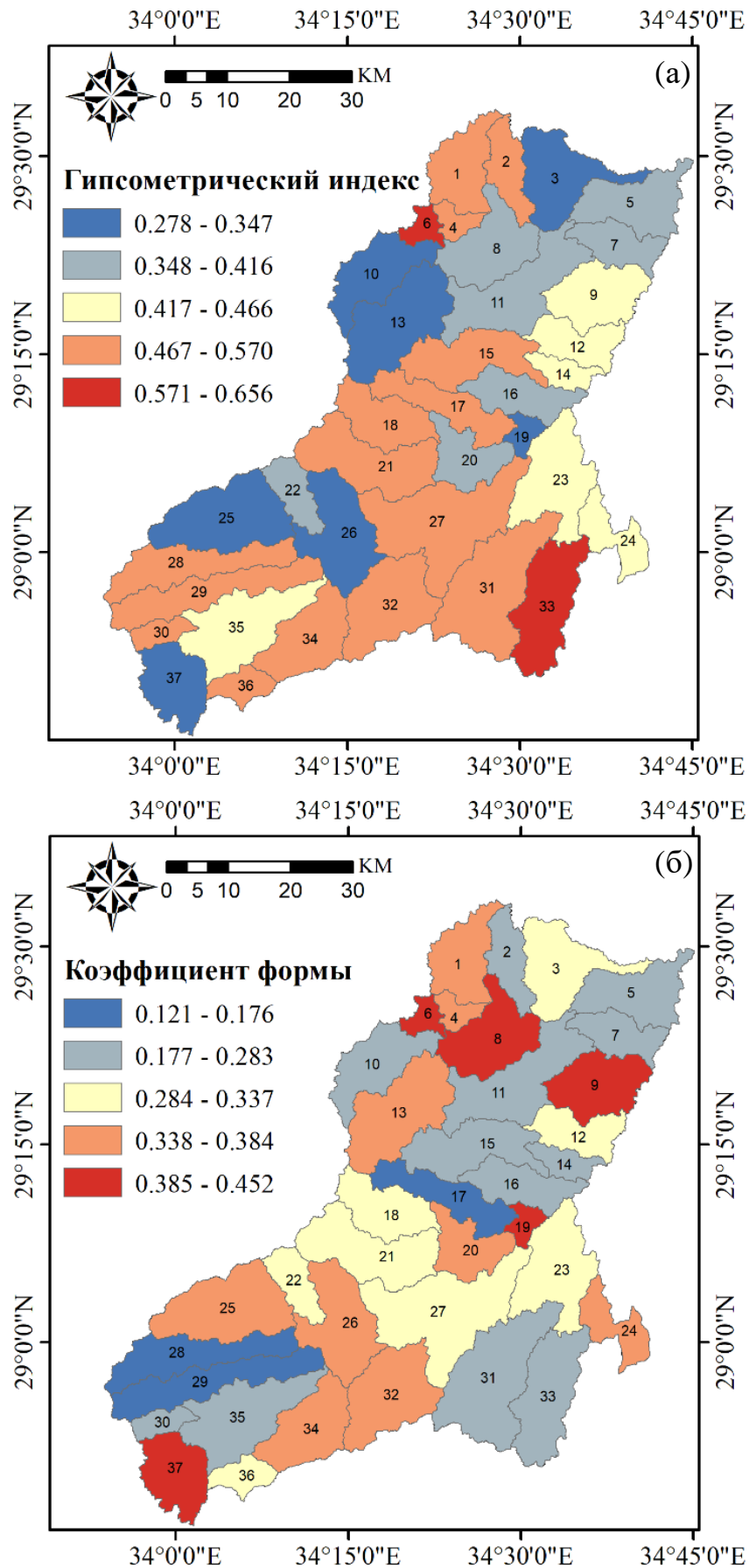


Рисунок 3.5 — Образцы карт рассчитанных морфометрических параметров: (а) гипсометрический индекс; (б) коэффициент формы

Для определения степени опасности для каждого подбассейна Баджабаа и др. [30] разработали концепцию. Всем параметрам присвоен номер по шкале опасности от одного (самый низкий) до пяти (самый высокий). Определены самые низкие и самые высокие значения каждого параметра для всех подбассейнов изучаемого региона. Следующие соотношения могут быть использованы для расчета фактической степени опасности подбассейнов [30]:

- Для прямо пропорциональных параметров:

$$\text{степень опасности} = \frac{4(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} + 1, \quad (9)$$

- Для обратно пропорциональных параметров:

$$\text{степень опасности} = \frac{4(X - X_{\max})}{(X_{\min} - X_{\max})} + 1, \quad (10)$$

где: X – значение морфометрического параметра; X_{\max} – максимальное значение; X_{\min} – минимальное значение.

Однако, основываясь на оценке, данной Эльшами, всего с тремя степенями (низкая, умеренная и высокая), этапы оценки были изменены, где количество шкал конечной опасности было установлено от одного (самый низкий) до трех (самый высокий).

3.2 Результаты и анализ

Результаты подхода Эльшами были разделены на две части. Во-первых, это соотношение между (B_r) и (F_q). Результаты показали, что четыре подбассейна расположены в секторе (А) (низкая опасность затопления), а общая площадь подбассейнов составляет 11,8% от всей площади бассейна. При этом 33 подбассейна располагались в секторе (В) (средней опасности затопления) с 88,2% общей площади. В секторе (С) (высокая опасность затопления) подбассейнов не было (рис. 3.6). Вторая часть — это соотношение между (B_r) и (D_d). Те же четыре подбассейна были расположены в секторе (А) с 11,8% общей площади бассейна. Сектор (В) включал 26 подбассейнов с 70% общей площади. Последние семь подбассейнов (18,2% общей площади) располагались в секторе (С) (рис. 3.7).

Вторая часть считалась наихудшим случаем из двух подходов и принималась в качестве окончательной оценки риска. Подбассейны с наибольшей паводковой опасностью были разбросаны в средней части общей территории. Подбассейны с низкими степенями опасности располагались в южной части водосбора (рис. 3.8).

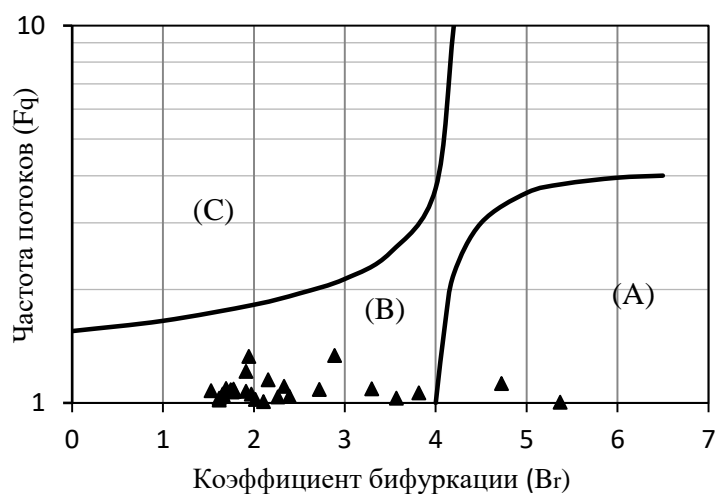


Рисунок 3.6 — Оценка риска внезапных наводнений с использованием первого соотношения Эльшами

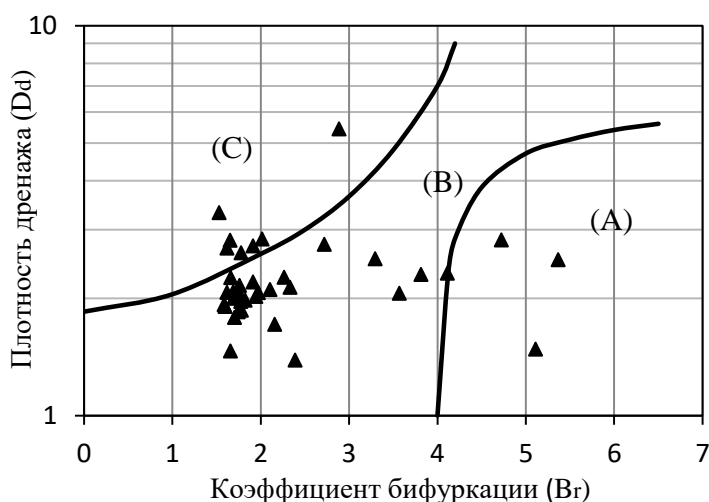


Рисунок 3.7 — Оценка риска внезапных наводнений с использованием второго соотношения Эльшами

Применение метода морфометрического ранжирования (МР) показало, что девяти подбассейнам присвоена низкая степень опасности с 19% всей площади. Кроме того, 17 подбассейнов были отнесены к средней степени опасности, занимая 44,2% от общей площади. Наконец, 11 подбассейнов были крайне

уязвимы для внезапных наводнений, занимая 36,8% площади бассейна. Подбассейны с наибольшей паводковой опасностью были сосредоточены в северной части южной половины. Подбассейны с низкой степенью опасности были сосредоточены на севере бассейна (рис. 3.9) [12].

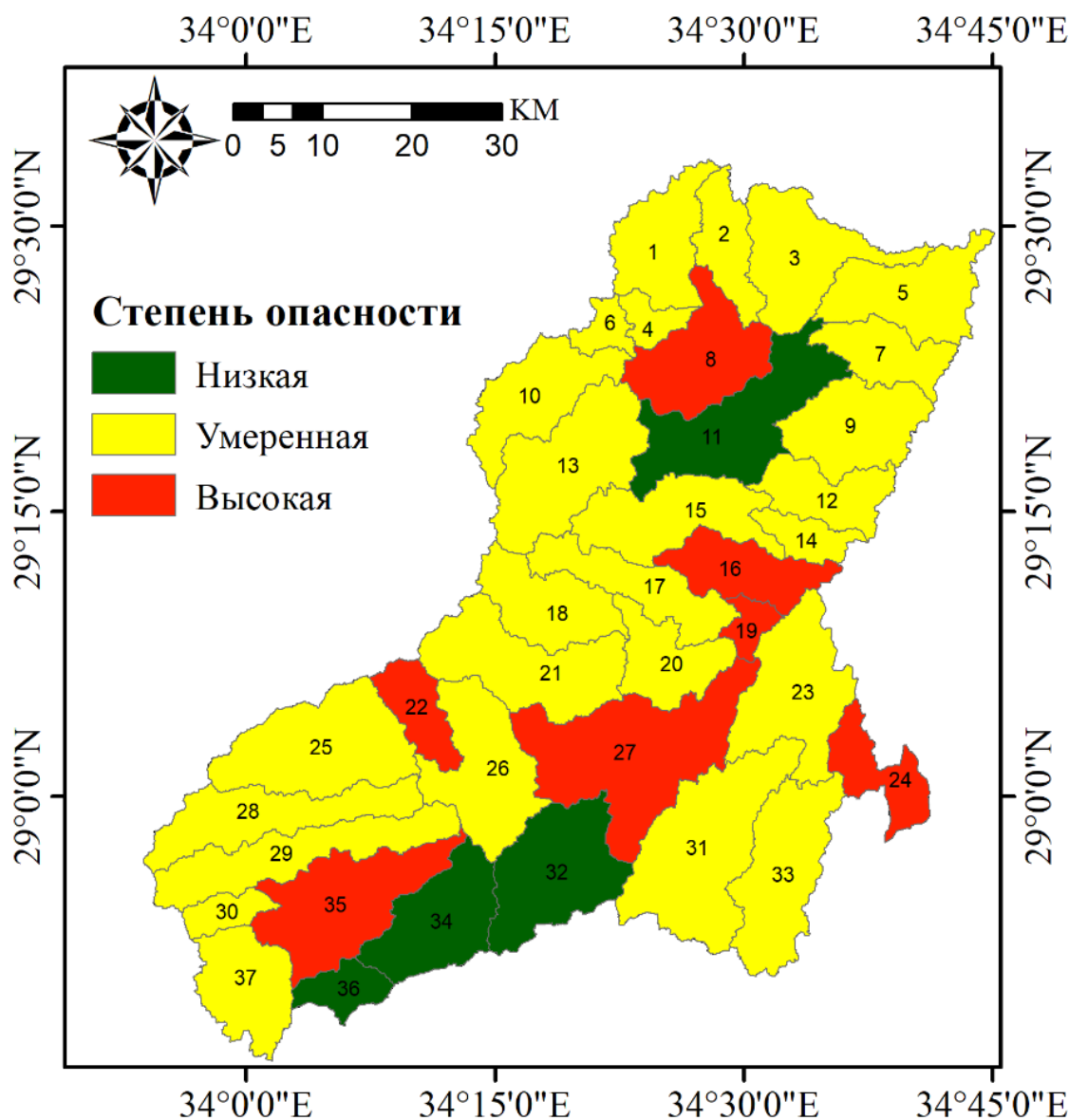


Рисунок 3.8 — Окончательная карта опасностей внезапных наводнений с использованием подхода Эльшами

В результате сравнения подхода Эльшами и метода морфометрического ранжирования установлено, что совпадение результатов по высокой степени опасности наблюдается в 5 подбассейнах с 12% площади бассейна. Соответствие по средней степени опасности установлено в 11 подбассейнах, занимающих

26,2% всей площади. Не было совпадения между результатами низкой степени опасности. Таким образом, были различия в результатах двух методов.

