МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа «Стартап как диплом»)

на тему Оптимизация процесса измерения уровня грунтовых вод в скважинах с помощью автоматизированной системы: технико-экономическое обоснование автоматического уровня грунтовых вод

Исполнитель Ефремов Вячеслав Алексеевич

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Девятов Владимир Сергеевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«1» июня 2026г.

Санкт–Петербург

2026

Содержание

Введение ... 5
1 Мониторинг уровня грунтовых вод ... 8
1.1 Теоретические основы мониторинга уровня грунтовых вод ... 8
Значение мониторинга грунтовых вод ... 8
Основные методы измерения уровня воды ... 9
Современные автоматизированные системы наблюдений ... 12
Недостатки существующих решений ... 13
Нормативно-методическое обеспечение мониторинга грунтовых вод ... 14
Анализ существующих автоматизированных систем мониторинга уровня грунтовых вод ... 17
1.2 Технология автоматического фиксирования уровня грунтовых вод ... 20
Общая структура автоматизированной системы ... 20
Выбор метода измерения уровня воды ... 22
Выбор аппаратных компонентов системы ... 23
Принцип работы автоматизированной системы ... 25
Алгоритм автоматической фиксации данных ... 26
Программная реализация системы ... 27
Алгоритмы обработки и фильтрации измерений ... 28
Оценка энергопотребления системы ... 32
1.3 Практическая реализация и оценка эффективности системы ... 34
Сборка экспериментального образца ... 34
Интерфейс отображения данных ... 36
Результаты тестирования системы ... 37
Преимущества разработанной системы ... 39
2 Математическое моделирование уровня грунтовых вод ... 41
2.1 Физико-географическое описание Ленинградской области ... 41
2.2 Классификации математических моделей ... 44
Балансовые модели ... 47
Инфильтрация атмосферных осадков ... 51
Конденсация водяного пара ... 52
Подземный приток ... 53
Методика построения балансовой модели ... 55

Фильтрационные модели ... 56
Динамические модели ... 62
2.3 Математическое описание уровня грунтовых вод ... 68
2.4 Выбор модели для сети гидростатических датчиков ... 70
3 Метеорологический факторы влияющие, на уровень грунтовых вод ... 74
Взаимосвязь метеорологических и гидрологических процессов ... 74
Понятие уровня грунтовых вод ... 74
3.1 Факторы влияния метеорологических параметров на уровень грунтовых вод и их краткое описание ... 77
3.2 Методы измерения параметров, характеризующих метеорологические факторы влияния на уровень грунтовых вод ... 85
Нормативно-методическая база гидрометеорологических и гидрогеологических наблюдений в системе Росгидромета ... 85
Классификация методов ... 86
Измерение и определение величины метеорологических факторов ... 87
3.3 Анализ метеорологических условий и динамики уровня грунтовых вод в Санкт-Петербурге и Астрахани ... 98
Сравнительная физико-географическая и климатическая характеристика районов 98
Статистическая обработка многолетних рядов атмосферных осадков и температуры ... 102
Мониторинг и анализ зеркала состояния зеркала грунтовых по данным репрезентативных постов ... 108
4 Технико-экономическое обоснование проекта по оптимизации измерения уровня грунтовых вод в скважинах. ... 115
Бизнес-план ... 116
Проблема. ... 116
Business to business и business to government потребители. Целевая аудитория продукта. ... 116
Преимущества вложения средств в проект HydroNet. ... 116
Решение проблемы. ... 118
Каналы распространения продукта. ... 118
Доходы и расходы проекта. ... 118
4.1 Анализ рынка проекта *HydroNet* ... 124
Общая характеристика рынка ... 124
Анализ конкурентов ... 124
Конкурентные преимущества HydroNet ... 125

Оценка емкости рынка 126
Вывод по анализу рынка..... 126
Технические риски. 127
Финансовые риски 127
Организационные риски 128
4.2 Расчет экономической эффективности проекта *HydroNet* 129
Расчет выручки проекта 129
Расчет затрат 130
Расчет прибыли 131
Расчет срока окупаемости 131
Расчет рентабельности инвестиций (ROI) 132
Расчет точки безубыточности 132
Вывод по расчетам экономической эффективности проекта 133
Перспективы развития HydroNet 133
4.3 Государственная и социальная польза проекта *HydroNet* 134
Нормативное регулирование мониторинга подземных вод 134
4.4 Оценка предотвращенного экологического и экономического ущерба проектом *HydroNet* 136
Оценка ущерба для объектов инфраструктуры 137
Экономический эффект от HydroNet для сельского хозяйства 137
Экономический эффект для промышленных предприятий 138
Расчет предотвращенного экономического ущерба 138
Заключение..... 140
Список использованных источников……141

Введение

Мониторинг уровня грунтовых вод является одной из важнейших задач современной гидрологии, поскольку состояние подземных вод оказывает существенное влияние на природные экосистемы, устойчивость инженерных сооружений, сельскохозяйственное производство и обеспечение населения водными ресурсами. Изменение уровня грунтовых вод может быть связано как с естественными гидрометеорологическими процессами, так и с антропогенным воздействием, что требует организации регулярных наблюдений и оперативного получения достоверной информации о состоянии подземной гидросферы.

Традиционные методы наблюдений за уровнем грунтовых вод зачастую предполагают выполнение периодических ручных измерений, что связано со значительными временными затратами, ограниченной оперативностью получения данных и высокой вероятностью возникновения пропусков в наблюдениях. В условиях развития цифровых технологий актуальной становится разработка автоматизированных систем мониторинга, способных обеспечивать непрерывный сбор, передачу, хранение и анализ гидрологической информации в режиме реального времени.

Перспективным направлением решения данной задачи является создание комплексной автоматизированной системы мониторинга уровня грунтовых вод, объединяющей современные средства измерения, технологии беспроводной передачи данных, программные инструменты визуализации и методы математического моделирования гидрологических процессов. Использование подобных систем позволяет повысить точность наблюдений, сократить эксплуатационные затраты и обеспечить своевременное получение информации для принятия управленческих решений.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка и исследование автоматизированной системы мониторинга уровня грунтовых вод *HydroNet*, обеспечивающей непрерывное измерение уровня воды, передачу данных пользователю, их визуализацию и анализ, а также оценку эффективности внедрения разработанного решения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– выполнен анализ существующих методов и средств мониторинга уровня грунтовых вод;

– исследованы факторы, влияющие на изменение уровня грунтовых вод;

– разработана математическая модель прогнозирования уровня грунтовых вод на основе гидрометеорологических данных;

– спроектирован и реализован программно-аппаратный комплекс автоматизированного измерения уровня воды;

– разработано мобильное приложение для отображения и анализа получаемых данных;

– выполнена оценка экономической эффективности внедрения системы *HydroNet* и определены перспективы её практического применения.

Объектом исследования являются процессы мониторинга уровня грунтовых вод.

Предметом исследования являются методы, технические средства и программные решения, применяемые для автоматизированного контроля уровня грунтовых вод.

Практическая значимость работы заключается в создании действующего программно-аппаратного комплекса, позволяющего автоматизировать процесс наблюдений за уровнем грунтовых вод и обеспечить удалённый доступ к результатам измерений. Разработанная система может быть использована при проведении гидрологических исследований, организации экологического мониторинга, контроле

состояния территорий и решении задач рационального природопользования.

Структура работы включает разделы, посвящённые анализу особенностей мониторинга уровня грунтовых вод, разработке математической модели прогнозирования, исследованию влияния гидрометеорологических факторов, созданию автоматизированной системы измерения и передачи данных, а также технико-экономическому обоснованию внедрения разработанного решения.

1 Мониторинг уровня грунтовых вод

1.1 Теоретические основы мониторинга уровня грунтовых вод

Значение мониторинга грунтовых вод

Мониторинг грунтовых вод является важной составляющей инженерно-гидрологических и гидрогеологических исследований. Наблюдения за изменением уровня подземных вод позволяют оценивать состояние водоносных горизонтов, выявлять закономерности изменения гидрологического режима и прогнозировать развитие неблагоприятных процессов, связанных с подтоплением или истощением водных ресурсов.

Уровень грунтовых вод оказывает существенное влияние на инженерные сооружения, сельскохозяйственные территории и природные экосистемы. При проектировании зданий, дорог, подземных коммуникаций и гидротехнических сооружений необходимо учитывать глубину залегания грунтовых вод, поскольку ее изменение может приводить к переувлажнению грунтов, снижению несущей способности оснований и деформации конструкций. В районах с высоким уровнем грунтовых вод возрастает риск сезонного подтопления территорий и заболачивания.

В сельском хозяйстве данные мониторинга используются для регулирования мелиоративных мероприятий, оценки водного режима почв и предотвращения процессов засоления. Для природных экосистем наблюдения за уровнем подземных вод позволяют анализировать степень увлажнения территорий, состояние болотных комплексов и изменение водного баланса.

Особое значение мониторинг грунтовых вод приобретает в условиях возрастающей антропогенной нагрузки. Активное строительство, изменение ландшафтов, увеличение площадей с искусственным покрытием

и интенсивное водопотребление способны существенно изменять естественный режим подземных вод. В связи с этим возникает необходимость организации регулярных и высокоточных наблюдений.

Традиционные методы измерения уровня воды во многих случаях не обеспечивают достаточной оперативности и непрерывности наблюдений. Проведение ручных измерений требует значительных временных затрат, а также ограничивает возможность получения детализированных временных рядов. Современные автоматизированные системы позволяют повысить точность и частоту измерений, минимизировать влияние человеческого фактора и организовать непрерывный мониторинг уровня грунтовых вод.

Основные методы измерения уровня воды

В гидрологических и гидрогеологических исследованиях применяется несколько основных методов измерения уровня воды, различающихся по принципу действия, точности измерений и условиям эксплуатации.

Наиболее простым и распространенным способом являются визуальные методы измерений, основанные на использовании уровнемерных реек и измерительных лент. Данные методы отличаются простотой применения и не требуют сложного оборудования, однако обладают невысокой точностью и зависят от квалификации оператора. Кроме того, ручные измерения не позволяют организовать непрерывный мониторинг.



Рисунок 1 – Ручное измерение при помощи измерительной ленты.

Контактные методы основаны на непосредственном взаимодействии измерительного устройства с водной средой. К данной категории относятся поплавковые и гидростатические уровнемеры. Поплавковые системы работают за счет изменения положения поплавка при колебании уровня воды. Такие устройства отличаются высокой надежностью, однако требуют значительного пространства для размещения и регулярного обслуживания.



Рисунок 2 – Поплавковая система.

Гидростатические методы измерения основаны на определении давления столба жидкости. Давление, создаваемое толщей воды, измеряется специальным датчиком и преобразуется в значение уровня. Основным преимуществом гидростатического метода является возможность установки оборудования непосредственно в наблюдательной скважине, высокая стабильность измерений и относительная простота реализации автоматизированной системы.



Рисунок 3 – Гидростатический датчик.

Бесконтактные методы измерений включают ультразвуковые, лазерные и радиолокационные уровнемеры. Принцип их действия основан на измерении времени прохождения сигнала до поверхности воды и обратно. Такие методы позволяют избежать контакта оборудования с водой, однако отличаются более высокой стоимостью и повышенными требованиями к условиям эксплуатации.

Также применяются расчетные методы определения уровня воды, основанные на использовании математических моделей и косвенных гидрологических параметров. Подобные методы используются

преимущественно при отсутствии возможности прямых измерений или для прогнозирования изменения уровня воды.

В современных условиях все большее распространение получают автоматизированные методы измерений, сочетающие цифровые датчики, микроконтроллеры и средства беспроводной передачи данных. Подобные системы обеспечивают высокую частоту наблюдений и позволяют организовать удаленный контроль гидрологических параметров.

Современные автоматизированные системы наблюдений

Развитие цифровых технологий привело к широкому внедрению автоматизированных систем мониторинга в различные области гидрологических наблюдений. Современные системы позволяют осуществлять непрерывный контроль уровня воды, автоматически сохранять результаты измерений и передавать их на удаленные устройства для дальнейшей обработки.

Основой автоматизированных систем являются электронные датчики, обеспечивающие преобразование физических параметров в цифровые сигналы. В системах мониторинга уровня грунтовых вод наиболее часто используются гидростатические датчики давления, позволяющие получать данные о высоте водяного столба с высокой точностью.

Для обработки измерений применяются микроконтроллеры, обеспечивающие выполнение алгоритмов считывания, фильтрации и передачи данных. В качестве управляющих устройств широко используются компактные микроконтроллерные платформы с поддержкой беспроводной связи, такие как ESP8266 и ESP32. Их применение позволяет реализовывать системы удаленного мониторинга с передачей информации по *Wi-Fi* или *Bluetooth*.

