

Проблемы управления: теория и практика
Administrative problems: theory and practice

УДК 556.116.4:[628.11:69](620)

DOI: 10.55959/MSU2070-1381-105-2024-39-52

Современные методы и решения в области управления водными ресурсами региона
Вади-Ватир (Египет)

Еззелдин Мостафа Мохамед Абделрахим

Кандидат технических наук, преподаватель, ORCID: [0000-0003-0332-0424](https://orcid.org/0000-0003-0332-0424), m_ezzeldin90@yahoo.com

Университет Менуфии, г. Шибин-эль-Ком, Египет.

Синиченко Евгений Константинович

Кандидат технических наук, доцент, SPIN-код РИНЦ: [2900-7009](https://elibrary.ru/2900-7009), ORCID: [0000-0002-9159-1218](https://orcid.org/0000-0002-9159-1218), sinichenko_ek@pfur.ru

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН), Москва, РФ.

Грицук Илья Игоревич¹

Кандидат технических наук, доцент, SPIN-код РИНЦ: [5449-8425](https://elibrary.ru/5449-8425), ORCID: [0000-0002-5671-7620](https://orcid.org/0000-0002-5671-7620), gritsuk_ii@pfur.ru

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), Москва, РФ.

Грицук Анна Ильинична

Бакалавр, GritsukAI@spa.msu.ru

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, РФ.

Аннотация

Основная проблема водных ресурсов Египта — растущий спрос и сокращение предложения, особенно после строительства Великой плотины Эфиопского Возрождения. Одним из лучших решений является использование необычных альтернативных методов управления, таких как, сбор и распределение дождевой воды. В данной работе рассмотрено использование нестандартных подходов, основанных на аккумуляции дождевых осадков, для управления водными ресурсами в засушливых регионах. С использованием географических информационных систем (ГИС) и гидрологического моделирования была оценена пригодность водосбора Вади-Ватира (Египет) для сохранения дождевой воды, а также определены оптимальные местоположения для строительства накопительных сооружений. Результаты исследования показали, что 19% (666 км²) площади изучаемой области является высокопригодной для поставленных целей и задач, а 16% (573 км²) площади водосбора имеет ограниченные возможности реализации. Установлено, что 12 участков подходят для строительства накопительных плотин; 14 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 — 1,34 км². В результате предложено строительство аккумулирующих воду сооружений, которые улучшат управление водными ресурсами региона Вади-Ватир. Осуществление проекта сооружений по сбору дождевой воды (СДВ) было разделено на три этапа, в зависимости от степени опасности ливневых паводков. Первый, второй и третий этапы могут обеспечить 62,24% (34,24 мил м³) потребностей в воде. Данный подход является новым и современным решением проблемы дефицита воды в условиях социально-экономических и экологических давлений при достижении целей устойчивого развития Египта. Статья написана на основе диссертационного исследования Мохамеда Мостафы Еззелдина Абделрахима (НИУ МГСУ, диссертационный совет № 24.2.339.07, март 2024 г.).

Ключевые слова

Водные ресурсы, ГИС, метод морфометрического ранжирования, дистанционное зондирование, Вади-Ватир (Египет).

Для цитирования

Еззелдин М., Синиченко Е.К., Грицук И.И., Грицук А.И. Современные методы и решения в области управления водными ресурсами региона Вади-Ватир (Египет) // Государственное управление. Электронный вестник. 2024. № 105. С. 39–52. DOI: 10.55959/MSU2070-1381-105-2024-39-52

Modern Methods and Solutions for Water Resources Management in the Wadi-Watir
Region (Egypt)

Mostafa M.A. Ezzeldin

PhD, Assistant lecturer, ORCID: [0000-0003-0332-0424](https://orcid.org/0000-0003-0332-0424), m_ezzeldin90@yahoo.com

Menoufia University, Shibin-el-Kom, Egypt.

Evgeny K. Sinichenko

PhD, Associate Professor, ORCID: [0000-0002-9159-1218](https://orcid.org/0000-0002-9159-1218), sinichenko_ek@pfur.ru

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), Moscow, Russian Federation.

Ilya I. Gritsuk²

PhD, Associate Professor, ORCID: [0000-0002-5671-7620](https://orcid.org/0000-0002-5671-7620), gritsuk_ii@pfur.ru

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN); Water Problems Institute (WPI RAS), Moscow, Russian Federation.

¹ Корреспондирующий автор.

² Corresponding author.

Anna I. Gritsuk

Bachelor's degree student, GritsukAI@spa.msu.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Abstract

The main problem of water resources in Egypt is the increasing demand and decreasing supply, especially after the construction of the Ethiopian Renaissance Great Dam. One of the best solutions is the use of unusual alternative management techniques, including as a major one, rainwater harvesting and distribution. This paper examines the use of unconventional approaches to water management in arid regions based on rainfall accumulation. Using Geographic Information Systems (GIS) and hydrological modelling, the suitability of the Wadi-Watir catchment (Egypt) for rainwater storage was assessed and optimal locations for the construction of storage structures were identified. The results of the study showed that 19% (666 km²) of the study area is highly suitable for the aims and objectives; 16% (573 km²) of the catchment area has limited realisability. Twelve sites were found to be suitable for the construction of storage dams. Fourteen sites are identified as optimal for the placement of percolation (filtration) reservoirs along watercourses. The area considered ideal for above-ground percolation (filtration) tanks is 25.9 km². The optimum area for farm ponds is 1.34 km². As a result, the construction of water storage structures is proposed to improve water management in the Wadi-Watir region. The implementation of the rainwater harvesting structures (SRF) was divided into three phases depending on the severity of the flash flood hazard. The first, second and third phases can meet 62.24% (34.24 mil m³) of the water demand. This approach is a new and modern solution to the problem of water scarcity under socio-economic and environmental pressures while achieving the goals of sustainable development in Egypt. The article is based on the dissertation research of Mohamed Mostafa Ezzeldin Abdelrahim (MGSU, dissertation council № 24.2.339.07, March 2024).

Keywords

Water resources, GIS, morphometric ranking method, remote sensing, Wadi-Watir (Egypt).

