

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский Университет Дружбы Народов Имени Патриса Лумумбы»

Научный руководитель: **Синиченко Евгений Константинович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Раткович Лев Данилович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Кафедра Гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, профессор.

Остякова Александра Витальевна
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Гидромеханики и гидравлических машин», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова» (ФНЦ ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова)

Защита состоится «19» марта 2024 года в 15.00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Бестужева А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В пятой оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата говорится, что нехватка воды затрагивает 80% населения мира. Кроме того, ожидается, что к 2025 году 1,8 миллиарда человек будут проживать в чрезвычайно засушливых районах по всему миру. В связи с ростом населения и изменением климата, особенно в полусушливых и пустынных регионах с сильно изменчивыми осадками, нехватка воды стала серьезной глобальной проблемой. 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. 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.

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. Необходимо связать устойчивые стратегии с целями устойчивого развития, далее (ЦУР).

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. На внезапные наводнения влияют геоморфология, топограммы, инфраструктура и география. Геоморфические исследования были проведены для улучшения методов предотвращения катастрофических последствий наводнений и подчеркивания важности геоморфологических исследований при планировании.

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.

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. ГИС и ДЗ в настоящее время являются ключевыми инструментами для оценки геоэкологических рисков и основным источником данных для классификации опасностей. Для идентификации допустимости аккумуляции дождевой воды сочетаются метод числа кривых службы охраны почв (SCS-CN), гидрологическое моделирование и многокритериальный анализ.

Степень разработанности темы исследования. Основные проблемы управления водными ресурсами Египта и способы их решения привлекают внимание многих исследователей, таких как: Abdeldayem S., Abdelhaleem F., Helal E., Abdelshafy H.I., Elshaharty A.A., Regelsberger M., Platzer C., Abdin A.E., Gaafar I., Abdrabbo M.A., Farag A.A., El-Desokey W.M.S., Abuzeid M.A. и др.

Коммерческое, туристическое и историческое значение Вади-Ватир сделало его объектом различных исследований, например: Мостафа Еззелдин, Синиченко, Е.К., Грицук, И.И., Еззелдин, М., Синиченко, Е.К., Грицук, И.И., Al-Zayed, I.S., Ribbe, L., Al-Salhi, A., Eissa, M.A. и др.

ГИС и дистанционное зондирование (ДЗ) применялись и доказали свою эффективность в различных исследованиях: Андреев Д.В., Болданова Е.В., Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А., Студников С.Н., Войнова М.В., Adham A., Sayl K.N., Abed R., Abdeladhim M.A., et al., Campos A.F., Alava J., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. 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., Elewa H.N., Zelenakova M., Nosair A.M., Jha M.K., Chowdary V.M., Kulkarni Y., Mal B.C., Krois J., Schulte A.

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, НЕС-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» 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 «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 наименование литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована Актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, охарактеризована научная новизна и практическая значимость исследования, описаны методология и методы исследования, использованный в работе, сформулирован предмет защиты, указаны сведения об апробации работы.

В первой главе были исследованы основные проблемы, связанные с управлением водными ресурсами Египта, а также возможности их решения, для эффективной охраны водного фонда Египта.

Во второй главе оптимальное строительство систем хранения дождевой воды определялось с учетом биофизических и социально-экономических особенностей исследуемой территории. ГИС, ДЗ и ГМ были объединены в тематическом исследовании для Вади-Ватир. Для обеспечения водной безопасности оптимальные места для сооружений СДВ были определены с использованием комбинации метода логического анализа, ВЛК и метода глубины депрессии.

Водосборный бассейн Вади-Ватир, выбранный в качестве района исследования, занимает площадь 3580 км² (рис. 1). Вади-Ватир является чрезвычайно засушливым водосбором. 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.

В Вади-Ватир проживает около 50,000 человек, и потребность в воде в среднем составляет 55 млн м³/год (табл. 1). Количество осадков в Вади-Ватир составляет 200 млн м³ в год. Жители страдают от нехватки воды, уничтожения овец и посевов. 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.

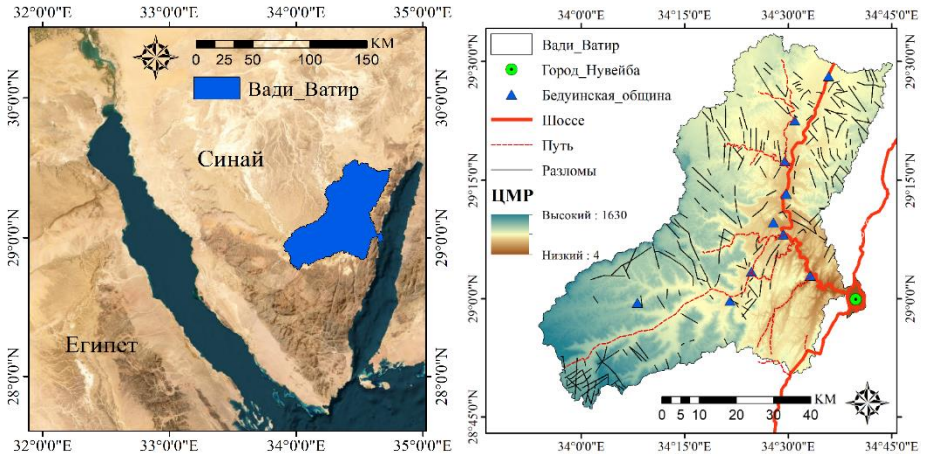


Рисунок 1 — Карта местоположения и основные свойства исследуемой территории

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	Хроническая нехватка воды	25-50 млн м ³	55 млн м ³
	500-1000 м ³	Регулярный водный стресс	50-85 млн м ³	
	1000-1700 м ³	Периодический водный стресс	>85 млн м ³	
	>1700 м ³			

