

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-1-56-68.6>

МРНТИ 38.61.31

УДК 556.38

Т. Эм*¹, Р. Аманжолова², Т. Рахимов³, А. Мусаева⁴

¹* Магистрант (АО «Казахстанско-Британский технический университет», Алматы, Казахстан; t_em@kbtu.kz)

² Магистрант (АО «Казахстанско-Британский технический университет», Алматы, Казахстан; r_amanzholova@kbtu.kz)

³ PhD, заведующий лабораторией региональной гидрогеологии и геоэкологии (АО «Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У. М. Ахмедсафина», Алматы, Казахстан; t.rakhimov@satbayev.university)

⁴ Магистрант (Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; asem.musayeva.02@mail.ru)

АЛЬТЕРНАТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВОДОНОСНЫМИ ГОРИЗОНТАМИ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНФИЛЬТРАЦИИ И АККУМУЛЯЦИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Аннотация. Изменение климата оказывает значительное влияние на водные ресурсы во всем мире, выявляя недостатки традиционных методов управления водными ресурсами. Длительные засухи, усиление штормовой активности, сокращение снежного покрова и изменение динамики стока создают дополнительные сложности для обеспечения водной безопасности. Традиционные гидротехнические сооружения, включая плотины и водохранилища, играют значительную роль, но с меньшей вероятностью решают проблему эффективного распределения воды на локальном уровне, особенно в засушливых районах. Сельскохозяйственное орошение управляемое методом AgMAR позволяет не только эффективно использовать воду, но и пополнять запасы подземных вод, снижая зависимость от поверхностных источников. Рассматривается возможность внедрения сельскохозяйственного управляемого восполнения запасов водоносных горизонтов (AgMAR) в Казахстане. Для моделирования почвенных слоев, динамики водных потоков и принципов MAR используется 3D-визуализация, созданная с помощью библиотеки PyVista. Результаты исследования показывают, что AgMAR обладает значительным потенциалом для ирригации и управления водными ресурсами в сельских районах. Среди ключевых преимуществ отмечаются стабилизация уровня грунтовых вод, восполнение запасов водоносных горизонтов в период сезонных осадков, улучшение качества подземных источников воды и повышение доступности пресной воды.

Ключевые слова: AgMAR/FloodMAR, INOWAS, наводнение, устойчивость, подземные воды, сельскохозяйственное орошение.

Введение. Управление рисками наводнений и засух становится все более сложным из-за растущего воздействия человеческой деятельности на климат. Для повышения устойчивости экосистем и обеспечения жизнедеятельности населения в ряде стран, включая США и Европу, активно внедряются передовые технологии, такие, как управляемое восполнение запасов водоносных горизонтов в сельском хозяйстве (AgMAR) и управление паводковыми водами (FloodMAR) [1].

AgMAR является одной из наиболее перспективных технологий этот метод активно развивается и применяется под различными названиями, такими, как искусственное восполнение грунтовых вод в сельском хозяйстве, восполнение запасов на фермерских угодьях или перехват паводковых вод. Суть технологии заключается в перенаправлении избыточных поверхностных вод, образующихся вследствие осадков, таяния снега или сбросов из водохранилищ, на сельскохозяйственные земли для восполнения запасов подземных водных ресурсов [2].

Основным показателем эффективности AgMAR является степень приемистости почвы за счет высокого коэффициента фильтрации насыщенной почвы (K_s). Хотя процессы преимущественного стока остаются сложными для моделирования, K_s продолжают использовать как практичный и общепринятый индикатор скорости инфильтрации.

Наибольших успехов в развитии технологии AgMAR достигли в США и Европе [3]. Этот метод включает контроль влажности почвы и использование природных почвенных процессов для устойчивого восполнения запасов подземных вод. Применение технологий искусственного увлажнения почвы в условиях засухи помогает сократить потери урожая и смягчить влияние сезонных климатических изменений.

Примеры успешного внедрения AgMAR. Калифорния стала первым регионом, использующим индекс запасов подземных вод (GWSI) для выявления наиболее пригодных для AgMAR сельскохозяйственных земель с помощью цифрового анализа почв (рисунки 1, 2). Этот подход позволил проводить целенаправленные исследования и разрабатывать методы возделывания многолетних культур, которые одновременно способствуют пополнению подземных вод и повышению сельскохозяйственной продуктивности [4].



Рисунок 1 – Наводнение / Сельское хозяйство. Управляемое пополнение водоносных горизонтов в Калифорнии [5]

Figure 1 – Flooding / Agriculture. Managed Aquifer Recharge in California [5]

Рисунок 2 –
Метод искусственного затопления
с использованием технологии MAR
в Калифорнии, США [4]

Figure 2 – Artificial flooding method
using MAR technology in California,
USA [4]



Опыт развития сельского хозяйства в области виноградарства, садоводства и орошаемого земледелия подробно описан в исследовании "Managed Aquifer Recharge for Agriculture in Australia". В нем рассматриваются схемы накопления подземных вод и преимущества применения Agricultural MAR. Исследование охватывает водоснабжающие системы Литл-Пара, Локайер и Ангас-Бремер, где объемы пополнения водных ресурсов составили $0,6$, $8,9$ и $6,5 \cdot 10^6$ м³ в год соответственно.

Эффективность Managed Aquifer Recharge (MAR) достигала 37–67% от общего пополнения водных объемов, что делает этот метод надежным решением для удовлетворения потребностей в орошении. Производители плодоовощной продукции могут рассматривать MAR как альтернативный источник водоснабжения. Например, в районах Альдинг и Ангас-Бремер внедрение систем закачки воды в скважины способствовало увеличению урожайности винограда премиум-класса. Дополнительное преимущество заключается в том, что использование существующих подземных

источников требует минимальных первоначальных вложений, так как инфраструктура скважин зачастую уже имеется [6].

Технологии MAR (управляемого пополнения водных ресурсов) обеспечивают фильтрацию поверхностных вод и восполнение запасов подземных источников, включая их очистку для питьевых нужд. В Германии, где поверхностные воды подвержены загрязнению, контроль качества питьевых источников является приоритетной задачей. Для выявления загрязнителей, оптимизации методов комбинированной очистки и эффективной настройки систем MAR применяются различные стратегии, направленные на обеспечение высокого качества питьевой воды [7].