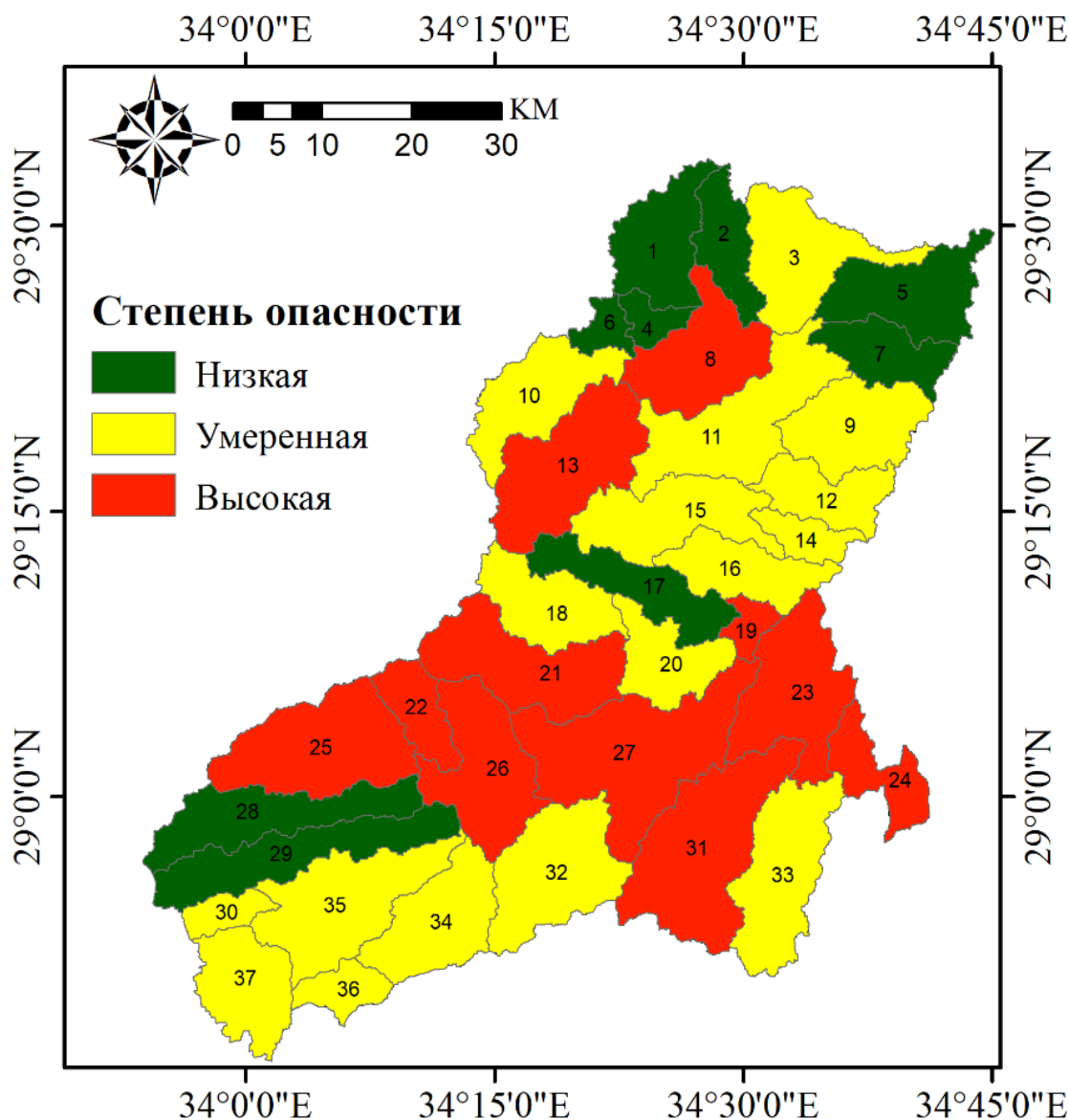


Рисунок 3.9 — Окончательная карта опасности внезапных наводнений с использованием метода морфометрического ранжирования

Разницу между двумя методами можно объяснить тем, что в подходе Эльшами коэффициент бифуркации считается наиболее важным параметром для оценки риска, который более эффективен, чем другие параметры, такие как (D_d) и (F_q), как показано на рис. 3.6 и 3.7. Согласно рис. 3.6 и 3.7 степень опасности водосборов имеет низкий или средний уровень, если значение (B_r) превышает четыре. Тем не менее влияние всех параметров можно сбалансировать с помощью

метода морфометрического ранжирования с использованием линейных соотношений в уравнениях (9) и (10), приведенных выше.

Выводы по главе 3

В этой главе были использованы два разных метода изучения степени опасности внезапных паводков в Вади-Ватир: подход Эльшами и метод морфометрического ранжирования (МР).

Для анализа, с использованием подхода Эльшами, приняты следующие параметры: (B_r), (D_d) и (F_q) - классификация основывалась на родстве между ними. Результаты исследований показали, что подбассейны с низкой, средней и высокой степенью опасности составляют 11,8% (4 подбассейна), 70% (26 подбассейнов) и 18,2% (7 подбассейнов) всей площади соответственно.

Для метода МР были рассчитаны и проанализированы 17 параметров данной классификации. Можно сделать вывод, что 19% общей площади имеют наименьшую степень опасности; 44,2% – средняя степень опасности; и 36,8% – высшей степени опасности. Поскольку в подходе Эльшами использовались только три параметра, различия между двумя методологиями были очевидны.

ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕЗАПНЫХ НАВОДНЕНИЙ НА СБОР ДОЖДЕВОЙ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

В последней части этой работы были изучены необычные решения проблем нехватки воды. Сбор дождевой воды представлен как альтернативный водный ресурс. Была определена пригодность аккумуляции дождевой воды и были определены лучшие места для сооружений хранения осадков. Кроме того, в данной работе были получены инженерные решения для прогнозирования и предупреждения внезапных наводнений, происходящих в изучаемом районе, путем оценки степени опасности внезапных наводнений. Настоящая глава призвана объединить результаты предыдущих двух частей для оптимального развития водосбора Вади-Ватир.

Большинство исследований, связывающих СДВ и внезапные паводки, посвящены изучению эффективности накопления дождевых вод в снижении риска внезапных наводнений. Согласно этим результатам, сбор дождевой воды является эффективным методом уменьшения объема наводнений [28, 51]. Абд-Элати и др. [15] оценили объем и расход пикового паводка в пустынной зоне равнины Эль-Каа на Синае.

Насколько известно автору, влияние ливневых паводков на адекватность сбора дождевой воды ранее не рассматривалось. Поэтому, данная глава направлена на изучение влияния ливневых паводков на использование территории Вади-Ватир для аккумуляции дождевой воды, с целью максимального увеличения количества собираемой воды и снижения риска внезапных наводнений. А также, определение оптимальных территорий для возведения накопительных сооружений и оценки количества воды, собираемой предлагаемыми ГТС. Новизна текущего раздела заключается в том, что она увязывает результаты исследования с ЦУР и представляет собой план хранения дождевой воды. Впервые результаты определения достаточности СДВ и оценки опасности быстроразвивающихся паводков накладываются друг на друга.

Предлагаемая стратегия представляет долгосрочные решения различных проблем (например, нехватки воды, экологических и социально-экономических).

4.1 Материалы и методы

4.1.1 Определение пригодности сбора дождевой воды

Во второй главе проектирование систем сбора дождевой воды определялось с учетом биофизических и социально-экономических особенностей рассматриваемой территории. ГИС, ДЗ, многокритериальный анализ и гидрологическое моделирование были объединены в тематическом исследовании в Вади-Ватир на Синайском полуострове в Египте. Затем лучшие места для сооружений хранения осадков были определены с использованием комбинации логического анализа, взвешенной линейной комбинации и метода глубины депрессии. На рис. 4.1 показаны карты адекватности аккумуляции дождевой воды и размещения сооружений СДВ, которые используются в качестве исходных данных для данной главе. Пригодность накопления дождевых вод была разделена на шесть категорий: ограниченная, очень низкая, низкая, умеренная, высокая и очень высокая. Предлагаемые сооружения — это перколяционные (фильтрационные) резервуары, накопительные плотины и фермерские пруды.

4.1.2 Картирование опасностей внезапных наводнений

Карта опасностей внезапных наводнений, используемая в данной работе, была подготовлена в третьей главе. С помощью ГИС была обработана цифровая модель рельефа для определения морфометрических параметров района. Порядки водотоков каждого подбассейна были определены с использованием метода Стралера [98]. Метод морфометрического ранжирования применялся для изучения уязвимости подбассейнов к внезапным наводнениям. Морфометрический анализ был выполнен с использованием 17 параметров. Степень опасности быстроразвивающихся паводков была оценена и разделена на три класса: низкий, средний и высокий, как показано на рис. 4.2.

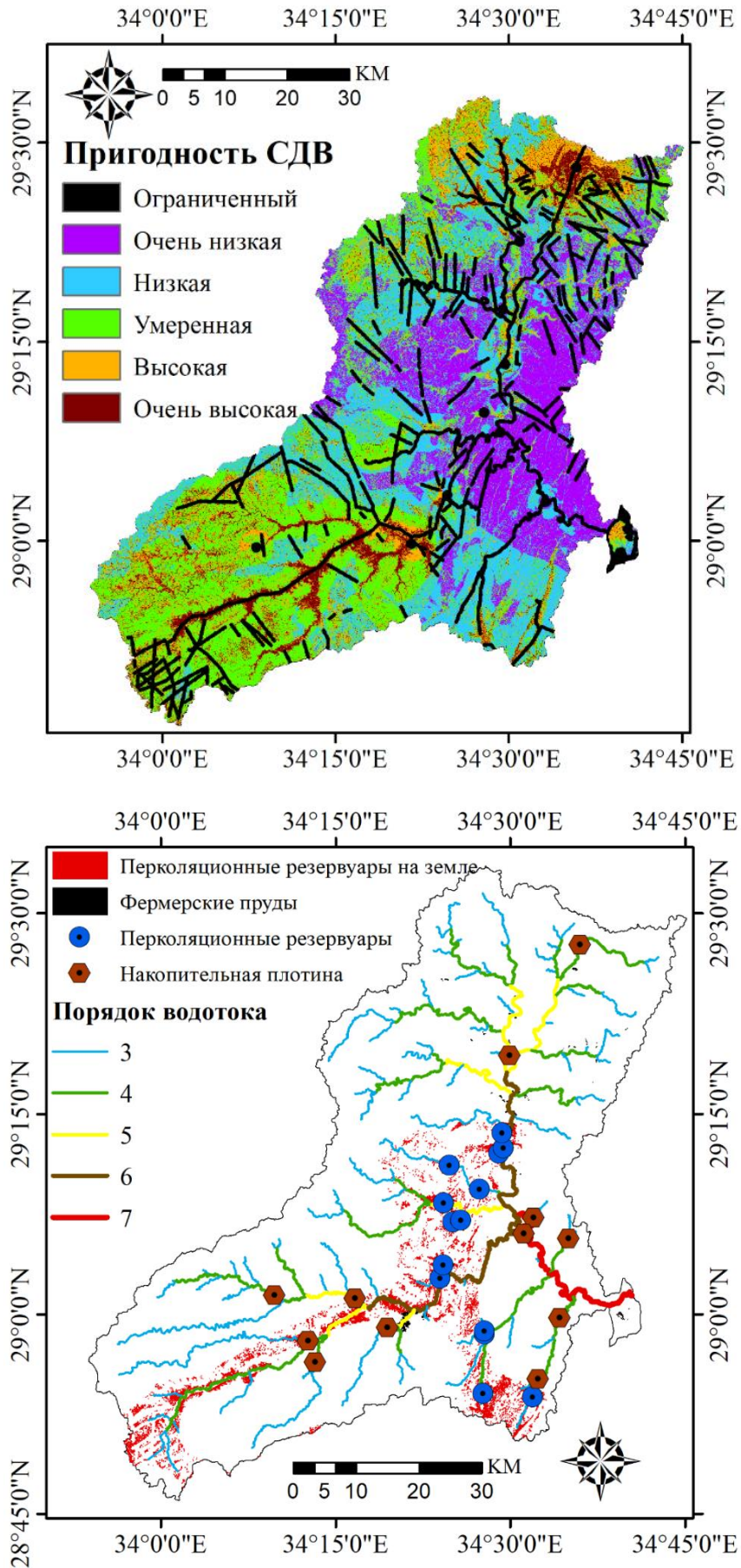


Рисунок 4.1 — Карты пригодности сбора дождевой воды и размещение сооружений СДВ

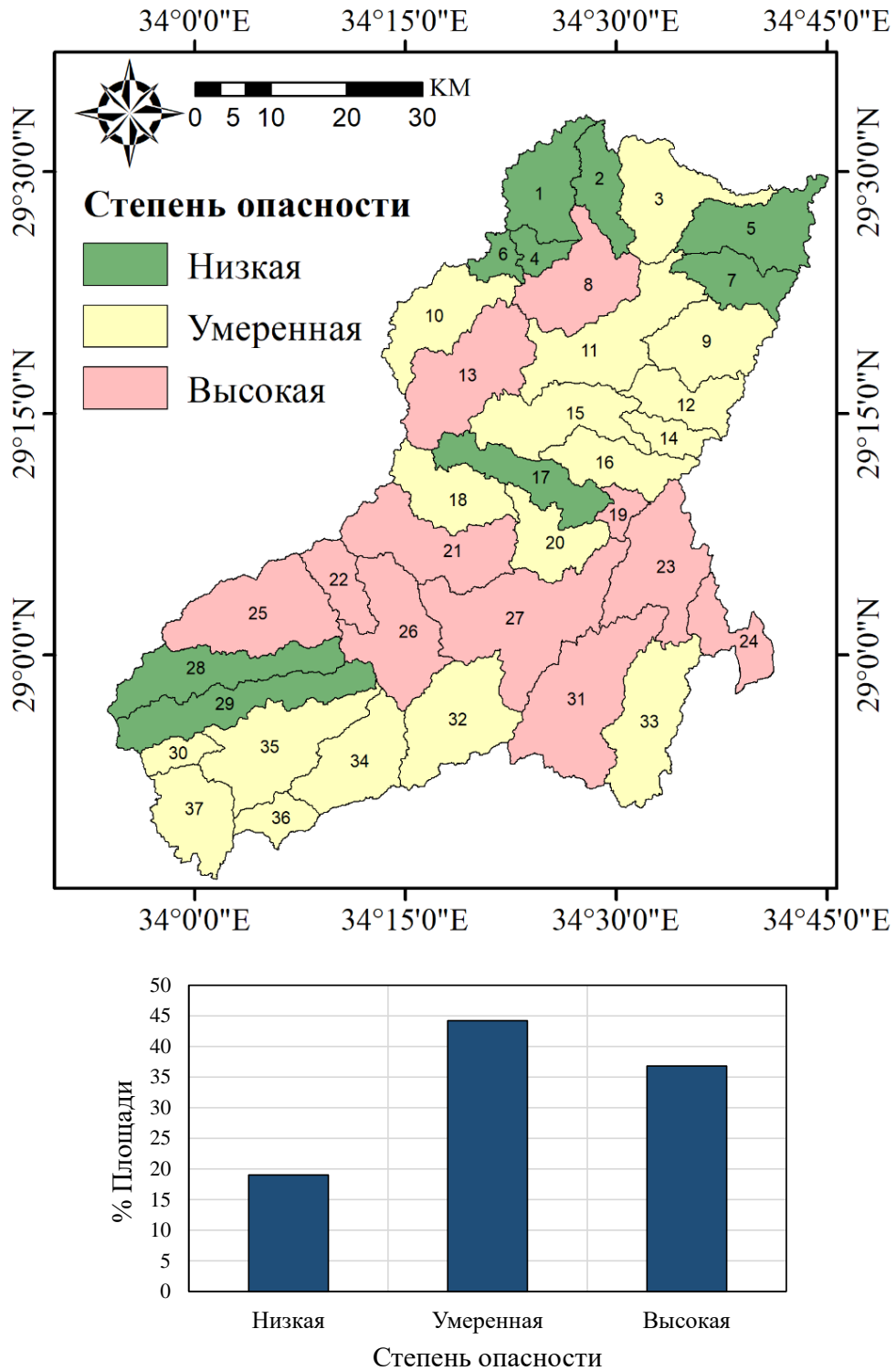


Рисунок 4.2 — Карта и гистограмма степени опасности внезапных наводнений

4.1.3 Влияние внезапных паводков на пригодность сбора дождевой воды

Карта опасности внезапных наводнений была создана в качестве базовой карты и разделена на три класса: низкий, умеренный и высокий. Карта адекватности была преобразована из растровой в векторную в среде ГИС. Карта

целесообразности СДВ была разделена на шесть отдельных карт в соответствии со степенью достаточности. Базовая карта была наложена на каждую карту пригодности сбора дождевой воды для анализа каждого случая отдельно. Эта комбинация породила шесть различных случаев. Прояснено влияние ливневых паводков на каждую категорию адекватности аккумуляции дождевой воды. Определено повышение достаточности накопления дождевых вод. Определены оптимальные места для водосборных сооружений. Эти площадки очень подходят для СДВ и расположены в регионах повышенной опасности.