Данные, использованные в исследовании, были собраны с разных ресурсов; веб-сайт USGS Earth Explorer, институт исследования водных ресурсов Египта и спутниковые снимки Landsat. Метеорологические данные были собраны за период с 1934 по 2014 гг для трех метеостанций: Рак-эль-Накб, Святая Екатерина и Нувейба (рис. 2, 3, 4, и 5) (табл. 2, 3, и 4). Тематические слои, применявшиеся в этом анализе, были рекомендованы международной пищевой и сельскохозяйственной организацией (FAO) и употреблены во многих предыдущих исследованиях. 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 5. Для улучшения допустимости участка были выбраны три слоя ограничений (табл. 6).

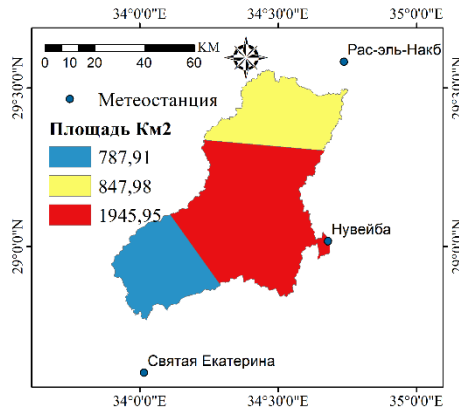


Рисунок 2 — Области воздействия метеостанций с использованием метода многоугольников Тиссена

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

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	1961	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		

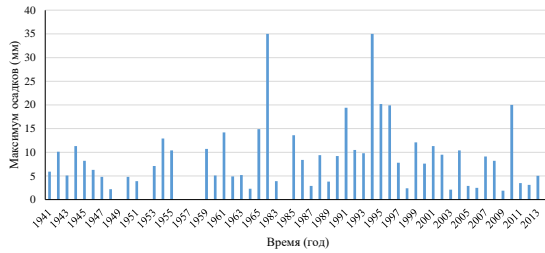


Рисунок 3 — Средние многолетние осадки для метеостанции Рас-эль-Накб за период (1941–2014 гг.)

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

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				15	1.2	7.8	8.1	29.8			

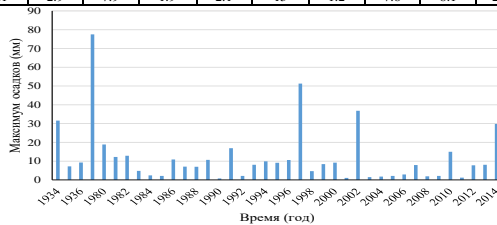


Рисунок 4 — Средние многолетние осадки для метеостанции Святая Екатерина за период (1934–2014 гг.)

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

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	

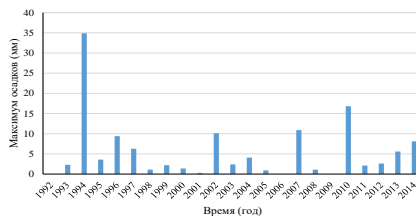


Рисунок 5 — Средние многолетние осадки для метеостанции Нувейба за период (1992–2014 гг.)

Таблица 5 — Веса и обоснования выбранных критериев и классификации их признаков

Критерии	Вес слоя	критерии выбора класса объектов	Критерие пригодности	Вес класса
Глубина стока (мм)	9	6.487–10.00	Низкий	7
		10.01–12.05	Умеренный	8
		12.06–13.25	Высокий	9
Уклон (%)	8	<5	Высокий	8
		$\geq 5 \leq 10$	Умеренный	6
		>10	Низкий	4
Площадь бассейна (км ²)	7	9.33–84.71	Низкий	3
		84.72–226.51	Умеренный	5
		226.52–527.70	Высокий	7
Максимальное расстояние потока (км)	6	6.18–15.10	Низкий	2
		15.20–29.90	Умеренный	4
		29.91–48.50	Высокий	6
Топографический индекс влажности	6	2.47–6.88	Низкий	2
		6.89–10.57	Умеренный	4
		10.58–25.4	Высокий	7
Плотность дренажа	5	0.04–1.86	Низкий	3
		1.87–3.67	Умеренный	5
		3.68–5.49	Высокий	8
Частотная плотность линеамента	4	0.00–0.52	Высокий	6
		0.53–1.05	Умеренный	4
		1.06–1.57	Низкий	2
Землепользование / почвенный покров	4	Поселения	Ограниченный	0
		Пустыи	Умеренный	3
		Водные фонды	Ограниченный	0
		Сельскохозяйственные	Ограниченный	0
Номер инфильтрации	3	Водотоки	Высокий	7
		0.58–0.99	Высокий	5
		1.00–1.14	Умеренный	4
Расстояние до населенных пунктов и общины бедуинов (м)	3	1.15–1.35	Низкий	2
		<500	Низкий	2
		$\geq 500 < 2,000$	Высокий	5
Расстояние до дорог (м)	2	$\geq 2,000$	Умеренный	3
		<1,000	Высокий	5
		$\geq 1,000 < 1,500$	Умеренный	3
		$\geq 1,500$	Низкий	2