Исследовательский и учебный центр MAR, созданный на территории Назарбаев Университета рядом с озером Талдыколь, является экспериментальной площадкой для тестирования передовых водных технологий. В центре изучаются методы MAR в сочетании с устойчивыми городскими дренажными системами (SUDS) для разработки сценариев инфильтрации, способствующих рациональному управлению водными ресурсами. Исследования направлены на учет местного и регионального водного баланса, включая ливневые, талые и паводковые воды.

Перспективы MAR в Казахстане. Продвижение технологий TERESA, INOWAS MAR и Flood-MAR в регионы республики, особенно в сельскую местность, откроет новые возможности для повышения эффективности орошения (рисунок 3). Их внедрение позволит оптимизировать хранение и распределение воды, а также повысить устойчивость аграрного сектора к изменениям климата. Интеграция методов MAR в системы устойчивого орошения станет важным шагом к обеспечению водной и продовольственной безопасности страны [8].



Рисунок 3 – Проект TERESA в Астане, в кампусе Назарбаев Университета (NU) [9]

Figure 3 – TERESA project in Astana, on the campus of Nazarbayev University (NU) [9]

Проект содержит основные компоненты применения технологии, показанные на рисунке 4.

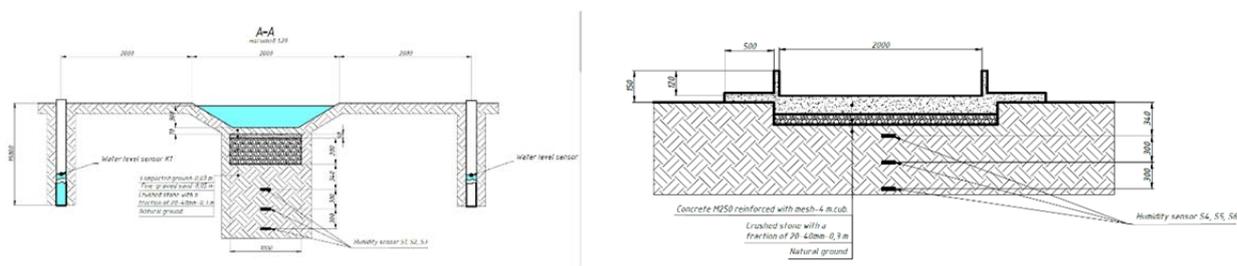


Рисунок 4 – TERESA исследовательский полигон в NU [10]

Figure 4 – TERESA research site at NU [10]

На рисунке 5 изображена метеорологическая станция, которая регистрирует температуру воздуха, направление ветра, индекс солнечной радиации, влажность и количество осадков. Это оборудование для исследований, которое используется в рамках проекта TERESA INOWAS MAR.



Рисунок 5 – Метеорологическая станция в Назарбаев Университете [10]

Figure 5 – Meteorological station at Nazarbayev University [10]

Soil sensors parameters

- depths
- 34cm
- 64 cm
- 94 cm

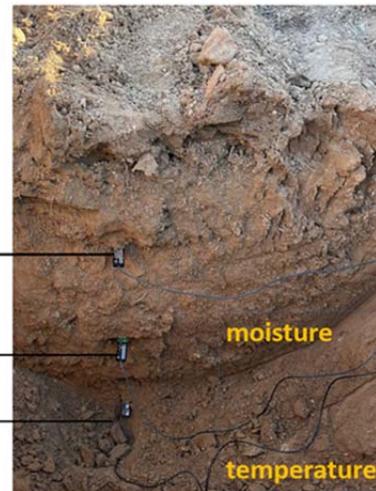


Рисунок 6 – Устройство для измерения грунта с использованием датчиков на разных уровнях [10]

Figure 6 – Ground measurement device using sensors at different levels [10]

Проведены измерения параметров почвы с использованием датчиков контроля температуры и влажности (рисунок 6).

В результате поверх проницаемого покрытия были размещены две скважины, где была определена дренажная система для канавы, показанной на рисунке 7, и установлены насосные скважины для откачки и пополнения запасов грунтовых вод (рисунок 8).

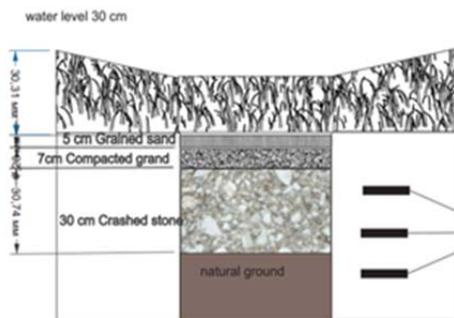


Рисунок 7 – Проектный план системы дренажной канавы [10]

Figure 7 – Design plan of the drainage ditch system [10]

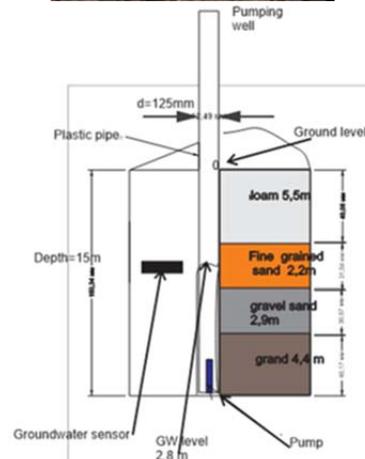


Рисунок 8 – Строительство дренажной канавы [10]

Figure 8 – Construction of a drainage ditch [10]

Использование подобных установок позволяет проводить контролируемые эксперименты для анализа и визуализации паводков вне зависимости от погодных условий.

Анализ регионов с недостаточной системой накопления воды. Опыт Испании показывает, что опора исключительно на плотины имеет ограниченную эффективность в борьбе с внезапными ливнями. Несмотря на значительные инвестиции в инфраструктуру, города продолжают подвергаться наводнениям, приводя к человеческим жертвам (рисунок 9). В связи с этим Испания выплатила компенсации по страховым случаям, связанным с чрезвычайными рисками. Исследователи отмечают, что сочетание двухлетней засухи и аномально высоких температур усугубило ситуацию, усилив воздействие рекордных осадков [11].