4.1.4 Влияние внезапных паводков на строительство сооружений СДВ

В среде ГИС карта опасности наводнений была разделена на три части в соответствии со степенью опасности. Точно так же предлагаемые сооружения сбора дождевой воды были разделены на три секции. Карта опасностей была сгенерирована как базовая карта, а сооружения хранения осадков были перекрыты сверху. В зависимости от степени опасности этот метод произвел три различных случая. Строительство предложенных сооружений было приоритетным. Впервые определены наиболее подходящие сооружения для сбора воды во время паводков [7]. Кроме того, было оценено количество воды, которое могло бы быть собрано после строительства сооружений.

4.2 Результаты и анализ

Для пригодности аккумуляции дождевой воды результаты разделены на шесть отдельных случаев в зависимости от адекватности СДВ. А для сооружений хранения осадков результаты разделены на три случая в зависимости от степени опасности внезапного наводнения [7].

4.2.1 Зона ограниченного доступа для сбора дождевой воды с картой опасностей внезапных наводнений

Территория ограниченного доступа для СДВ состоит из городских районов, общин бедуинов, дорог и разломов [71]. Территория ограниченного доступа составляет 16% (573 км²) от общей площади исследования. На рис. 4.3 и 4.9

видно, что 42% и 44% запретной территории расположены в регионах с высокой и средней степенью опасности паводков соответственно. Это означает, что большая часть территории ограниченного доступа находится в высокой опасности от внезапных наводнений и нуждается в хорошей защите. Согласно таблице 14, только 14% территории ограниченного доступа находится в зоне низкой опасности наводнений. Возникновение ливневых паводков не повлияет на пригодность сбора дождевой воды данной категории (таблица 15).

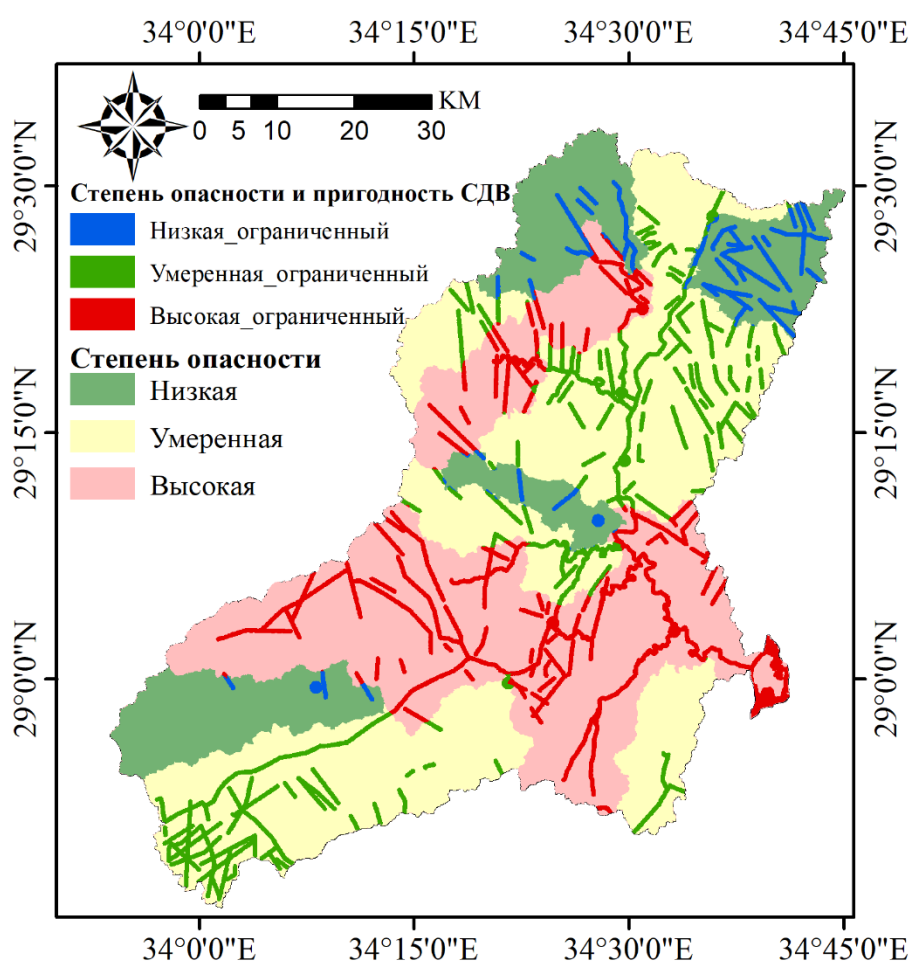


Рисунок 4.3 — Карта опасности внезапных наводнений с зоной ограниченного доступа

4.2.2 Очень низкая пригодность СДВ с картой опасностей внезапных наводнений

Пригодность сбора дождевой воды очень низкая для 17% (618 км²) изучаемой территории. Как показано на рис. 4.4 и 4.9, 39% этой территории находятся в зоне высокой опасности внезапных паводков. В случае ливневого

паводка адекватность этой территории для СДВ может измениться с очень низкой на низкую. Следовательно, площадь этой категории уменьшится с 618 км² (17%) до 358 км² (10%) (таблица 14). 50% и 11% очень низкопригодной площади приходится на регионы со средним и низким уровнем опасности наводнения соответственно (таблица 15).

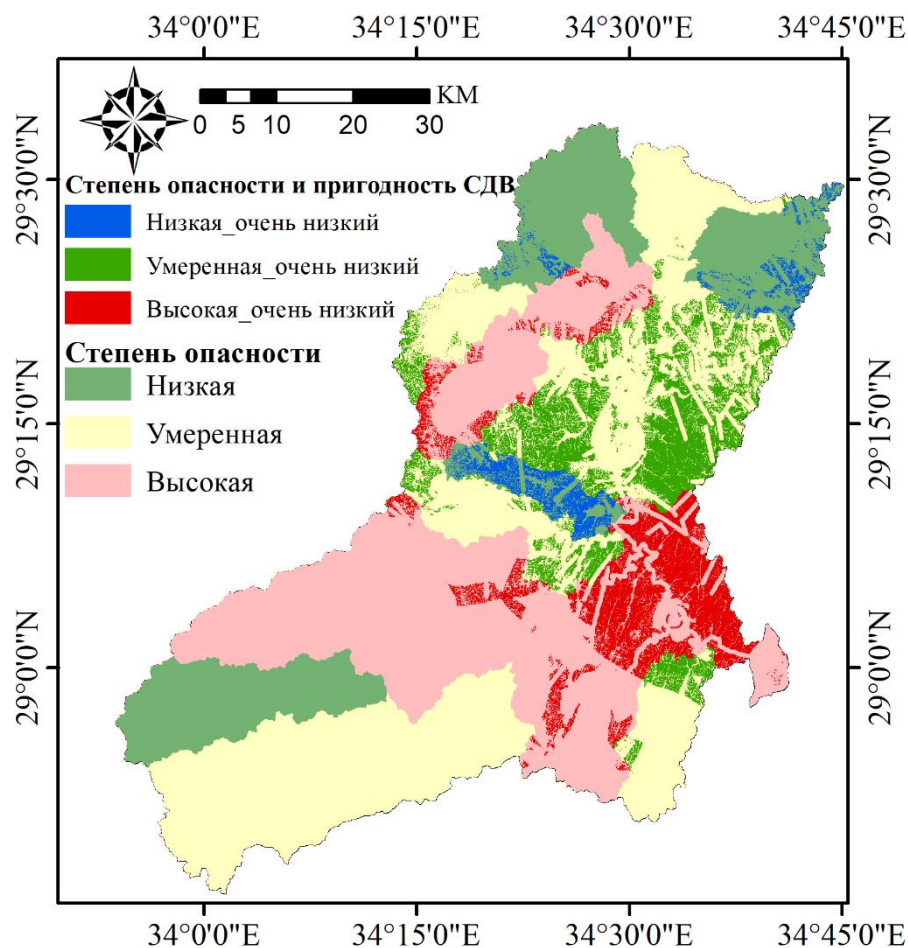


Рисунок 4.4 — Карта опасности внезапных наводнений с очень низкой пригодностью СДВ

4.2.3 Низкая пригодность сбора дождевой воды с картой опасностей внезапных наводнений

Мостафа и др. [71] пришли к выводу, что 23% (832 км²) площади водосбора Вади-Ватир малопригодны для СДВ. Эта площадь распределяется следующим образом: 45%, 40% и 15% в регионах с высокой, умеренной и низкой степенью опасности для внезапных паводков соответственно, как видно на рис. 4.5 и 4.9 (таблица 14). Территория, расположенная в зоне высокой степени опасности

(45%), более пригодна для сбора воды при возникновении паводков. Пригодность сбора дождевой воды для этой области может быть повышена с низкой до умеренной. Следовательно, количество воды, забираемой в этом районе, может быть увеличено. Площадь этой территории увеличится с 23% (832 км²) до 26% (931 км²), как показано в таблице 15.

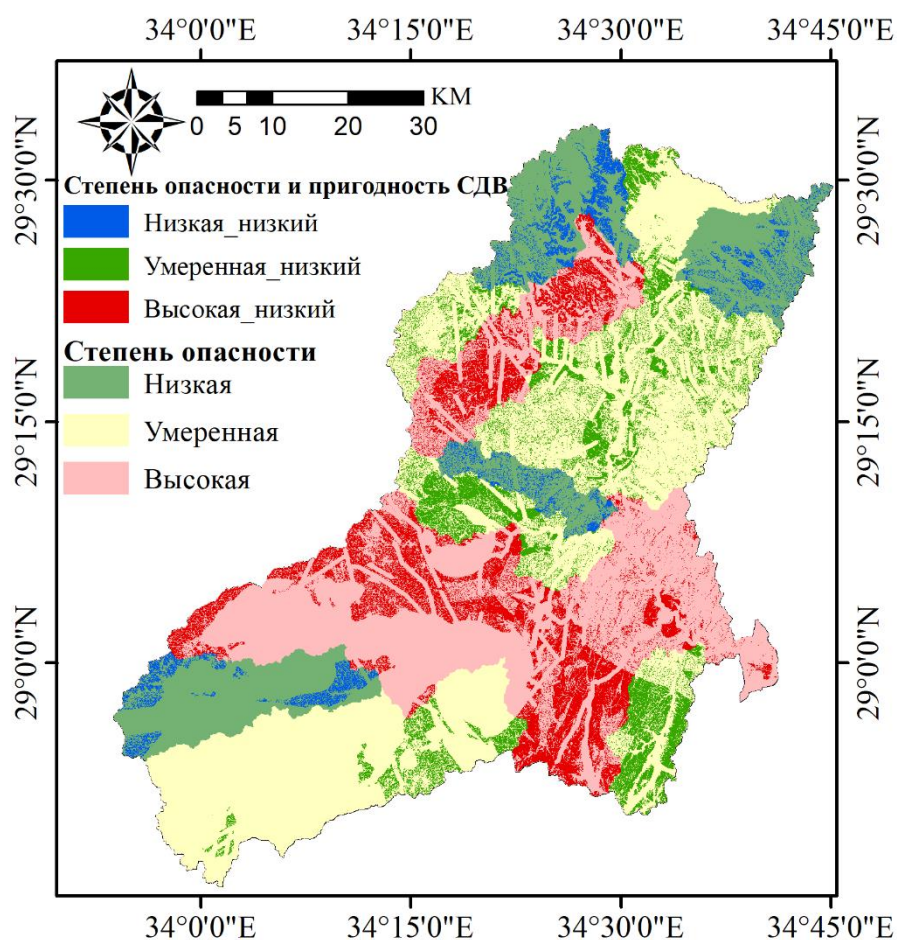


Рисунок 4.5 — Карта опасности внезапных наводнений с низкой пригодностью сбора дождевой воды

4.2.4 Умеренная пригодность СДВ с картой опасностей внезапных наводнений

Умеренно пригодная территория для сбора дождевой воды составляет 25% (891 км²) изучаемой территории. Как показано на рис. 4.6 и 4.9, 32% этой территории находится в зоне высокой опасности ливневых паводков, 44% — в зоне умеренной опасности и 24% — в зоне низкой опасности (таблица 14). Пригодность для СДВ района, находящегося в зоне повышенной опасности,

может быть повышена с умеренной до высокой во время внезапных паводков. Сооружения можно использовать для снижения опасности внезапных паводков и увеличения сбора воды. Площадь этой территории изменится с 891 км² (25%) до 752 км² (21%), как показано в таблице 15. Площадь уменьшилась, так как изменение от умеренного к высокому было выше, чем изменение от низкого к умеренному.