Таблица 6 — Логические критерии и их обоснования

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

Шкала Саати 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, предложенный Виндом и Саати, был

рассчитан для проверки соответствия весов, присвоенных различным темам. Следующее уравнение демонстрирует расчет коэффициента согласованности (КС):

$$КС = \frac{CI}{RCI} , \quad (1)$$

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

CI можно получить следующим образом:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} , \quad (2)$$

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

Для получения годового объема паводка (глубины стока) с использованием программного обеспечения системы моделирования водосборных бассейнов (WMS 10.1) использовался метод числа кривых службы охраны почв (SCS-CN). Гидравлическая модель НЕС-1 преобразовывала данные об осадках в гидрограф стока (рис. 6 и 7). Зона воздействия каждой метеостанции определялась методом многоугольников Тиссена (рис. 2). Числа кривых службы охраны почв (SCS-CN) обрабатывались для определения стока с помощью следующего уравнения:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (P > 0.2S) , \quad (3)$$

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

S вычислялась следующим образом:

$$S = \frac{25400}{CN_w} - 254 , \quad (4)$$

где CN_w — номер взвешенной кривой для всего водосбора.

CN_w определялся следующим образом:

$$CN_w = \frac{\sum(CN_i * A_i)}{A} , \quad (5)$$

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

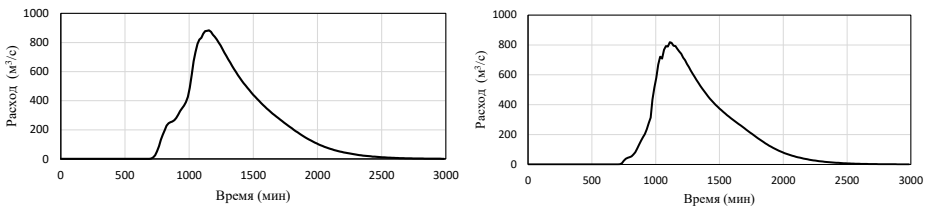


Рисунок 6 — Гидрограф стока для некоторых подбассейнов

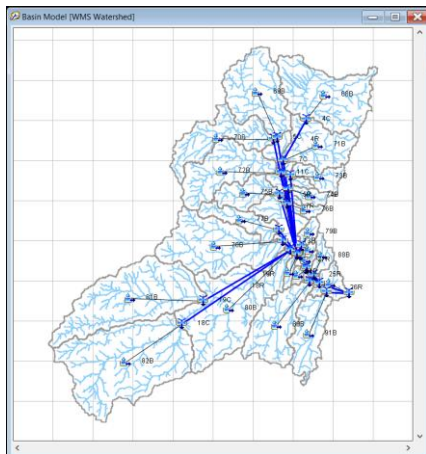


Рисунок 7 — Гидрологическая модель водосбора Вади-Ватир (WMS, НЕС-1)

Метод ВЛК является решающим правилом для создания агрегированных карт с использованием ГИС. Этот метод был объединен с логическими факторами, чтобы исключить некоторые особенности из процесса выбора места и создания карты пригодности. Логические критерии, классифицированные как неподходящие для накопления дождевых вод, были объединены в один слой ограничений. Этот слой был объединен с выходным слоем метода ВЛК для создания окончательной карты соответствия СДВ.

Глубина депрессии вычисляется путем вычитания исходной цифровой модели рельефа, далее (ЦМР) из заполненной ЦМР. Глубина депрессии и выходные слои из ВЛК и логических критериев были объединены. Сооружения хранения осадков рекомендуются для участков с прилегающими депрессионными зонами и высокой пригодностью для СДВ. Применяемые критерии выбора места сооружения подробно описаны в таблице 7. На рис. 8 представлена блок-схема применяемой методики.

