

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЗАРАФШАНСКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ ПРИРОДНОМ ПАРКЕ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Эшкувватов Бекзод Беккулович - доцент кафедры географии и природных ресурсов
Самаркандского государственного университета

Холманов Эркин Базарович - Самаркандский государственный университет, кафедра
географии и природных ресурсов, самостоятельный соискатель 2-го курса

Аннотация: В статье обосновывается концепция автономной автоматизированной системы мониторинга уровня подземных вод для Зарафшанского национального природного парка. Исследование сосредоточено на географических и экологических условиях размещения наблюдательных пунктов, архитектуре станции, алгоритме регистрации и передачи данных и способах интеграции мониторинговой информации в GIS-среде. Предлагаемая система объединяет датчик уровня воды, микроконтроллер, локальное хранение данных, GSM-связь, солнечную панель, аккумулятор и защищённый корпус. В качестве результата разработана схема ландшафтно-экологического размещения пунктов наблюдений и предложена методика комплексного сопоставления динамики подземных вод с осадками, температурой воздуха, влажностью почвы, поверхностными водами и состоянием растительности. Принципиально важно, что устройство на момент подготовки статьи не установлено в парке, поэтому работа представляет проектно-методический результат, а не отчёт о проведённых полевых испытаниях. Предлагается последующая верификация системы в лабораторных и полевых условиях.

Ключевые слова: подземные воды, автоматизированный мониторинг, изменение климата, Зарафшанский национальный природный парк, тугайная экосистема, GIS, GSM, автономная станция, водный стресс.

GEOGRAPHICAL AND ECOLOGICAL FOUNDATIONS FOR DESIGNING AN AUTONOMOUS AUTOMATED GROUNDWATER-LEVEL MONITORING SYSTEM IN THE ZARAFSHAN NATIONAL NATURE PARK UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

Eshkuvvatov Bekzod Bekkulovich — Associate Professor, Department of Geography and Natural Resources, Samarkand State University

Kholmanov Erkin Bazarovich — Samarkand State University, Department of Geography and Natural Resources, independent 2nd-year doctoral researcher

Abstract: the paper presents a geographical and ecological framework for designing an autonomous automated groundwater-level monitoring system for Zarafshan National Nature Park. The study focuses on the landscape and ecological

principles of monitoring-site selection, the architecture of the autonomous station, the data acquisition and transmission algorithm, and the integration of monitoring information within a GIS environment. The proposed system combines a water-level sensor, microcontroller, local data storage, GSM communication, solar power, battery supply, and a protective enclosure. The main result is a landscape-ecological scheme for locating monitoring sites and a methodological approach for relating groundwater dynamics to precipitation, air temperature, soil moisture, surface-water conditions, and vegetation status. The device has not yet been installed in the park; therefore, the paper reports a design and methodological result rather than field-test findings. Further laboratory and field validation is proposed.

Keywords: groundwater, automated monitoring, climate change, Zarafshan National Nature Park, tugai ecosystem, GIS, GSM, autonomous station, water stress.

1. Введение

Изменение климата усиливает неопределённость водного режима природных территорий, вследствие чего возрастает значение непрерывных наблюдений за состоянием подземных вод. Для речно-тугайных экосистем уровень подземных вод является одним из ключевых гидрологических показателей, поскольку отражает условия увлажнения корнеобитаемого слоя и потенциальную связь между поверхностными и подземными водами. Международные исследования и методические документы подчёркивают необходимость получения сопоставимых временных рядов, контроля качества наблюдений и их использования при оценке состояния водных ресурсов [3-7].

Зарафшанский национальный природный парк представляет собой территорию, где водный режим тесно связан с функционированием тугайных комплексов, руслом реки Зарафшан, канальной сетью и естественными источниками. В таких условиях одинаковое расстояние между наблюдательными пунктами не гарантирует репрезентативность данных: мониторинг должен учитывать положение участков относительно реки, родников, каналов, зон ограниченного водоснабжения и участков с относительно естественным гидрологическим фоном [1,2,8, 12].