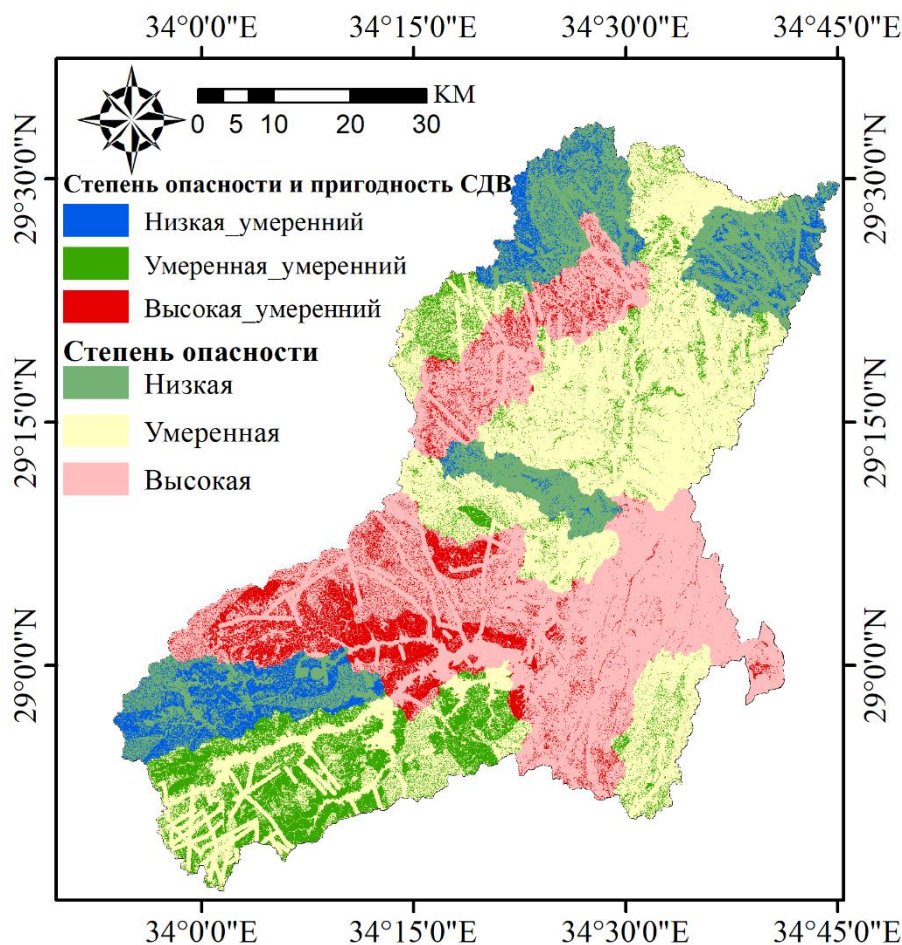


Рисунок 4.6 — Карта опасности внезапных наводнений с умеренной пригодностью СДВ

4.2.5 Высокая пригодность сбора дождевой воды с картой опасностей внезапных наводнений

Сделан вывод, что 12% (430 км²) территорий водосбора хорошо подходят для СДВ, а 28% находится в зоне повышенной опасности наводнений. В случае ливневых паводков эта площадь (28%) может быть очень высокой, пригодной для сбора дождевой воды и оптимальной для строительства водосборных

сооружений. Как показано на рис. 4.7 и 4.9, 41% и 31% наиболее подходящих территорий для аккумуляции дождевой воды находятся в регионах со средней и низкой опасностью быстроразвивающихся паводков соответственно (таблица 14). Доля этой категории изменится с 12% (430 км²) до 18% (644 км²), см. таблицу 15. Площадь увеличилась на 6% (214 км²), что является максимальным повышением пригодности накопления дождевых вод. Этот регион добавляется к подходящей площади для установки водосборных сооружений.

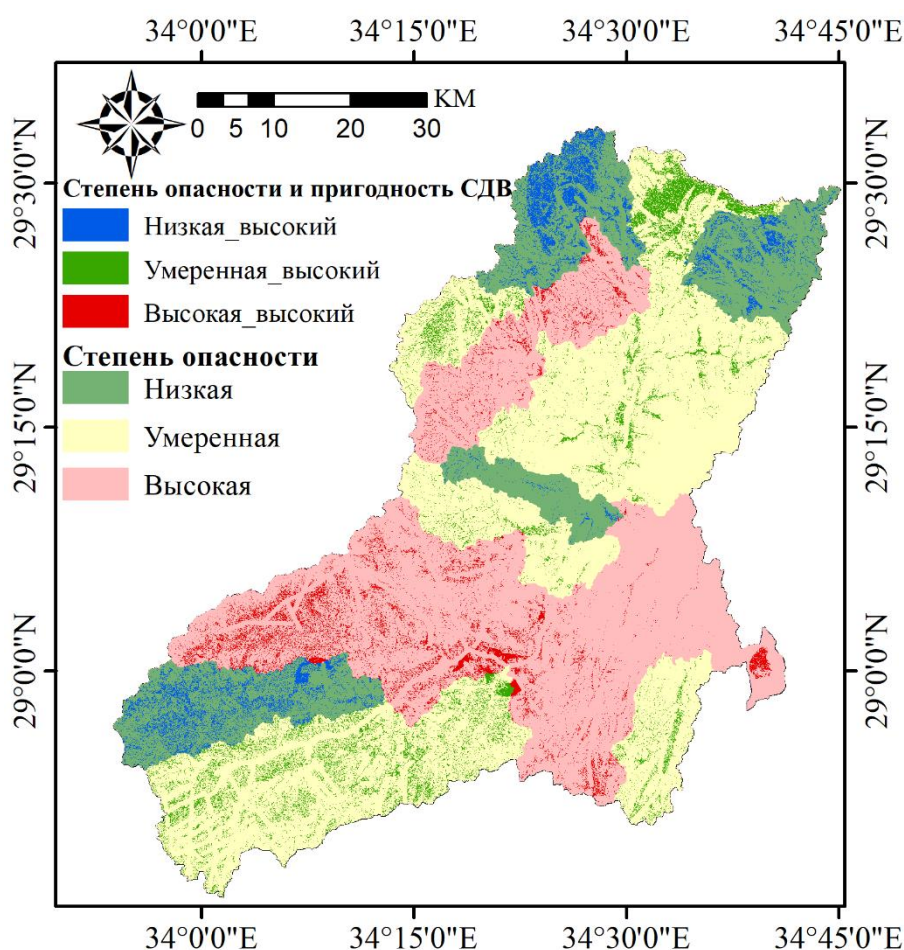


Рисунок 4.7 — Карта опасности внезапных наводнений с высокой пригодностью сбора дождевой воды

4.2.6 Очень высокая пригодность СДВ с картой опасностей внезапных наводнений

Обнаружено, что 7% (236 км²) территории исследований очень хорошо подходят для сбора дождевой воды [71]. Эта территория разделена следующим образом: 26% в районе с высокой опасностью быстроразвивающихся паводков,

48% в районе с умеренной опасностью и 26% в районе с низкой опасностью, как показано на рис. 4.8 и 4.9 (таблица 14). Площадь этой категории увеличится с 236 км² (7%) до 322 км² (9%), как показано в таблице 15. Увеличение для этой категории составляет 2% (86 км²). Это означает, что оптимальный регион для строительства водосборных сооружений увеличится на 2%. Хорошая защита этого региона от риска внезапных наводнений делает его возможным местом для новых бедуинских общин.

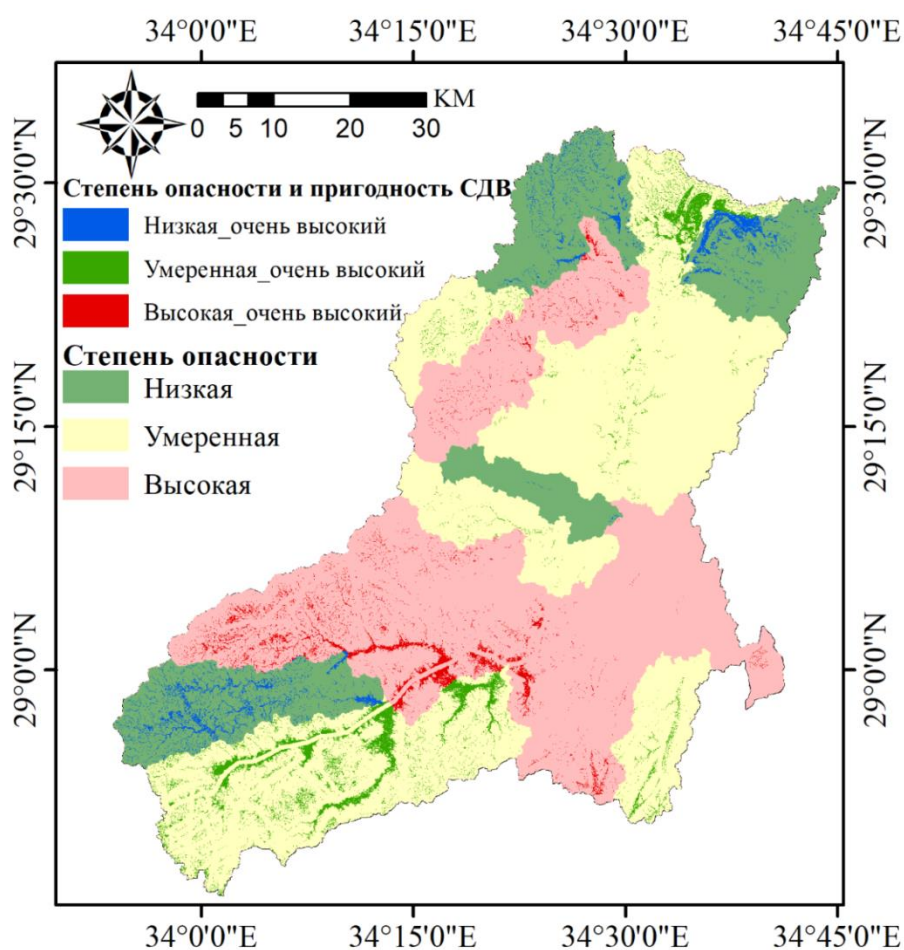
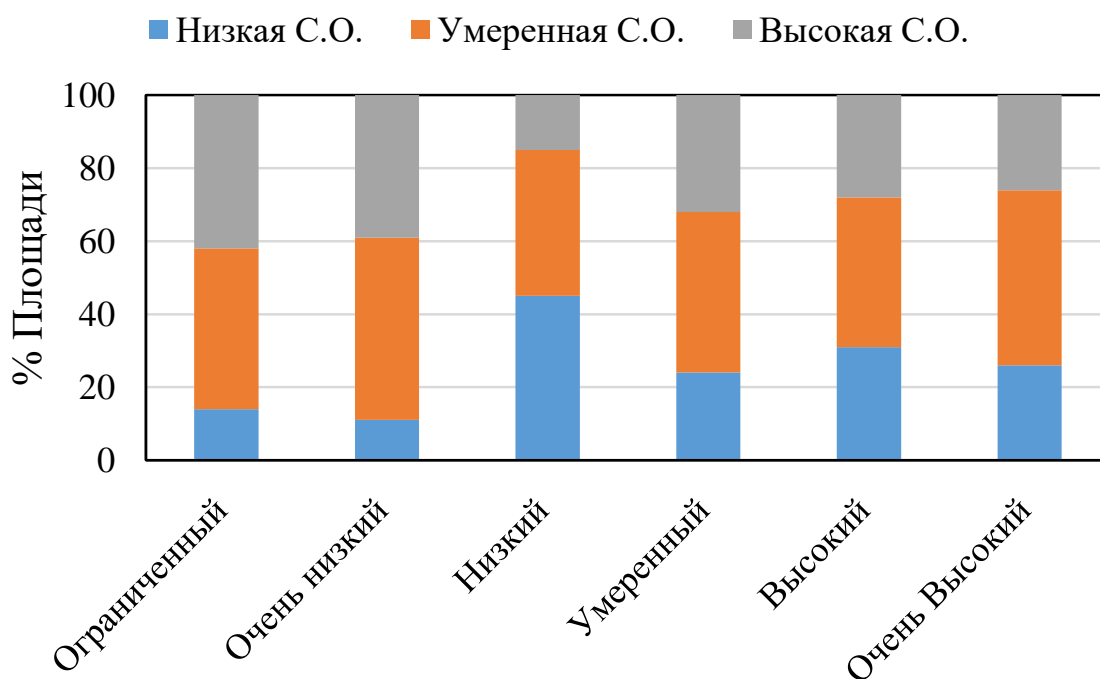


Рисунок 4.8 — Карта опасности внезапных наводнений с очень высокой пригодностью СДВ



Пригодность СДВ

Рисунок 4.9 — Распределение степени опасности для каждой пригодности сбора дождевой воды (где С.О. – степень опасности)

Таблица 14 — Процент пригодности СДВ для каждой степени опасности

Процент пригодности СДВ	%, (Площадь)	Степень опасности		
		Низкая	Умеренная	Высокая
Ограниченный	16% (573 km ²)	14%	44%	42%
Очень низкий	17% (618 km ²)	11%	50%	39%
Низкий	23% (832 km ²)	45%	40%	15%
Умеренный	25% (891 km ²)	24%	44%	32%
Высокий	12% (430 km ²)	31%	41%	28%
Очень Высокий	7% (236 km ²)	26%	48%	26%

Таблица 15 — Процент пригодность СДВ в обычном случае и во время паводков

Процент пригодности СДВ	Обычный случай (%) (Площадь)	Случай наводнения (%) (Площадь)
Ограниченный	16% (573 км ²)	16% (573 км ²)
Очень низкий	17% (618 км ²)	10% (358 км ²)
Низкий	23% (832 км ²)	26% (931 км ²)
Умеренный	25% (891 км ²)	21% (752 км ²)
Высокий	12% (430 км ²)	18% (644 км ²)
Очень Высокий	7% (236 км ²)	9% (322 км ²)

4.2.7 Сооружения сбора дождевой воды, расположенные в районах с низкой степенью опасности внезапных наводнений

Зона низкой опасности внезапных наводнений составляет 19% от исследуемой территории [12]. Установлено, что две накопительные плотины и два перколяционных (фильтрационных) резервуара находятся в зонах с низкой степенью опасности. Кроме того, 2,13 км² (8,22%) площади наземных перколяционных (фильтрационных) резервуаров и 0,11 км² (8,21%) площади фермерских прудов находятся в зонах с низкой степенью опасности, см. рис. 4.10 (таблица 16). Эти сооружения наименее пригодны для сбора воды во время внезапных наводнений. Поэтому строительство этих сооружений должно стать последним этапом развития Вади-Ватир.