Таблица 7 — Критерии выбора места строительства сооружений СДВ

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

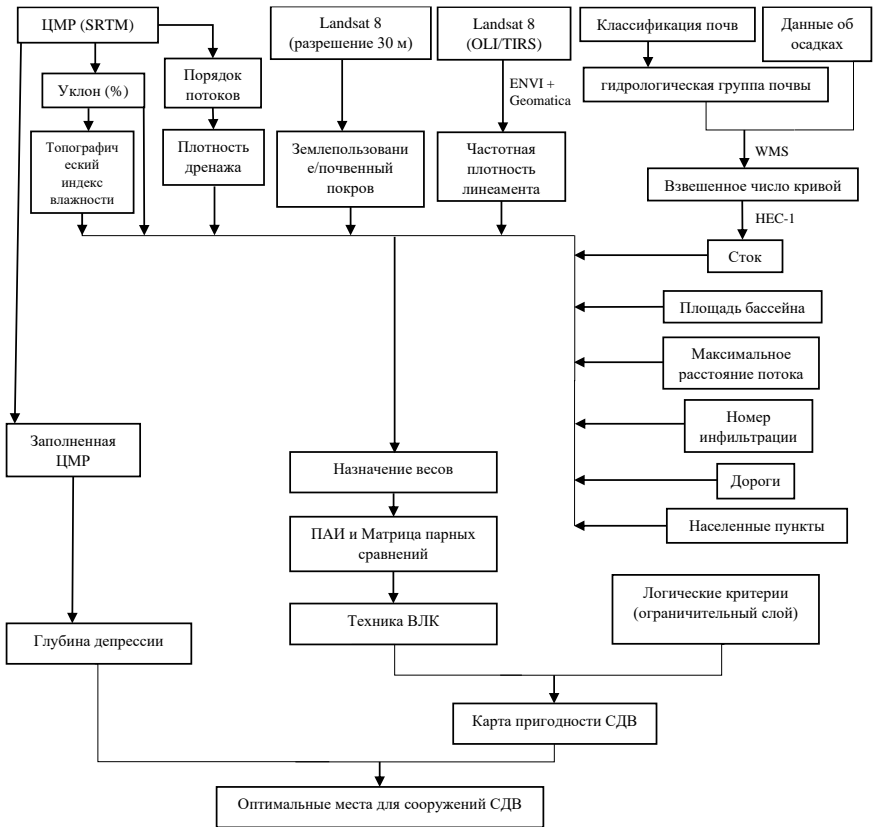


Рисунок 8 — Блок-схема применяемой методологии

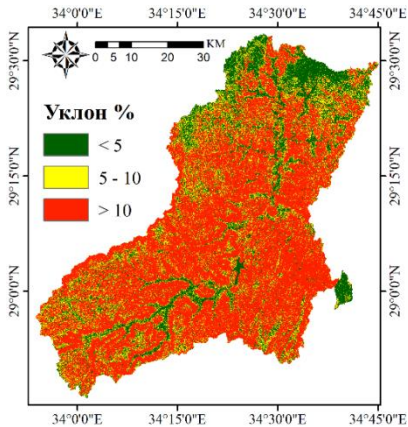
Уклоны в исследуемой зоне сильно варьируют от пологих до очень крутых. Процент уклона делится на три части: легкий ($<5\%$), умеренный (от 5% до 10%) и крутой ($>10\%$) (рис. 9(а)). Согласно Адхам и др., уклон менее 5% является наиболее подходящим для СДВ. Землепользование Вади-Ватир делится на пять категорий: поселения, пустыне, водные фонды, сельскохозяйственные, водотоки, как показано на рис. 9(б). Карта землепользования была усовершенствована и проверена по спутниковым снимкам. Водотоки лучше всего подходят для аккумуляции дождевой воды.

Для критериев исследования была создана матрица парных сравнений. Нормализованные веса были рассчитаны с использованием процесса аналитической иерархии и метода собственных векторов (табл. 8). Был рассчитан коэффициент согласованности, и его значение показало, что выбранные критерии непротиворечивы.

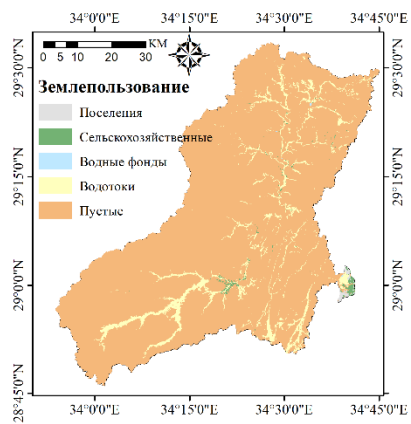
Таблица 8 — Матрица парных сравнений для используемых критериев

Критерии	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

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



(а)



(б)

Рисунок 9 — (а) карта уклонов; (б) карта землепользования

Анализ ВЛК одиннадцати тематических слоев был реализован в среде ГИС для создания карты соответствия СДВ, как показано на рис. 10(а). Пригодность накопления дождевых вод подразделяется на пять категорий: очень низкая, низкая, умеренная, высокая и очень высокая. Метод логического анализа был применен с использованием трех ограничений. Все ограничения были объединены в одну карту и классифицированы по двум категориям, а именно подходящие и неподходящие, как показано на рис. 10(б).