Рисунок 9 – Катастрофическое наводнение в Испании, 7 ноября 2024 года [11]

Figure 9 – Catastrophic flooding in Spain, 7 November 2024 [11]



Рисунок 10 – Наводнение в селе Кызылагаш [12]

Figure 10 – Floods in Kyzylagash village [12]

Аналогичная ситуация наблюдалась в 2010 году в селе Кызылагаш Алматинской области Казахстана (рисунок 10). Произошло разрушительное наводнение с человеческими жертвами. Это событие связано с разрушением плотины, вызванным таянием снега и проливными дождями. В результате было повреждено более 80% инфраструктуры деревни. Первоначально планировалось накопить больше поверхностной воды в водохранилище в рамках подготовки к засушливому летнему сезону. Однако никто не ожидал, что это обернется катастрофой [12].

Внедрение MAR в Казахстане: необходимость и перспективы. Расширение применения технологий MAR в Казахстане представляет собой важную инициативу, направленную на эффективное управление водными ресурсами. В рамках немецко-казахстанского сотрудничества реализуется проект TERESA, который способствует устойчивому использованию поверхностных и подземных вод, опираясь на передовой немецкий опыт в области смягчения последствий наводнений и засух. Одним из ключевых пилотных районов исследования выбран город Астана, где рядом с Назарбаев Университетом функционирует учебный центр MAR, специализирующийся на изучении водно-болотных угодий. Здесь тестируются различные методы MAR и устойчивые городские дренажные системы (SUDS), разрабатываются сценарии инфильтрации для повышения эффективности управления водными ресурсами. В дальнейшем планируется активное продвижение проекта TERESA INOWAS MAR в сельскохозяйственном секторе, что позволит оптимизировать использование земельных ресурсов. Усиленный мониторинг ливневых, талых и паводковых вод создаст условия для интеграции MAR в системы устойчивого орошения, тем самым повысит продуктивность сельского хозяйства.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования выбран Балтабайский сельский округ (ранее совхоз «Балтабай табаководческий»), основанный в 1961 году в центральной части Енбекшиказахского района Алматинской области (рисунок 11). Этот регион отличается богатой историей и устойчивыми сельскохозяйственными традициями, включая выращивание зерновых и овощных культур. Первое детальное полевое обследование почвенных условий здесь было проведено в 1972 году, что позволило комплексно оценить земельные ресурсы округа.

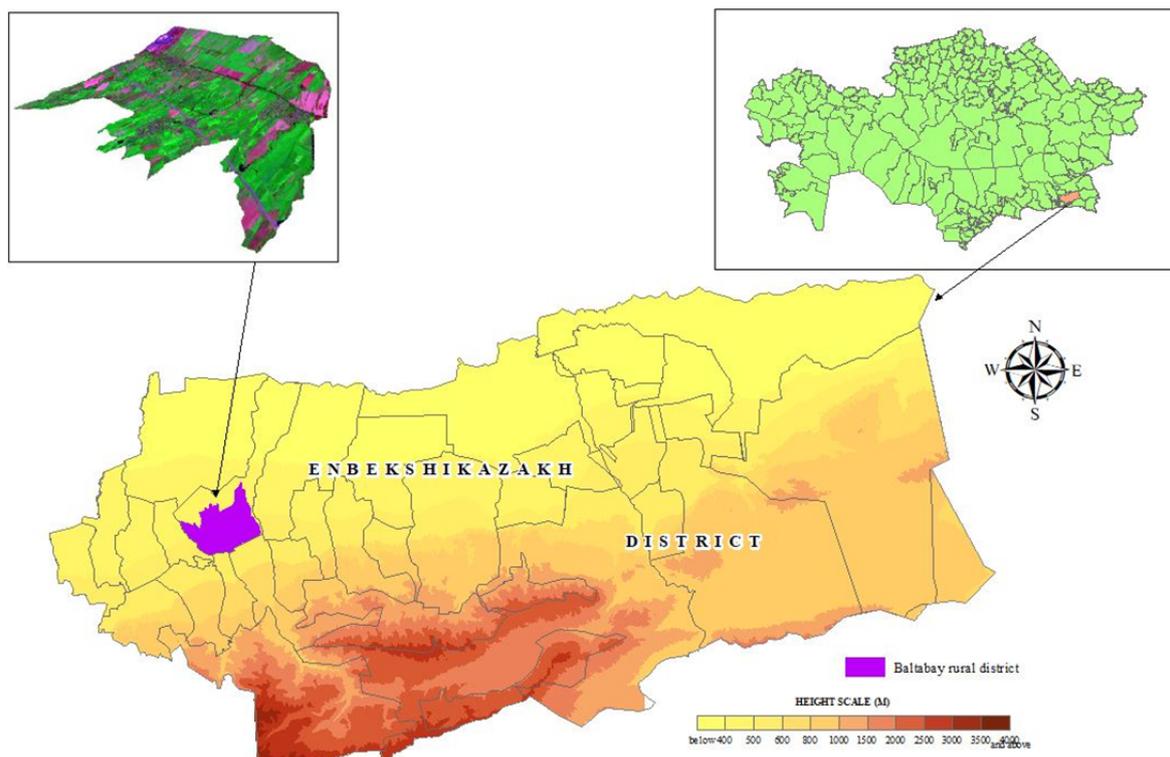


Рисунок 11 – Общая карта Енбекшиказахского района

Figure 11 – General map of Yenbekshikazakh district

Балтабайский сельский округ расположен в 54 км к востоку от областного центра и в 25 км к северу от районного центра, города Иссыка. Через его территорию проходит Большой Алма-тинский канал им. Д. Кунаева, обеспечивающий водоснабжение и орошение предгорных территорий. В состав округа входят села Балтабай, Бирлик и Енбек. Общая площадь орошаемых земель составляет 6389,58 га, из которых 5795 га заняты пашнями. Основные сельскохозяйственные культуры – кукуруза, пшеница, овощи и бахчевые.