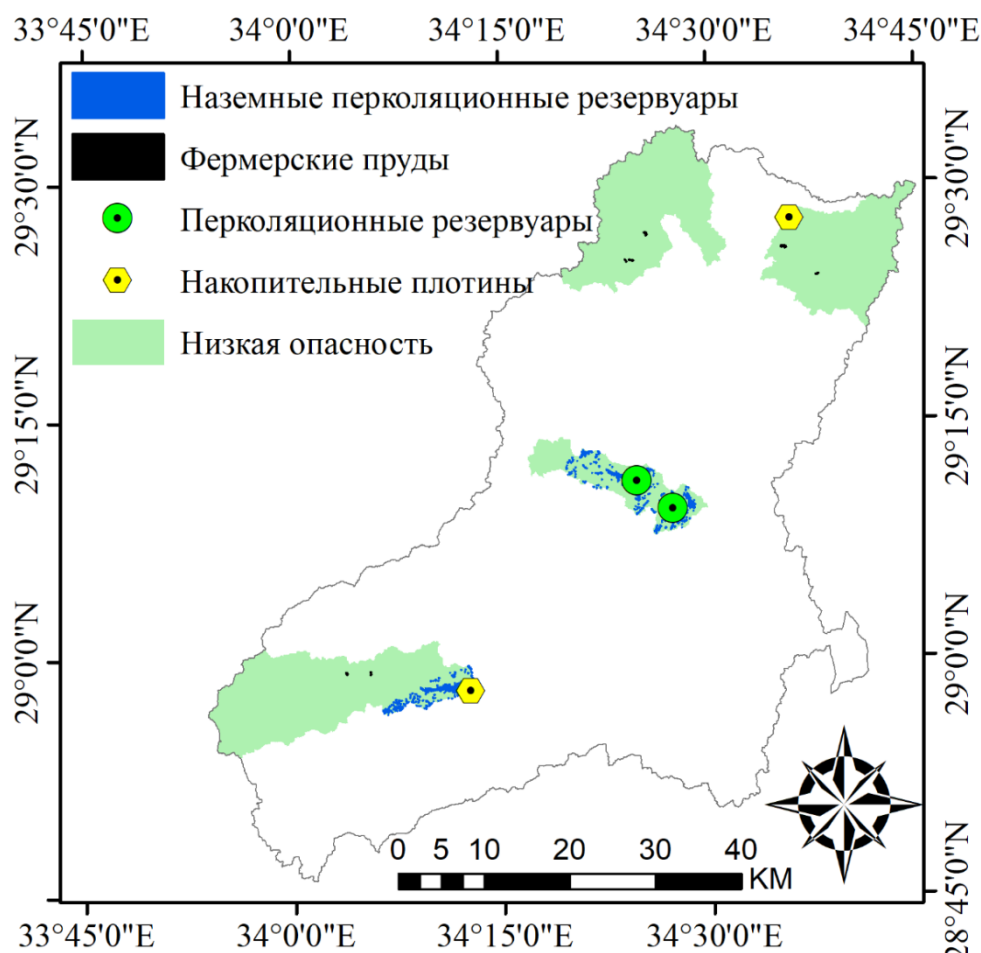


Рисунок 4.10 — Сооружения сбора дождевой воды в зоне низкой опасности

4.2.8 Сооружения СДВ, расположенные в районах с умеренной опасностью внезапных наводнений

Мостафа [12] уточнил, что 44,2% площади водосборного бассейна Вади-Ватир умеренно уязвимы к внезапным наводнениям. Как показано на рис. 4.11, зона умеренных паводков содержит пять накопительных плотин, семь перколяционных (фильтрационных) резервуаров, 12,62 км² (48,73%) пространства для наземных перколяционных (фильтрационных) резервуаров и 0,75 км² (55,97%) площади фермерских прудов (таблица 16). Примерно половина предлагаемых сооружений сбора дождевой воды находится в зонах умеренной опасности. В случае внезапного наводнения вероятность использования этих сооружений для сбора воды возрастает. Осуществление этих сооружений должно стать вторым приоритетом при развитии исследовательской района.

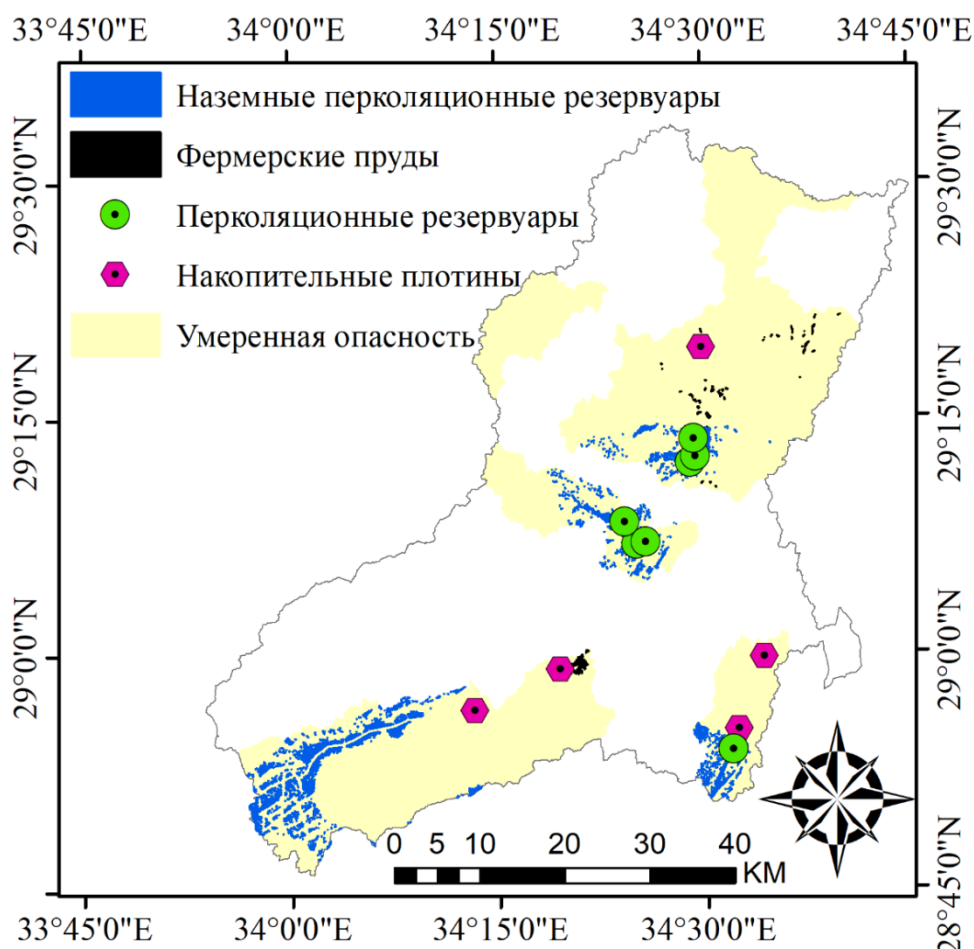


Рисунок 4.11 — Сооружения СДВ в зоне умеренной опасности

4.2.9 Сооружения сбора дождевой воды, расположенные в зонах высокой опасности внезапных наводнений

Площадь с высокой степенью опасности внезапных наводнений составляет 36,8% водосбора. Пять накопительных плотин, пять перколяционных (фильтрационных) резервуаров вдоль водотоков. Площадь локальных наземных перколяционных (фильтрационных) резервуаров составляет 11,15 км², а площадь фермерских прудов, расположенных в зоне высокой опасности внезапных наводнений-0,48 км², как показано на рис. 4.12 (таблица 16). Сооружения СДВ в этом районе наиболее подходят для сбора воды в случае внезапного наводнения. Освоение площади водосбора Вади-Ватир должно начинаться с этого региона.

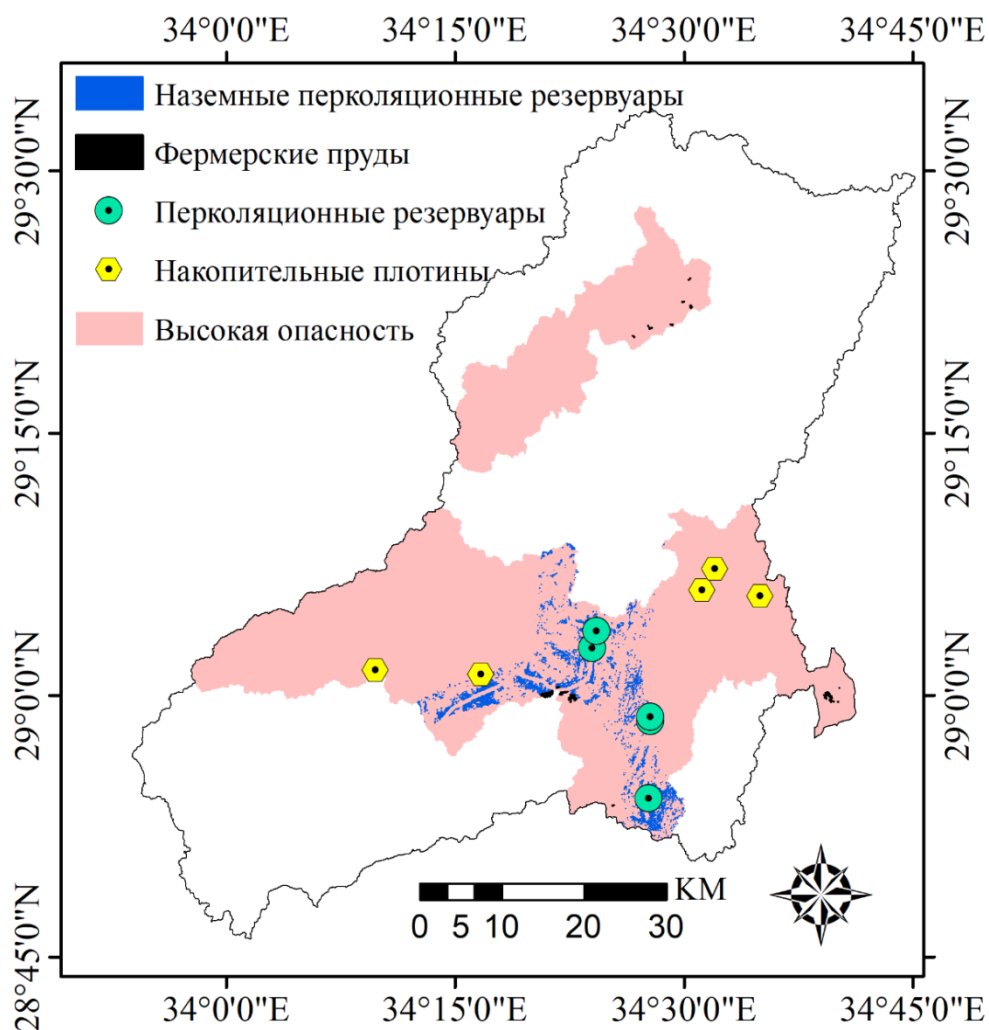


Рисунок 4.12 — Сооружения сбора дождевой воды в зоне высокой опасности

Таблица 16 — Распределение сооружений СДВ по степени опасности

Степень опасности	Разделение по площади	Наземные перколяционные резервуары (25.9 km ²)	Фермерские пруды (1.34 km ²)	перколяционные резервуары (14)	накопительные плотины (12)
Низкая	680.2 km ² (19%)	2.13 km ² (8.22%)	0.11 km ² (8.21%)	2	2
Умеренная	1582.4 km ² (44.2%)	12.62 km ² (48.73%)	0.75 km ² (55.97%)	7	5
Высокая	1317.4 km ² (36.8%)	11.15 km ² (43.05%)	0.48 km ² (35.82%)	5	5

4.3 Оценка объема собираемой воды сооружениями СДВ

Осуществление сооружений СДВ была разделена на три этапа в зависимости от степени опасности ливневых паводков (таблица 16). Первый этап включает в себя строительство сооружений хранения осадков, расположенных в регионах с высокой степенью опасности. Второй этап – строительство сооружений в регионах средней степени опасности. Третье – строительство сооружений низкой степени опасности. Сооружения первого этапа могут обеспечить 15,68 млн м³ (28,5%) потребностей в воде Вади-Ватир (рис. 4.13). Вторая и третья очереди могут обеспечить 23,1% и 10,64% потребности в воде соответственно, как показано в таблице 17.

Таблица 17 — Оценка объема воды, собираемой предлагаемыми сооружениями

Этап	Плотины	водохранилище объем (млн м ³)	Резервуары	Объем резервуаро в (млн м ³)	общий объем (млн м ³)	% потребности в воде (55 млн м ³)
Первый	П 1	5,35	P1	3,25	15.682	28,5
	П 2	4,32	P2	0,177		
	П 3	0,197	P3	0,089		
	П 4	0,331	P4	0,342		
	П 5	1,41	P5	0,214		
Итог I		11,61		4.072		
Второй	П 6	6,21	P6	0,111	12.703	23,1
	П 7	3,64	P7	0,077		
	П 8	0,23	P8	0,361		
	П 9	0,67	P9	0,201		
	П 10	0,095	P10	0,126		
			P11	0,378		
			P12	0,599		
Итог II		10,85		1.853		
Третий	П 11	2,93	P13	1,142	5,85	10,64
	П 12	1,67	P14	0,108		
Итог III		4,60		1,25		
Итог		27.06		7.175	34.238	62,24

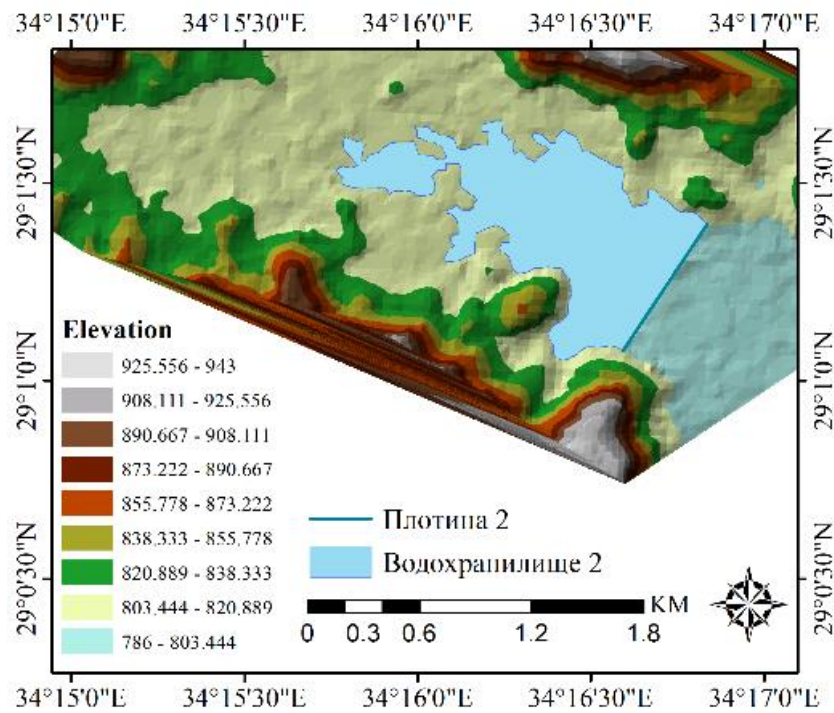
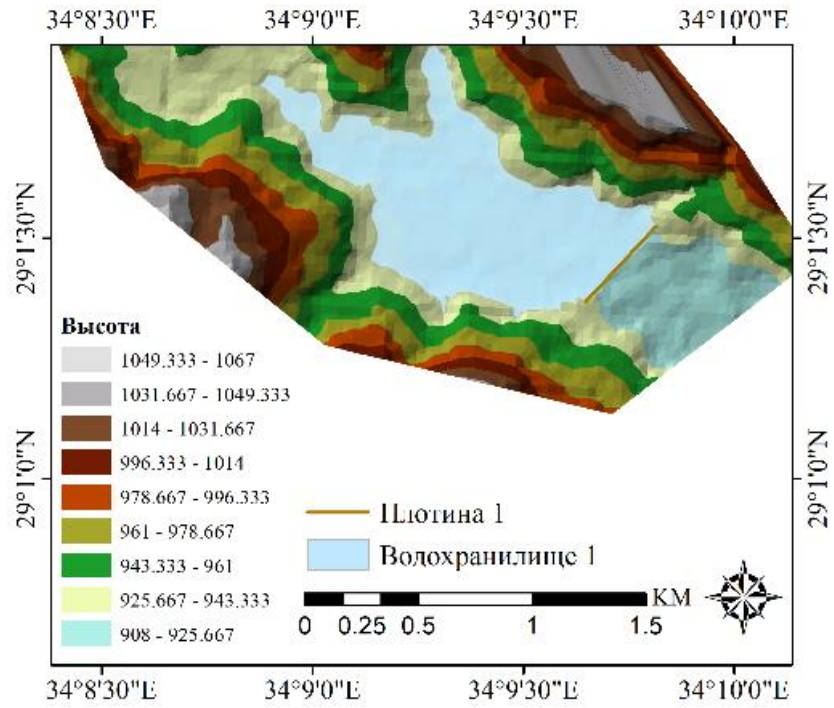


Рисунок 4.13 — Водохранилища двух плотин первого этапа

4.4 Устойчивый план сбора дождевой воды

Развитие изучаемой территории или любого другого региона должно осуществляться с использованием устойчивых стратегий [88]. Планы развития должны быть связаны с целями устойчивого развития (ЦУР) [100]. Принимая это во внимание, данная работа направлена на то, чтобы представить долгосрочный план СДВ путем достижения ЦУР. Выводы исследования связаны с ЦУР, чтобы предложить решения основных проблем, с которыми сталкиваются жители Вади-Ватир.