Научная проблема заключается в необходимости адаптировать непрерывный автоматический мониторинг подземных вод к пространственной неоднородности охраняемой тугайно-речной территории и одновременно связать гидрологические данные с экологическими индикаторами. В отличие от автономной регистрации одного параметра, предлагаемый подход предполагает рассмотрение уровня подземных вод как элемента комплексной геоэкологической системы.

Цель исследования состоит в разработке проектно-методической концепции автономной автоматизированной станции мониторинга уровня подземных вод, обосновании географических принципов размещения пунктов наблюдения и определении схемы последующей GIS-интеграции данных. Поскольку опытная

установка ещё не выполнена, основное внимание уделяется архитектуре решения, логике мониторинга и процедуре его будущей верификации.

2. Материалы и методы

Материальную основу исследования составили официальные сведения о Зарафшанском национальном природном парке [8, 9, 12], международные методические материалы по наблюдениям за подземными и поверхностными водами [3-7], а также проектная концепция автономной мониторинговой станции, разработанная авторами.

В работе использованы методы географического сравнения, ландшафтно-экологического районирования, маршрутной рекогносцировки, проектного моделирования, статистического анализа временных рядов, корреляционного анализа, анализа трендов и GIS-картографирования. На этапе подготовки системы эти методы формируют единый протокол: сначала выделяются репрезентативные типы территории, затем для каждого пункта задаётся стандарт измерений и далее формируется сопоставимая база пространственно-временных данных.

Проектируемая станция включает датчик уровня подземных вод, микроконтроллер, модуль хранения данных, GSM-модуль, солнечную панель, аккумулятор, защищённый корпус и конструкцию для размещения датчика в наблюдательной скважине либо камере. В нормальном режиме датчик измеряет уровень через установленный интервал, микроконтроллер оцифровывает и фильтрует сигнал, сохраняет результат с временной меткой и передаёт данные через GSM. При отсутствии связи информация остаётся в локальной памяти и передаётся после восстановления канала.

Для будущей экспериментальной проверки предусмотрено сопоставление показаний датчика с контрольными ручными измерениями. Абсолютная погрешность определяется по формуле $\Delta h = |h_s - h_r|$, относительная погрешность - по формуле $E = |h_s - h_r| / h_r \times 100 \%$, где h_s - показание датчика, h_r - контрольное измерение. Допустимый предел погрешности будет устанавливаться по паспорту применяемого датчика и принятому протоколу испытаний.

Таблица 1.

Основные функциональные модули проектируемой станции

Модуль	Назначение	Роль в мониторинге
Датчик уровня	Измерение уровня подземных вод	Формирование основного временного ряда
Микроконтроллер	Сбор и первичная обработка сигнала	Автоматизация регистрации
Память данных	Локальное сохранение результатов	Защита данных при отсутствии связи

Модуль	Назначение	Роль в мониторинге
GSM-модуль	Дистанционная передача	Оперативное поступление данных
Солнечная панель и аккумулятор	Автономное электропитание	Работа без стационарной сети
Защитный корпус	Защита компонентов от внешней среды	Эксплуатация в полевых условиях

3. Результаты исследования

Результатом исследования является концептуальная модель автономной станции мониторинга, ориентированная на эксплуатацию на охраняемой территории с ограниченным доступом к электроснабжению. Конструкция предусматривает объединение измерительного, вычислительного, коммуникационного и энергетического блоков в единую систему. Предлагаемое решение сохраняет локальную копию данных и допускает восстановление передачи после временного разрыва GSM-связи.

Концепция мониторинга включает девять последовательных операций: автоматический запуск и диагностику датчика; измерение уровня; цифровую обработку и фильтрацию сигнала; запись с датой и временем; передачу данных; локальное накопление при разрыве связи; повторную передачу накопленных данных; включение информации в GIS-базу и статистический анализ; формирование условного сигнала при резком снижении уровня воды.

Географическая модель размещения пунктов. Для парка предложено размещать наблюдательные пункты не по принципу равного расстояния, а по принципу ландшафтно-экологической репрезентативности. Такой подход позволяет сопоставлять участки, непосредственно связанные с рекой, с участками, где влияние поверхностных вод слабее, и тем самым выявлять пространственную изменчивость гидрологического режима.

Таблица 2.