Природные условия и сельское хозяйство. Развитие сельского хозяйства в округе зависит от активного применения ирригационных технологий. Высокие летние температуры, сильные восточные ветры и низкая влажность вызывают дефицит влаги, что делает орошение необходимым условием для земледелия. В округе выращивают пшеницу, ячмень, кукурузу, подсолнечник, кормовые травы и овощи. Несмотря на природные сложности, регион обладает значительным аграрным потенциалом.

Рельеф и гидрография. Балтабайский сельский округ расположен на предгорной аккумулятивной равнине на высоте 500–750 м над уровнем моря, с постепенным уклоном на север. Через его территорию протекают реки Турген, Балтабай, Карасу, Макан, Куватобе, Жарылган и другие. Речные долины имеют крутые обрывистые склоны. Южная часть района характеризуется каменистыми почвами, центральная является водоразделом, а северная – волнистым рельефом, пересеченным реками и родниками. Условия местности благоприятны для механизированной обработки почвы и выращивания сельскохозяйственных культур.

Почвы и растительность. Почвенный покров округа варьируется в зависимости от рельефа, уровня грунтовых вод и типа почвы. Преобладают светло-каштановые почвы, которые являются суглинистыми и имеют гумусовый горизонт толщиной 1,75–2,38%. Они богаты калием, но бедны фосфором, что требует внесения удобрений. Эти почвы относятся к первой агропромышленной группе и наиболее подходят для возделывания зерновых культур и кукурузы.

Лугово-сероземные почвы имеют суглинистый состав, умеренное содержание гумуса (до 2,8%) и склонность к засолению. Требуют мелиоративных мероприятий, таких, как дренаж, что подразумевает сбор и отвод грунтовых вод с помощью инженерно-технических сооружений.

Методы оценки фильтрации. Для оценки фильтрационных свойств почв применяются методы А. К. Болдырева и Н. С. Нестерова. В проницаемых грунтах используется метод А. К. Болдырева, а в низкопроницаемых – метод Н. С. Нестерова [13].

Двухкольцевой инфильтрометр является одним из наиболее распространенных инструментов для измерения скорости инфильтрации воды в почву. Его использование позволяет снизить влияние бокового стока и обеспечить более точную оценку водопроницаемости грунта (рисунок 12). Эти данные критически важны при проектировании ирригационных систем, разработке стратегий сохранения почвенной влаги и управлении водными ресурсами [14, 15].

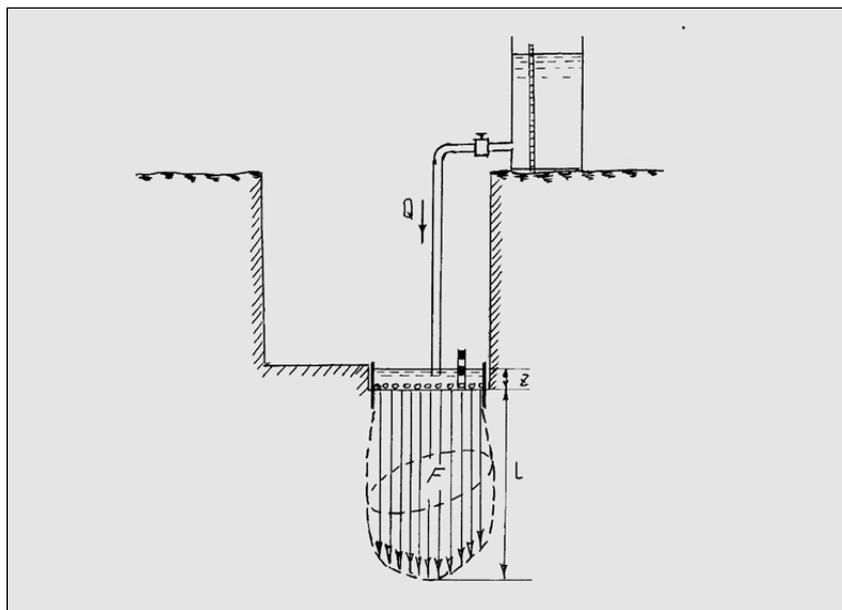


Рисунок 12 – График изменения расхода и общего объема воды при заполнении экспериментального шурфа

Figure 12 – Graph of change in flow rate and overall water volume during filling of the experimental pits

Для построения этой модели использовался набор данных по Балтабайскому сельскому округу, включающий почвенные индексы, значения осадков и статистику инфильтрации во временном масштабе. Язык программирования Python предоставляет широкий инструментарий для обработки данных. В работе применялись библиотеки Pandas и Numpy, обеспечивающие коррективку и фильтрацию районных измерений, содержащих числовые параметры, такие, как индексы и процентное содержание осадков. После сбора и предварительной обработки данных использовалась библиотека PyVista для 3D-моделирования, позволяющая визуализировать пространственные характеристики исследуемой территории [16].

Методы сценарного моделирования с помощью библиотек Pandas, Numpy, PyVista. В качестве сбора данных используется библиотека Pandas (рисунок 13) и методы для считывания и обработки файлов типа Excel и CSV.

```
try:
    if data_type == "well":
        data = pd.read_csv(file_path)
    else:
        data = pd.read_excel(file_path, engine='openpyxl')
    self.data_descriptors[data_type] = data
except Exception as e:
    raise ValueError(f"Failed to load {data_type} data: {e}")
```