Интегрированное управление природными ресурсами, особенно водными, является задачей следующих целей устойчивого развития: задача 6.5 - «осуществление комплексного управления водными ресурсами» и задача 12.2 - «устойчивое управление природными ресурсами». Тема данной работы —СДВ— является важным компонентом комплексного управления водными ресурсами.

Целей устойчивого развития задачи 6.4 - «решение проблемы нехватки воды», задачи 6.А - «расширение сбора воды» и задачи 6.6 - «восстановление водоносных горизонтов» поддерживают идею устранения проблемы нехватки воды за счет сбора воды и подпитки грунта. Основной целью настоящего исследования является строительство систем аккумуляции дождевой воды для решения проблемы недостатка воды. Предлагаемые сооружения (перколяционные резервуары) используются для пополнения запасов подземных вод; подземные воды считаются самым важным источником питьевой воды для местных жителей. Справедливое распределение этих сооружений среди всех общин бедуинов в Вади-Ватир позволяет достичь задачи 6.1 - «доступ к воде для всех».

Задача 6.В - «участие местных сообществ в управлении водными ресурсами» и задача 12.8 - «повышение осведомленности в интересах устойчивого развития» имеют важное значение для устойчивого развития Вади-Ватир. Осведомленность общественности о важности систем накопления дождевых вод можно повысить с помощью средств массовой информации (например, выездов на места, учебных курсов). Кроме того, бедуины должны

участвовать в планировании и осуществления стратегий управления. Это сотрудничество облегчит строительство, консервацию и техническое обслуживание сооружений.

Сельское хозяйство лежит в основе ряда задач целей устойчивого развития. Например, задача 2.3 - «удвоение производительности сельского хозяйства», задача 15.3 - «борьба с опустыниванием» и задача 2.4 - «внедрение устойчивых методов ведения сельского хозяйства». В связи с этим большое значение имеет строительство предлагаемых сооружений (фермерских прудов и накопительных плотин) и поощрение лесонасаждения. Эти меры позволят увеличить площадь обрабатываемых земель и уменьшить опустынивание. Соответственно, жизненно важное значение имеет подбор культур с низким водопотреблением и высокой продуктивностью, а также применение таких современных методов орошения, как капельное и дождевание. Расширение сельского хозяйства решит социально-экономические проблемы и позволит достичь многих целей. Это увеличит производительность продовольствия, повысит уровень доходов жителей и создаст рабочие места, что в итоге приведет к ликвидации нищеты и голода. С этой целью являются: задача 1.2 - «сократить бедность»; задача 2.1 - «покончить с голодом»; задача 8.3 - «содействие созданию рабочих мест»; задача 9.1 - «поддержка экономического развития».

Использование доступной и чистой энергии является седьмой целью ЦУР (например, задача 7.2 - «увеличение использования возобновляемых источников энергии»). Солнечная энергия может быть устойчивым источником энергии, необходимой для сельского хозяйства и муниципального использования. Установка солнечных панелей над водоемами обеспечит необходимую энергию и уменьшит потери на испарение.

Изменение климата в настоящее время стало глобальной проблемой. Принимая это во внимание, целей устойчивого развития поощряют снижение последствий изменения климата и адаптацию к ним. Это решается следующими задачами: задача 1.5 - «сократить связанные с климатом экстремальные явления»;

задача 11.В - «адаптация к изменению климата»; задача 13.1 - «повысить устойчивость к опасностям, связанным с климатом». Изучаемый район уязвим к изменению климата, которое может вызвать стихийные бедствия, такие как внезапные наводнения. Строительство сооружений СДВ может снизить опасность, создаваемую внезапными наводнениями, и защитить туристический город Нувейба и основные дороги в водосборе. Соответственно, задача 8.9 - «развитие туризма» может быть достигнута (рис. 4.14).



Рисунок 4.14 — целей устойчивого развития, связанные с исследованием

Данная работа напрямую связано с задачами шестой цели «чистая вода и санитария». Однако исследование может быть связано с рядом социально-экономических и экологических целей устойчивого развития (ЦУР). План сбора

дождевой воды предлагает долгосрочные решения различных проблем, с которыми сталкиваются местные жители.

Представленная стратегия (план и результаты) может помочь водохозяйственникам и проектировщикам в определении оптимальных участков для сооружений хранения осадков и решения проблем местных сообществ. Применяемый метод использует данные из общедоступных источников. Это делает метод пригодным для регионов с ограниченными наземными данными (например, полузасушливые и засушливые).

Выводы по главе 4

В данной главе изучалось влияние ливневых паводков на пригодность сбора дождевой воды. Новизна заключается в том, что совпадение между оценкой достаточности СДВ и анализа опасности внезапных наводнений может быть использовано для увеличения сбора воды и снижения риска внезапных наводнений. Используемый метод успешно продемонстрировал взаимосвязь между ливневыми паводками и каждым случаем адекватности аккумуляции дождевой воды. Основные выводы настоящей главы можно резюмировать следующим образом:

- Возникновение ливневых паводков оказывает значительное влияние на использование накопления дождевых вод.
- Оптимальная зона для реализации водосборных сооружений (очень высокая-пригодная площадь для СДВ увеличилась с 236 км² (7%) до 322 км² (9%).
- Площадь аккумуляции увеличилась с 430 км² (12%) до 644 км² (18%), количество воды, которое можно собрать, тоже увеличивается.
- Максимальное изменение сбора дождевой воды составляет 7% (268 км²) для очень низкой категории.
- Возможность внезапных паводков не влияет на пригодность зоны ограниченного доступа для использования в целях охраны окружающей среды. Однако запретная зона должна быть хорошо защищена от опасности внезапных паводков в районах повышенной и средней опасности.

- Установка водосборных сооружений в наиболее подходящих для накопления дождевых вод районах, расположенных в зонах повышенной опасности, снижает опасность внезапных паводков и максимально увеличивает количество собираемой воды.

В соответствии со степенью опасности внезапных наводнений процесс развития Вади-Ватир был разделен на три этапа следующим образом:

- Этап I: строительство сооружений хранения осадков, расположенных в регионах с высокой степенью опасности включает в себя 5 перколяционных (фильтрационных) резервуаров, 5 накопительных плотин, 11,15 км² площади наземных перколяционных (фильтрационных) резервуаров и 0,48 км² для фермерских прудов. Эти сооружения являются оптимальными для сбора воды во время внезапных наводнений. Данный этап обеспечивает 15,68 млн м³ (28,5%) потребностей в воде Вади-Ватир.

- Этап II: строительство сооружений в зонах с умеренной степенью опасности включает 7 перколяционных (фильтрационных) резервуаров, 5 накопительных плотин, 12,62 км² для наземных перколяционных (фильтрационных) резервуаров и 0,75 км² для фермерских прудов. Второй этап обеспечивает 12,7 млн м³ (23,1%) потребностей в воде.

- Этап III: строительство сооружений в районах с низким уровнем опасности включает два перколяционных (фильтрационных) резервуара, две накопительные плотины, 2,13 км² для наземных перколяционных (фильтрационных) резервуаров и 0,11 км² для фермерских прудов. Данный этап обеспечивает 5,85 млн м³ (10,64%) потребностей в воде.

- Применение устойчивого плана сбора дождевой воды имеет большое значение для развития Вади-Ватир. Существует соответствие между задачами настоящего исследования и задачами ЦУР 6 (например, задача 6.1 «доступ к воде для всех», задача 6.4 «решение проблемы нехватки воды», задача 6.A «расширить сбор воды», и задача 6.6 «восстановить водоносные горизонты»). Таким образом, установка предлагаемых систем СДВ обеспечивает решение проблемы недостатка воды и достижение целей устойчивого развития.

- Подход исследования показывает различные связи с различными социальными, экономическими и экологическими ЦУР и выделяет долгосрочные решения социальных, экономических и экологических проблем, например, расширение сельского хозяйства и создания рабочих мест.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы исследования можно резюмировать следующим образом:

- Управление водными ресурсами Египта сопряжено с многочисленными проблемами. Основная из них — это строительство великой плотины возрождения Эфиопии. Кроме того, следует упомянуть орошение сельскохозяйственных земель и большие водопотери, отсутствие необходимой информации, значительное испарение воды и малое количество осадков.

- Основными решениями водных ресурсов в Египте являются проекты Верхнего Нила, бурение колодцев на воду, опреснение морской воды, использование очищенных сточных и дренажных вод, оптимизационное моделирование. Необходимо использовать необычные водные ресурсы, такие как сбор дождевой воды.

- В ходе работы были впервые определены участки, подходящие для сбора дождевой воды, в районе Вади-Ватир на Синайском полуострове, а также оптимальные места и зоны для хранения осадков:

1. Окончательная карта СДВ показала, что 19% (666 км²) Вади-Ватира очень подходят для аккумуляции дождевой воды. Примерно вся эта территория расположена вдоль водотоков водосбора. Эти результаты обусловлены крутыми склонами изучаемой территории и горным характером.

2. Установлено, что 12 участков подходят для строительства запорных плотин. Четырнадцать участков определены как оптимальные для размещения перколяционных (фильтрационных) резервуаров вдоль водотоков. Площадь, считающаяся идеальной для наземных перколяционных (фильтрационных) резервуаров, составляет 25,9 км². Оптимальная площадь для фермерских прудов составляет 1,34 км².

- Для анализа с использованием подхода Эльшами результаты показали, что подбассейны с низкой, умеренной и высокой степенью опасности составляют 11,8%, 70% и 18,2% всей площади соответственно. Для метода

морфометрического ранжирования можно сделать вывод, что наименьшую степень опасности имеет 19% общей площади; 44,2% – умеренной степени опасности; и 36,8% – высшая степень опасности. Разница между двумя методологиями была очевидна, поскольку в подходе Эльшами использовались только три параметра.

- В исследовании изучалось влияние ливневых паводков на пригодность СДВ и строительство сооружений хранения осадков:

1. Оптимальная зона для осуществления водосборных сооружений увеличилась с 236 км² (7%) до 322 км² (9%). Площадь наиболее пригодной для аккумуляции дождевой воды увеличилась с 430 км² (12%) до 644 км² (18%). Максимальное изменение пригодности сбора дождевой воды (СДВ) составляет 7% (268 км²) для очень низкой категории.

2. Запретная зона, расположенная в районах повышенной и средней опасности, должна быть хорошо защищена от опасности внезапных паводков.

3. Процесс развития Вади-Ватир был разделен на три этапа строительства в соответствии со степенью опасности внезапных наводнений. Первый этап обеспечивает 15,68 млн м³ (28,5%) потребностей в воде Вади-Ватир. Второй и третий этапы могут обеспечить 23,1% и 10,64% потребности в воде соответственно, в итоге 62,24 % (34,24 млн м³) потребностей в воде.

- Существующий подход показывает разнообразные связи с различными целями устойчивого развития и выделяет устойчивые решения водных, социальных, экономических и экологических проблем, например, использование солнечной энергии для производства электроэнергии, расширение сельского хозяйства, и создания рабочих мест.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Данные исследования предназначены для Министерства водного хозяйства и ирригации Египта и Института водных ресурсов Египта. Разработанный подход может применяться в различных регионах, испытывающих дефицит воды. Однако строительство систем СДВ требует дополнительных исследований, в том числе

детальных полевых обследований предлагаемых площадок аккумуляции дождевой воды, полной характеристики площадок и оценки и мониторинга операций поверхностного затопления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Д. В. ГИС В Водном Туризме На Примере Бассейна Реки Амга (Якутия) / Д. В. Андреев // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – Т. 8–4. – № 78. – С. 332–333.
2. Артезианские скважины: глубина бурения, способы сооружения: [Электронный ресурс]. URL: <https://proagregat.com/burenie/artezianskie-skvazhiny> (Дата обращения: 14.01.2023).
3. Болданова Е. В. Оценка трофности озера Байкал с использованием дистанционного зондирования / Болданова Е. В. // Географический вестник = Geographical bulletin. – 2022. Т. 2. – № 61. С. 73–89. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-73-89>
4. Громадская, Е. И. Актуализация картографической и тематической информации о водных объектах Республики Беларусь / Е. И. Громадская, Д. С. Баканова // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: сб. статей III Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2020», Минск, 3 декабря 2020 г. : в 3 т. – Минск: БГТУ, 2021. – Т. 1. – С. 93–98. <https://elib.belstu.by/handle/123456789/40744>
5. Губанов Р. С. Эксплуатация гидротехнических сооружений и трансформация сооружений, и трансформация прибрежного фаунистического комплекса (Tetrapoda) озера Лысый Лиман / Р. С. Губанов // Геология и Геофизика Юга России. – 2022. – Т. 3. – № 12. – С. 157–168. <http://geosouth.ru/article/view/762/674>
6. Еззелдин М. Управление водными ресурсами Египта: проблемы и способы решения / М. Еззелдин // Строительство: наука и образование. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 1-14. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.1.1
7. Еззелдин М., Синиченко Е.К., Грицук И.И. Влияние ливневых паводков на строительство сооружений по сбору дождевой воды / М. Еззелдин, Е. К. Синиченко, И. И. Грицук // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т.