For citation

Ezzeldin M., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I., Gritsuk A.I. (2024) Modern Methods and Solutions for Water Resources Management in the Wadi-Watir Region (Egypt). *Gosudarstvennoye upravleniye. Elektronnyy vestnik*. No. 105. P. 39–52. DOI: 10.55959/MSU2070-1381-105-2024-39-52

Введение

Поскольку водное хозяйство становится все более важным аспектом нашей современной жизни, эффективное управление водными ресурсами становится приоритетом. Вода — это не только необходимый ресурс для обеспечения нашей жизни, но и ключевой элемент для устойчивого развития и сохранения экосистемы. Необходимо рассмотреть проблемы, с которыми сталкиваются власти при управлении водными ресурсами, а также важность принятия эффективных стратегий и политики для их сохранения и использования в интересах наших будущих поколений [Еззелдин 2021; Allam, Allam 2007].

Управление водными ресурсами в Египте играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития страны. В суровых условиях, характеризующихся высокой степенью засушливости и ограниченным доступом к пресной воде, эффективное управление становится жизненно важным. Египет полагается на Нил как на основной источник воды, и поэтому страна активно развивает стратегии по максимальному использованию этого ресурса [Omar, Moussa 2016; Bedawy 2014]. Однако с учетом изменяющихся климатических условий и увеличения потребления управление водными ресурсами становится все более сложным и требует комплексных подходов, включая инновационные методы орошения, эффективное распределение воды и сотрудничество с соседними странами по водным вопросам [Еззелдин и др. 2023а; Elsayed et al. 2019].

Проблемы с водными ресурсами в регионе Вади-Ватир на полуострове Синай в Египте являются серьезным вызовом для местного населения и экосистемы. Вади-Ватир страдает от острой нехватки пресной воды из-за недостатка осадков и ограниченного доступа к подземным водным запасам. Это создает серьезные проблемы для жителей этой области, которые зависят от воды для сельского хозяйства, питьевого водоснабжения и повседневных потребностей. Кроме того, ухудшение качества воды из-за загрязнения представляет угрозу здоровью и благополучию местного населения, а также окружающей среде. Решение этих проблем требует срочных и комплексных мер, таких как внедрение устойчивых методов использования воды, восстановление экосистемы и совместные усилия в области охраны окружающей среды с участием местных сообществ, правительственных органов и международных организаций [Еззелдин и др. 2023b; Elshemy, Khadr 2015].

Геоинформационные системы (ГИС), дистанционное зондирование и гидрологическое моделирование играют ключевую роль в управлении водными ресурсами, предоставляя инструменты для анализа, мониторинга и прогнозирования их состояния и распределения. Данные методы помогают принимать обоснованные решения в процессе водопользования, а также оценивать влияние климатических изменений и человеческой деятельности на доступность и качество воды в будущем [Adham et al. 2016; Elewa et al. 2021].

Сбор дождевой воды является важным и эффективным методом управления водными ресурсами в аридных регионах. В таких областях, где осадки редки и нестабильны, каждая капля дождя ценна. Применение систем сбора дождевой воды позволяет эффективно использовать доступные ресурсы, собирая воду, которая обычно бы просто стекла бы в землю или утекла в водоемы. Эта вода может быть использована для различных целей, включая сельское хозяйство, орошение, питьевое водоснабжение и даже промышленные нужды. Благодаря простоте и относительной дешевизне таких систем сбор дождевой воды представляет собой доступное и эффективное решение для повышения устойчивости и снижения зависимости от ограниченных водных ресурсов в аридных регионах [Hamdy et al. 2020; Mahmoud et al. 2022; Matomela et al. 2020].

Цель статьи — исследовать сбор дождевой воды с использованием ГИС, дистанционного зондирования и гидрологического моделирования, определяя оптимальные местоположения для таких сооружений. ГИС помогут анализировать данные о рельефе, землепользовании и климате для выбора подходящих участков. Дистанционное зондирование обеспечит информацией о погоде и водных ресурсах. Гидрологическое моделирование предсказывает поведение водных систем и эффективность сбора воды. Такой подход поможет определить оптимальные местоположения для сбора дождевой воды, улучшая управление водными ресурсами и устойчивость региона.

Материалы и методы

Область исследования

Вади-Ватир, расположенный на полуострове Синай в Египте, представляет собой уникальное географическое образование, богатое историей и природными достопримечательностями. Этот ущельный регион занимает значительную часть восточного побережья полуострова и простирается на север вдоль берегов Красного моря. Площадь водосборного бассейна Вади-Ватир представляет собой участок земной поверхности значительных размеров, охватывая разнообразные ландшафты: от гористых хребтов до песчаных дюн. Климат в этом регионе типично аридный, с низким количеством осадков и высокими температурами в течение большей части года. Несмотря на неблагоприятные климатические условия, Вади-Ватир является домом для разнообразной флоры и фауны, а также представляет культурный и исторический интерес (Рисунок 1). Население региона в основном занято сельским хозяйством и туризмом, сосредоточившись в близлежащем городе Нувейба. Нувейба, расположенный на побережье Красного моря, служит важным туристическим центром и транзитным пунктом для путешественников, исследующих красоту и богатство Вади-Ватира и его окрестностей [Еззелдин и др. 2023а; Еззелдин и др. 2023b; Ezzeldin et al. 2022].