Современные автоматизированные системы могут включать встроенные средства хранения информации, модули беспроводной связи,

автономные источники питания и программное обеспечение для визуализации данных. Использование мобильных приложений и облачных сервисов значительно упрощает процесс контроля измерений и обеспечивает оперативный доступ к информации.

Важным направлением развития автоматизированных систем является снижение энергопотребления и повышение автономности работы оборудования. Для этого применяются энергосберегающие режимы работы микроконтроллеров, аккумуляторные источники питания и солнечные панели.

Применение автоматизированных систем наблюдений позволяет существенно повысить точность гидрологических измерений, сократить трудозатраты и обеспечить непрерывное получение данных о состоянии грунтовых вод.

Недостатки существующих решений

Несмотря на активное развитие автоматизированных систем мониторинга уровня воды, существующие технические решения обладают рядом недостатков, ограничивающих их широкое применение.

Одной из основных проблем является высокая стоимость промышленного оборудования. Многие современные системы мониторинга ориентированы на использование в крупных инженерных или научных проектах, что делает их экономически нецелесообразными для небольших наблюдательных сетей, учебных организаций и локальных исследований.

Дополнительным недостатком является сложность монтажа и обслуживания оборудования. Некоторые системы требуют применения специализированных программных комплексов, профессиональной настройки и регулярного технического сопровождения. Это значительно

повышает эксплуатационные затраты и усложняет использование оборудования в полевых условиях.

Существенным ограничением также является закрытая архитектура отдельных промышленных решений. Пользователь зачастую не имеет возможности изменять алгоритмы обработки данных, адаптировать систему под конкретные задачи или интегрировать оборудование с другими программными средствами.

Отдельной проблемой остается энергопотребление автоматизированных станций. При организации длительного автономного мониторинга возникает необходимость применения энергоэффективных компонентов и оптимизации режимов работы оборудования.

Кроме того, часть существующих систем обладает ограниченными возможностями удаленной передачи данных и визуализации результатов измерений. Это снижает оперативность контроля и затрудняет использование оборудования при организации распределенных наблюдательных сетей.

В связи с перечисленными недостатками возникает необходимость разработки более доступной, компактной и энергоэффективной автоматизированной системы, способной обеспечивать непрерывный мониторинг уровня грунтовых вод при относительно низкой стоимости реализации.

Нормативно-методическое обеспечение мониторинга грунтовых вод

Организация наблюдений за уровнем грунтовых вод требует соблюдения установленных методических требований, обеспечивающих достоверность, сопоставимость и практическую ценность получаемых результатов. Нормативно-методическая база гидрологических и гидрогеологических наблюдений определяет порядок проведения

измерений, требования к оборудованию, периодичность наблюдений и методы обработки данных.

В Российской Федерации проведение инженерно-гидрогеологических исследований и мониторинга подземных вод регламентируется рядом нормативных документов. Одним из основных является СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения», устанавливающий общие требования к выполнению инженерных изысканий, включая гидрогеологические исследования. Документ определяет необходимость получения достоверных данных о состоянии подземных вод, их режиме и возможном влиянии на проектируемые объекты [66].

При организации наблюдений за грунтовыми водами также используются положения СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства», в котором рассматриваются вопросы изучения гидрогеологических условий территории, размещения наблюдательных скважин и проведения режимных наблюдений. Данный свод правил содержит рекомендации по сбору и анализу информации о подземных водах на различных стадиях инженерных изысканий [67].

Для территорий, подверженных подтоплению, важное значение имеет СП 104.13330.2016 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления», который устанавливает требования к оценке гидрогеологических условий и организации наблюдений за уровнем грунтовых вод. Результаты мониторинга используются для прогнозирования процессов подтопления и разработки мероприятий по защите территорий и объектов инфраструктуры [68].

Основой мониторинга грунтовых вод являются наблюдательные скважины, предназначенные для регулярного контроля состояния водоносных горизонтов. Размещение наблюдательных пунктов осуществляется с учетом геологических особенностей территории, характера водоносных пород, условий питания подземных вод и целей

проводимых исследований. Правильный выбор местоположения наблюдательных скважин позволяет получать репрезентативные данные о режиме грунтовых вод и выявлять закономерности его изменения.

Одним из важнейших требований к организации мониторинга является обеспечение сопоставимости результатов измерений. Для этого наблюдения должны проводиться по единой методике с использованием откалиброванного оборудования и постоянной системы отсчета уровней. При выполнении измерений необходимо учитывать влияние внешних факторов, включая атмосферное давление, температурный режим и возможные изменения технического состояния измерительных приборов.

Традиционно контроль уровня грунтовых вод выполняется посредством ручных измерений с использованием электроуровнемеров, мерных лент и других специализированных устройств. Частота проведения наблюдений определяется задачами мониторинга и может изменяться от нескольких измерений в год до ежедневных наблюдений. Однако при высокой динамике изменения уровня грунтовых вод ручные методы не всегда позволяют получать необходимый объем информации.

Современные тенденции развития гидрологических наблюдений связаны с внедрением автоматизированных систем мониторинга. Автоматизация процесса измерений позволяет значительно увеличить частоту регистрации данных, обеспечить непрерывность наблюдений и снизить вероятность возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором. При этом сохраняются основные требования к точности измерений, надежности оборудования и корректности обработки получаемой информации.

Особое внимание при организации мониторинга уделяется вопросам хранения и обработки результатов наблюдений. Полученные данные должны систематизироваться в виде временных рядов, обеспечивающих возможность анализа многолетних изменений уровня грунтовых вод. На основе накопленных материалов выполняется оценка гидрогеологических

условий территории, выявляются закономерности колебаний уровня воды и разрабатываются прогнозы дальнейшего развития гидрологической ситуации.

В настоящее время развитие цифровых технологий способствует переходу от периодических наблюдений к системам непрерывного автоматизированного мониторинга. Использование электронных датчиков, микроконтроллеров и беспроводных каналов передачи данных позволяет организовать оперативный контроль состояния грунтовых вод и значительно повысить информативность наблюдений. Такие системы соответствуют современным требованиям к инженерным изысканиям и позволяют получать данные в режиме реального времени, что особенно важно при мониторинге территорий с высоким риском подтопления.

Таким образом, нормативно-методическое обеспечение мониторинга грунтовых вод основывается на требованиях действующих сводов правил и методических документов, регламентирующих проведение гидрогеологических наблюдений. Соблюдение данных требований обеспечивает получение достоверной информации о состоянии подземных вод и создает условия для эффективного использования результатов мониторинга в инженерной, природоохранной и научно-исследовательской деятельности.

Анализ существующих автоматизированных систем мониторинга уровня грунтовых вод

В настоящее время для наблюдения за уровнем грунтовых вод широко применяются автоматизированные системы мониторинга, основанные на использовании электронных датчиков и регистраторов данных. Подобные комплексы позволяют выполнять непрерывные измерения, хранить

результаты наблюдений и передавать информацию на удаленные устройства для последующего анализа.

Одним из наиболее известных решений является оборудование компании *Solinst*. Регистраторы уровня воды серии *Levelogger* предназначены для длительных автономных наблюдений за уровнем и температурой подземных вод. Устройства обеспечивают высокую точность измерений, имеют герметичную конструкцию и способны сохранять значительные объемы данных во внутренней памяти. Полученная информация может выгружаться на персональный компьютер для дальнейшей обработки [79].

Широкое распространение получили также регистраторы *Diver* компании *Van Essen Instruments*. Данные устройства используются при проведении гидрогеологических исследований, мониторинге водоносных горизонтов и инженерных изысканиях. Отличительной особенностью оборудования является компактность конструкции и возможность длительной автономной работы в полевых условиях [80].

Для решения задач промышленного мониторинга применяются системы компании *Keller*. Используемые датчики давления позволяют получать высокоточные данные о положении уровня воды и могут интегрироваться в автоматизированные системы сбора информации. Оборудование данного класса часто используется на объектах инженерной инфраструктуры, водозаборах и гидротехнических сооружениях [81].

Современные автоматизированные комплексы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами измерений. Они обеспечивают непрерывность наблюдений, высокую точность регистрации параметров и возможность длительной автономной эксплуатации. Кроме того, использование цифровых технологий позволяет организовывать удаленный доступ к результатам измерений и оперативно реагировать на изменения гидрогеологической обстановки.

Несмотря на перечисленные достоинства, большинство промышленных систем имеют ряд недостатков. Основным ограничивающим фактором является высокая стоимость оборудования и сопутствующего программного обеспечения. Дополнительные затраты связаны с приобретением специализированных интерфейсов связи, обслуживанием оборудования и проведением его периодической поверки.

Другим недостатком является ограниченная гибкость отдельных коммерческих решений. Многие системы имеют закрытую архитектуру, что затрудняет модификацию программного обеспечения и интеграцию оборудования с пользовательскими приложениями. Это особенно важно при выполнении научно-исследовательских и учебных проектов, где нередко возникает необходимость адаптации системы под конкретные задачи.

Сравнение наиболее распространенных автоматизированных систем мониторинга уровня грунтовых вод представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение существующих автоматизированных систем мониторинга уровня грунтовых вод

Система	Метод измерения	Передача данных	Основные преимущества	Основные недостатки
Solinst Levelogger	Гидростатический	Через регистратор	Высокая точность, надежность	Высокая стоимость
Diver	Гидростатический	Через регистратор	Компактность, автономность	Ограниченные возможности модернизации
Keller	Гидростатический	Проводная и беспроводная	Высокая точность измерений	Высокая стоимость оборудования

Разрабатываемая система	Гидростатический	*Wi-Fi*	Низкая стоимость, открытая архитектура, мобильное приложение	Требует дальнейшей опытной эксплуатации

Проведенный анализ показывает, что существующие промышленные решения обеспечивают высокое качество измерений, однако зачастую являются дорогостоящими и ориентированы на выполнение специализированных инженерных задач. В связи с этим сохраняется актуальность разработки доступных автоматизированных систем мониторинга, способных обеспечить достаточную точность измерений при существенно меньших затратах.

Разрабатываемая в рамках данной работы система основана на применении гидростатического датчика давления и микроконтроллера ESP8266. Использование доступных электронных компонентов позволяет снизить стоимость реализации, обеспечить возможность дальнейшей модернизации оборудования и организовать передачу данных непосредственно на мобильное устройство пользователя.

1.2 Технология автоматического фиксирования уровня грунтовых вод

Общая структура автоматизированной системы

Разрабатываемая автоматизированная система предназначена для непрерывного контроля уровня грунтовых вод в наблюдательных

скважинах и автоматической фиксации изменений уровня воды. Основной задачей системы является получение достоверных данных о положении уровня воды с последующей обработкой, сохранением и передачей результатов измерений.

Структурно система состоит из нескольких основных элементов:

- датчика гидростатического давления;
- микроконтроллера;
- модуля беспроводной передачи данных;
- источника питания;
- программного обеспечения для отображения результатов измерений.

Принцип работы системы основан на измерении гидростатического давления, создаваемого столбом воды в скважине. Полученные значения давления поступают на микроконтроллер, где выполняется их обработка и преобразование в значение уровня воды. После обработки данные могут сохраняться во внутренней памяти устройства или передаваться на мобильное устройство по беспроводному каналу связи.

В качестве управляющего элемента системы используется микроконтроллер ESP8266, обладающий встроенным модулем *Wi-Fi*, достаточной производительностью и низким энергопотреблением. Использование данного микроконтроллера позволяет реализовать функции автоматического измерения, обработки и передачи данных без применения дополнительного сложного оборудования [82, 83].

Автоматизированная система ориентирована на использование в условиях локального мониторинга и отличается компактностью конструкции, простотой монтажа и возможностью дальнейшей модернизации.

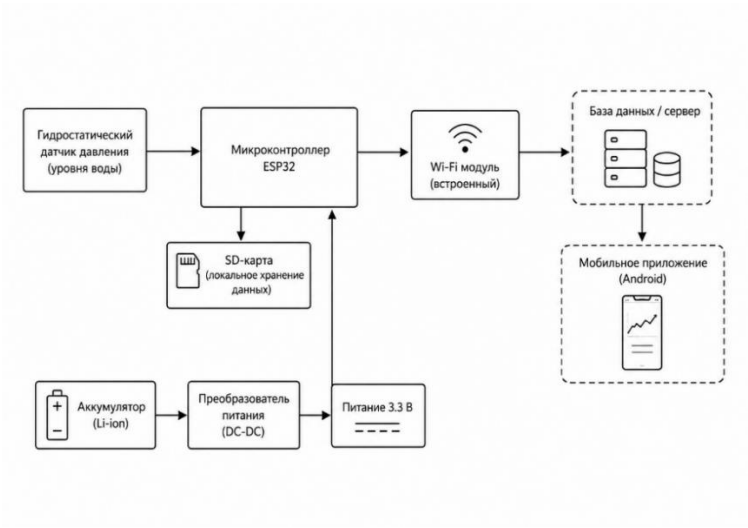


Рисунок 4 – Главная структурная схема устройства.