Рисунок 13 – Реализация метода с помощью библиотеки Pandas

Figure 13 – Method implementation using Pandas library

Numpy – это библиотека для работы с данными, представленными списками. В проекте для реализации метода наложения слоёв почвы использовалась функция `np.linspace`, которая помогла распределить границы слоёв с заданным расстоянием. Метод `np.meshgrid` используется для сбора данных почвы в матрицу трёхмерного отображения. Генерирование текстуры псевдометодом реализовано библиотекой `Noise` с применением математического алгоритма классического шума Перлина (рисунок 14).

```

if row['Soil Name'] == "Surface":
    # Генерируем поверхность с шумом Перлина
    x = np.linspace(extended_bounds[0], extended_bounds[1], 50)
    y = np.linspace(extended_bounds[2], extended_bounds[3], 50)
    x, y = np.meshgrid(x, y)

    z = np.zeros_like(x)
    for i in range(x.shape[0]):
        for j in range(x.shape[1]):
            z[i, j] = depth_high + noise.pnoise2(
                x[i, j] / 50.0,
                y[i, j] / 50.0,
                octaves=3,
                persistence=0.5,
                lacunarity=2.0
            ) * 5
            if i == 0 and j == 0: # Печатаем примерное значение для первого узла
                print(f"[DEBUG] Noise value at (0, 0): {z[i, j]}")

    surface = pv.StructuredGrid(x, y, z)
    self.plotter.add_mesh(surface, color=color, opacity=0.5)

```

Рисунок 14 – Использование библиотек Numpy и Noise для отрисовки слоёв почвы

Figure 14 – Using the Numpy and Noise libraries to render soil layers

3D-визуализирование объектов скважины, насоса, дождевых капель создано благодаря библиотеке `PyVista` (рисунок 15). Она использует встроенные методы 3D концепций геометрических фигур (цилиндра, сферы, куба, параллелепипеда, конуса и др.).

```

# Добавляем структуру скважины
well_cylinder = pv.Cylinder(
    center=(0, y_position, (surface_level + groundwater_depth) / 2),
    direction=(0, 0, -1),
    height=abs(surface_level - groundwater_depth),
    radius=3.5
)
self.plotter.add_mesh(well_cylinder, color='gray', opacity=0.9)

```

Рисунок 15 – Использование библиотеки PyVista для генерации геометрического объекта скважины

Figure 15 – Using the PyVista library to generate a geometric well object

Сценарий 1, представленный на рисунке 16, отображает фазу естественного накопления поверхностной воды в накопительный шурф для очистки воды от инородных веществ.

Сценарий 2 – активная фаза использования электрической дренажной системы с работой насоса (рисунок 17). Этот метод основан на накопительном процессе поверхностной воды и пополнении подземных источников для равномерного распределения и регулирования водных ресурсов.

Сценарий 3 отображает последствия климатических случаев длительных засух (рисунок 18). В это время происходит процесс активного выкачивания подземной воды и насыщения орошаемых земель методом естественного затопления. Метод является полезным для активного распределения поверхностных и подземных вод.

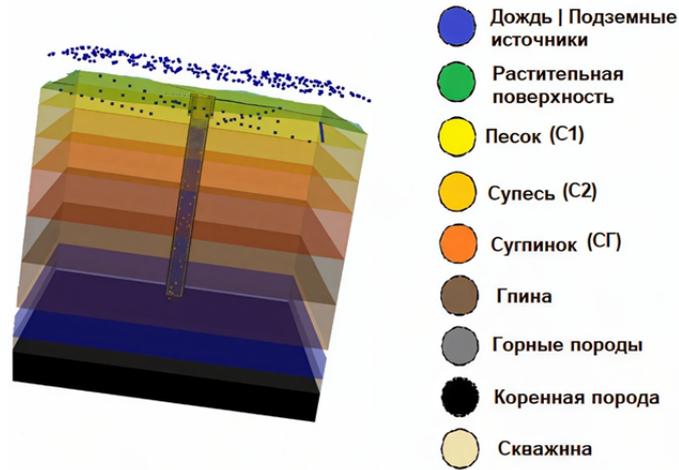


Рисунок 16 – Сценарий с осадками и пополнением наружного кольца
Figure 16 – Scenario with precipitation and replenishment of the outer circle

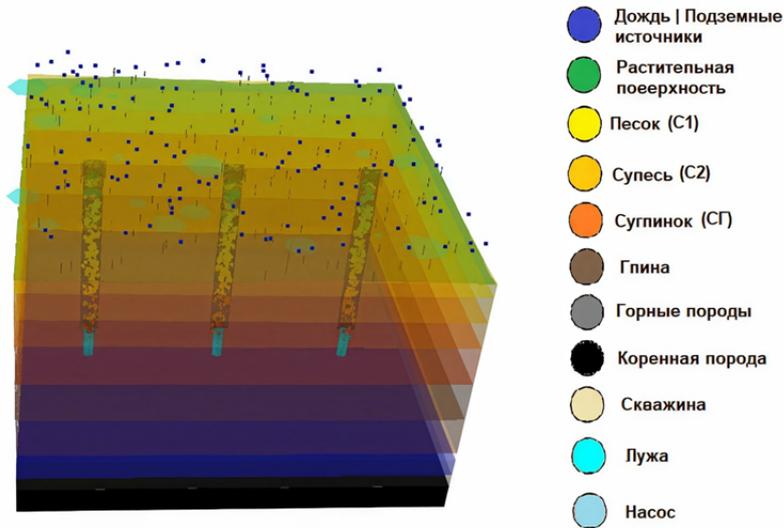


Рисунок 17 – Сценарий инфильтрации с пополнением внутреннего кольца
Figure 17 – Infiltration scenario with refilling of the inner circle

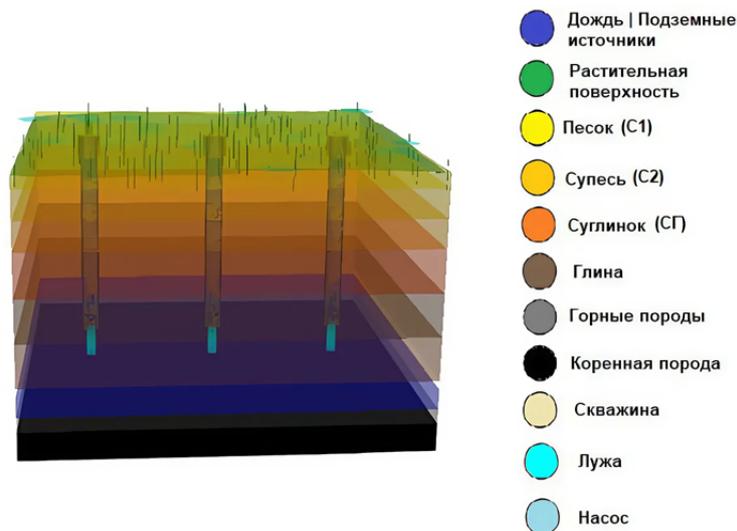


Рисунок 18 – Сценарий искусственного насыщения органического слоя почвы за счет работы насосной системы
Figure 18 – Scenario of artificial saturation of soil organic layer due to pumping system operation