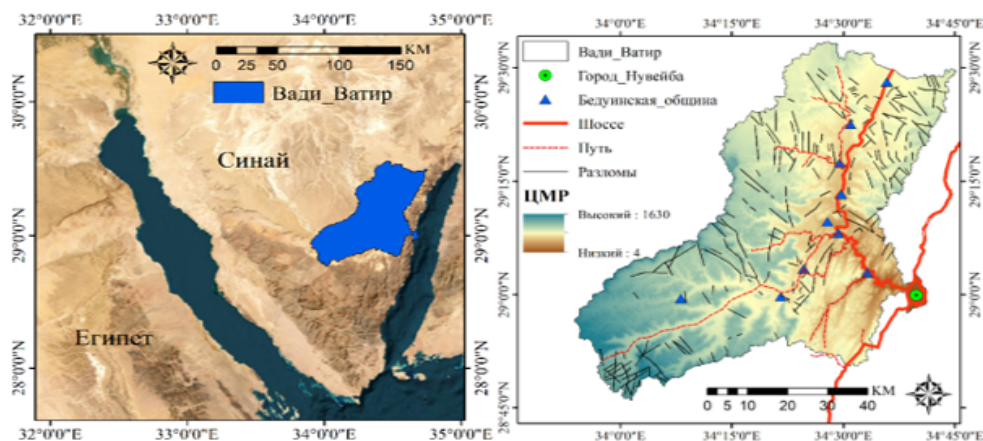


Рисунок 1. Местоположение и основные характеристики изучаемой территории³

Выбор и подготовка тематических слоев

Тематические слои, анализируемые в статье, были выбраны из-за доступности данных и научной обоснованности. Кроме того, они были рекомендованы ФАО (Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций) и использовались во многих предыдущих исследованиях [Adham et al. 2016; Jha et al. 2014; Matomela et al. 2020; Singh et al. 2017]. Одиннадцать выбранных тематических слоев для взвешенной линейной комбинации (ВЛК) включают глубину стока, уклон (%), площадь бассейна, максимальное расстояние потока, индекс влажности рельефа и другие.

Для выбора местоположений объектов использовались тематические слои, подготовленные в ArcGIS 10.5. Границы Вади-Ватир определялись с использованием цифровой модели рельефа (SRTM) для создания карт уклона, индекса влажности рельефа и порядков водотоков. Расчет плотности дренажа осуществлялся на основе порядков водотоков. Landsat 8 использовался для радиометрической и геометрической коррекции изображений, а также для надзорной классификации землепользования. Водосборный бассейн был разделен на 25 подбассейнов, а затем параметры каждого подбассейна интерполировались для всего бассейна в ГИС-среде. Для подготовки тематического слоя для частотной плотности линеаментов использовались ENVI 5.3, Geomatica 2017 и ArcGIS 10.5.

Все тематические слои и их характеристики были реклассифицированы и получили веса на основе степени их пригодности в качестве мест размещения систем сбора дождевой воды, как указано в Таблице 1. Веса и критерии были приняты и обновлены на основе предыдущих исследований для исключения расхождений в назначении весов [Adham et al. 2016; Al-Adamat et al. 2010; Jha et al. 2014; Matomela et al. 2020; Singh et al. 2017; Tiwari et al. 2018]. Использование булевых параметров критически важно для исключения некоторых мест, выбранных с использованием метода ВЛК. Три слоя ограничений были выбраны для улучшения процесса оценки пригодности мест. В Таблице 2 представлены булевы критерии и их обоснование.

³ Источник: [Еззелдин и др. 2023b, 108].

Таблица 1. Взвешивание и обоснование выбранных критериев, а также классификация их признаков⁴

Критерии	Вес слоя	Критерии выбора класса объектов	Критерий 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
		≥5 ≤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
		Пустые	Умеренный	3
		Водные фонды	Ограниченный	0
		Сельскохозяйственные	Ограниченный	0
		Временные водотоки	Высокий	7
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 (м)	3	<500	Низкий	2
		≥500 < 2,000	Высокий	5
		≥2,000	Умеренный	3
Расстояние до дорог (м)	2	<1,000	Высокий	5
		≥1,000 < 1,500	Умеренный	3
		≥1,500	Низкий	2

Таблица 2. Булевы критерии и их обоснования⁵

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

⁴ Составлено авторами по [Ezzeldin et al. 2022, 4].

⁵ Составлено авторами по [Ezzeldin et al. 2022, 4].

Расчеты стока

Для получения ежегодного объема паводков (глубины стока) использовался метод SCS-CN с использованием программного обеспечения для моделирования водосбора (WMS 10.1). В различных исследованиях оценивался сток на основе данных об осадках с использованием этого метода [Elewa et al. 2021; Gautam et al. 2019; Matomela et al. 2020; Singh et al. 2017; Tiwari et al. 2018]. Метод SCS-CN в значительной степени зависит от безразмерных значений кривой числа (CN), которые необходимо рассчитать точно для получения надежных результатов. Оценка CN зависит от землепользования и группы гидрологических почв. Весовое значение кривой числа для всего водосбора (CN_w) рассчитывалось с использованием WMS. Гидравлическая модель HEC-1 преобразовывала данные об осадках в гидрограф стока. Область воздействия каждой метеостанции определялась с использованием метода полигонов Тиссена. Метод SCS-CN может быть применен для определения стока по следующему уравнению:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (P > 0.2S), \quad (1)$$

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:

$$S = \frac{25400}{CN_w} - 254, \quad (2)$$

где CN_w — номер взвешенной кривой для всего бассейна. CN_w определялся следующим образом:

$$CN_w = \frac{\sum(CN_i \cdot A_i)}{A}, \quad (3)$$

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

Пригодность для сбора дождевой воды

Метод ВЛК широко применяется при составлении карт пригодности в ГИС и в многокритериальном анализе. Метод ВЛК был объединен с булевыми факторами для исключения некоторых характеристик из процесса выбора местоположения и создания карты пригодности. Используемое уравнение может быть выражено следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{ИПСДВ} = & \text{СТ}_{\text{нв}} \cdot \text{СТ}_{\phi} + \text{УК}_{\text{нв}} \cdot \text{УК}_{\phi} + \text{ПБ}_{\text{нв}} \cdot \text{ПБ}_{\phi} + \text{МРП}_{\text{нв}} \cdot \text{МРП}_{\phi} + \text{ТИВ}_{\text{нв}} \cdot \text{ТИВ}_{\phi} + \\ & + \text{ПД}_{\text{нв}} \cdot \text{ПД}_{\phi} + \text{ЧПЛ}_{\text{нв}} \cdot \text{ЧПЛ}_{\phi} + \text{ЗП}_{\text{нв}} \cdot \text{ЗП}_{\phi} + \text{НФ}_{\text{нв}} \cdot \text{НФ}_{\phi} + \text{Брос}_{\text{нв}} \cdot \text{Брос}_{\phi} + \text{Дрос}_{\text{нв}} \cdot \text{Дрос}_{\phi}. \end{aligned} \quad (4)$$