Выбор метода измерения уровня воды

Для реализации автоматизированной системы измерения уровня грунтовых вод был выбран гидростатический метод измерений. Данный метод основан на зависимости давления жидкости от высоты столба воды.

При размещении датчика давления в водной среде на чувствительный элемент воздействует давление, создаваемое толщей воды над датчиком. Значение уровня воды определяется по формуле:

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad (1)$$

где

h – высота столба воды, м;

P – гидростатическое давление, Па;

ρ – плотность воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Выбор гидростатического метода обусловлен рядом преимуществ. В первую очередь данный способ обеспечивает достаточно высокую точность измерений при сравнительно простой конструкции оборудования. Датчик

может размещаться непосредственно внутри наблюдательной скважины, что особенно важно при мониторинге грунтовых вод.

Дополнительным преимуществом является возможность непрерывного автоматического измерения без необходимости постоянного участия оператора. Полученные данные могут автоматически передаваться на внешние устройства и использоваться для построения временных рядов наблюдений.

По сравнению с ультразвуковыми и радиолокационными методами гидростатический способ отличается меньшей стоимостью оборудования и меньшей чувствительностью к внешним условиям эксплуатации. Это делает его удобным для создания компактных и доступных автоматизированных систем мониторинга.

Выбор аппаратных компонентов системы

При разработке автоматизированной системы особое внимание уделялось подбору компонентов, обеспечивающих стабильность измерений, низкое энергопотребление и возможность дальнейшего расширения функционала системы.

Основным измерительным элементом является гидростатический датчик давления. Датчик предназначен для измерения давления столба жидкости и преобразования его в электрический сигнал, поступающий на микроконтроллер. Использование цифрового датчика позволяет повысить точность измерений и снизить влияние внешних помех.



Рисунок 5 – Гидростатический датчик давления.

В качестве управляющего устройства выбран микроконтроллер ESP8266. Данный микроконтроллер обладает встроенным модулем *Wi-Fi*, достаточным объемом памяти и поддержкой программирования в среде *Arduino IDE*. К преимуществам ESP8266 относятся компактные размеры, низкая стоимость и возможность реализации беспроводной передачи данных [82].

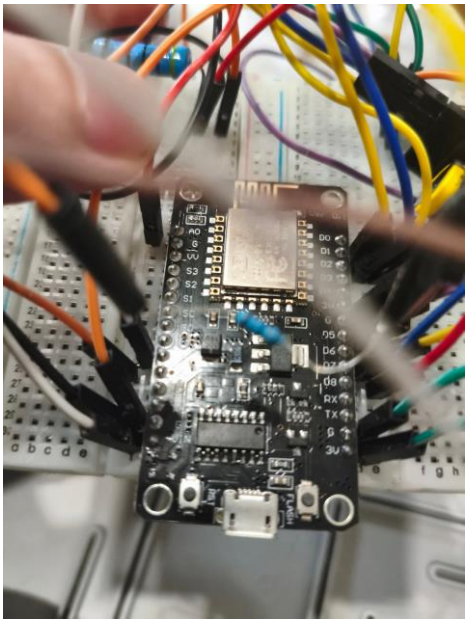


Рисунок 6 – ESP8266.

Для обеспечения автономной работы системы применяется источник питания постоянного тока. В зависимости от условий эксплуатации питание может осуществляться как от аккумуляторной батареи, так и от внешнего источника напряжения. При необходимости возможно применение дополнительных средств энергосбережения.

Передача данных реализуется посредством беспроводного соединения *Wi-Fi*. Использование беспроводной связи позволяет организовать удаленный доступ к измерениям и обеспечивает удобство эксплуатации системы в полевых условиях.

Для отображения результатов измерений используется мобильное приложение, позволяющее в реальном времени контролировать уровень воды, просматривать текущие значения и анализировать изменение параметров наблюдений.

Принцип работы автоматизированной системы

Работа системы начинается с измерения гидростатического давления датчиком, установленным в наблюдательной скважине. Давление водяного столба воздействует на чувствительный элемент датчика и преобразуется в электрический сигнал.

Полученный сигнал передается на микроконтроллер ESP8266, где выполняется обработка измерений. Программное обеспечение микроконтроллера осуществляет преобразование давления в значение уровня воды с использованием расчетной зависимости между давлением и высотой столба жидкости.

После вычисления уровня воды система выполняет фильтрацию измерений для уменьшения влияния случайных помех и кратковременных

колебаний сигнала. Для повышения стабильности результатов может использоваться усреднение нескольких последовательных измерений.

Обработанные данные сопровождаются временной отметкой и передаются на мобильное устройство посредством беспроводной связи. Пользователь получает возможность наблюдать текущий уровень воды в режиме реального времени.

При необходимости результаты измерений могут сохраняться для последующего анализа и построения графиков изменения уровня грунтовых вод. Автоматизация процесса измерений позволяет организовать непрерывный мониторинг без постоянного присутствия оператора.

Алгоритм автоматической фиксации данных

Алгоритм работы системы включает несколько последовательных этапов, обеспечивающих автоматическое получение и обработку измерительной информации.

На первом этапе выполняется инициализация оборудования и проверка корректности работы датчика давления. После запуска системы микроконтроллер устанавливает соединение с измерительным устройством и подготавливает программные модули к выполнению измерений.

Далее осуществляется циклическое считывание значений давления через заданные интервалы времени. Частота измерений определяется настройками системы и может изменяться в зависимости от требований наблюдений.

Полученные данные проходят этап первичной обработки, включающий фильтрацию шумов и усреднение результатов. Это позволяет уменьшить влияние случайных помех и повысить стабильность измерений.

После обработки выполняется вычисление уровня воды и формирование итогового пакета данных, содержащего:

- значение уровня воды;
- время измерения;
- служебную информацию о работе системы.

Сформированные данные передаются на мобильное устройство пользователя посредством беспроводного соединения. При отсутствии соединения система может временно сохранять результаты измерений во внутренней памяти с последующей передачей после восстановления связи.

Автоматический алгоритм работы обеспечивает непрерывность наблюдений и минимизирует влияние человеческого фактора на процесс измерений.

Программная реализация системы

Программная часть автоматизированной системы реализована в среде *Arduino IDE* с использованием языка программирования C++. Программное обеспечение обеспечивает управление датчиком давления, обработку измерительной информации и передачу данных пользователю.

Основной цикл программы включает последовательное выполнение операций считывания данных, расчета уровня воды, фильтрации результатов и передачи информации по беспроводному каналу связи. Для повышения стабильности работы системы предусмотрена обработка ошибок подключения и контроль корректности измерений.

Для взаимодействия с пользователем реализован интерфейс мобильного приложения, отображающий текущие значения уровня воды и состояние системы. Интерфейс обеспечивает удобное визуальное представление данных и позволяет контролировать результаты измерений в режиме реального времени.

Программная реализация системы предусматривает возможность дальнейшего расширения функционала, включая:

- сохранение архивов измерений;
- построение графиков;
- интеграцию с облачными сервисами;
- организацию удаленного мониторинга через сеть Интернет.

Использование программируемого микроконтроллера и открытой архитектуры позволяет адаптировать систему под различные условия эксплуатации и требования гидрологических наблюдений [83–85].

Алгоритмы обработки и фильтрации измерений

Для повышения достоверности результатов измерений в программном обеспечении системы реализованы алгоритмы фильтрации и предварительной обработки данных. Использование подобных алгоритмов позволяет снизить влияние случайных помех, возникающих в процессе работы датчика и аналогово-цифрового преобразователя микроконтроллера.

Первичным этапом обработки является преобразование значения, полученного с аналогового входа микроконтроллера, в уровень воды. Для этого используются калибровочные коэффициенты, определенные экспериментальным путем. В программном коде они задаются следующим образом:

```
float adc_air = 170.0;
float adc_per_meter = 116.0;
```

Расчет уровня воды выполняется по линейной зависимости между выходным сигналом датчика и высотой водяного столба:

```
int adc = analogRead(A0);
float current_level = (adc - adc_air) / adc_per_meter;
```

```
if (current_level < 0)
   current_level = 0;
```

Полученное значение представляет собой текущий уровень воды в метрах и используется для дальнейшей обработки.

С целью уменьшения влияния случайных колебаний сигнала реализован алгоритм скользящего среднего. Для хранения последних измерений используется циклический буфер фиксированного размера:

```
const int numReadings = 5;
float readings[numReadings];
int readIndex = 0;
float totalLevel = 0;
float averageLevel = 0;
```

При поступлении нового измерения выполняется обновление массива значений и пересчет среднего уровня воды:

```
totalLevel = totalLevel - readings[readIndex];
readings[readIndex] = current_level;
totalLevel = totalLevel + readings[readIndex];

readIndex = readIndex + 1;

if (readIndex >= numReadings) {
   readIndex = 0;
}

averageLevel = totalLevel / numReadings;
```

Использование скользящего среднего позволяет сглаживать кратковременные колебания показаний датчика и уменьшать влияние случайных шумов. В результате на выходе системы формируется более стабильное значение уровня воды по сравнению с одиночными измерениями.

Дополнительно в системе реализован механизм обнаружения аномальных значений. Каждое новое измерение сравнивается со средним значением предыдущих измерений. Если отклонение превышает установленный порог, измерение рассматривается как выброс и не используется при дальнейших расчетах.

В программном обеспечении максимальное допустимое отклонение задается следующим параметром:

```
float maxDeviation = 0.3;
```

Проверка измерения на наличие аномального скачка выполняется следующим образом:

```
if (bufferFilled) {
   if (abs(current_level - averageLevel) > maxDeviation) {
      isValid = false;
   }
}
```

Такой подход позволяет исключить влияние кратковременных электрических помех, нестабильности питания и случайных ошибок считывания данных. Благодаря этому повышается надежность работы системы в условиях длительной автономной эксплуатации.

Для обеспечения корректной привязки результатов наблюдений ко времени в составе системы используется модуль часов реального времени DS3231. Получение текущих даты и времени осуществляется командой:

```
DateTime now = rtc.now();
```

Каждое измерение сопровождается временной меткой, содержащей дату и точное время регистрации данных. Это позволяет формировать непрерывные временные ряды наблюдений и выполнять последующий анализ изменения уровня грунтовых вод.

Дополнительным источником информации является датчик BME280, обеспечивающий измерение температуры воздуха, атмосферного давления

и относительной влажности. Считывание данных выполняется следующими командами:

```
float temp = bme.readTemperature();
float pressure = bme.readPressure() / 100.0;
float humidity = bme.readHumidity();
```

Регистрация указанных параметров позволяет учитывать влияние внешних условий на результаты измерений и расширяет возможности анализа данных мониторинга.

Передача результатов измерений осуществляется посредством встроенного *Wi-Fi*-модуля микроконтроллера ESP8266. После обработки данные формируются в формате *JSON* и передаются в мобильное приложение по протоколу *HTTP*. Фрагмент программного кода формирования *JSON*-объекта представлен ниже:

```
String json = "{";
json += "\"time\":\"" + String(now.year()) + "-" +
        String(now.month()) + "-" +
        String(now.day()) + " " +
        String(now.hour()) + ":" +
        String(now.minute()) + ":" +
        String(now.second()) + "\",";

json += "\"level\":" + String(averageLevel, 3) + ",";
json += "\"temp\":" + String(temp) + ",";
json += "\"pressure\":" + String(pressure) + ",";
json += "\"humidity\":" + String(humidity);
json += "}";
```

Использование формата *JSON* обеспечивает удобный обмен данными между микроконтроллером и мобильным приложением, а также позволяет легко интегрировать систему с другими программными средствами мониторинга.

Применение алгоритмов фильтрации и предварительной обработки данных позволяет повысить надежность работы автоматизированной системы и обеспечить получение более устойчивых результатов измерений в условиях реальной эксплуатации. Включение механизмов усреднения, обнаружения выбросов и временной привязки измерений существенно повышает качество собираемой информации и делает систему пригодной для долговременного мониторинга уровня грунтовых вод.

Оценка энергопотребления системы

Одним из важных требований к автоматизированным системам мониторинга является возможность длительной автономной работы без постоянного подключения к внешним источникам питания. Особенно актуально это для наблюдательных скважин, расположенных на удаленных участках, где организация стационарного электроснабжения затруднена или экономически нецелесообразна.

Основным потребителем электроэнергии в разработанной системе является микроконтроллер ESP8266, обеспечивающий обработку данных и передачу информации по беспроводной сети *Wi-Fi*. Дополнительное энергопотребление создают датчик атмосферных параметров BME280, модуль часов реального времени DS3231 и гидростатический датчик уровня воды [82, 83].