Географическая модель размещения пунктов мониторинга

Тип территории	Цель	Показатель	Рекомендация	Экологический смысл
Тугайные массивы	Естественный режим влажности	Уровень подземных вод, влажность почвы	Сопоставлять с состоянием растительности	Оценка обеспеченности растений влагой
Естественные родники	Обводнённость родников	Уровень воды, температура	Связывать с характеристикам и дебита	Контроль устойчивости водоисточников
Зона влияния реки Зарафшан	Инфильтрация и влияние орошения	Уровень подземных и канальных вод	Сопоставлять с периодами подачи воды	Оценка гидравлической связи

Тип территории	Цель	Показатель	Рекомендация	Экологический смысл
Участок с ограниченным водоснабжением	Риск водного стресса	Уровень подземных вод	Использовать как пункт раннего предупреждения	Выявление неблагоприятной динамики
Контрольный участок	Естественный фон	Уровень подземных вод	Сопоставлять с другими пунктами	Базовая пространственная оценка

GIS-интеграция и система показателей. Для каждого пункта мониторинга предлагается формировать единый паспорт, включающий координаты, абсолютную высоту, глубину наблюдательной скважины, высоту установки датчика, дату калибровки и техническое состояние станции. В GIS должны объединяться слои положения реки и каналов, родников, тугайных массивов, охранных участков, пунктов мониторинга и зон антропогенного воздействия. Базовая система данных включает уровень подземных вод, температуру воздуха, осадки, влажность почвы, уровень воды в реке и каналах, а также показатели состояния растительности. Это создаёт возможность перейти от простого контроля уровня воды к анализу причин и экологических последствий его изменения.

Таблица 3.

**Система показателей для комплексного
GIS-мониторинга**

Показатель	Периодичность	Единица	Основная аналитическая задача
Уровень подземных вод	Почасовая/суточная	м	Тренд и сезонная амплитуда
Температура воздуха	Почасовая/суточная	°C	Оценка теплового стресса
Осадки	По событию/суточная	мм	Оценка влияния на пополнение
Влажность почвы	Почасовая/суточная	%	Оценка влагообеспеченности растений
Уровень реки/канала	Суточная	м	Связь поверхностных и подземных вод
Состояние растительности	Еженедельная/ежемесячная	балл/индекс	Экологическая реакция

Техническая новизна проектного решения

Предлагаемая новизна состоит не в простом объединении стандартных компонентов «датчик + GSM + солнечная панель», а в их включении в специализированную систему геоэкологического мониторинга охраняемой

тугайной территории. Системное отличие заключается в одновременном учёте пространственной репрезентативности пунктов, локальном хранении данных, дистанционной передаче и последующей GIS-интеграции.

Вопрос патентоспособности устройства в данной статье не рассматривается как установленный факт. Его правовая оценка требует отдельного патентного поиска и экспертизы с учётом действующего законодательства об изобретениях и полезных моделях [10, 11].

Программа верификации

1. Калибровка датчика при известных значениях уровня воды.
2. Непрерывное стендовое испытание в течение 24-72 часов.
3. Оценка автономности солнечной панели и аккумулятора.
4. Проверка покрытия GSM и стабильности передачи данных.
5. Сопоставление показаний датчика с ручными контрольными измерениями.
6. Проверка устойчивости корпуса к влажности, пыли и температурным воздействиям.
7. Опытная эксплуатация на 2-3 пилотных пунктах в парке.
8. Корректировка конструкции и алгоритма по результатам испытаний.

4. Обсуждение

Полученная концепция показывает, что для охраняемой тугайно-речной территории техническое средство мониторинга целесообразно рассматривать как часть геоэкологической системы, а не как изолированный измерительный прибор. Один ряд данных об уровне подземных вод не позволяет однозначно интерпретировать причины его изменения. Поэтому сопоставление с осадками, температурой, влажностью почвы, состоянием реки и каналов и растительным покровом является принципиальным условием экологической интерпретации. Преимуществом предложенной схемы является сочетание пространственной дифференциации наблюдений и непрерывности измерений. В результате потенциально можно выявлять участки с ускоренным снижением уровня подземных вод и сопоставлять их с зонами повышенного экологического риска. Многолетние временные ряды позволяют в дальнейшем применять корреляционный анализ, анализ трендов и пространственную интерполяцию. Ограничение исследования связано с отсутствием на момент подготовки статьи реального полевого ряда наблюдений. Поэтому количественные показатели точности, автономности, устойчивости GSM-связи и экологической эффективности станции пока не должны трактоваться как подтверждённые экспериментальные результаты. Их получение является обязательным этапом последующей верификации.