где ИПСДВ — индекс потенциала сбора дождевой воды; $\text{СТ}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы стока; СТ_{ϕ} — вес признака темы стока; $\text{УК}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы уклона; УК_{ϕ} — вес признака темы уклона; $\text{ПБ}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы площади бассейна; ПБ_{ϕ} — вес признака темы площади бассейна; $\text{МРП}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы максимального расстояния потока; МРП_{ϕ} — вес признака темы максимального расстояния потока; $\text{ТИВ}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы топографического индекса влажности; ТИВ_{ϕ} — вес признака темы топографического индекса влажности; $\text{ПЛ}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы плотности дренажа; ПЛ_{ϕ} — вес признака темы плотности дренажа; $\text{ЧПЛ}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы частотной плотности линеамента; ЧПЛ_{ϕ} — вес признака темы частотной плотности линеамента; $\text{ЗП}_{\text{нв}}$ — нормализованный вес темы

землепользования; ZP_{ϕ} — вес признака темы землепользования; HF_{HB} — нормализованный вес темы номера фильтрации; HF_{ϕ} — вес признака темы номера фильтрации; $Bros_{HB}$ — нормализованный вес расстояния до населенных пунктов и темы бедуинских общин; $Bros_{\phi}$ — вес признака расстояния до населенных пунктов и темы бедуинских общин; $Dros_{HB}$ — нормализованный вес темы расстояния до дорог; $Dros_{\phi}$ — вес признака темы расстояния до дорог.

Уравнение (4) создает растровую карту, которая показывает пригодность исследовательской области для сбора дождевой воды (СДВ). *ИПСДВ* — это безразмерное значение, полученное из уравнения (4). Значения *ИПСДВ* классифицируются на пять категорий для определения пригодности земли для СДВ для Вади-Ватира. Этот метод был использован в различных исследованиях и доказал свою успешность [Adham et al. 2016; Al-Adamat et al. 2010; Jha et al. 2014; Matomela et al. 2020; Tiwari et al. 2018]. Булевы критерии, которые классифицировались как непригодные для СДВ, были объединены в один слой ограничений. Этот слой был объединен с выходным слоем из метода ВЛК для создания итоговой карты пригодности СДВ.

Локализация оптимальных мест для сооружений СДВ

Глубина депрессии вычисляется путем вычитания начальной цифровой модели рельефа (ЦМР) из заполненной ЦМР. Глубина депрессии и выходные слои из метода ВЛК и булевых критериев были интегрированы. Сооружения СДВ рекомендуются для участков со смежными зонами депрессии и высокой пригодностью для СДВ [Matomela et al. 2020]. Рельеф, использование земли и характеристики почв являются основными параметрами для выбора местоположения сооружений с использованием булевой логики. ГИС была использована для создания буферной зоны (50 м) вокруг второстепенных и третьестепенных потоков для определения подходящих мест для перколяционных резервуаров и полтин [Jha et al. 2014; Matomela et al. 2020; Singh et al. 2017]. На Рисунке 2 показана блок-схема применяемой методологии.