Ориентировочные значения потребляемого тока основных компонентов системы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Энергопотребление компонентов системы

Компонент	Потребляемый ток, мА
ESP8266 (активный режим)	70–170

Компонент	Потребляемый ток, мА
BME280	до 1
DS3231	менее 1
Гидростатический датчик	5–20
Прочие элементы схемы	5–10

Наибольшее энергопотребление наблюдается в момент передачи данных по сети *Wi-Fi*, когда ток микроконтроллера может кратковременно достигать 170 мА. Однако большая часть времени система выполняет измерения и обработку данных, что позволяет поддерживать среднее энергопотребление на существенно меньшем уровне.

Для оценки времени автономной работы рассмотрим использование аккумуляторной батареи емкостью 3600 мА·ч. При среднем потребляемом токе около 100 мА ориентировочное время работы системы составит:

$$T = \frac{C}{I} \tag{2}$$

где

T – время автономной работы, ч;

C – емкость аккумулятора, мА·ч;

I – средний потребляемый ток, мА.

Подставляя значения, получим:

$$T = \frac{3600}{100} = 36 \text{ ч.}$$

Таким образом, при непрерывной работе система сможет функционировать более суток без подзарядки.

Следует отметить, что данный режим является наиболее энергозатратным, поскольку микроконтроллер постоянно активен и

поддерживает беспроводное соединение. Для увеличения времени автономной работы возможно использование энергосберегающих режимов ESP8266, при которых устройство большую часть времени находится в режиме сна и активируется только для выполнения очередного измерения.

Например, при выполнении измерений один раз в пять минут и использовании режима глубокого сна, среднее энергопотребление может быть снижено в несколько раз. В этом случае время автономной работы системы будет исчисляться уже неделями или даже месяцами в зависимости от емкости источника питания.

Дополнительным способом повышения автономности является применение солнечной панели для подзарядки аккумулятора. Подобное решение позволяет организовать длительный мониторинг уровня грунтовых вод без необходимости регулярного обслуживания системы.

Таким образом, проведенная оценка показывает, что разработанная система обладает приемлемыми показателями энергопотребления и может использоваться как в стационарном режиме, так и в составе автономных мониторинговых комплексов. Возможность применения энергосберегающих режимов работы делает систему перспективной для длительных гидрологических наблюдений в полевых условиях.

1.3 Практическая реализация и оценка эффективности системы

Сборка экспериментального образца

В рамках выполнения работы был разработан и собран экспериментальный образец автоматизированной системы измерения уровня грунтовых вод. Основной целью практической реализации являлась проверка работоспособности выбранной технологии автоматического

фиксирования уровня воды и оценка возможности ее применения в условиях локального гидрологического мониторинга.

Конструкция системы включает гидростатический датчик давления, микроконтроллер ESP8266, источник питания и модуль беспроводной передачи данных. Все основные элементы были объединены в единую измерительную систему, обеспечивающую автоматическое получение и обработку данных.

Датчик давления размещается в нижней части наблюдательной скважины или емкости с водой, где осуществляется измерение давления водяного столба. Микроконтроллер выполняет обработку сигналов, вычисление уровня воды и передачу информации пользователю.

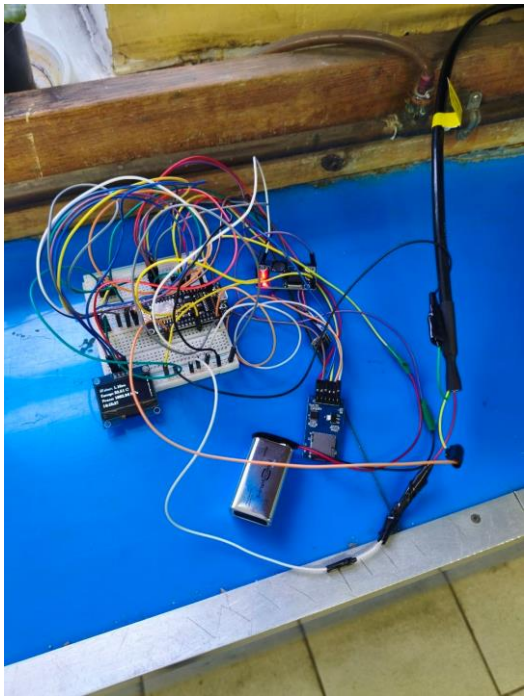


Рисунок 7 – Сборка образца.

При разработке экспериментального образца особое внимание уделялось компактности конструкции и удобству монтажа. Использование малогабаритных компонентов позволило уменьшить размеры системы и упростить ее размещение в условиях ограниченного пространства.

Для защиты электронных компонентов от воздействия влаги предусматривается использование герметичного корпуса и изолированных соединений. Это позволяет повысить надежность работы оборудования при эксплуатации в полевых условиях.

Разработанная конструкция обладает модульной структурой, благодаря чему отдельные элементы системы могут заменяться или модернизироваться без существенного изменения общей схемы работы устройства.

Интерфейс отображения данных

Для обеспечения удобства контроля результатов измерений был реализован интерфейс отображения данных на мобильном устройстве. Использование мобильного приложения позволяет получать информацию о текущем уровне воды в режиме реального времени без необходимости прямого подключения к измерительному оборудованию.

Интерфейс приложения отображает основные параметры системы:

- текущий уровень воды;
- состояние подключения;
- время последнего измерения;
- служебную информацию о работе устройства.

Одним из основных требований к интерфейсу являлась простота восприятия информации. В связи с этим структура отображения данных была реализована в минималистичном стиле с выделением наиболее важных параметров наблюдений.

Передача данных между устройством и мобильным приложением осуществляется посредством беспроводного соединения *Wi-Fi*. Это обеспечивает удобство эксплуатации системы и позволяет организовать удаленный контроль результатов измерений.

Дополнительно интерфейс может использоваться для отображения графиков изменения уровня воды и сохранения архивов измерений. Реализация подобных функций повышает информативность системы и упрощает анализ гидрологических наблюдений.

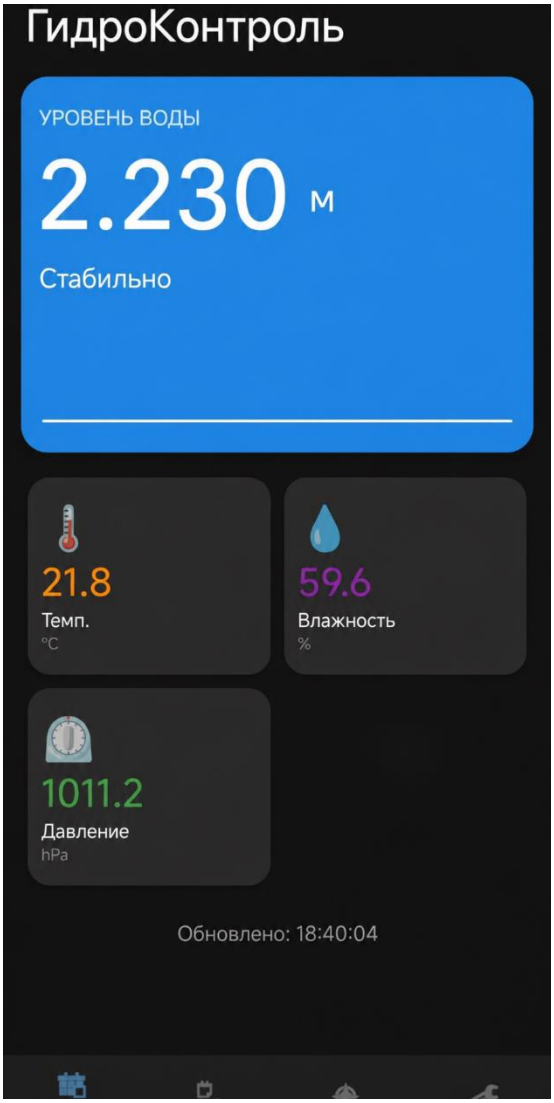


Рисунок 8 – Интерфейс мобильного приложения.

Результаты тестирования системы

Для оценки работоспособности разработанной системы были проведены испытания экспериментального образца в условиях изменения

уровня воды. В процессе тестирования проверялась стабильность измерений, корректность передачи данных и реакция системы на изменение гидростатического давления.

Результаты испытаний показали, что система обеспечивает устойчивое считывание измерительной информации и корректное определение уровня воды. При изменении высоты водяного столба фиксировалось соответствующее изменение показаний датчика давления [66, 67].

Таблица 3 – Результаты тестирования автоматизированной системы измерения уровня воды

№ Измерения	Уровень воды по датчику, м	Уровень воды при ручном измерении, м	Абсолютная ошибка, м	Относительная ошибка, %
1	1,52	1,50	0,02	1,33
2	1,74	1,74	0,00	0,00
3	1,93	1,91	0,02	1,05
4	2,15	2,16	0,01	0,46
5	2,37	2,36	0,01	0,42
6	2,45	2,47	0,02	0,81
7	2,88	2,90	0,02	0,69
8	3,01	2,99	0,02	0,67
9	3,11	3,10	0,01	0,32
10	3,12	3,11	0,01	0,32
11	3,04	3,00	0,04	1,33

Передача данных на мобильное устройство осуществлялась без значительных задержек, что позволило организовать практически непрерывный контроль измерений. Использование автоматической

обработки данных обеспечило уменьшение влияния случайных шумов и кратковременных колебаний сигнала.

В ходе тестирования также была подтверждена работоспособность алгоритма автоматической фиксации измерений через заданные интервалы времени. Система сохраняла стабильность работы при длительном функционировании и не требовала постоянного участия оператора.

Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанной системы для организации локального мониторинга уровня грунтовых вод и проведения автоматизированных гидрологических наблюдений.

Преимущества разработанной системы

Разработанная автоматизированная система обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами измерения уровня грунтовых вод.

Одним из основных преимуществ является возможность непрерывного автоматического мониторинга. В отличие от ручных измерений система обеспечивает регулярную фиксацию изменений уровня воды без необходимости постоянного присутствия оператора.

Дополнительным достоинством является относительно низкая стоимость реализации. Использование доступных микроконтроллеров и цифровых датчиков позволяет значительно снизить стоимость системы по сравнению с промышленными автоматизированными станциями мониторинга.

Важным преимуществом также является компактность конструкции и простота установки оборудования. Система может использоваться в локальных наблюдательных сетях, учебных исследованиях и инженерно-гидрологических работах.

Использование беспроводной передачи данных обеспечивает удобство эксплуатации и возможность удаленного контроля результатов измерений. При необходимости система может быть дополнительно модернизирована путем подключения облачных сервисов хранения данных или расширения функционала программного обеспечения.

Благодаря открытой архитектуре разработанная система обладает высокой гибкостью настройки и может адаптироваться под различные условия эксплуатации и задачи гидрологического мониторинга.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения компактных автоматизированных систем для организации наблюдений за уровнем грунтовых вод и дальнейшего развития технологий гидрологического мониторинга [79–81, 86, 89].

2 Математическое моделирование уровня грунтовых вод

2.1 Физико-географическое описание Ленинградской области

Ленинградская область расположена на северо-западе России. Территория характеризуется низменным рельефом, значительной заболоченностью (до 10–15 % территории), обилием озер и рек, что можно увидеть на рисунке 9 [99].



Рисунок 9 – Карта Ленинградской области.

Климат Ленинградской области умеренно континентальный, с мягкой зимой, прохладным летом и обильными осадками в течение всего года. Основные характеристики представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Климатические характеристики

Параметр	значение

Среднегодовая температура	+5,5…+6,5°C
Среднегодовое количество осадков	600–700 мм
Число дней с осадками	200–230 дней/год
Испаряемость	400–500 мм/год (ниже количества осадков)
Преобладающие ветра	Западные и юго-западные

Осадки значительно превышают испаряемость, что свидетельствует о водоизбыточном режиме территории. Большое количество дней с осадками приводит к постоянному пополнению запасов грунтовых вод. Зимой грунт промерзает неглубоко, а весной снеготаяние дает интенсивный поверхностный сток, который при высоком коэффициенте фильтрации грунта переходит в питание грунтовых вод [99].

Гидрогеологическое строение Ленинградской области:

1. Поверхностные отложения - моренные суглинки, супеси, пески, глины, мощность 5–30 м. Суглинки и глины обладают низкой водопроницаемостью, что затрудняет инфильтрацию и способствует застою влаги.

2. Водоносные горизонты – гравийно-галечные отложения ледниковых озер и речных долин. Проницаемость варьируется от низкой (глины) до умеренной (пески).

3. Близость к поверхностным водам – многие водоносные горизонты гидравлически связаны с реками, озерами и болотами, что обеспечивает интенсивный обмен водой.

Ключевая особенность – высокий уровень грунтовых вод в болотистых низинах составляет 5–30 см обусловленный:

– избыточным увлажнением климата;
– низкой водопроницаемостью поверхностных грунтов;
– равнинным рельефом и слабым поверхностным стоком.