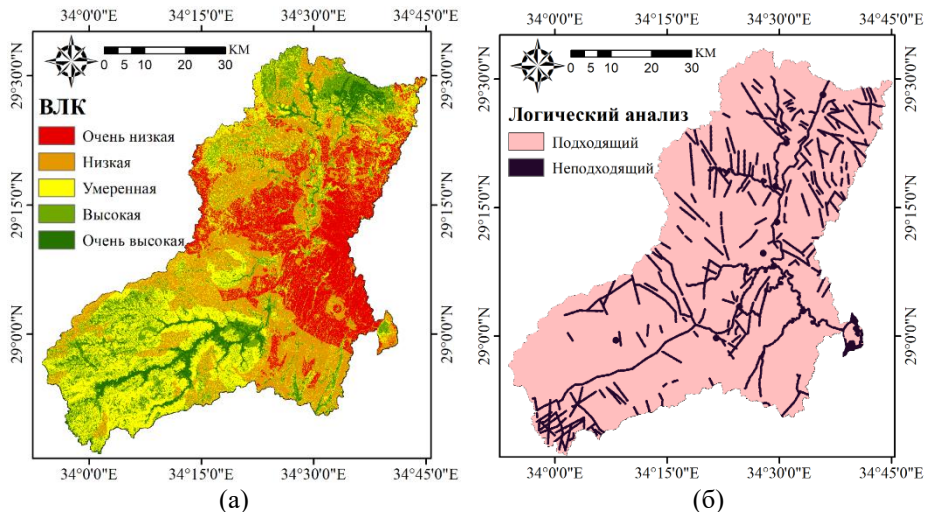


Рисунок 10 — (а) карта пригодности СДВ после ВЛК; (б) карта логического анализа

Карта ВЛК и карта логического анализа были объединены для получения окончательной карты пригодности СДВ (рис. 11(а)). Результаты показали, что 7% (236 км²) Вади-Ватир очень высоко подходят для сбора дождевой воды, а 12% (430 км²) высоко подходят. Примерно вся эта территория расположена вдоль водотоков в водосборе. Сбора дождевой воды ограничивается 16% (573 км²) исследуемой зоны. Пригодность СДВ для водосбора Вади-Ватир распределена нормально (рис. 11(б)).

Оптимальные места для сооружений хранения осадков были определены с использованием ранее упомянутой методологии и в соответствии с критериями, описанными в таблице 7. Смежные глубины депрессии были объединены с областями высокой аккумуляции дождевой воды для определения оптимальных мест сооружений хранения осадков. Сооружения, рассмотренные в исследовании, включают перколяционные (фильтрационные) резервуары (наземные и вдоль водотоков), накопительные плотины и фермерские пруды. Участки сооружений СДВ были выбраны вдали от существующих сооружений (рис. 12). Двенадцать участков пригодны для накопительных плотин. Для перколяционных резервуаров вдоль водотоков оптимально 14 участков. Площадь, считающаяся идеальной для наземных перколяционных резервуаров, составляет 25,9 км². Оптимальное пространство для фермерских прудов составляет 1,34 км², близко к сельскохозяйственным угодьям.

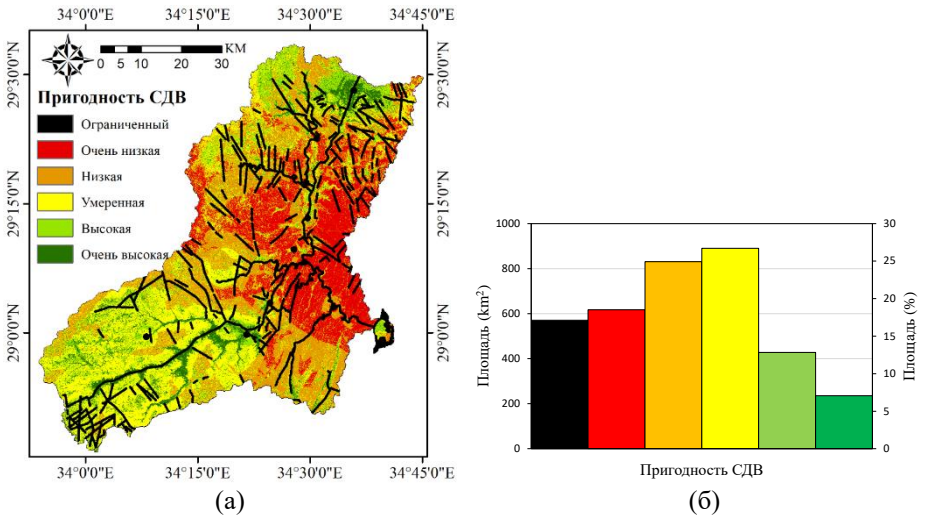


Рисунок 11 — (а) окончательная карта пригодности СДВ; (б) гистограмма пригодности СДВ

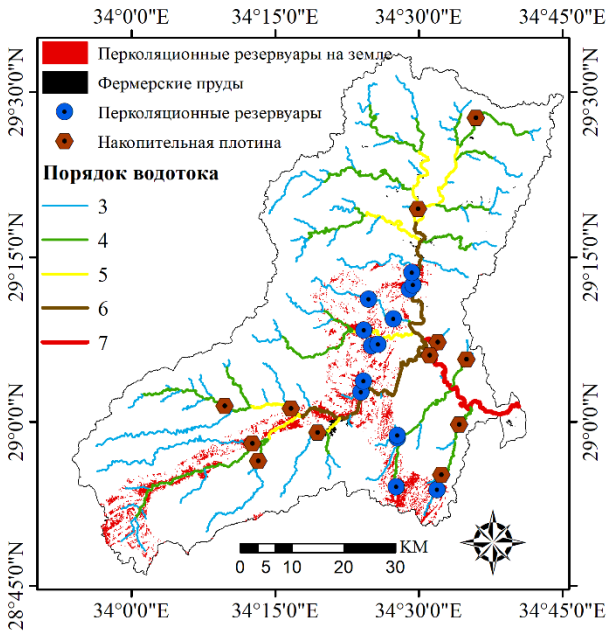


Рисунок 12 — Размещение сооружений СДВ

В третьей главе оценивалась степень опасности внезапных паводков в Вадиватир методом морфометрического ранжирования с использованием ГИС и ДЗ. Выявление и прогнозирование районов, подверженных риску затопления, может

уменьшить ущерб и наносимый урбанизацией. Кроме того, эти шаги могут помочь в планировании строительства новых городов для предотвращения этих опасностей.