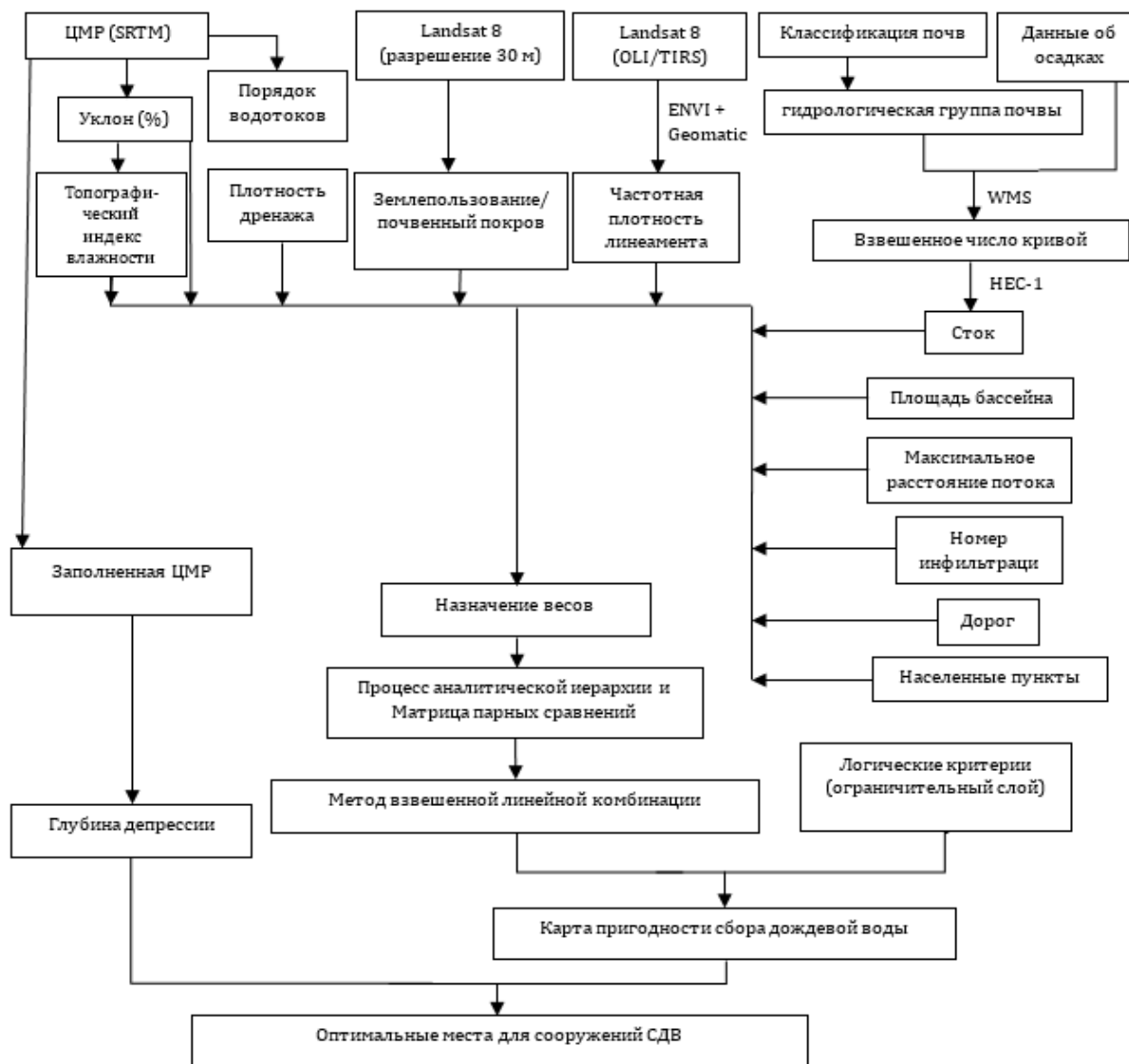


Рисунок 2. Блок-схема применяемой методологии⁶

Результаты исследования

Тематические слои для картирования пригодности СДВ

Тематические слои, выбранные на основе их эффективности для определения пригодности СДВ, представлены ниже.

Карта уклонов

Цифровая модель рельефа (SRTM) использовалась для создания карты уклона в ГИС. В рассматриваемой зоне исследования уклоны варьируются от пологих до очень крутых. Большая часть водосбора (63%) относится к категории крутых уклонов, что делает их менее подходящими для СДВ. Пологие и умеренные уклоны составляют 19% и 18% соответственно и более пригодны для СДВ, согласно [Adham et al. 2018]. Таким образом, 19% исследуемой области подходят для СДВ в соответствии с картой уклона (Рисунок 3(а)).

Карта землепользования/земельного покрова

Карта использования земли была составлена на основе изображений Landsat 8 с разрешением 30 м и делится на пять категорий: неосвоенные земли (пустые), сельское хозяйство, поселения, водотоки и вода. Основная часть изучаемой области представляет собой пустые — 93%,

⁶ Составлено авторами по [Ezzeldin et al. 2022, 6].

а водотоки занимают 6,28%. Сельскохозяйственные, поселения и водные фонды занимают менее 1% (Рисунок 3(б)). Карта использования земли была улучшена и проверена с применением спутниковых изображений, что подтверждает гипотезу о засушливости области. Водотоки наилучшим образом подходят для сбора и аккумуляции воды, а незастроенная земля умеренно пригодна. Исходя из анализа карты, можно сделать вывод о том, что 99% водосбора подходит для СДВ.

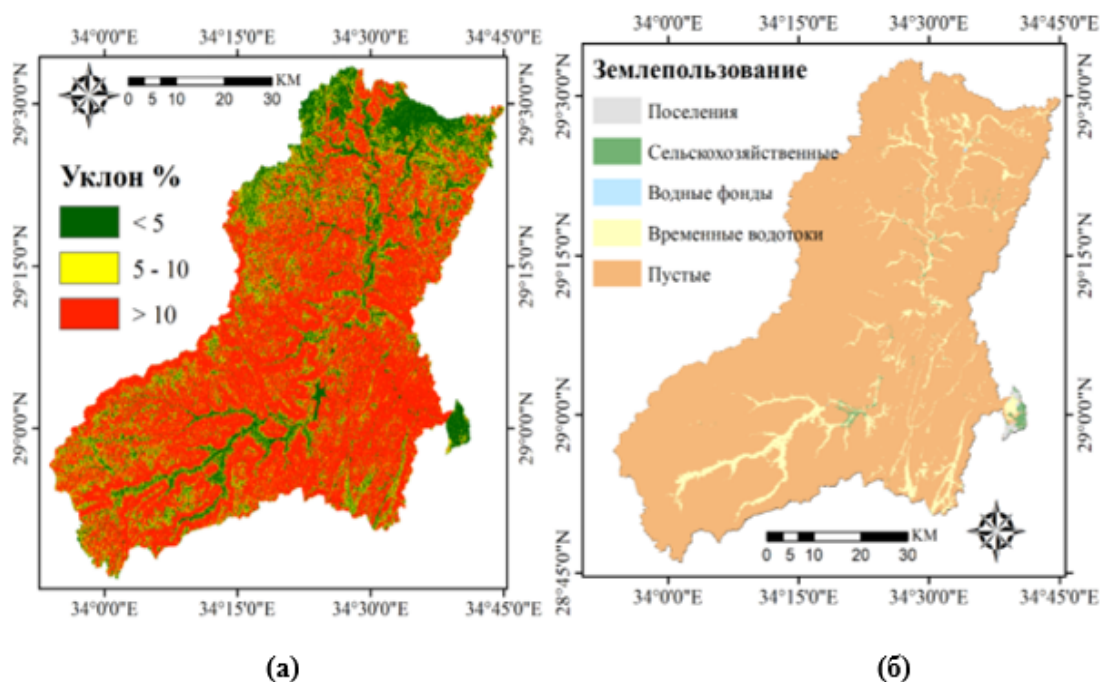


Рисунок 3. Карта уклона и землепользования⁷

Карта пригодности для сбора дождевой воды

Анализ ВЛК 11 тематических слоев был реализован с использованием уравнения (4). ВЛК была применена в среде ГИС для создания карты пригодности для СДВ, как показано на Рисунке 4(а). Пригодность для СДВ классифицируется на пять категорий, в зависимости от значения *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). Булев метод был применен с использованием трех ограничений, показанных в Таблице 2. Все ограничения были объединены в одну карту и классифицированы на две категории, а именно подходящие или неподходящие, как показано на Рисунке 4(б).

Карты анализа ВЛК и булевого метода были объединены для создания итоговой карты пригодности для сбора дождевой воды (Рисунок 5). Результаты показывают, что 7% (236 км²) Вади-Ватира очень подходят для СДВ, а 12% (430 км²) высоко подходят. Почти всю эту область можно найти вдоль водотоков на водоразделе. Сбор ограничивается на 16% (573 км²) зоны исследования. Пригодность низкая (23%; 832 км²) и очень низкая (17%; 618 км²) для 40% (1450 км²) Вади-Ватира. Наименее подходящая область для СДВ находится в середине водораздела. Умеренная пригодность для СДВ наблюдается в 25% (891 км²) исследуемой области.