13. Вып. 2. – Ст. 102–116. URL: <http://nsojournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.7

8. Ефанов А. В. Использование Многоспектральной Спутниковой Информации Для Мониторинга Динамики Озер И Оценки Лимнологических Характеристик Водных Экосистем Центрального Ямала / А. В. Ефанов, В. В. Кириллов, Н. М. Ковалевская, А. В. Ловцкая, Л. А. Хворова // Высокопроизводительные Вычислительные Системы И Технологии. – 2021. – Т. 5. – № 1. – С. 331–337.

9. Красногорская Н. Н. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами / Н. Н. Красногорская, Е. А. Белозерова // Гидрометеорология и Экология. – 2021. – № 65. С. 702–725. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-65-702-725>

10. Куленбеков Ж. Э. Обзор и анализ эффективности международных нормативно-правовых актов и законов в сфере Интегрированного управления водными ресурсами в Центральной Азии / Ж. Э. Куленбеков, С. Ж. Орунбаев, Б. Д. Асанов, Е. П. Сахваева // Проблемы постсоветского пространства. – 2022. Т. 9. – № 2. С. 20–43. <https://doi.org/10.24975/2313-8920-2022-9-1-20-43>

11. Кутляров Д. Н. Моделирование Водных Объектов Республики Башкортостан С Использованием Гис-Технологий / Д. Н. Кутляров, А. Н. Кутляров // Землеустройство, Кадастр И Мониторинг Земель. – 2018. – Т. 6. № 161. – С. 61–66.

12. Мостафа Еззелдин. Картирование опасности внезапных наводнений с использованием метода морфометрического ранжирования / Еззелдин Мостафа, Е. К. Синиченко, И. И. Грицук // Природообустройство. – 2023. – № 2. – С. 106–112. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-106-112

13. Сейтов А. Ж. Оптимальные Управления Водных Ресурсов Крупных Магистральных Каналов С Каскадом Насосных Станций Ирригационных Систем / А. Ж. Сейтов, А. Р. Кутлимурадов, Р. Н. Тураев, Э. М. Махкамов, Б. Р.

Хонимкулов // Академические Исследования В Области Образовательных Наук. – 2021. Т. 2. – № 2. С. 265–273.

14. Студников С. Н. Методика Использования Гис-Технологии В Экологическом Мониторинге На Примере Программы Mapinfo Pro / С. Н. Студников, М. В. Войнова // Астраханский Вестник Экологического Образования. – 2021. – Т. 5. – № 65. – С. 36–46. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-5-36-46>

15. Abdylaty I. Forecasting of Flash Floods Peak Flow for Environmental Hazards and Water Harvesting in Desert Area of El-Qaa Plain, Sinai / I. Abdylaty, H. Shoshah, M. Zeleňáková, et al. // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19 No. 10. – 6049. <https://doi.org/10.3390/ijerph19106049>

16. Abdeldayem S. Water quality issues in Egypt / S. Abdeldayem // Italian–Egyptian Study Days on the Environment. Cairo, Egypt, 9–20 October 1994. – Pp. 81–92.

17. Abdelhai M. Rural non-farm employment / M. Abdelhai // Workshop Current and emerging issues for economic analysis and policy research, CUREMIS II NENA. FAO. INP. – 2002.

18. Abdelhaleem F., Helal E. Impacts of grand Ethiopian Renaissance Dam on different water usages in Upper Egypt / F. Abdelhaleem, E. Helal // British Journal of Applied Science & Technology. – 2015. – Vol. 8. No. 5. – Pp. 461–483. DOI: 10.9734/BJAST/2015/17252

19. Abdelshafy H.I. Rainwater issue in Egypt: quantity, climatic effect and future overlook / H.I. Abdelshafy, A.A. Elsharty, M. Regelsberger, C. Platzer // Journal of Mediterranean Marine Science. – 2010. – Vol. 11. No. 2. – Pp. 245– 257. DOI: 10.12681/mms.75

20. Abdin A.E. Rational water use in Egypt, technological perspectives for rational use of water resources in the Mediterranean region / A.E. Abdin, I. Gaafar // Options Méditerranéennes. – 2009. – Vol. 88. – Pp. 11–27.

21. Abdrabbo M.A. Implementing of RCPs Scenarios for the Prediction of Evapotranspiration in Egypt / M.A. Abdrabbo, A.A. Farag, W.M.S. El-Desokey // International Journal of Plant & Soil Science. – 2015. – Vol. 6. No. 1. – Pp. 50–63. DOI: 10.9734/IJPSS/2015/12721
22. Abuzeid M.A. Water resources assessment for Egypt / M.A. Abuzeid // International Journal of Water Resources Development. – 2007. – Vol. 8. No. 2. – Pp. 76–86.
23. Adham A. Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review / A. Adham, M. Riksen, M. Ouessar, C. Ritsema // International Soil and Water Conservation Research. – 2016. – Vol. 4. No. 2. – Pp. 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001>
24. Adham A.A GIS-based approach for identifying potential sites for harvesting rainwater in the Western Desert of Iraq / A. Adham, K.N. Sayl, R. Abed, et al. // International Soil and Water Conservation Research. – 2018. – Vol. 6. No. 4. – Pp. 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.07.003>
25. Al-adamat R. Combining GIS with multicriteria decision making for siting water harvesting ponds in Northern Jordan / R. Al-adamat, A. Diabat, G. Shatnawi // Journal of Arid Environments. – 2010. – Vol. 74. No. 11. – Pp. 1471–1477. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.001>
26. Allam M.N. Water resources in Egypt: future challenges and opportunities / M.N. Allam, G.I. Allam // Water International Journal. – 2007. – Vol. 32. No. 2. – Pp. 205–218. DOI: 10.1080/02508060708692201
27. Alnaggar D. Water resources management and policies for Egypt / D. Alnaggar // Workshop on Policies and Strategies Options for Water Management in Islamic Countries. Tehran, Iran, December 2003.
28. Al-Zayed I.S. Water Harvesting and Flashflood Mitigation-Wadi Watier Case Study (South Sinai, Egypt) / I.S. Al-Zayed, L. Ribbe, A. Al-Salhi // International

Journal of Water Resources and Arid Environments. – 2013. – Vol. 2. No. 2. – Pp. 102-109. [https://www.psipw.org/attachments/article/340/IJWRAE_2\(2\)102-109.pdf](https://www.psipw.org/attachments/article/340/IJWRAE_2(2)102-109.pdf)

29. Bahaa E. A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility / E. Bahaa, A. Mamdooh, M.H.A. Reda, S.Z., Amr // Ain Shams Engineering Journal. – 2022. – Vol. 13. No. 3. – 101618. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.013>

30. Bajabaa S. Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia) / S. Bajabaa, M. Masoud, N. Alamri // Arabian Journal of Geosciences. – 2014. – Vol. 7. No. 6. – Pp. 2469–2481.

31. Berhanu B. Identification of Surface Water Storing Sites Using Topographic Wetness Index (TWI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) / B. Berhanu, E. Bisrat // Journal of Natural Resources and Development. – 2018. – Vol. 8. Pp. 91–100. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v8i0.09>

32. Bitterman P. Water security and rainwater harvesting: A conceptual framework and candidate indicators / P. Bitterman, E. Tate, K.J. Van Meter, N.B. Basu // Applied Geography. – 2016. – Vol. 76. Pp. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.013>

33. Cairo University. Implications of bridging the Ethiopian Renaissance on Egypt // a conference organized by Nile Basin Group. Cairo University, Cairo, Egypt, 16 April 2013.

34. Campos A.F. Influence of the El Niño phenomena on the climate change of the Ecuadorian coast / A.F. Campos, J. Alava, E.K. Sinichenko, I.I. Gritsuk // RUDN Journal of Engineering Research. – 2018. – Vol. 19. No. 4. – Pp.513—523. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-4-513-523>

35. Chang N.B. Optimal management of environmental and land resources in a reservoir watershed by multiobjective programming / N.B. Chang, C.G. Wen, S.L. Wu // Journal of Environmental Management. – 1995. – Vol. 44. – Pp. 144–161.

36. Cools J. An early warning system for flash floods in hyper-arid Egypt / J. Cool, P. Vanderkimpen, G. Elafandi, et al. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2012. – Vol. 12. – Pp. 443–457.
37. Dadamouny M.A. Trends of climate with rapid change in Sinai, Egypt / M.A. Dadamouny, M. Schnittler // *Journal of Water and Climate Change*. – 2016. – Vol. 7. No. 2. – Pp. 393–414. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.215>
38. Diana R.K. Water sharing in the Nile River Valley / R.K. Diana // *Project GNV011: using GIS/remote sensing for the sustainable use of natural resources*. Geneva, 2000. – Pp. 1–85.
39. Eissa M.A. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt / M.A. Eissa, J.M. Pohll, O. Shouakar-Stash, et al. // *Applied Geochemistry*. – 2016. – Vol. 71. – Pp. 48–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.05.017>
40. Elbehiry M.G. Integrated GIS and Remote Sensing for Runoff Hazard Analysis in Ain Sukhna Industrial Area, Egypt / M.G. Elbehiry, A. Shedid, A. Abukhadra, M. Elhuseiny // *Earth Sciences*. – 2006. – Vol. 17. – Pp. 19-42.
41. Elewa H.H. Integration of the Analytical Hierarchy Process and GIS Spatial Distribution Model to Determine the Possibility of Runoff Water Harvesting in Dry Regions: Wadi Watir in Sinai as a Case Study / H.H. Elewa., M. Zelenakova, A.M. Nosair // *Water*. – 2021. – Vol. 13. – 804 p. <https://doi.org/10.3390/w13060804>
42. Elhassnaoui I. Management of water scarcity in arid areas: a case study (Ziz Watershed) / I. Elhassnaoui, Z. Moumen, M. Ouarani, et al. // *Insights into Regional Development*. – 2021. – Vol. 3. No. 1. – Pp. 80-103. [http://doi.org/10.9770/IRD.2021.3.1\(5\)](http://doi.org/10.9770/IRD.2021.3.1(5))
43. Elsayed M.R. Integrated water resource management in Sharkia Governorate, East Nile Delta using numerical evaluation of water management strategies / M.R. Elsayed, S.S. Omima, R.F. Maha, M.A Gamal // *Alexandria*

Engineering Journal. – 2019. – Vol. 58. No. 2. – Pp. 757–771. DOI: 10.1016/j.aej.2019.06.006

44. Elshamy I. Recent Recharge and Flash Flooding Opportunities in the Eastern Desert, Egypt. / I. Elshamy // Annals of Geological Survey of Egypt. – 1992 – Vol. 18. – Pp. 323-334.

45. Elshemy M. Hydrodynamic impacts of Egyptian Coastal Lakes due to climate change — example Manzala Lake / M. Elshemy, M. Khadr // Eighteenth International Water Technology Conference, IWTC18. Sharm ElSheikh, Egypt, 12–14 March 2015.

46. Emad E. Mitigating the impact of climate change by reducing evaporation losses: sediment removal from the High Aswan Dam reservoir / E. Emad, U. Brigitte, E. Bernd, F. Dalia // American Journal of Climate Change. – 2017. – Vol. 6. No. 2. – Pp. 230–246. DOI: 10.4236/ajcc.2017.62012

47. Emad E. Modeling high Aswan dam reservoir morphology using remote sensing to reduce evaporation / E. Emad, F. Dalia, U. Brigitte // International Journal of Geosciences. – 2014. – Vol. 5. No. 2. – Pp. 156–169. DOI: 10.4236/ijg.2014.52017

48. EMRL. Watershed Modeling System, Environmental Modeling Research Laboratory, Brigham Young University, Utah, USA // WMS user manual v 10.1. – 2017. [http://wmsdocs.aquaveo.com/WMS_User_Manual_\(v10.1\).pdf](http://wmsdocs.aquaveo.com/WMS_User_Manual_(v10.1).pdf)

49. ENVI. Exelis Visual Information Solutions // Inc., a subsidiary of Harris Corporation, Boulder, Colorado, USA. – 2015. <https://www.l3harrisgeospatial.com/Support/Self-Help-Tools/Help-Articles/Help-Articles-Detail/ArtMID/10220/ArticleID/15485/ENVI-53-Release-Notes>

50. ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10. // Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. – 2016. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>

51. Gabriele F. Effectiveness of Rainwater Harvesting Systems for Flood Reduction in Residential Urban Areas / F. Gabriele, L. Lorena // *Water*. – 2019. – Vol. 11. No. 7. – 1389. <https://doi.org/10.3390/w11071389>
52. Gado T.A. Climate Change Impacts on Water Balance in Egypt and Opportunities for Adaptations / T.A. Gado, D.E. El-Agha // In: Abu-hashim, M., Khebour Allouche, F., Negm, A. (eds) *Agro-Environmental Sustainability in MENA Regions*. Springer Water. Springer, Cham. – 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78574-1_2
53. Gautam S. Impacts of dem source, resolution and area threshold values on SWAT generated stream network and streamflow in two distinct Nepalese Catchments / S. Gautam, V. Dahal, R. Bhattarai // *Environmental Processes*. – 2019. – Vol. 6. No. 3. – Pp. 597– 617. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00379-6>
54. Gezelius S.S. Barriers to rational decision-making in environmental planning / S.S. Gezelius, K. Refsgaard // *Journal of Land Use Policy*. – 2007. – Vol. 24. – Pp. 338–348.
55. Hamdy E. The Nile Water-Food-Energy Nexus under Uncertainty: Impacts of the Grand Ethiopian Renaissance Dam / E. Hamdy, D. Slobodan, A.S. Dragan, T. Ioannis // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2020. – Vol. 146. No.11. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001285
56. Hamimi Z. The geology of Egypt / Z. Hamimi, A. El-Barkooky, J.M. Frías, et al. // *Regional Geology Reviews*. – 2020. DOI: 10.1007/978-3-030- 15265-9
57. Harby M. Water saving scenarios for effective irrigation management in Egyptian rice cultivation / M. Harby, F. Naoya // *Ecological Engineering*. – 2014. – Vol. 70. – Pp. 11–15. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.04.005
58. Harka A.E. Modelling rainfall runoff for identification of suitable water harvesting sites in Dawe River watershed, Wabe Shebelle River basin, Ethiopia / A.E. Harka, N.T. Roba, A.K. Kassa // *Journal of Water and Land Development*. – 2020. – Vol. 47. (X–XII). – Pp. 186–195. <https://doi.org/10.24425/jwld.2020.135313>