Пространственное моделирование и искусственная аккумуляция подземных вод. Пространственное моделирование играет важную роль в изучении процессов искусственной аккумуляции подземных вод. В рамках исследования рассматриваются ключевые этапы формирования почвенных слоев, механизмы инфильтрации, роль подземного водонакопления и возможные сценарии их рационального использования. Модели, основанные на фактических данных о территориях, демонстрируют потенциал применения искусственных водных ресурсов в различных условиях.

Одним из ключевых направлений является моделирование процессов инфильтрации, позволяющее оценить физико-химические свойства почвы. Например, осадочные воды не всегда достигают глубоких горизонтов из-за формирования иловых прослоек, которые, будучи рыхлыми и слабо проницаемыми, приводят к образованию заболоченных участков. Со временем такие участки пересыхают, что ограничивает возможность повторного использования накопленной воды и её поступление в нижние слои. Этот феномен иллюстрирует как потенциальные риски, так и возможности применения технологий искусственного орошения.

Искусственное орошение играет важную роль в поддержании стабильного роста сельскохозяйственных культур. Для его эффективного функционирования необходимы точные данные о структуре почвы, уровнях осадков и современные технологии мониторинга. В Балтабайском сельском округе предлагается внедрение электрической системы дренажных скважин, обеспечивающей:

- мониторинг влажности почвы – постоянное отслеживание изменений уровня влажности;
- регулирование процесса орошения – автоматическое поддержание оптимальных условий для роста сельскохозяйственных культур;
- очистку осадочных вод – удаление примесей перед хранением в водоупорных слоях.

Применение таких технологий повышает эффективность управления водными ресурсами и способствует устойчивому развитию сельского хозяйства в условиях изменяющегося климата.

Результаты и их обсуждение. *Реализация AgMAR в Балтабайском сельском округе.* Реализация управляемого восполнения запасов подземных вод в сельскохозяйственном орошении методом AgMAR, в Балтабайском сельском округе Алматинской области является важным шагом в поддержке устойчивого развития Казахстана. В рамках проекта было установлено пять скважин, позволяющих эффективно управлять процессами инфильтрации и магацинирования воды в почву.

Ключевые аспекты внедрения AgMAR:

- мониторинг инфильтрации: важным элементом реализации MAR является постоянное наблюдение за процессами фильтрации профиль почвы;
- учет свойств почвы: эффективность инфильтрации зависит от типа почвы и её физических характеристик, что требует комплексного анализа перед внедрением системы;
- изменение гидравлических свойств: при длительном заводнении инфильтрационных участков исходные гидравлические характеристики почвы могут изменяться из-за явления заиливания, которое приводит к снижению скорости инфильтрации, что является одной из ключевых эксплуатационных проблем MAR-систем.

Использование шурфов (см. рисунки 12, 16, 17, 18) является эффективным решением для предотвращения данного процесса. Этот подход минимизирует негативные последствия физических, биологических и химических загрязнений, обеспечивая стабильные характеристики инфильтрации в системах искусственного восполнения запасов подземных вод.

В сельском хозяйстве применяется метод естественного затопления, известный как «черный полив». Да, согласны, что такие технологии требуют больших объемов воды, из которых эффективно используется всего 50–60%. Предлагаемая нами методика актуальна лишь в паводковый период. Если расход воды не контролировать в отсутствие паводков, это может привести к истощению как поверхностных, так и подземных источников из-за нарушения водного баланса.

Метод искусственного затопления с применением технологии AgMAR нацелен на пополнение запасов грунтовых вод с минимизацией потерь с акцентом на использование паводковых дренажных вод.

Заключение. Казахстан сталкивается с проблемами водных ресурсов, которые заключаются в отсутствии надлежащей практики для обеспечения их устойчивости.

Изучение показало, что интеграция поверхностных и подземных вод с помощью рециркуляционных ирригационных систем способствует распространению MAR по всему Казахстану. Это исследование является первой попыткой расширить и показать результаты управления подземными водами для сельских районов, выгоды и преимущества для фермеров и местных жителей при хранении и управлении водой.

AgMAR способствует выбору правильной методологии орошения с учетом современных принципов развития сельского хозяйства. Он тесно связан с концепцией пополнения подземных вод (MAR), которая, в свою очередь, реализует способы сохранения возобновляемых источников и обеспечивает их повторное использование даже в условиях сезонных засух. Таким образом, грамотное использование AgMAR поможет повысить производительность сельскохозяйственной отрасли во всех регионах Казахстана.

Внедрение AgMAR призвано увеличить эффективность использования подземных вод для поддержки сельскохозяйственного производства и правильного развития градостроительства. Такие регионы, как Южный и Западный Казахстан, имеют явные проблемы с нехваткой воды в сезоны засухи. Северная и восточная части сталкиваются с токсичностью воды из-за наличия в ней вредных химических элементов. В этих ситуациях у MAR есть ряд полезных решений, основанных на накоплении и очистке подземных вод.