⁷ Составлено авторами по [Ezzeldin et al. 2022, 7].

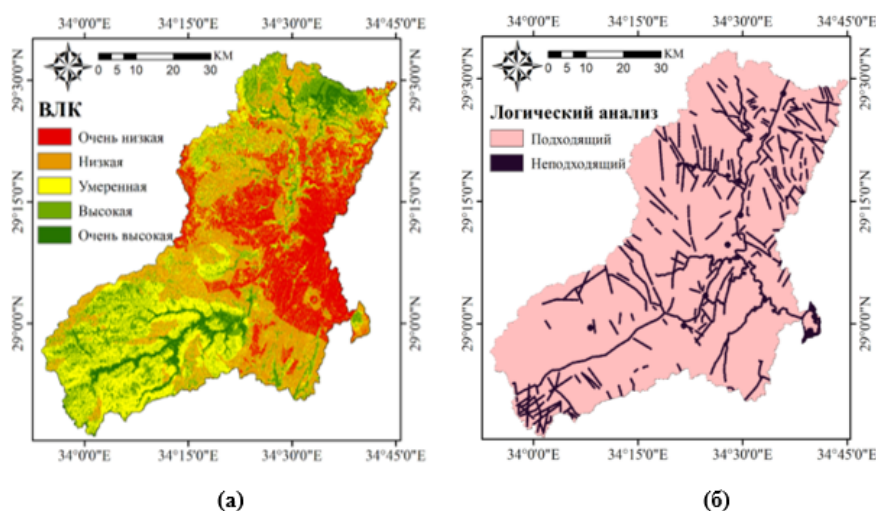


Рисунок 4. а) Карта пригодности СДВ после ВЛК; б) Карта булевого анализа⁸

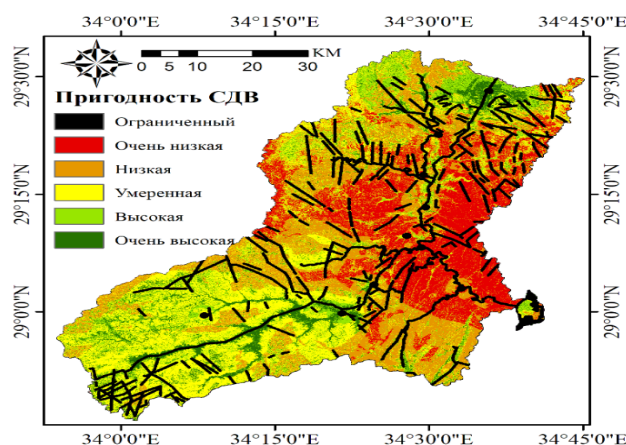


Рисунок 5. Итоговая карта пригодности СДВ⁹

Размещение сооружений СДВ

Оптимальные места для сооружений СДВ были определены с использованием описанной выше методики. Смежные глубины депрессии, полученные из ЦМР, были объединены с областями высокой и очень высокой пригодности для сбора дождевой воды для выявления оптимальных мест для строительства объектов СДВ. В статье рассматриваются следующие сооружения: перколяционные резервуары (на земле и вдоль водотоков), накопительные плотины и фермерские пруды. Для указания местоположения сооружений СДВ использовался булев метод [Singh et al. 2017]. Места были выбраны так, чтобы они находились далеко от уже существующих сооружений, как показано на Рисунке 6. Эффективность этого метода была подтверждена через уже существующие объекты, поскольку они находятся на пересечении глубин депрессии и областей высокой и очень высокой пригодности.

⁸ Составлено авторами по [Ezzeldin et al. 2022, 10].

⁹ Составлено авторами по [Ezzeldin et al. 2022, 10].

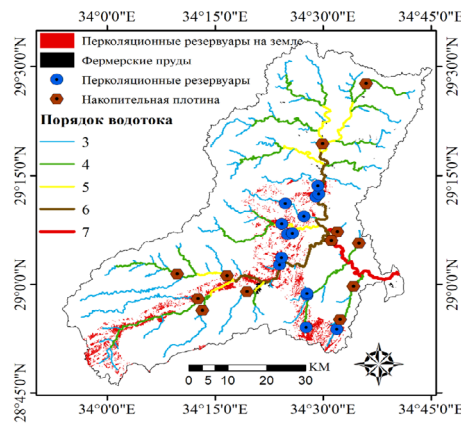


Рисунок 6. Размещение сооружений сбора дождевой воды¹⁰

Для накопительных плотин оптимальны 12 мест: 5 в юго-западной части, 3 в центре, 2 в юго-восточной части и 2 в северной части. Для перколяционных резервуаров вдоль водотоков оптимальны 14 мест: 4 в юго-восточной части и остальные в центре Вади-Ватира. Зона, считающаяся идеальной для перколяционных резервуаров, составляет 25,9 км². Эта зона в основном расположена в центральной и южной частях исследуемой области. Оптимальное пространство для фермерских прудов составляет 1,34 км² и находится недалеко от земельных угодий.

Заключение

Настоящая работа направлена на поиск решений проблем управления водными ресурсами в засушливых регионах через нестандартные подходы, такие как сбор дождевой воды. Пригодность водосборного бассейна Вади-Ватир для аккумуляции дождевой воды была исследована с использованием ГИС и гидрологического моделирования. Были определены наилучшие местоположения для сооружений накопления дождевой воды.

Основные результаты можно сформулировать следующим образом:

- итоговая карта СДВ показала, что 19% (666 км²) площади водосбора Вади-Ватира высокопригодны для СДВ. Почти вся эта область расположена вдоль водотоков водораздела. Эти результаты обусловлены крутыми склонами и гористой природой исследуемой области;
- 12 мест были определены подходящими для накопительных плотин. Четырнадцать мест определены оптимальными для размещения перколяционных резервуаров вдоль водотоков. Зона, считаемая идеальной для перколяционных резервуаров на земле, составляет 25,9 км²; оптимальная площадь для фермерских прудов — 1,34 км².

Данная методика может быть полезна инженерам по водному хозяйству, планировщикам и управляющим в интегрированном управлении водными ресурсами в регионе Вади-Ватир. Однако внедрение систем сбора дождевой воды требует дополнительных исследований, включая детальные полевые обследования предполагаемых мест для сбора дождевой воды.