Цифровая модель рельефа была обработана в среде ГИС для расчета морфометрических параметров, таких как площадь (A), коэффициент рельефа (R_h), номер водотока (N_u) и многие другие (табл. 9). Бассейн был разделен на 37 подбассейнов для анализа его потенциальной опасности затопления с использованием статистики их морфометрических параметров. Порядок водотоков в подбассейнах определялся методом Стралера. Водотоки были разделены на семь порядков, как показано на рис. 13.

Таблица 9 — Морфометрические параметры и их формулы.

Параметр	Символ/формула	Метод расчета
Площадь (км)	A	ArcGis
Периметр (км)	P	ArcGis
Длина бассейна (км)	L_b	ArcGis
Коэффициент формы	$R_f = A / (L_b)^2$	
Коэффициент округлости	$R_y = 4\pi A / P^2$	
Коэффициент удлинения	$R_e = 2 (A/\pi)^{0.5} / L_b$	
Шейп-фактор	$F_s = L_b^2 / A$	
Коэффициент компактности	$R_c = P / 2(\pi A)^{0.5}$	
Порядок водотоков	U	Иерархический ранг
Длина водотока (км)	L_u	ArcGis
Номер водотока	N_u	ArcGis
Плотность дренажа (км^{-1})	$D_d = \sum L_u / A$	
Частота водотоков	$F_q = \sum N_u / A$	
Коэффициент текстуры	$R_t = \sum N_u / P$	
Коэффициент рельефа	$R_h = R / L_b$	(R) Рельеф в км
Относительный коэффициент рельефа	$R_v = R / P$	
Индекс прочности	$R_I = R \times D_d$	
Гипсометрический индекс	$H_I = (E_{\text{mean}} - E_{\text{min}}) / (E_{\text{max}} - E_{\text{min}})$	(E) Высота в км
Уклон бассейна (градусы)	$S_B = (R / L_b) * 60$	

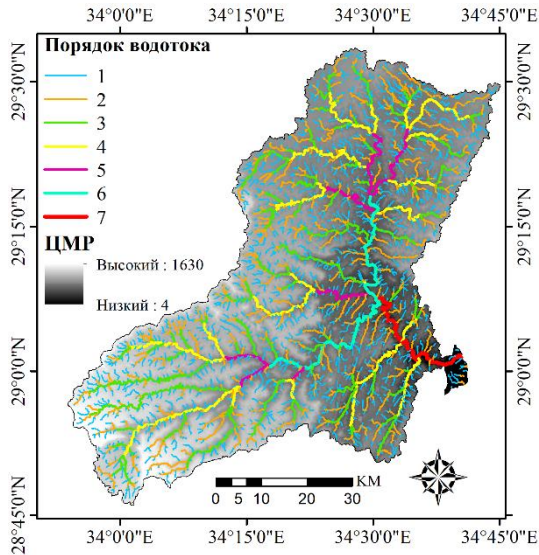


Рисунок 13 — Порядок водотоков с фоном цифровой модели рельефа

Было использовано 17 параметров для проведения морфометрического анализа и расчета их, как описано в таблице 9. Параметры варьировались в зависимости от размеров, формы и поверхности дренажной сети и бассейна. Выборка расчетных параметров для каждого подбассейна представлена на рис. 14. Для определения степени опасности для каждого подбассейна всем параметрам был присвоен номер шкалы опасности от одного (самый низкий) до пяти (самый высокий). Следующие соотношения могут быть использованы для расчета фактической степени опасности подбассейнов:

- Для прямо пропорциональных параметров:

$$\text{степень опасности} = \frac{4(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} + 1, \quad (6)$$

- Для обратно пропорциональных параметров:

$$\text{степень опасности} = \frac{4(X - X_{\max})}{(X_{\min} - X_{\max})} + 1, \quad (7)$$

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

В результате установлено, что девять подбассейнов относятся к низкой степени опасности паводков. Кроме того, 17 подбассейнов, занимающих 44,2% общей площади, отнесены к средней степени опасности. Наконец, 36,8% площади бассейна очень уязвимы для быстроразвивающихся паводков (рис. 15). Данные подбассейны должны быть защищены от опасности внезапных паводков. Это может быть достигнуто за счет строительства защитных сооружений.