Финансирование. Работа поддержана грантовым финансированием проекта ИРН AP23490043 «Перспективы применения инновационных технологий интегрированного использования поверхностных и подземных вод путем создания оборотных систем водопользования для орошения» Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2024-2026 годы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sallwey J., Barquero F., Fichtner T., Stefan C. Planning MAR Schemes Using Physical Models: Comparison of Laboratory and Field Experiments // *Applied Sciences*. 9. 3652. – 2019. 10.3390/app9183652
- [2] Bachand S. M., Hossner R., Bachand M. A. 2017 OFR demonstration site monitoring and analyses: Effects on soil hydrology and salinity, and potential implications on soil oxygen. – 2019.
- [3] Dahlke H. E., Brown A. G., Orloff S., Putnam D., O'Geen T. Managed winter flooding of alfalfa recharges groundwater with minimal crop damage // *California Agriculture*. – 2018. – Vol. 72, No. 1. – P. 1-75. <https://doi.org/10.3733/ca.2018a0001>
- [4] Harter T., Dahlke H. E. Out of sight but not out of mind: California refocuses on groundwater // *California Agriculture*. – 2014. – Vol. 68, No. 3. – P. 54-55. <https://doi.org/10.3733/ca.v068n03p54>
- [5] Impact of Flood-MAR strategy in California, USA [Электрон. ресурс]. – URL:<https://floodmar.org/> (дата обращения: 26.12.2024).
- [6] Declan P., Joanne V., Dennis G., James B., Pascal C. Managed aquifer recharge for agriculture in Australia – History, success factors and future implementation // *Agricultural Water Management*. – 2023. – Vol. 285. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108382>.
- [7] Tabea M., Lutz A., Philipp W. Managed aquifer recharge as a potential pathway of contaminants of emerging concern into groundwater systems – A systematic review // *Chemosphere*. – 2024. – Vol. 364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143030>.
- [8] TERESA, Urban water management: German expertise for Kazakh cities [Электрон. ресурс]. – URL:<https://www.teresa.inowas.com/> (дата обращения: 26.12.2024).
- [9] Платформа Google Earth [Электрон. ресурс]. – URL:<https://earth.google.com/web/> (дата обращения: 26.12.2024).
- [10] Amanzholova R., Sarsekova D., Stefan C., Sagin J., King R., Timur E. TVET IT technologies support for the water resources, agro forest shelterbelts sustainability // 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST): Мат-лы Международ. конф. Astana, Kazakhstan, 2024. – Astana, 2024. – P. 239-244. <https://doi.org/10.1109/SIST61555.2024.10629634>
- [11] Spain's catastrophic floods by the numbers: At least 219 dead, 93 missing and billions in damage [Электрон. ресурс]. – URL:<https://www.independent.co.uk/news/valencia-ap-spain-madrid-andalusia-b2643313.html> (дата обращения: 26.12.2024).
- [12] Отслеживание сезонных наводнений в Казахстане с течением времени. Кызылагашский район. 2010 [Электрон. ресурс]. – URL:<https://astanatimes.com/2024/04/tracing-kazakhstans-seasonal-floods-through-time/> (дата обращения: 26.12.2024).
- [13] Absametov M. K., Murtazin E., Kulagin V. V., Makyzhanova A., Ismagulova A. Infiltration and colmatation dynamics on physical models' study by infiltration basins at artificial groundwater recharge // *Water Conservation & Management*. – 2024. – Vol. 7, No. 1. – P. 45-54. 10.26480/wcm.01.2023.45.54
- [14] Sparovek G., de Jong van Lier Q., Marcinkonis S., Rogasik J., Schnug E. A simple model to predict river floods – A contribution to quantify the significance of soil infiltration rates // *Landbauforschung Volkenrode*. – 2002. – Vol. 52, No. 3. – P. 187-195.
- [15] Köhne J., Júnior J., Köhne S., Tiemeyer B., Lennartz B., Kruse J. (2011). Double ring and tension infiltrometer measurements of hydraulic conductivity and mobile soil regions // *Pesquisa Agropecuária Tropical*. – 2011. – Vol. 41. – P. 336-347. 10.5216/pat.v41i3.11376.

[16] Python. Плагин PyVista. Детальная документация [Электрон. ресурс]. – URL:<https://docs.pyvista.org/> (дата обращения: 26.12.2024).

REFERENCES

- [1] Sallwey J., Barquero F., Fichtner T., Stefan C. Planning MAR Schemes Using Physical Models: Comparison of Laboratory and Field Experiments // *Applied Sciences*. 9. 3652. 2019. 10.3390/app9183652
- [2] Bachand S. M., Hossner R., Bachand M. A. 2017 OFR demonstration site monitoring and analyses: Effects on soil hydrology and salinity, and potential implications on soil oxygen. 2019.
- [3] Dahlke H. E., Brown A. G., Orloff S., Putnam D., O'Geen T. Managed winter flooding of alfalfa recharges groundwater with minimal crop damage // *California Agriculture*. 2018. Vol. 72, No. 1. P. 1-75. <https://doi.org/10.3733/ca.2018a0001>
- [4] Harter T., Dahlke H. E. Out of sight but not out of mind: California refocuses on groundwater // *California Agriculture*. 2014. Vol. 68, No. 3. P. 54-55. <https://doi.org/10.3733/ca.v068n03p54>
- [5] Impact of Flood-MAR strategy in California, USA [Electronic resource]. URL:<https://floodmar.org/> (date of access: 26/12/2024).
- [6] Declan P., Joanne V., Dennis G., James B., Pascal C. Managed aquifer recharge for agriculture in Australia History, success factors and future implementation // *Agricultural Water Management*. 2023. Vol. 285. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108382>.
- [7] Tabea M., Lutz A., Philipp W. Managed aquifer recharge as a potential pathway of contaminants of emerging concern into groundwater systems A systematic review // *Chemosphere*. 2024. Vol. 364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143030>.
- [8] TERESA, Urban water management: German expertise for Kazakh cities [Electronic resource]. – URL:<https://www.teresa.inowas.com/> (date of access: 26/12/2024).
- [9] Google Earth platform [Electronic resource]. URL:<https://earth.google.com/web/> (date of access: 26/12/2024).
- [10] Amanzholova R., Sarsekova D., Stefan C., Sagin J., King R., Timur E. TVET IT technologies support for the water resources, agro forest shelterbelts sustainability // 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST): AgMAR Astana, 2024. P. 239-244. <https://doi.org/10.1109/SIST61555.2024.10629634>
- [11] Spain's catastrophic floods by the numbers: At least 219 dead, 93 missing and billions in damage [Electronic resource]. – URL:<https://www.independent.co.uk/news/valencia-ap-spain-madrid-andalusia-b2643313.html> (date of access: 26/12/2024).
- [12] Tracking seasonal floods in Kazakhstan over time. Kyzylagash district. 2010 [Electronic resource]. – URL:<https://astanatimes.com/2024/04/tracing-kazakhstan-seasonal-floods-through-time/> (date of access: 26/12/2024) (in Russ.).
- [13] Absametov M.K., Murtazin E., Kulagin V.V., Makyzhanova A., Ismagulova A. Infiltration and colmatation dynamics on physical models' study by infiltration basins at artificial groundwater recharge // *Water Conservation & Management*. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 45-54. 10.26480/wcm.01.2023.45.54
- [14] Sparovek G., de Jong van Lier Q., Marcinkonis S., Rogasik J., Schnug E. A simple model to predict river floods – A contribution to quantify the significance of soil infiltration rates // *Landbauforschung Volkenrode*. 2002. Vol. 52, No. 3. P. 187-195.
- [15] Köhne J., Júnior J., Köhne S., Tiemeyer B., Lennartz B., Kruse J. (2011). Double ring and tension infiltrometer measurements of hydraulic conductivity and mobile soil regions // *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2011. Vol. 41. P. 336-347. 10.5216/pat.v41i3.11376.
- [16] Python. PyVista plugin. Full documentation [Electronic resource]. – URL:<https://docs.pyvista.org/> (date of access: 26/12/2024).