Список литературы:

Еззелдин М. 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](https://doi.org/10.22227/2305-5502.2021.1.1)

Еззелдин М., Синиченко Е.К., Грицук И.И. Влияние ливневых паводков на строительство сооружений по сбору дождевой воды // Строительство: наука и образование. 2023а. Т. 13. № 2. С. 102–116. DOI: [10.22227/2305-5502.2023.2.7](https://doi.org/10.22227/2305-5502.2023.2.7)

¹⁰ Составлено авторами по [Еззелдин и др. 2023а, 105].

Еззелдин М., Синиченко Е.К., Грицук И.И. Картирование опасности внезапных наводнений с использованием метода морфометрического ранжирования // Природообустройство. 2023b. № 2. С. 106–112. DOI: [10.26897/1997-6011-2023-2-106-112](https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-2-106-112)

Adham A., Riksen M., Ouessar M., Ritsema C. Identification of Suitable Sites for Rainwater Harvesting Structures in Arid and Semi-Arid Regions: A Review // International Soil and Water Conservation Research. 2016. Vol. 4. Is. 2. P. 108–120. DOI: [10.1016/j.iswcr.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001)

Adham A., Sayl K.N., Abed R., Abdeladhim M.A., Wesseling J.G., Riksen M., Fleskens L., Karim U., Ritsem C.J. GIS-Based Approach for Identifying Potential Sites for Harvesting Rainwater in the Western Desert of Iraq // International Soil and Water Conservation Research. 2018. Vol. 6. Is. 4. P. 297–304. DOI: [10.1016/j.iswcr.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.07.003)

Al-Adamat R., Diabat A., Shatnawi G Combining GIS with Multicriteria Decision Making for Siting Water Harvesting Ponds in Northern Jordan // Journal of Arid Environments. 2010. Vol. 74. Is. 11. P. 1471–1477. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2010.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.001)

Allam M.N., Allam G.I. Water Resources in Egypt: Future Challenges and Opportunities // Water International Journal. 2007. Vol. 32. Is. 2. P. 205–218. DOI: [10.1080/02508060708692201](https://doi.org/10.1080/02508060708692201)

Bedawy R. Water Resources Management: Alarming Crisis for Egypt // Journal of Management and Sustainability. 2014. Vol. 4. Is. 3. DOI: [10.5539/jms.v4n3p108](https://doi.org/10.5539/jms.v4n3p108)

Elewa H.H., Zelenakova M., Nosair A.M. 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 // Water. 2021. Vol. 13. Is. 6. DOI: [10.3390/w13060804](https://doi.org/10.3390/w13060804)

Elsayed M.R., Omima S.S., Maha R.F., Gamal M.A. Integrated Water Resource Management in Sharkia Governorate, East Nile Delta Using Numerical Evaluation of Water Management Strategies // Alexandria Engineering Journal. 2019. Vol. 58. Is. 2. P. 757–771. DOI: [10.1016/j.aej.2019.06.006](https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.06.006)

Elshemy M., Khadr M. Hydrodynamic Impacts of Egyptian Coastal Lakes due to Climate Change — Example Manzala Lake // 18th International Water Technology Conference, IWTC18. Sharm ElSheikh, Egypt, 12–14 March 2015. Sharm ElSheikh: IWTA, 2015. P. 206–217.

Ezzeldin M., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Determining the Suitability of Rainwater Harvesting for the Achievement of Sustainable Development Goals in Wadi Watir, Egypt Using GIS Techniques // Journal of Environmental Environment. 2022. Vol. 313. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.114990](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114990)

Gautam S., Dahal V., Bhattarai R. Impacts of Dem Source, Resolution and Area Threshold Values on SWAT Generated Stream Network and Streamflow in Two Distinct Nepalese Catchments // Environmental Processes. 2019. Vol. 6. P. 597–617. DOI: [10.1007/s40710-019-00379-6](https://doi.org/10.1007/s40710-019-00379-6)

Hamdy E., Djordjević S., Savić D.A., Tsoukalas I., Makropoulos Ch. The Nile Water-Food-Energy Nexus under Uncertainty: Impacts of the Grand Ethiopian Renaissance Dam // Journal of Water Resources Planning and Management. 2020. Vol. 146. Is. 11. DOI: [10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001285)

Jha M.K., Chowdary V.M., Kulkarni Y., Mal B.C. Rainwater Harvesting Planning Using Geospatial Techniques and Multicriteria Decision Analysis // Conservation & Recycling. 2014. Vol. 83. P. 96–111. DOI: [10.1016/j.resconrec.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.003)

Mahmoud M.M., Mona G.I., Manabu F., Mahmoud N. Sustainable Development Goals (SDGs) Associated with Flash Flood Hazard Mapping and Management Measures through Morphometric Evaluation // Geocarto International. 2022. DOI: [10.1080/10106049.2022.2046868](https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2046868)

Matomela N., Li T., Ikhumhen H.O. Siting of Rainwater Harvesting Potential Sites in Arid or Semi-Arid Watersheds Using GIS-based Techniques // Environmental Processes. 2020. Vol. 7. P. 631–652. DOI: [10.1007/s40710-020-00434-7](https://doi.org/10.1007/s40710-020-00434-7)

Omar M. El Din M., Moussa A.M.A. Water Management in Egypt for Facing the Future Challenges // Journal of Advanced Research. 2016. Vol. 7. Is. 3. P. 403–412. DOI: [10.1016/j.jare.2016.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.02.005)

Singh L.K., Jha M.K., Chowdary V.M. Multi-Criteria Analysis and GIS Modeling for Identifying Prospective Water Harvesting and Artificial Recharge Sites for Sustainable Water Supply // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142. Part 4. P. 1436–1456. DOI: [10.1016/j.jclepro.2016.11.163](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163)

Tiwari K., Goyal R., Sarkar A. GIS-Based Methodology for Identification of Suitable Locations for Rainwater Harvesting Structures / *Water Resources Management*. 2018. Vol. 32. P. 1811–1825. DOI: [10.1007/s11269-018-1905-9](https://doi.org/10.1007/s11269-018-1905-9)