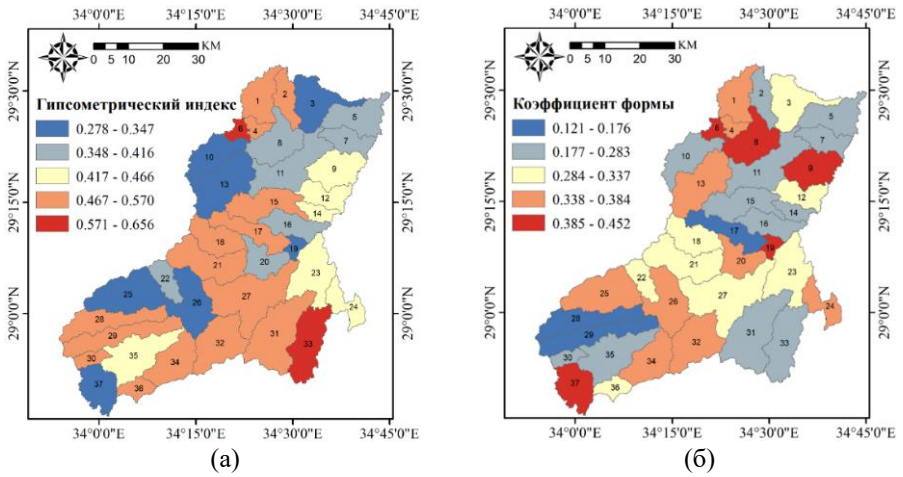


Рисунок 14 — Образцы карт рассчитанных морфометрических параметров: (а) гипсометрический индекс; (б) коэффициент формы

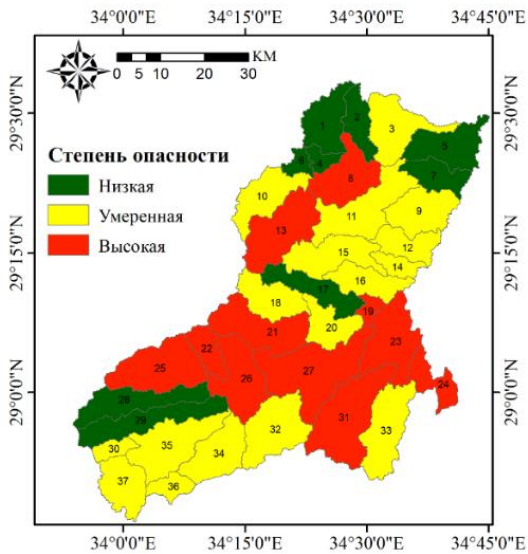


Рисунок 15 — Карта опасности внезапных наводнений

В четвертой главе впервые проиллюстрировано влияние внезапных паводков на адекватность СДВ и строительство сооружений хранения осадков. ГИС использовалась для наложения карт пригодности сбора дождевой воды, сооружений хранения осадков и карт опасности ливневых паводков. Перекрытие между этими слоями было классифицировано и проанализировано.

Во-первых, карта опасности внезапных наводнений (рис. 15) была создана в качестве базовой карты. Карта пригодности сбора дождевой воды (рис. 11(а)) была разделена на шесть отдельных карт в соответствии со степенью пригодности. Базовая

карта была наложена на каждую карту адекватности сбора дождевой воды для анализа каждого случая отдельно. Эта комбинация породила шесть различных случаев.

Во-вторых, карта опасности внезапных наводнений (рис. 15) была разделена на три части в зависимости от степени опасности. Аналогично, предлагаемые сооружения хранения осадков (рис. 12) были разделены на три секции. Карта опасностей была создана как базовая карта, а сооружения накопления дождевых вод перекрывались сверху. В зависимости от степени опасности этот метод привел к трем различным случаям.

Результаты показали, что возникновение ливневых паводков оказывает значительное влияние на пригодность накопления дождевых вод. Оптимальная зона для осуществления водосборных сооружений увеличилась с 236 км² (7%) до 322 км² (9%). Площадь наиболее пригодной для сбора дождевой воды возросла с 430 км² (12%) до 644 км² (18%). Следовательно, количество воды, которое можно собрать, увеличивается. Возможность внезапных паводков не влияет на достаточность зоны ограниченного доступа для использования в целях охраны окружающей среды. Однако запретная зона, расположенная в районах повышенной и средней опасности, должна быть хорошо защищена от опасности внезапных паводков, как показано в таблицах 10 и 11 и на рис. 16.

Таблица 10 — Процент пригодности СДВ для каждой степени опасности

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

Таблица 11 — 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)

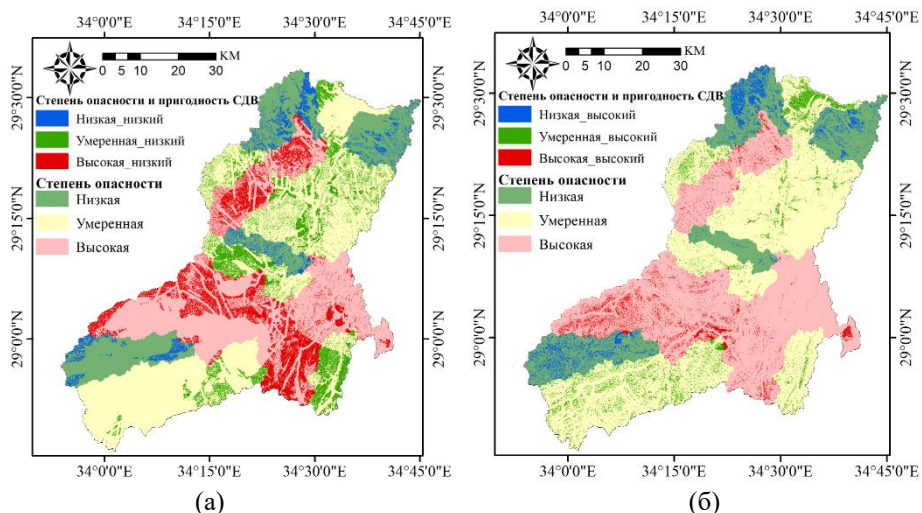


Рисунок 16 — Карта опасности внезапных наводнений: (а) с низкой пригодностью СДВ; (б) с высокой пригодностью СДВ

Осуществление сооружений СДВ была разделена на три этапа в зависимости от степени опасности ливневых паводков (табл. 12) (рис. 17). 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. 18). Вторая и третья очереди могут обеспечить 23,1% и 10,64% потребности в воде соответственно, как показано в таблице 13. Сбор такого количества воды мог бы обеспечить водную безопасность в Вади-Ватир.