59. Helal E. Effect of Floating Bridges on Open Channels Flow and Bed Morphology / E. Helal, M. Sobeih, M. Ezzeldin // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. – 2018. – Vol. 144. No. 7. – 04018026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001331](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001331)
60. Hvidt M. Water resource planning in Egypt. The Middle Eastern Environment: Selected papers of the 1995 / M. Hvidt // *Conference of the British Society of Middle Eastern Studies*. Cambridge. – 1995. – Pp. 90–100.
61. Jha M.K. Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis. *Resour* / M.K. Jha, V.M. Chowdary, Y. Kulkarni, B.C. Mal // *Conservation & Recycling*. – 2014. – Vol. 83. – Pp. 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.003>
62. Jothiprakash V. Evaluation of rainwater harvesting methods and structures using analytical hierarchy process for a large scale industrial area / V. Jothiprakash, M.V. Sathe // *Journal of Water Resources*. – 2009. – Vol. 1. No. 6. – Pp. 427–438. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2009.16052>
63. Krois J. GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed northern Peru / J. Krois, A. Schulte // *Applied Geography*. – 2014. – Vol. 51. – Pp. 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.04.006>
64. Mahmoud M.M. Sustainable development goals (SDGs) associated with flash flood hazard mapping and management measures through morphometric evaluation / M.M. Mahmoud, G.I. Mona, F. Manabu, N. Mahmoud // *Geocarto International*. – 2022. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2046868>
65. Mahmoud S.H. The potential of in situ rainwater harvesting in arid regions: developing a methodology to identify suitable areas using GIS-based decision support system / S.H. Mahmoud, A.A. Alazba // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2015. – Vol. 8. No. 7. – Pp. 5167– 5179. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1535-3>

66. Matomela N. Siting of Rainwater Harvesting Potential Sites in Arid or Semi-arid Watersheds Using GIS-based Techniques / N. Matomela, T. Li, H.O. Ikhumhen // *Environmental Processes*. – 2020. – Vol. 7. – Pp. 631–652. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00434-7>
67. Melese T. Groundwater Potential Zone Mapping Using Analytical Hierarchy Process and GIS in Muga Watershed, Abay Basin, Ethiopia / T. Melese, T. Belay // *Global Challenges*. – 2022. – Vol. 6. – 2100068. <https://doi.org/10.1002/gch2.202100068>
68. Ministry of Water Resources and Irrigation. Adopted measures to trace major challenges in the Egyptian water sector // A report submitted at the request of World Water Council for 3rd World Water Forum. Cairo, Egypt. – 2002. – Pp. 1–39.
69. Mohamed A.A. Geomorphology, Classification and Evaluation of Wadi Watir Soils in Southeastern Sinai Using Combined Remote Sensing and GIS techniques / A.A. Mohamed, M.F, Fatahallah // *Oecologia aegyptiaca*. – 2008. – Vol. 1. – Pp. 30–46.
70. Mohieeldin M.O. Water management in Egypt for facing the future challenges / M.O. Mohieeldin, M.A. Ahmed // *Journal of Advanced Research*. – 2016. – Vol. 7. – Pp. 403–412. DOI: 10.1016%2Fj.jare.2016.02.005
71. Mostafa E. Determining the suitability of rainwater harvesting for the achievement of sustainable development goals in Wadi Watir, Egypt using GIS techniques / E. Mostafa, E.K. Sinichenko, I.I. Gritsuk // *Journal of Environmental Environment*. – 2022. – Vol. 313. – 114990. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114990>
72. Mugo G.M. Site selection for rainwater harvesting structures in Kiambu County-Kenya / G.M. Mugo, P.A. Odera // *Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Sciences*. – 2019. – Vol. 22. – Pp. 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.05.003>

73. Mustafa A.E. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt / A.E. Mustafa, M.T. James, P. Greg, et al. // *Applied Geochemistry*. – 2016. – Vol. 71. – 48e62.
74. Napoli M. Determining potential rainwater harvesting sites using a continuous runoff potential accounting procedure and GIS techniques in central Italy / M. Napoli, S. Cecchi, S. Orlandini, C.A. Zanchi // *agricultural water management*. – 2014. – Vol. 141. – Pp. 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.012>
75. NGMDB. National Geologic Map Database. – 2021. <https://ngmdb.usgs.gov/> (Accessed 05 Feb 2021)
76. Nikkami D. Land use scenarios and optimization in a watershed / D. Nikkami, M. Shabani, H. Ahmadi // *Journal of Applied Sciences*. – 2009. – Vol. 9. No. 2. – Pp. 287–297.
77. Nino M. Social and environmental constraints to the irrigation water conservation measures in Egypt / M. Nino // MSc Thesis, Lund University. Sweden. – 2003.
78. Omolabi P.O. Mapping suitable sites for water storage structure in the Sokoto-Rima basin of northwest Nigeria. *Remote Sens / P.O. Omolabi, B.J. Fagbohun // Applications: Society and Environment*. – 2019. – Vol. 13. – Pp. 12–30. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.006>
79. Osama M.S. Use of Numerical Groundwater Modeling to Assess the Feasibility of Aquifer Storage and Recovery (ASR) in the Wadi Watir Delta, Sinai, Egypt / M.S. Osama // *Journal of Water Resource and Protection*. – 2019. – Vol. 11. – Pp. 1462-1480. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.1112085>
80. PCI. PCI-Geomatics, PCI Software, Richmond Hill, Ontario, Canada. – 2017. <https://support.pcigeomatics.com/hc/en-us/articles/360016137091-Object-Analyst-Classification-Geomatica-2018->

81. Pitlick J. Relations between peak flows, precipitation and physiography for five mountainous regions in Western U.S.A. / J. Pitlick // *Journal of Hydrology*. – 1994. – Vol. 158. – Pp. 219–240. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90055-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90055-8)
82. Prakrut K. An assessment of the filling process of the Grand Ethiopian Renaissance Dam and its impact on the Downstream Countries / K. Prakrut, L. Wenzhao, E. Hesham, et al. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. No. 4. – P. 711. DOI:10.3390/rs13040711
83. Randa E. Water resources management: alarming crisis for Egypt / E. Randa // *Journal of Management and Sustainability*. – 2014. – Vol. 4. No. 3. DOI: 10.5539/jms.v4n3p108
84. Saaty T.L. How to make a decision: The analytical hierarchy process / T.L. Saaty // *European Journal of Operational Research*. – 1990. – Vol. 48. No. 1. – Pp. 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
85. Sabri H. Using remote sensing data for predicting potential areas to flash flood hazards and water resources Remote Sensing Applications / H. Sabri, A. Mohamed, H. Raafat, A. Mohamed // *Society and Environment*. – 2019. – Vol. 16. – 100254.
86. Saleh A.S. Flash floods in deserts / A.S. Saleh // *A geomorphic study of desert Wadis Institute of Arab Research, Special Studies Series*. – 1989. – Vol. 51. – Pp. 1-93.
87. Samal D.R. GIS based drainage morphometry and its influence on hydrology in parts of Western Ghats region, Maharashtra, India / D.R. Samal, S.S. Gedam, R. Nagarajan // *Geocarto International*. – 2015. – Vol. 30. No. 7. – Pp. 755–778. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.978903>
88. Saqr A.M. Sustainable Development Goals (SDGs) Associated with Groundwater Over-Exploitation Vulnerability: Geographic Information System-Based Multi-criteria Decision Analysis / A.M. Saqr, M.G. Ibrahim, M. Fujii, M. Nasr // *Natural Resources Research*. – 2021. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09945-y>

89. Sara A. Geospatial risk assessment of flash floods in Nuweiba area, Egypt / A. Sara, Y. May, I. Samia, et al. // *Journal of Arid Environments*. – 2016. – Vol. 133. – 54e72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.06.004>
90. Sara M.A. Groundwater potential zone assessment in Wadi Watir area, Egypt using radar data and GIS / M.A. Sara // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2016. – Vol. 9. – P. 501.
91. Sarif M.O. Spatiotemporal mapping of Land Use/Land Cover dynamics using Remote Sensing and GIS approach: a case study of Prayagraj City, India (1988–2018) / M.O. Sarif, R.D. Gupta // *Environment, Development and Sustainability*. – 2022. – Vol. 24. – Pp. 888–920. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01475-0>
92. Sayl K.N. Identification of potential sites for runoff water harvesting / K.N. Sayl, N.S. Muhammad, A. El-Shafie // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management*. – 2019. – Vol. 172. No. 3. – Pp. 135–148. <https://doi.org/10.1680/jwama.16.00109>
93. Schumann A.H. Thiessen polygon. In: *Encyclopedia of Hydrology and Lakes* / A.H. Schumann // *Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht. – 1998. https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6_220
94. Schumm S. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy New Jersey / S. Schumm // *Geological Society of America Bulletin*. – 1956. – Vol. 67. No. 5. – 597e646.
95. SCS. Hydrology, National Engineering Handbook, Supplement A, Sect. 4 Chap. 10. Soil Conservation Service. U.S.D.A, Washington, DC. –1956.
96. Selvam S. A GIS based identification of groundwater recharge potential zones using RS and IF technique: a case study in Ottapidaram taluk, Tuticorin district, Tamil Nadu / S. Selvam, N.S. Magesh, S. Chidambaram, et al. // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 73. No. 7. – Pp. 3785–3799. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3664-0>

97. Singh L.K. Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply / L.K. Singh, M.K. Jha, V.M. Chowdary // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 142. – Pp. 1436–1456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163>
98. Strahler A. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks / A. Strahler // Geological Society of America Bulletin. – 1964. – Vol. 63. – 1117e1142.
99. Tiwari K. GIS-based Methodology for identification of suitable locations for rainwater harvesting structures / K. Tiwari, R. Goyal, A. Sarkar // Water Resources Management. – 2018. – Vol. 32. No. 5. – Pp. 1811–1825. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1905-9>
100. UN. The United Nations sustainable development goals. United Nations. – 2020. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/summit/> (Accessed 5 Sep 2021)
101. United Nations Common Country Assessment. Embracing the spirit of millenium declaration. United Nations–Egypt. Cairo, Egypt. – 2005. URL: <http://www.undp.org/content/dam/egypt/docs/LegalFramework/Common%20Country%20Assesment%202005%20Egypt.pdf>
102. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Dynamics, World Population Prospects. – 2019. URL: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population>
103. U.S. president Donald Trump addresses the national association of counties // Legislative Conference in Washington. U.S. – 3 March 2020. REUTERS/Carlos Barria. URL: <https://www.reuters.com/article/us-egypt-ethiopia-trump/trump-tells-sisi-u-sto-pursue-efforts-for-deal-on-ethiopia-dam-egypt-presidency-idUSKBN20Q2J4>
104. USGS. United States Geological Survey. – 2021. <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed 15 Jan 2021)
105. Velis M. Groundwater and human development: synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals / M. Velis, K.I. Conti, F.

Biermann // Sustainability Science. – 2017. – Vol. 12. – Pp. 1007–1017.
<https://doi.org/10.1007/s11625-017-0490-9>

106. Wael M.E. Developing an overall assessment map for flood hazard on large area watershed using multi-method approach: case study of Wadi Qena watershed, Egypt / M.E. Wael, G.I. Mona, E.M. Wael, K. Shinjiro // Natural Hazards. – 2019. – Vol. 95. – Pp. 739–767.

107. Wael M.E. Flash flood risk estimation of Wadi Qena Watershed, Egypt Using GIS Based Morphometric Analysis / M.E. Wael, G.I. Mona, E.M. Wael // Journal of Applied Environmental Research. – 2018. – Vol. 40. No. 1. – Pp. 36–45. DOI: 10.35762/AER.2018.40.1.4

108. Wagdy A. Progress in water resources management: Egypt / A. Wagdy // Proceedings of the 1st Technical Meeting of Muslim Water Researchers Cooperation, MUWAREC. Malaysia. – 2008. – Pp. 1–13.

109. Walaa Y.E. Managing risks of the Grand Ethiopian Renaissance Dam on Egypt / Y.E. Walaa, H.E. Ahmed // Ain-Shams Engineering Journal. – 2018. – Vol. 9. No. 4. – Pp. 2383–2388. DOI: 10.1016/j.asej.2017.06.004

110. Walter L.F. Understanding responses to climate-related water scarcity in Africa / L.F. Walter, T. Edmond, A.F. James, et al. // Science of The Total Environment. – 2022. – Vol. 806. No. 1. – 150420.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150420>

111. Water Scarcity in Egypt // Arab Republic of Egypt, Ministry of Water Resources and Irrigation. – February 2014. URL: https://globalhealthnewswire.com/wp-content/uploads/2016/09/Egypt%20Water%20Resources%20Paper_2014.pdf

112. Wind Y. Marketing applications of the analytic hierarchy process / Y. Wind, T.L. Saaty // Management Science. – 1980. – Vol. 26. No. 7. – Pp. 641–658.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.26.7.641>

113. WRRI. Construction of protection works from floods at Wadi Watir–South Sinai // Water Resources Research Institute (WRRI), Delta-Barrages, Cairo, Egypt. – 2014
114. Wu R.S. Optimal Sites Identification for Rainwater Harvesting in Northeastern Guatemala by Analytical Hierarchy Process / R.S. Wu, G.L. Letona Molina, F. Hussain // Water Resources Management. – 2018. – Vol. 32. – Pp. 4139-4153. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2050-1>
115. Xinhao W.A. Land allocation based on integrated GIS-optimization modeling at a watershed level / W.A. Xinhao, Y.A. Sheng, G.H. Huangb // Landscape and Urban Planning. – 2004. – Vol. 66. No. 2. – Pp. 61–74.
116. Yahya F. Flash Flood Risk Estimation of Wadi Yutum (Southern Jordan) Watershed Using GIS Based Morphometric Analysis and Remote Sensing Techniques / F. Yahya, A. Omar // Open Journal of Modern Hydrology. – 2016. – Vol. 6. – Pp. 79-100.
117. Yannopoulos S. Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide / S. Yannopoulos, I. Giannopoulou, M. Kaiafa-Saropoulou // Water. – 2019. – Vol. 11. No. 10. – Pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/w11102168>
118. Yasir S.A. Water resource assessment along the Blue Nile River, north Africa with a one-dimensional model / S.A. Yasir, C. Alessandra, A.M. Yasir, et al. // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Water Management. – 2014. – Vol. 167. No. 7. – Pp. 394-413. DOI: 10.1680/wama.13.00020
119. Yong L.A. An integrated GIS-based analysis system for land use management of lake areas in urban fringe / L.A. Yong, L. Xiaojian, Q.B. Xiaosheng, et al. // Landscape and Urban Planning. – 2007. – Vol. 82. No. 4. – Pp. 233–246.
120. Zaghoul A.S. Impact of Upper Nile projects on the hydraulic performance of the White Nile and Jebel Aulia Dam operation / A.S. Zaghoul, M. Elsayed, A. Elzawahry // Twentieth International Water Technology Conference, IWTC20.

Hurghada, Egypt. – 18-20 May 2017. – Pp. 549–560. DOI: <http://iwtc.info/wp-content/uploads/2017/05/122.pdf>

121. Zende A.M. Water Security Assessment in Semi-arid Region using geospatial techniques / A.M. Zende, R.A. Patil, V.M. Patil // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. No. 1. – Pp. 620–627. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.125>