В Ленинградской области уровень грунтовых вод имеет выраженные сезонные колебания:

– весна: максимальный подъем на 0,5–1,5 м из-за снеготаяния;

– лето: умеренное понижение (Эвапотранспирация, меньше осадков);

– осень: повторный подъем при интенсивных затяжных дождях;

– зима: стабилизация на относительно высоком уровне при промерзании грунта.

В понижениях рельефа уровень грунтовых вод может подниматься до 0,1–0,5 метра от поверхности или выходить на нее. Близкое расположение водоносного горизонта к поверхности создает условия для постоянного переувлажнения почв и их последующего заболачивания.

В Ленинградской области болота образуются преимущественно за счет высокого уровня грунтовых вод и избыточного увлажнения. Процесс формирования можно описать следующим образом:

– Начальная стадия – в понижениях рельефа (котловины, поймы рек, озерные котловины) уровень грунтовых вод подходит к поверхности (0,1–0,5 м).

– Переувлажнение почвы – постоянный водоизбыток создает анаэробные условия, замедляющие разложение органики.

– Накопление торфа – отмершая растительность не разлагается и накапливается в виде торфа мощностью до 1 м.

– Формирование низинного болота – основной источник влаги – грунтовые воды и поверхностный сток.

Переходные болота (мезотрофные): мощность торфа увеличивается до 2 м, впадина превращается в плоскую равнину. Влага поступает из атмосферных осадков, поверхностного стока и грунтовых вод. Растения начинают испытывать дефицит минеральных веществ.

Верховые болота (олиготрофные): торф достигает 2–5 м и более. Корни растений не достают до минерального грунта. Влага поступает только за счет атмосферных осадков, грунтовые воды слишком глубоко. Растительность представлена сфагновыми мхами, карликовыми березами, соснами – видами, нетребовательными к минеральному питанию.

На территории Ленинградской области болота занимают около 10–15 % площади, что делает ее одной из наиболее заболоченных областей.

Полученные данные позволяют точно составить и подобрать математическую модель, описывающую изменение уровня грунтовых вод, которая будет применима как для Ленинградской области, так и для других схожих регионов Российской Федерации.

2.2 Классификации математических моделей

Для описания и прогнозирования изменений уровня грунтовых вод применяется несколько типов математических моделей. Они различаются используемыми методами расчета, объемом исходной информации и степенью детализации исследуемых процессов. Выбор конкретной модели зависит от поставленной задачи, доступности наблюдений и требуемой точности прогнозирования. Наиболее распространёнными являются четыре группы моделей: эмпирические, балансовые, фильтрационные и динамические. Каждая из них по-своему описывает процессы формирования и изменения уровня грунтовых вод, поэтому имеет собственную область применения [91, 92].

Эмпирические модели

Эмпирические модели строятся на основе результатов наблюдений и представляют собой статистические зависимости между уровнем грунтовых вод и факторами, оказывающими на него влияние. В отличие от моделей, основанных на физических законах, данный подход не требует детального

описания гидрогеологических процессов и позволяет получать прогнозы непосредственно по накопленным данным измерений. Для систем мониторинга, использующих гидростатические датчики, эмпирические модели особенно удобны. Они требуют сравнительно небольшого объёма исходной информации, легко реализуются и обеспечивают получение оперативных прогнозов при минимальных вычислительных затратах. Основным источником данных в этом случае являются временные ряды наблюдений за уровнем грунтовых вод [104].

Физической основой таких моделей служит уравнение водного баланса водоносного горизонта:

$$\Delta h = \frac{1}{\mu}(P - E - Q_0 + Q_П)\Delta t \quad (2.1)$$

где

Δh – изменение уровня грунтовых вод (м);

μ – коэффициент водоемкости пористой среды (безразмерный, 0,05–0,3 для песков);

P – инфильтрация атмосферных осадков (м/сут);

E – эвапотранспирация (м/сут);

$Q_o, Q_п$ – подземный отток и приток (м/сут);

Δt – временной шаг (сут).

Для территории Ленинградской области наибольшее влияние на уровень грунтовых вод оказывают атмосферные осадки, температура воздуха, расход воды в реках, облачность и предшествующие значения уровня воды. Эти факторы используются в качестве независимых переменных при построении модели Ключевые параметры для Ленинградской области указаны в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры эмпирической модели

Зависимая переменная	Физическое смысл	Влияние
Атмосферные осадки (мм)	Питание водоносного горизонта	Положительное (с лагом 1–6 мес)
Температура воздуха (°C)	Таяние снега, эвапотранспирация	Положительное весной, отрицательное летом
Расход воды рек (м³/с)	Гидравлическая связь с поверхностными водами	Положительное
Облачность (баллы)	Косвенный показатель осадков	Положительное
Уровень воды в предыдущий момент h_{n-1}	Инерционность системы	Сильное положительное

Среди различных вариантов эмпирического моделирования наиболее широкое распространение получила модель множественной линейной регрессии. Её особенность заключается в возможности одновременно учитывать воздействие нескольких факторов, влияющих на состояние водоносного горизонта.

Общее уравнение множественной линейной регрессии имеет вид:

$$h_t = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i, \quad (2)$$

где уровень грунтовых вод рассматривается как зависимая переменная, а метеорологические и гидрологические характеристики выступают в роли предикторов. Применительно к задаче прогнозирования уровня грунтовых вод в качестве предикторов могут использоваться месячная сумма осадков, средняя температура воздуха, расход воды в реках, показатели облачности

и другие параметры окружающей среды. Построение эмпирической модели обычно включает несколько последовательных этапов.

На первом этапе выполняется сбор и предварительная обработка исходных данных. Используются архивы измерений гидростатических датчиков, а также данные метеорологических наблюдений за аналогичный период. Для получения статистически надёжной модели продолжительность наблюдений должна составлять не менее шести лет. На втором этапе проводится корреляционный анализ, позволяющий определить степень влияния каждого фактора на уровень грунтовых вод и исключить взаимозависимые параметры. Третий этап связан с построением регрессионного уравнения и подбором наиболее значимых переменных. Для этого используются методы пошагового отбора, позволяющие исключить факторы, не оказывающие существенного влияния на результат. На четвёртом этапе выполняется оценка качества модели с использованием статистических критериев, характеризующих достоверность полученных коэффициентов и точность аппроксимации исходных данных. Заключительным этапом является проверка модели на независимой выборке наблюдений. Такой подход позволяет оценить её способность прогнозировать уровень грунтовых вод в условиях, отличных от тех, на которых проводилось обучение модели.

Балансовые модели

Балансовые модели основаны на фундаментальном законе сохранения массы воды. [93,95] В отличие от эмпирических методов, которые выявляют статистические зависимости между входными и выходными параметрами, балансовый подход описывает реальные процессы поступления и расходования воды в пределах рассматриваемой территории. Основная идея заключается в том, что изменение запасов подземных вод определяется

разностью между объёмом поступающей и расходуемой воды. Благодаря этому можно не только спрогнозировать изменение уровня грунтовых вод, но и установить причины происходящих изменений. Балансовые модели применяются для:

– характеристики водообеспеченности района и возможностей ежегодного пополнения запасов подземных вод;

– изучения причин подтопления территорий;

– прогноза изменения уровня подземных вод;

– регулирования режима подземных вод в нужном направлении.

Для системы мониторинга в Ленинградской области балансовая модель позволяет количественно оценить вклад инфильтрации осадков, испарения, бокового притока и оттока в изменение уровня грунтовых вод, что критически важно при избыточном увлажнении и заболоченности региона.

Общее уравнение водного баланса имеет вид:

$$X + Y_1 + W_1 = Z + Y_2 + W_2 \pm \Delta U \quad (2.3)$$

где

X – атмосферные осадки;

Y_1 – поверхностный приток;

W_1 – подземный приток;

Z – испарение;

Y_2 – поверхностный отток;

W_2 – подземный отток;

ΔU – изменение запасов воды в системе.

В данной формуле учитываются все основные составляющие прихода и расхода воды. Применительно к грунтовым водам в приходную часть баланса входят инфильтрация атмосферных осадков, конденсация влаги,

боковой подземный приток, фильтрация из поверхностных водоёмов и вертикальные перетоки между водоносными горизонтами.

К расходным составляющим относятся испарение, транспирация растительности, боковой подземный отток и фильтрация в нижележащие горизонты.

Для выделенного участка в течение промежутка времени t изменение запасов подземных вод определяется взаимодействием приходных и расходных составляющих.

Приходная часть:

– A – инфильтрация атмосферных осадков (м³/год);

– K – конденсация водяных паров (м³/год);

– P_1 – боковой подземный приток (м³/год);

– P_2 – фильтрационные поступления из поверхностных водных источников (реки, озера) (м³/год);

– P_3 – переток из нижележащего водоносного горизонта (м³/год).

Расходная часть:

– E – испарение (включает испарение с поверхности грунтовых вод и транспирацию растений) (м³/год);

– S_1 – боковой отток (м³/год);

– S_2 – переток в нижележащий водоносный горизонт (м³/год).

При всех вводных общее балансовое уравнение для грунтовых вод будет иметь вид:

$$\Delta W = A + K + P1 + P2 + P3 - E - S1 - S2 \quad (2.4)$$

где ΔW – изменение запасов грунтовых вод за время t (м³).

Одним из наиболее важных параметров модели является инфильтрация атмосферных осадков. Она характеризует объём воды, который после выпадения осадков достигает водоносного горизонта. Для её определения применяются различные методы расчёта, включая

использование коэффициента инфильтрации и обратный расчёт по уравнению водного баланса.

Кроме инфильтрации, существенное значение имеют процессы подземного притока и оттока. Их оценка обычно выполняется на основе закона Дарси, который связывает расход подземных вод с гидравлическим уклоном и фильтрационными свойствами грунтов. Испарение также оказывает заметное влияние на режим грунтовых вод. Его интенсивность зависит от глубины залегания водоносного горизонта, климатических условий и характера растительного покрова. В условиях Ленинградской области, где грунтовые воды часто располагаются близко к поверхности, испарение, может быть, одной из основных статей расхода. Построение балансовой модели включает определение границ исследуемого участка, сбор гидрометеорологических данных, расчёт отдельных составляющих водного баланса и последующую проверку соответствия расчётных значений фактическим данным наблюдений.

Если на исследуемой территории выполняются наблюдения за режимом грунтовых вод, изменение их уровня может быть непосредственно связано с составляющими водного баланса. В этом случае используется следующее уравнение:

$$\mu \Delta h = A + k + P - E - S \quad (2.5)$$

где

Δh – среднее изменение уровня грунтовых вод за расчётный период t, м;

μ – коэффициент водоотдачи при понижении уровня или недостаток насыщения при его повышении (безразмерная величина);

A – инфильтрационное питание;

K – конденсация водяного пара;

P – суммарный подземный приток;

E – испарение;

S – подземный отток.

Изменение величины $\mu\Delta h$ зависит как от сезонных факторов, так и от многолетних гидрогеологических циклов. При увеличении запасов подземных вод значение Δh становится положительным, что соответствует подъёму уровня грунтовых вод. При уменьшении запасов наблюдается снижение уровня, и величина Δh принимает отрицательные значения. Для определения отдельных составляющих баланса применяется ряд расчётных методов, основанных на физических закономерностях формирования и движения подземных вод.

Инфильтрация атмосферных осадков

Инфильтрация представляет собой процесс проникновения атмосферных осадков через почвенно-грунтовую толщу с последующим поступлением воды в водоносный горизонт. Для большинства территорий именно инфильтрационное питание является одним из основных источников пополнения запасов грунтовых вод. Определение инфильтрации может выполняться несколькими способами.

Первый способ основан на использовании балансового уравнения и предполагает обратный расчёт неизвестной величины:

$$A = \mu\Delta h - K - P + E + S. \quad (3)$$

Такой подход позволяет определить объём инфильтрационного питания по известным составляющим водного баланса.

Второй способ связан с расчётом инфильтрационного питания территории по формуле:

$$G = M_{\text{ор}} \cdot F_{\text{Ор}} + W_{\text{уТ}} + O_C \cdot (F - F_{\text{пр}} \cdot \delta\text{пр} - \text{Fн} \cdot \delta\text{н} \cdot \beta) - \text{Ес} \cdot \text{Fпр} \quad (4)$$

где

G – общий объём инфильтрационного питания грунтовых вод;

*M*ор – оросительная норма зелёных насаждений;

*F*ор – площадь орошаемых территорий;

*W*ут – объем эксплуатационных и аварийных утечек из инженерных коммуникаций;

*O*с – количество атмосферных осадков;

F – общая площадь рассматриваемой территории;

*F*пр – площадь проницаемых поверхностей;

*F*н – площадь непроницаемых покрытий;

δпр – коэффициент стока с проницаемых поверхностей;

δн – коэффициент стока с непроницаемых поверхностей;

β – коэффициент отвода поверхностного стока в ливневую канализацию;

Ес – суммарное испарение.