Т. Эм*¹, Р. Аманжолова², Т. Рахимов³, А. Мусаева⁴

¹* Магистрант («Қазақстан-Британ техникалық университеті», АҚ, Алматы, Қазақстан; t_em@kbtu.kz)

² Магистрант («Қазақстан-Британ техникалық университеті», АҚ, Алматы, Қазақстан; r_amanzholova@kbtu.kz)

³ PhD, аймақтық гидрогеология және геоэкология зертханасының меңгерушісі («У. М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; t.rakhimov@satbayev.university)

⁴ Магистрант (Өл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан; asem.musayeva.02@mail.ru)

СУЛЫ ГОРИЗОНТТАРДЫ БАСҚАРУДЫҢ БАЛАМАЛЫ ШЕШІМІ ЖӘНЕ АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫНДА ИНФИЛЬТРАЦИЯ МЕН АККУМУЛЯЦИЯ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ

Аннотация. Климаттың өзгеруі әлемдегі су ресурстарына айтарлықтай әсер етеді, ауа райының болжамсыз болуына әкеліп, дәстүрлі су ресурстарын басқару әдістерінің кемшіліктерін анықтайды. Ұзаққа созылған қуаңшылықтар, дауыл белсенділігінің күшеюі, қар жамылғысының азаюы және ағын динамикасының өзгеруі су қауіпсіздігін қамтамасыз етуде қосымша қиындықтар туғызады. Дәстүрлі гидротехникалық құрылыстар, соның ішінде бөгеттер мен су қоймалары, маңызды рөл атқарады, бірақ әсіресе құрғақ аймақтарда суды жергілікті деңгейде тиімді бөлу мәселесін әрдайым шеше бермейді. AgMAR сияқты ауыл

шаруашылығын суару әдістері суды тиімді пайдалануға ғана емес, жер асты су қорын толықтыруға да мүмкіндік береді, осылайша жер үсті су көздеріне тәуелділікті азайтады. Бұл зерттеуде Қазақстанда ауыл шаруашылығын басқарылатын сулы горизонттарды толықтыру (AgMAR) жүйесін енгізу мүмкіндігі қарастырылады. Топырақ қабаттарын, су ағынының динамикасын және MAR қағидаларын модельдеу үшін PyVista кітапханасы негізінде жасалған 3D-визуализациясы қолданылады. Зерттеу нәтижелері AgMAR жүйесінің ауылдық аймақтардағы ирригация және су ресурстарын басқару үшін үлкен әлеуетке ие екенін көрсетеді. Негізгі артықшылықтарына жер асты сулары деңгейінің тұрақтануы, маусымдық жауын-шашын кезінде сулы горизонттардың толықтырылуы, жер асты суларының сапасының жақсаруы және тұщы судың қолжетімділігінің артуы жатады.

Түйін сөздер: AgMAR, су тасқыны, MAR, INOWAS, TERESA тұрақтылық.

T. Em^{*1}, R. Amanzholova², T. Rahimov³, A. Musayeva⁴

^{1*}MS student (JSC “Kazakhstan-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan; t_em@kbtu.kz)

²MS student (JSC “Kazakhstan-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan; r_amanzholova@kbtu.kz)

³PhD, Head of the Laboratory of Regional Hydrogeology and Geoecology (JSC “Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U. M. Akhmedsafin”, Almaty, Kazakhstan; t.rahimov@satbayev.university)

⁴MS student (Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; asem.musayeva.02@mail.ru)

ALTERNATIVE SOLUTION FOR AQUIFER MANAGEMENT AND APPLICATION OF INFILTRATION AND ACCUMULATION METHODS IN AGRICULTURE

Abstract. Climate change has a significant impact on water resources worldwide, leading to more unpredictable weather conditions and revealing the shortcomings of traditional water management methods. Prolonged droughts, increased storm activity, reduced snow cover, and changes in runoff dynamics pose additional challenges to ensuring water security. Traditional hydraulic structures, including dams and reservoirs, play an important role but are less likely to effectively distribute water at the local level, especially in arid regions. Agricultural irrigation methods such as AgMAR not only enable efficient water use but also replenish groundwater reserves, reducing dependence on surface sources. This study explores the potential implementation of Agricultural Managed Aquifer Recharge (AgMAR) in Kazakhstan. For modeling soil layers, water flow dynamics, and MAR principles, 3D visualization created with the PyVista library is used. The research results indicate that AgMAR has significant potential for irrigation and water resource management in rural areas. Key benefits include groundwater level stabilization, aquifer recharge during seasonal precipitation, improved groundwater quality, and increased freshwater availability.

Keywords: AgMAR, flood, MAR, INOWAS, flood, TERESA, sustainability.