References:

Adham A., Riksen M., Ouassar M., Ritsema C. (2016) Identification of Suitable Sites for Rainwater Harvesting Structures in Arid and Semi-Arid Regions: A Review. *International Soil and Water Conservation Research*. Vol. 4. Is. 2. P. 108–120. DOI: [10.1016/j.iswcr.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001)

Adham A., Sayl K.N., Abed R., Abdeladhim M.A., Wesseling J.G., Riksen M., Fleskens L., Karim U., Ritsem C.J. (2018) GIS-Based Approach for Identifying Potential Sites for Harvesting Rainwater in the Western Desert of Iraq. *International Soil and Water Conservation Research*. Vol. 6. Is. 4. P. 297–304. DOI: [10.1016/j.iswcr.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.07.003)

Al-Adamat R., Diabat A., Shatnawi G. (2010) Combining GIS with Multicriteria Decision Making for Siting Water Harvesting Ponds in Northern Jordan. *Journal of Arid Environments*. Vol. 74. Is. 11. P. 1471–1477. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2010.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.001)

Allam M.N., Allam G.I. (2007) Water Resources in Egypt: Future Challenges and Opportunities. *Water International Journal*. Vol. 32. Is. 2. P. 205–218. DOI: [10.1080/02508060708692201](https://doi.org/10.1080/02508060708692201)

Bedawy R. (2014) Water Resources Management: Alarming Crisis for Egypt. *Journal of Management and Sustainability*. Vol. 4. Is. 3. DOI: [10.5539/jms.v4n3p108](https://doi.org/10.5539/jms.v4n3p108)

Elewa H.H., Zelenakova M., Nosair A.M. (2021) 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. *Water*. Vol. 13. Is. 6. DOI: [10.3390/w13060804](https://doi.org/10.3390/w13060804)

Elsayed M.R., Omima S.S., Maha R.F., Gamal M.A. (2019) Integrated Water Resource Management in Sharkia Governorate, East Nile Delta Using Numerical Evaluation of Water Management Strategies. *Alexandria Engineering Journal*. Vol. 58. Is. 2. P. 757–771. DOI: [10.1016/j.aej.2019.06.006](https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.06.006)

Elshemy M., Khadr M. (2015) Hydrodynamic Impacts of Egyptian Coastal Lakes due to Climate Change — Example Manzala Lake. *18th International Water Technology Conference, IWTC18*. Sharm ElSheikh, Egypt, 12–14 March 2015. Sharm ElSheikh: IWTA, P. 206–217.

Ezzeldin M. (2021) Challenges of Water Resources Management in Egypt and Solution Opportunities. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. Vol. 11. No. 1. P. 1–14. DOI: [10.22227/2305-5502.2021.1.1](https://doi.org/10.22227/2305-5502.2021.1.1)

Ezzeldin M., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. (2022) Determining the Suitability of Rainwater Harvesting for the Achievement of Sustainable Development Goals in Wadi Watir, Egypt Using GIS Techniques. *Journal of Environmental Environment*. Vol. 313. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.114990](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114990)

Ezzeldin M., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. (2023a) Flash Floods Impact on the Construction of Rainwater Harvesting Structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. Vol. 13. No. 2. P. 102–116. DOI: [10.22227/2305-5502.2023.2.7](https://doi.org/10.22227/2305-5502.2023.2.7)

Ezzeldin M., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. (2023b) Flash Flood Hazard Mapping Using Morphometric Ranking Method. *Prirodoobustroystvo*. No. 2. P. 106–112. DOI: [10.26897/1997-6011-2023-2-106-112](https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-2-106-112)

Gautam S., Dahal V., Bhattarai R. (2019) Impacts of Dem Source, Resolution and Area Threshold Values on SWAT Generated Stream Network and Streamflow in Two Distinct Nepalese Catchments. *Environmental Processes*. Vol. 6. P. 597–617. DOI: [10.1007/s40710-019-00379-6](https://doi.org/10.1007/s40710-019-00379-6)

Hamdy E., Djordjević S., Savić D.A., Tsoukalas I., Makropoulos Ch. (2020) The Nile Water-Food-Energy Nexus under Uncertainty: Impacts of the Grand Ethiopian Renaissance Dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 146. Is. 11. DOI: [10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001285)

Jha M.K., Chowdary V.M., Kulkarni Y., Mal B.C. (2014) Rainwater Harvesting Planning Using Geospatial Techniques and Multicriteria Decision Analysis. *Conservation & Recycling*. Vol. 83. P. 96–111. DOI: [10.1016/j.resconrec.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.003)

Mahmoud M.M., Mona G.I., Manabu F., Mahmoud N. (2022) Sustainable Development Goals (SDGs) Associated with Flash Flood Hazard Mapping and Management Measures through Morphometric Evaluation. *Geocarto International*. DOI: [10.1080/10106049.2022.2046868](https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2046868)

Matomela N., Li T., Ikhumhen H.O. (2020) Siting of Rainwater Harvesting Potential Sites in Arid or Semi-Arid Watersheds Using GIS-based Techniques. *Environmental Processes*. Vol. 7. P. 631–652. DOI: [10.1007/s40710-020-00434-7](https://doi.org/10.1007/s40710-020-00434-7)

Omar M. El Din M., Moussa A.M.A (2016) Water Management in Egypt for Facing the Future Challenges. *Journal of Advanced Research*. Vol. 7. Is. 3. P. 403–412. DOI: [10.1016/j.jare.2016.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.02.005)

Singh L.K., Jha M.K., Chowdary V.M. (2017) Multi-Criteria Analysis and GIS Modeling for Identifying Prospective Water Harvesting and Artificial Recharge Sites for Sustainable Water Supply. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 142. Part 4. P. 1436–1456. DOI: [10.1016/j.jclepro.2016.11.163](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163)

Tiwari K., Goyal R., Sarkar A. (2018) GIS-Based Methodology for Identification of Suitable Locations for Rainwater Harvesting Structures. *Water Resources Management*. Vol. 32. P. 1811–1825. DOI: [10.1007/s11269-018-1905-9](https://doi.org/10.1007/s11269-018-1905-9)

Дата поступления/Received: 15.05.2024