Интенсивность питания определяется выражением:

$$P = \frac{G}{F \cdot T}, \quad (4)$$

где Т – расчетный период времени.

Третий способ основан на использовании коэффициента инфильтрации:

$$A = \alpha \cdot \text{Oc}, \quad (5)$$

где α характеризует долю атмосферных осадков, достигающих водоносного горизонта. Значение коэффициента зависит от состава и проницаемости грунтов. Для территорий, сложенных преимущественно моренными суглинками и глинистыми породами, характерны сравнительно невысокие значения α вследствие затруднённого проникновения воды в грунт.

Конденсация водяного пара

Конденсация представляет собой процесс перехода влаги из почвенного воздуха в жидкое состояние с последующим её накоплением в зоне аэрации. Несмотря на постоянное протекание данного процесса, его вклад в общий водный баланс обычно невелик. В большинстве практических расчётов величина конденсационного питания составляет доли миллиметра или несколько миллиметров в год и часто не оказывает заметного влияния на режим грунтовых вод. Поэтому во многих случаях данный член баланса допускается принимать равным нулю.

Подземный приток

Подземный приток объединяет несколько источников поступления воды в водоносный горизонт. Наиболее распространённой составляющей является боковой приток подземных вод, поступающих с прилегающих участков водосбора. Его расчёт выполняется на основе закона Дарси:

$$P^1 = \mathrm{Kf} \cdot i \cdot \omega, \qquad (6)$$

где

Kf – коэффициент фильтрации грунта,

i – гидравлический уклон,

ω — площадь живого сечения потока.

Другим источником питания является фильтрация воды из поверхностных водоёмов. Если уровень воды в реке или озере превышает уровень грунтовых вод, часть воды начинает просачиваться в грунт:

$$\mathrm{P_2} = \mathrm{Kf} \cdot (\mathrm{hрека} - \mathrm{hгрунт})/\mathrm{m} \cdot \mathrm{Lберега} \qquad (7)$$

где

*h*река и *h*грунт характеризуют уровни воды в водоеме и водоносном горизонте соответственно,

m – мощность проницаемого слоя,

*L*берега – длина участка взаимодействия.

Дополнительным источником питания может выступать вертикальный переток из нижележащих водоносных горизонтов:

$$\mathrm{P_З} = \mathrm{Kv} \cdot (\mathrm{hнапор} - \mathrm{hгрунт})/\mathrm{M} \cdot F, \quad (8)$$

где

Kv – коэффициент вертикальной фильтрации,

*h*напор – пьезометрический уровень напорного горизонта,

M – мощность разделяющего слоя,

F – площадь участка.

Общий подземный приток определяется суммой отдельных составляющих

Испарение

Испарение является одной из основных расходных статей водного баланса и характеризует потери воды в атмосферу. В его состав входят непосредственное испарение с поверхности грунтовых вод и транспирация влаги растительным покровом.

Суммарное испарение определяется выражением:

$$\mathrm{Ec} = \mathrm{E_0} \cdot \mathrm{Kб} \quad (9)$$

где E_0 представляет собой испарение с открытой водной поверхности, а *K*б учитывает влияние растительности. Интенсивность испарения существенно зависит от глубины залегания грунтовых вод. По мере увеличения расстояния от поверхности земли до водоносного горизонта влияние капиллярного поднятия влаги уменьшается, что приводит к сокращению испарительных потерь.

Для различных типов грунтов существует критическая глубина, после превышения которой испарение практически прекращается. Для песчаных грунтов она составляет 3–4 м, для супесей – 2–3 м, для суглинков – около 1,5–2 м.

Методика построения балансовой модели

Построение балансовой модели включает несколько последовательных этапов. На первом этапе определяются границы исследуемого участка и рассчитывается его площадь. Границы обычно устанавливаются по гидроизогипсам, водоразделам или другим естественным гидрогеологическим рубежам.

На втором этапе формируется информационная база, включающая сведения об уровне грунтовых вод, атмосферных осадках, температуре воздуха, гидрологических характеристиках поверхностных водных объектов и фильтрационных свойствах грунтов.

Третий этап связан с расчётом всех составляющих водного баланса. Для каждого расчётного интервала определяются величины инфильтрации, подземного притока, испарения, подземного оттока и других компонентов.

После этого составляется итоговое балансовое уравнение и выполняется анализ соответствия расчётных результатов фактическим изменениям уровня грунтовых вод.

Для каждого временного шага баланс записывается в виде:

$$\mu \Delta h_{\text{i}} = A_{\text{i}} + K_{\text{i}} + P_{\text{i}} - E_{\text{i}} - S_{\text{i}}. \quad (10)$$

Полученные результаты позволяют оценить роль отдельных процессов в формировании режима грунтовых вод и использовать модель для анализа гидрогеологических условий территории.

Фильтрационные модели

Фильтрационные модели представляют собой один из наиболее точных и физически обоснованных подходов к описанию режима грунтовых вод. Их основная задача заключается в моделировании процессов движения воды через пористую среду с учётом реальных свойств грунтов и гидрогеологических условий территории. В основе таких моделей лежат фундаментальные законы гидродинамики, прежде всего закон Дарси и уравнения нестационарной фильтрации. [98,100]

В отличие от эмпирических моделей, которые строятся на статистической обработке наблюдений, и балансовых моделей, рассматривающих водообмен в пределах исследуемого участка в усреднённом виде, фильтрационные модели позволяют анализировать пространственное распределение уровней грунтовых вод. Это даёт возможность оценивать изменения гидрогеологической обстановки не только во времени, но и в различных точках рассматриваемой территории.

Особую ценность данный подход представляет при исследовании сложных природных систем, где существенное влияние оказывают неоднородность грунтов, особенности рельефа и взаимодействие подземных вод с поверхностными водными объектами. Благодаря этому фильтрационные модели широко применяются при изучении процессов подтопления, проектировании дренажных систем, расчёте водопонизительных мероприятий и оценке последствий хозяйственной деятельности.

К основным преимуществам фильтрационных моделей относятся:

– использование физических закономерностей движения подземных вод;

– возможность учёта неоднородности гидрогеологических характеристик грунтов;

– моделирование движения воды в двух- и трёхмерном пространстве;

– описание взаимодействия между подземными водами и поверхностными водоёмами;

– возможность применения в условиях сложного геологического строения территории.

Для Ленинградской области использование фильтрационных моделей особенно актуально. Значительная заболоченность территории, наличие большого количества рек и озёр, а также высокий уровень грунтовых вод требуют детального анализа процессов водообмена и пространственного распределения подземных вод.

Теоретической основой большинства фильтрационных моделей является закон Дарси, устанавливающий связь между скоростью фильтрации воды и гидравлическим градиентом. Закон справедлив для ламинарного режима движения жидкости в пористой среде и используется в гидрогеологии уже более полутора столетий.

Согласно закону Дарси:

$$v = k_f \cdot I$$

где

v – скорость фильтрации (фиктивная скорость, отнесенная к полному сечению потока) (м/сут);

k_f – коэффициент фильтрации грунта (м/сут);

I – гидравлический градиент (безразмерный), равный $I = \frac{H}{l}$;

H – потеря напора на длине пути фильтрации l (м);

l – длина пути фильтрации (м).

Физический смысл данной зависимости заключается в том, что интенсивность движения воды возрастает при увеличении проницаемости

грунта и разности гидравлических напоров. Чем выше коэффициент фильтрации, тем легче вода перемещается через пористую среду.

Закон Дарси может быть также представлен через расход потока:

$$Q = k_f \cdot F \cdot I \cdot t$$

где

Q – расход фильтрационного потока (м³);

F – площадь поперечного сечения потока (м²);

t – время (сут).

Следует учитывать, что рассчитанная скорость фильтрации является условной величиной, поскольку поток воды движется только через поровое пространство грунта. Для определения действительной скорости движения воды используется зависимость:

$$v = \frac{q}{F} = \frac{Q}{F \cdot t}$$

где учитывается активная пористость грунта.

При моделировании пространственного движения подземных вод применяется векторная форма закона Дарси:

$$\vec{q} = -K \nabla h$$

где

$\vec{q}$ – вектор потока воды (м/сут);

K – тензор гидравлической проводимости (м/сут);

∇h – градиент напора (м/м).

Такое представление позволяет учитывать изменение направления движения потока в различных частях исследуемой области и является основой современных численных моделей.

Применимость закона Дарси ограничивается условиями ламинарного движения воды. Для проверки данного условия используется критерий Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} < 1$$

где

d – средний диаметр частиц грунта (см);

ν – кинематическая вязкость воды (≈ 0.01 см²/с при нормальной температуре).

Если значение критерия не превышает допустимых пределов, движение воды считается ламинарным, и закон Дарси может использоваться без дополнительных поправок.

Уравнение Ричардса

Для описания процессов переноса влаги в ненасыщенной зоне грунта используется уравнение Ричардса. Эта область располагается между поверхностью земли и уровнем грунтовых вод и играет важную роль в процессах инфильтрации атмосферных осадков.

Одномерное уравнение Ричардса имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(K(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + 1\right)\right) + f_3(x, y, t), H < y < H_p$$

где

$\theta(\psi)$ – объемная влажность (безразмерная);

ψ – давление почвенной влаги (м, отрицательное в зоне аэрации);

$K(\psi)$ – коэффициент влагопроводности (м/сут);

y – вертикальная координата, направленная вверх (м);

H – уровень грунтовых вод (м);

H_p – отметка поверхности земли (м);

f_3 – функция источников (инфильтрация R, испарение E, поглощение корнями e).

Данное уравнение позволяет учитывать поступление влаги в грунт, её перемещение под действием сил тяжести и капиллярных эффектов, а также расход воды на испарение и поглощение растительностью.

Важной особенностью модели является зависимость влажности и влагопроводности грунта от давления почвенной влаги:

$$\theta = \frac{m}{1+(-\psi/\mathrm{a})^{n_2}}, \psi < 0$$

$$K = k_f \left(\frac{\theta-\theta_1}{m-\theta_1}\right)^{n_1}, \psi < 0$$

где

m – пористость грунта (0.3–0.6);

θ_1 – остаточная влажность (0.05);

a, n_1, n_2 – эмпирические параметры ($a = 3, n_1 = 3, n_2 = 3$).

При $\psi \geq 0$: $K = k_f, \theta = m$ (полное насыщение).

Эти зависимости позволяют учитывать изменение фильтрационных свойств грунта по мере его насыщения водой. При полном насыщении параметры системы существенно отличаются от характеристик сухого или слабовлажного грунта.

Использование уравнения Ричардса особенно важно при анализе процессов снеготаяния и сильных осадков, когда происходит интенсивное поступление влаги в грунт и последующее повышение уровня грунтовых вод.

Разработка фильтрационной модели включает несколько последовательных этапов. На первом этапе определяется область моделирования. Границы расчётной области обычно устанавливаются по водоразделам, гидроизогипсам или другим естественным гидрогеологическим рубежам.

После этого создаётся расчётная сетка, которая разбивает территорию на отдельные ячейки.

На втором этапе задаются начальные условия, характеризующие распределение уровней грунтовых вод в момент начала моделирования. Эти данные получают по результатам наблюдений или путём интерполяции имеющихся измерений.

Третий этап связан с определением граничных условий. Они описывают взаимодействие моделируемой области с окружающей средой. В качестве границ первого рода обычно выступают реки, озёра и другие водоёмы с известным уровнем воды. Границы второго рода используются для описания участков, через которые отсутствует приток или отток воды.

Далее задаются основные параметры грунтов: коэффициенты фильтрации, пористость, водоотдача и другие характеристики, определяющие интенсивность движения подземных вод. Значения этих параметров получают по результатам лабораторных исследований, буровых работ и гидрогеологических наблюдений. Для условий Ленинградской области характерно наличие моренных суглинков с низкой проницаемостью и песчаных отложений с более высокими фильтрационными свойствами. Поэтому пространственное распределение параметров грунта является одним из ключевых факторов при построении модели. После задания всех исходных данных выполняется дискретизация уравнений фильтрации. Непрерывная математическая модель преобразуется в систему конечно-разностных уравнений, которая может быть решена численными методами с использованием вычислительной техники.

Фильтрационные модели являются наиболее физически обоснованным инструментом исследования режима грунтовых вод. Они позволяют учитывать реальные свойства грунтов, пространственную неоднородность территории и взаимодействие подземных вод с поверхностными водными объектами.

Для условий Ленинградской области такие модели особенно полезны при анализе процессов подтопления, оценке причин заболачивания и разработке инженерных мероприятий по регулированию водного режима. Вместе с тем их применение требует значительного объёма исходной информации и достаточно высоких вычислительных ресурсов, что ограничивает возможность использования данного подхода для оперативного мониторинга в автоматизированных системах наблюдений.