Таблица 12 — Распределение сооружений СДВ по степени опасности

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

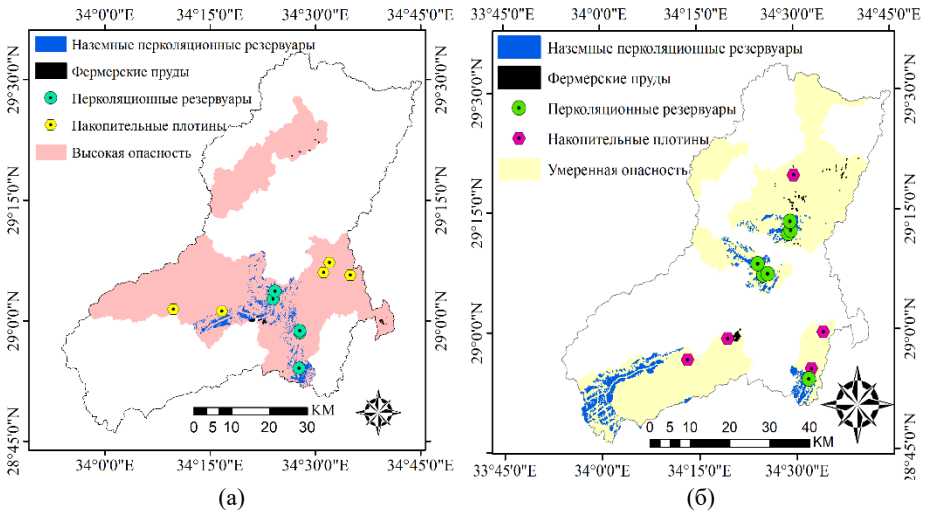


Рисунок 17 — Сооружения СДВ (а) в зоне высокой опасности (б) в зоне умеренной опасности

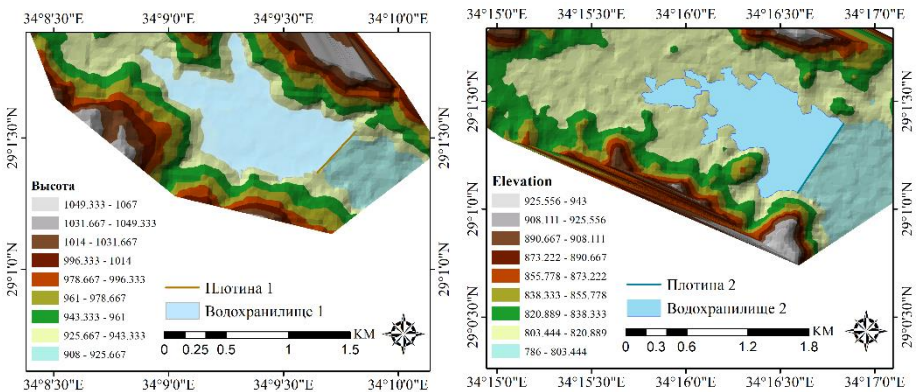


Рисунок 18 — Водохранилища двух плотин первого этапа

Развитие исследуемой территории или любого другого региона должно осуществляться с использованием устойчивых стратегий. Планы развития должны быть связаны с целями устойчивого развития (<https://sdgs.un.org/goals>). Выводы исследования связаны с ЦУР, чтобы предложить долгосрочные решения основных проблем, с которыми сталкиваются жители Вади-Ватир.

Таблица 13 — Оценка объема воды, собираемой предлагаемыми сооружениями

Этап	Плотины	водохранилище объем (млн м ³)	Резервуары	Объем резервуаров (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		
Итого 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			
Итого II		10,85		1,853		
Третий	П 11	2,93	P13	1,142	5,85	10,64
	П 12	1,67	P14	0,108		
Итого III		4,60		1,25		
Итого		27,06		7,175	34,238	62,24

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 подходит 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 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Мостафа Еззелдин.** Управление водными ресурсами Египта: проблемы и способы решения // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. №1. С.1-14. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.1.1

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

3. **Еззелдин М.**, Синиченко Е.К., Грицук И.И. Влияние ливневых паводков на строительство сооружений по сбору дождевой воды // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 102–116. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.7

Статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных (Scopus, WoS):

4. **Е. Mostafa**, Е.К. Sinichenko, I.I. Gritsuk. Determining the suitability of rainwater harvesting for the achievement of sustainable development goals in Wadi Watir, Egypt using GIS techniques // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 313. 114990. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114990