Для дальнейшего развития методики может быть введён комплексный индекс водного стресса, учитывающий нормированное снижение уровня подземных вод относительно базового периода, уменьшение влажности почвы и повышение температуры. Однако пороговые значения такого индекса должны

определяться только после накопления эмпирических данных за несколько сезонов.

5. Заключение

Разработана географо-экологическая и техническая концепция автономной автоматизированной системы мониторинга уровня подземных вод для Зарафшанского национального природного парка. Предложенное решение ориентировано на работу в условиях ограниченной инфраструктуры и обеспечивает сочетание автоматического измерения, локального хранения, дистанционной передачи и последующей GIS-обработки данных.

Обосновано размещение пунктов мониторинга по принципу ландшафтно-экологической репрезентативности с выделением тугайных массивов, родников, зон влияния реки и каналов, участков с ограниченным водоснабжением и контрольных территорий. Такой подход должен повысить информативность пространственного мониторинга.

Показано, что научная ценность проектируемой системы определяется интеграцией гидрологических данных с климатическими и экологическими показателями. Вместе с тем эффективность устройства и заявленные параметры могут считаться подтверждёнными только после лабораторной и полевой верификации. Это определяет основное направление дальнейших исследований: создание прототипа, калибровка, пилотная установка и формирование долговременного временного ряда.

Литература:

1. Ярашев К.С., Эшкувватов Б.Б., Валиёва Ш.И. и др. Formation and Distribution of Groundwater in the Middle Zarafshan Region. Экономика и социум. 2026. № 5(144)-2. С. 755-762.
2. Saitqulova Z.U. Natural Geographical Features of the Zarafshon Oasis. Journal of Geography and Natural Resources. 2025. Vol. 5, No. 03. P. 51-57. DOI: 10.37547/supsci-jgnr-05-03-07.
3. UNESCO World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater - Making the Invisible Visible. Paris: UNESCO, 2022.
4. World Meteorological Organization. 2022 GCOS ECVs Requirements: Groundwater Level. Geneva: WMO, 2022.
5. World Meteorological Organization. Manual on Stream Gauging. Volume I: Fieldwork. Geneva: WMO.
6. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices: Hydrology - From Measurement to Hydrological Information. Geneva: WMO.
7. UNESCO; World Meteorological Organization. State of Global Water Resources 2023. Geneva: UNESCO/WMO, 2024.
8. Национальный комитет Республики Узбекистан по экологии и изменению климата. «Зарафшанский» национальный парк: официальные

сведения о территории, природных комплексах и биоразнообразии. 2025. URL: <https://gov.uz/ru/eco/news/view/22815>.

9. Национальный комитет Республики Узбекистан по экологии и изменению климата. Увеличена площадь трех охраняемых природных территорий. 12 марта 2025 г. URL: <https://gov.uz/ru/eco/news/view/39861>.

10. Всемирная организация интеллектуальной собственности (WIPO). Law on Inventions, Utility Models and Industrial Designs, Uzbekistan: Law No. 397-II of 29 August 2002, amended up to Law No. LRU-908 of 15 February 2024. WIPO Lex. URL: <https://www.wipo.int/wipolex/en/legislation/details/22558>.

11. Закон Республики Узбекистан «Об изобретениях, полезных моделях и промышленных образцах» от 29 августа 2002 г. № 397-II, с изменениями, внесёнными Законом Республики Узбекистан от 15 февраля 2024 г. № O'RQ-908. WIPO Lex. URL: <https://www.wipo.int/wipolex/en/legislation/details/22558>.

12. Национальный комитет Республики Узбекистан по экологии и изменению климата. Неповторимая фауна Зарафшанского национального парка. 7 мая 2025 г. URL: <https://gov.uz/ru/eco/news/view/52334>.