Динамические модели

Динамические модели используются для описания и прогнозирования изменений уровня грунтовых вод во времени. [91,92] В отличие от других типов моделей, которые в основном ориентированы на оценку состояния системы в конкретный момент или за определённый расчётный период, динамический подход позволяет анализировать временную структуру наблюдений и прогнозировать дальнейшее развитие процессов.

Основой таких моделей являются временные ряды, формируемые по данным регулярных наблюдений. В современных системах мониторинга, оснащённых гидростатическими датчиками, информация о положении уровня грунтовых вод поступает непрерывно или через небольшие интервалы времени. Это создаёт благоприятные условия для применения методов анализа временных рядов и построения прогнозных моделей.

Главной особенностью динамических моделей является возможность учитывать характерные закономерности изменения уровня грунтовых вод: долговременные тенденции, сезонные колебания, циклические процессы и зависимость текущих значений от предыдущих наблюдений. Благодаря этому обеспечивается более точное прогнозирование поведения водоносного горизонта на ближайшие дни, недели или месяцы.

К числу основных преимуществ динамических моделей относятся:

– использование данных многолетних наблюдений;

– возможность выявления долгосрочных тенденций изменения уровня грунтовых вод;

– учёт сезонных колебаний, связанных с климатическими особенностями региона;

– анализ автокорреляционных связей между последовательными измерениями;

– возможность построения краткосрочных и среднесрочных прогнозов;

– адаптация модели по мере накопления новых данных наблюдений.

Для территории Ленинградской области данный подход представляет особый интерес. Режим грунтовых вод здесь характеризуется ярко выраженной сезонностью. Весной наблюдается интенсивный подъём уровня вследствие снеготаяния, летом происходит его снижение под воздействием испарения и водопотребления растительностью, а осенью уровень вновь повышается из-за увеличения количества атмосферных осадков. Такие закономерности хорошо выявляются при анализе временных рядов и могут эффективно использоваться для прогнозирования.

В основе динамического моделирования лежит временной ряд, представляющий собой последовательность значений уровня грунтовых вод, зарегистрированных через одинаковые промежутки времени.

$$\{h_t\} = \{h_1, h_2, \dots, h_n\} \quad (11)$$

где h_t – уровень грунтовых вод в момент времени t (м).

Компоненты временного ряда представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Компоненты временного ряда

Компонент	Обозначение	Физический смысл
Тренд	T_t	Долгосрочное изменение (многолетнее понижение/подъем)
Сезонность	S_t	Периодические колебания (годовые, сезонные)
Цикличность	C_t	Колебания с непериодической длиной (3–5 лет)
Случайная составляющая	ε_t	Шум, непредсказуемые отклонения

Каждое наблюдение отражает состояние гидрогеологической системы в определённый момент времени и может рассматриваться как результат воздействия различных природных и антропогенных факторов. При анализе временных рядов обычно выделяют несколько основных компонентов.

Тренд характеризует долговременное изменение уровня грунтовых вод. Его наличие может быть связано с климатическими изменениями, изменением режима водопользования или другими факторами, оказывающими влияние на систему в течение длительного периода.

Сезонная составляющая отражает регулярно повторяющиеся колебания уровня воды. Для Ленинградской области такие изменения прежде всего обусловлены снеготаянием, распределением осадков по сезонам и особенностями испарения.

Циклическая составляющая описывает более продолжительные колебания, периодичность которых не является строго фиксированной.

Подобные изменения могут быть связаны с многолетними климатическими циклами или особенностями водообмена на территории.

Случайная составляющая включает непредсказуемые изменения уровня грунтовых вод, возникающие под влиянием кратковременных природных явлений или погрешностей измерений.

Для описания структуры временного ряда широко применяется аддитивная модель:

$$h_t = T_t + S_t + C_t + \varepsilon_t \quad (12)$$

В случаях, когда амплитуда сезонных колебаний изменяется вместе с общим уровнем ряда, может использоваться мультипликативная модель.

Для условий Ленинградской области наиболее целесообразно применение аддитивной схемы, поскольку сезонные изменения уровня грунтовых вод имеют относительно стабильную амплитуду. Одним из важных этапов построения динамической модели является анализ стационарности временного ряда. Стационарным считается ряд, статистические характеристики которого остаются постоянными во времени.

$$h_t = T_t \times S_t \times C_t \times \varepsilon_t \quad (13)$$

На практике ряды наблюдений за уровнем грунтовых вод редко являются стационарными. Обычно это связано с наличием трендов и выраженной сезонности. Для устранения подобных эффектов применяется процедура дифференцирования.

$$E[h_t] = \mu = \text{const}, \text{var}(h_t) = \sigma^2 = \text{const} \quad (14)$$

После преобразования ряда проводится повторная проверка его свойств. Для оценки стационарности используются графический анализ,

исследование автокорреляционных функций и статистические критерии, включая тест Дики–Фуллера.

Автокорреляционный анализ

Важной особенностью временных рядов гидрогеологических наблюдений является наличие зависимости между текущими и предыдущими значениями уровня грунтовых вод. Для количественной оценки такой связи используется показатель автокорреляции.

Коэффициент автокорреляции определяется следующим выражением:

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^{n}(h_t - \bar{h})\ (h_{t-k} - \bar{h})}{\sum_{t=1}^{n}(h_t - \bar{h})^2} \quad (15)$$

где

r_k – коэффициент автокорреляции лага k;

$\bar{h}$ – среднее значение ряда.

Высокие значения коэффициента свидетельствуют о том, что изменения уровня грунтовых вод происходят постепенно и сохраняют связь с предыдущими состояниями системы. Это характерно для большинства гидрогеологических процессов, поскольку подземные воды обладают значительной инерционностью.

Для исследования структуры временного ряда используются автокорреляционная функция (*ACF*) и частная автокорреляционная функция (*PACF*).

Автокорреляционная функция позволяет определить степень влияния предыдущих наблюдений на текущее значение уровня грунтовых вод.

Частная автокорреляционная функция используется для выявления прямых связей между значениями ряда на различных временных лагах без учёта промежуточных наблюдений.

Результаты анализа *ACF* и *PACF* широко применяются при построении прогнозных моделей типа *ARIMA* и других методов обработки временных рядов.

В современных системах мониторинга динамические модели используются для оперативного прогнозирования уровня грунтовых вод и раннего выявления неблагоприятных гидрогеологических процессов. Наиболее востребованными являются методы *ARIMA*, *Prophet*, *GRU* и *LSTM*, позволяющие анализировать большие массивы данных и строить прогнозы с высокой точностью.

Для сети гидростатических датчиков динамический подход особенно эффективен благодаря постоянному поступлению новых измерений. По мере накопления информации модель может регулярно уточняться, что повышает надёжность прогнозов и позволяет своевременно выявлять угрозу подтопления территорий.

Динамические модели являются эффективным инструментом прогнозирования уровня грунтовых вод на основе временных рядов наблюдений. Их применение позволяет учитывать долгосрочные тенденции, сезонные колебания и внутреннюю структуру данных, что существенно повышает точность прогнозов.

Для условий Ленинградской области данный подход представляет значительный практический интерес благодаря выраженной сезонности режима грунтовых вод и возможности автоматизированного сбора данных с гидростатических датчиков. Вместе с тем эффективность таких моделей напрямую зависит от объёма и качества накопленных наблюдений, поэтому наилучшие результаты достигаются при длительном и непрерывном мониторинге.

2.3 Математическое описание уровня грунтовых вод

Уровень грунтовых вод является одной из основных характеристик гидрогеологического состояния территории. Его положение определяется совокупным воздействием природных и антропогенных факторов, среди которых наибольшее значение имеют атмосферные осадки, процессы инфильтрации, испарение, подземный водообмен и взаимодействие с поверхностными водными объектами. Изменение любого из перечисленных факторов приводит к изменению запасов воды в водоносном горизонте и, как следствие, к колебаниям уровня грунтовых вод. [97,101]

С точки зрения гидрогеологии водоносный горизонт можно рассматривать как динамическую систему, в которой непрерывно происходят процессы поступления и расходования воды. При увеличении объёма поступающей воды происходит повышение уровня грунтовых вод, а при преобладании расходных процессов наблюдается его снижение. Для количественного описания этих изменений используются математические модели, основанные на законах сохранения массы и движения жидкости в пористой среде.

Основой математического описания служит уравнение водного баланса. Оно отражает взаимосвязь между всеми источниками поступления воды в водоносный горизонт и её потерями за рассматриваемый промежуток времени.

$$\frac{d\varsigma}{\mathrm{dt}} = d(t) \qquad (16)$$

Данное уравнение показывает, что изменение уровня грунтовых вод определяется разностью между приходной и расходной частями водного баланса. К приходным составляющим относятся инфильтрация

атмосферных осадков, подземный приток и поступление воды из поверхностных водоёмов. Расходная часть включает испарение, транспирацию растительности и подземный отток [102, 103].

Наиболее важным источником пополнения запасов грунтовых вод является инфильтрация атмосферных осадков. После выпадения осадки частично испаряются, частично формируют поверхностный сток, а оставшаяся часть проникает в грунт и достигает водоносного горизонта. Количество инфильтрующейся воды зависит от интенсивности осадков, свойств грунта, рельефа местности и степени увлажнения почвы.

Процессы движения воды в грунте описываются законом Дарси, который устанавливает связь между скоростью фильтрации и гидравлическим градиентом.

Согласно данному закону, скорость движения подземных вод возрастает при увеличении проницаемости грунта и разности гидравлических напоров. Благодаря этому становится возможным оценить направление движения подземного потока и интенсивность водообмена между различными участками водоносного горизонта.

Для описания процессов изменения уровня грунтовых вод в насыщенной зоне используется уравнение фильтрации, учитывающее движение воды в пористой среде и влияние внешних источников питания:

$$\mu \frac{\mathrm{dн}}{\mathrm{dt}} = \frac{d}{\mathrm{dx}}\left(\mathrm{Кп}\frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{dx}}\right) + \frac{d}{\mathrm{dy}}\left(\mathrm{Кп}\frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{dy}}\right) + \mathrm{pounds2}(x, y, t) \qquad (17)$$

где

H – уровень грунтовых вод или пьезометрический напор;

μ – коэффициент водоотдачи водоносного горизонта;

k_n – коэффициент пьезопроводности;

$\xi_2(x, y, t)$ – функция внешнего питания, учитывающая поступление воды в водоносный горизонт.

Данное уравнение отражает основные закономерности формирования режима грунтовых вод. Изменение уровня во времени определяется не только притоком воды, но и фильтрационными свойствами грунтов, а также условиями водообмена на границах рассматриваемой территории. Таким образом, уровень грунтовых вод является результатом совместного воздействия нескольких взаимосвязанных процессов.

Физический смысл уравнения заключается в том, что любое изменение запасов подземных вод сопровождается перераспределением напоров внутри водоносного горизонта. Чем выше проницаемость грунтов, тем быстрее происходит выравнивание уровней и перемещение воды в пределах исследуемой области. Внешние источники питания, такие как атмосферные осадки, инфильтрация поверхностных вод и подземный приток, вызывают изменение напора и влияют на положение уровня грунтовых вод. Использование математического аппарата позволяет не только анализировать текущее состояние водоносного горизонта, но и выполнять прогнозирование его дальнейшего поведения. Полученные результаты могут применяться для оценки риска подтопления территорий, контроля гидрогеологических условий и принятия решений в области природопользования и инженерной защиты объектов.

Таким образом, математическое описание уровня грунтовых вод основывается на комплексном учёте процессов поступления, движения и расходования воды в грунтах. Совместное использование уравнений водного баланса, законов фильтрации и методов анализа временных рядов позволяет наиболее полно описать режим грунтовых вод и получить надёжную основу для их прогнозирования.

2.4 Выбор модели для сети гидростатических датчиков

В предыдущих разделах были рассмотрены основные подходы к моделированию уровня грунтовых вод: эмпирические, балансовые, фильтрационные и динамические модели. Каждый из этих подходов обладает определёнными преимуществами и ограничениями, поэтому выбор конкретной модели должен основываться на целях исследования, особенностях объекта наблюдения и требованиях к точности прогнозирования [97, 103, 104].

Основной задачей разрабатываемой системы является непрерывный контроль уровня грунтовых вод и получение прогноза его изменения на основе данных, поступающих от сети гидростатических датчиков. В связи с этим модель должна обеспечивать возможность оперативной обработки информации, обладать достаточной точностью расчётов и не требовать чрезмерных вычислительных ресурсов.

Балансовые модели позволяют анализировать процессы формирования уровня грунтовых вод через приходные и расходные составляющие водного баланса. Такой подход обладает высокой физической наглядностью и позволяет оценивать влияние отдельных факторов на гидрогеологический режим территории. Однако применение балансовых моделей требует определения большого количества параметров, многие из которых изменяются во времени и могут быть определены только приближённо. Это приводит к накоплению погрешностей и снижению точности прогноза.

Фильтрационные модели обеспечивают наиболее полное описание процессов движения подземных вод. Их использование позволяет учитывать пространственную неоднородность грунтов, особенности геологического строения территории и взаимодействие подземных вод с поверхностными водоёмами. Вместе с тем реализация таких моделей требует значительного объёма гидрогеологической информации и проведения сложных вычислений. По этой причине применение

фильтрационного моделирования целесообразно преимущественно при решении специализированных инженерных и научных задач.

Динамические модели ориентированы на анализ временных рядов и позволяют учитывать сезонные колебания, тренды и циклические изменения уровня грунтовых вод. Они хорошо подходят для прогнозирования поведения системы во времени, однако для получения устойчивых результатов обычно необходимы длительные ряды наблюдений и регулярная корректировка параметров модели.

Наиболее рациональным решением для рассматриваемой системы является использование эмпирической модели, основанной на методе множественной линейной регрессии. Данный подход позволяет установить количественную связь между уровнем грунтовых вод и факторами, оказывающими на него влияние, а также использовать полученные зависимости для прогнозирования дальнейших изменений.

Общий вид модели множественной линейной регрессии может быть представлен следующим выражением:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_n X_n + \varepsilon \qquad (18)$$

где

Y – прогнозируемый уровень грунтовых вод;

β_0 – свободный член модели;

$\beta_1 \ldots \beta_n$ – коэффициенты регрессии;

$X_1 \ldots X_n$ – факторы, влияющие на изменение уровня грунтовых вод;

ε – случайная ошибка модели.

Преимуществом данного подхода является возможность получения прогноза на основе статистически выявленных закономерностей без необходимости детального описания процессов фильтрации и водообмена. Кроме того, регрессионная модель обладает сравнительно простой структурой, что позволяет выполнять расчёты в автоматическом режиме и оперативно обновлять результаты по мере поступления новых измерений.

Ещё одним важным достоинством эмпирического подхода является возможность оценки влияния каждого фактора на изменение уровня грунтовых вод. Анализ коэффициентов регрессии позволяет определить наиболее значимые параметры и оценить степень их воздействия на исследуемый процесс.

Сравнение рассмотренных методов показывает, что именно эмпирическая регрессионная модель в наибольшей степени соответствует задачам оперативного мониторинга и прогнозирования уровня грунтовых вод. Она обеспечивает приемлемую точность расчётов, отличается сравнительно невысокими требованиями к вычислительным ресурсам и легко интегрируется в автоматизированную систему сбора и обработки данных.

Таким образом, в качестве математической основы системы мониторинга уровня грунтовых вод выбрана модель множественной линейной регрессии. Её использование позволит выполнять анализ текущего состояния водоносного горизонта, выявлять тенденции изменения уровня грунтовых вод и формировать прогнозы для последующего принятия управленческих решений [97, 103, 104].

3 Метеорологический факторы влияющие, на уровень грунтовых вод

Взаимосвязь метеорологических и гидрологических процессов

Ключевой причиной непрерывной связи метеорологии и гидрологии является существование глобального гидрологического цикла – непрерывного процесса циркуляции воды между оболочками Земли. В рамках этого цикла вода постепенно меняет свои агрегатные состояния последовательно перемещаясь из одной оболочки в другую. Движущей силой всех этапов являются метеорологические факторы.

Хотелось бы рассмотреть пример, доказывающий выше написанное:

Под действием солнечной, поступающей на верхнюю границу атмосферы происходит испарение с поверхности водоемов, переводящих воду из жидкого агрегатного состояния – в состояние водяного пара. Перенос этого пара осуществляется системой атмосферной циркуляции-глобальными или региональными ветрами, циклонами и антициклонами. При определенных термодинамических условиях (достижение состояния насыщения, наличие ядер конденсации) пар начинает конденсироваться, образуя облака и выпадает на поверхность земли в виде осадков.

Замкнутость этого цикла подчеркивает, что любой гидрологическим процесс является прямым следствием протекания определенных метеорологических явлений. Выпавшие осадки частично инфильтрируются в грунт, пополняя подземные воды. В свою очередь грунтовые воды обеспечивают устойчивый сток рек в засушливые периоды и влияют на локальное испарение, замыкая гидрологический цикл.

Понятие уровня грунтовых вод

Грунтовые воды – подземные воды, залегающие на первичном от поверхности земли слое, и не имеющие сверху сплошной водоупорной

кровли, а также свободно сообщающиеся с атмосферой и поверхностными водами. Основными характеристиками грунтовых вод являются:

– свободная поверхность. Уровень воды непостоянен и напрямую зависит от деятельности человека, атмосферных осадков, времени года;
– изменчивость режима. Уровень поднимается весной и после продолжительных осадков, а опускается зимой и после продолжительных засух соответственно;
– питание в основном за счет атмосферных осадков и талых вод;
– пресное или слабоминерализованное качество, легко загрязняющиеся биологически или химически из-за отсутствия защитного слоя.

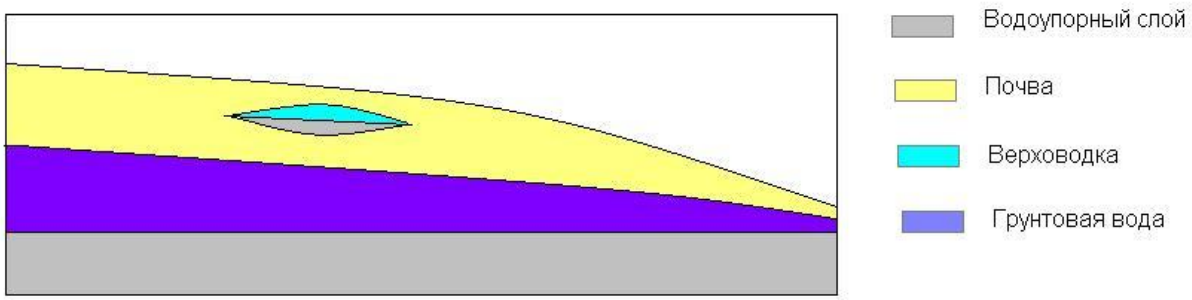


Рисунок 10 – Строение грунтовых вод.

Грунтовые воды формируются в основном за счёт инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод. Область питания грунтовых вод обычно совпадает с областью распространения водоносного горизонта. Мощность горизонта непостоянна и зависит от свойств водосодержащих пород, расстояния до области разгрузки, интенсивности питания. Главная характерная особенность грунтовых вод, отличающая их от более глубоких артезианских вод этого отсутствия напора.

Наиболее существенное влияние на режим грунтовых вод оказывают:

– гидравлические условия:

– изменение режима поверхностных водоемов. Режим водоема – многолетнее, сезонное и суточное изменение его уровня, температуры,

химического состава. В этом случае наблюдается простая, логичная зависимость: в случае паводков, половодья и создания водохранилищ (повышения уровня воды в водоеме) УГВ будет повышаться. В случае снижения уровня воды в водоеме будет понижаться. Интереснее ситуация с многолетними климатическими трендами- здесь будет наблюдаться долговременное снижение УГВ. Красочным примером является высыхание Аральского моря, что привело к падению уровня на десятки метров вокруг:

- взаимодействие водоносных горизонтов. В случаях подпитки верхнележащего горизонта из нижних, УГВ верхнего горизонта будет падать медленнее или будет иметь небольшой прирост. В обратном случае- снижение уровня верхнего горизонта.

Хозяйственная деятельность человека:

- строительство гидротехнических сооружений. При строительстве платин и водохранилищ наблюдается подъем уровня. В отличии от постройки дамб и набережные – здесь отчетливо заметно снижение уровня в пойме на прилегающих площадях, объем, который может доходить до нескольких сотен метров ввиду прерывания естественной связи питания реки и поймы;

- откачка воды из нефти и недр. Откачка воды становится значимым долгосрочным фактором, уменьшение может проявляться как через несколько десятков месяцев, так и лет на площади десятков километров;

- добыча полезных ископаемых. Все зависит от методы добычи полезных ископаемых. Для открытого и шахтного способов следует резкое опускание уровня, с конечным повышением, в некоторых случаях, доходящим до затопления территории (шахтный способ). При добычи гидравликой происходит локальное исчезновение грунтового горизонта без возможности его восстановления;

– удобрение сельскохозяйственных земель. При орошении почвы формируется подъем, особенно на орошаемом участке.
– Метеорологические факторы:

– количество и характер атмосферных осадков;
– снеготаяние;
– температура воздуха;
– испаряемость и дефицит влажности воздуха;
– ветер;
– атмосферное давление;
– облачность и солнечная радиация.

Далее мы более подробно рассмотрим каждый из этих метеорологических факторов и их непосредственное влияние.

3.1 Факторы влияния метеорологических параметров на уровень грунтовых вод и их краткое описание

Атмосферные осадки

Атмосферные осадки являются основным источником питания для большей части грунтовых вод во влажных и умеренных зонах. Существует нелинейная зависимость между количество осадков и уровнем грунтовых вод (чем выше количество осадков, тем соответственно будет выше потенциальный уровень подъема, при этом часть осадков будет испаряться, а часть уходить в поверхностный сток).

Классификация осадков в прогнозах

№	ПРОГНОЗ	КОЛИЧЕСТВО ОСАДКОВ, мм/12ч	
		Для жидких и смешанных осадков	Для твердых осадков
1	Без осадков (без существенных осадков)	< 0,3	< 0,2
2	Слабые осадки (дождь, снег)	0,0 – 3,0 (но не без осадков)	0,0 – 2,0 (но не без осадков)
3	Умеренные осадки (дождь, снег)	4,0 – 14,0	3.0 – 6,0
4	Сильные осадки (дождь, снег)	15,0 – 49,0	7,0 – 19,0
5	Очень сильные осадки (дождь, снег)	> 50,0	> 20,0

Рисунок 11 – Классификация осадков в прогнозах.

Исходя, из этого рисунка можно сделать вывод о том, что малое количество осадков наиболее эффективно для подъема уровня грунтовых, так как в этом случае вся вода успевает впитаться, в отличии от осадков средней и высокой интенсивности, где большая часть осадков попадает в сток.

Снеготаяние

Снежный покров выполняет роль естественного аккумулятора атмосферных осадков холодного периода, а его таяние весной формирует период максимального инфильтрационного питания грунтовых вод. Высота снежного покрова, запасы воды в снеге, интенсивность и продолжительность снеготаяния определяют объем весеннего пополнения грунтовых вод. В условиях Санкт-Петербурга снежный покров формируется в ноябре-декабре и сохраняется до марта-апреля, обеспечивая значительную долю годового инфильтрационного питания грунтовых вод в период весеннего половодья.

Влияние ледового режима поверхностных водоемов и промерзания почво-грунтов также сказывается на динамике уровня грунтовых вод. Промерзание зоны аэрации существенно снижает или полностью прекращает инфильтрационное питание грунтовых вод в зимний период, создавая условия для разгрузки подземных вод и снижения их уровней. Глубина промерзания зависит от температурного режима, высоты снежного покрова, литологического состава и влажности грунтов. В засушливых регионах с малоснежными зимами, таких как Астраханская область, глубина промерзания может достигать значительных величин, что влияет на формирование зимних минимумов уровней грунтовых вод.

Температура воздуха

Температурный режим атмосферы оказывает комплексное влияние на режим грунтовых вод.

Во-первых, температура воздуха определяет фазовое состояние атмосферных осадков и почвенной влаги, влияя на процессы промерзания и оттаивания зоны аэрации, что особенно значимо для территорий с устойчивым снежным покровом.

Во-вторых, температура является ключевым фактором, определяющим интенсивность испарения с поверхности почвы и транспирации растительностью, которые в совокупности формируют суммарное испарение (эвапотранспирацию). В засушливых регионах суммарное испарение может значительно превышать количество атмосферных осадков, что приводит к отрицательному водному балансу и снижению уровней грунтовых вод в теплый период года.

Испаряемость и дефицит влаги воздуха

Испаряемость – это потенциально возможное испарение с водной поверхности или из полностью увлажненной почвы при данных метеорологических условиях (температуре, влажности воздуха, ветре, солнечной радиации).

Дефицит влаги, в свою очередь, представляет собой разницу между испаряемостью и фактическим количеством выпавших атмосферных осадков. Чем больше испаряемость превышает осадки, тем выше дефицит влаги. Именно это и запускает цепочку процессов, оказывающих прямое и косвенное воздействие на уровень грунтовых вод.

Первое и наиболее очевидное влияние заключается в том, что высокий дефицит влаги и связанная с ним интенсивная испаряемость приводят к

прямому снижению уровня грунтовых вод. Этот процесс развивается поэтапно. На начальной стадии под воздействием сухого и жаркого воздуха происходит интенсивное испарение влаги с поверхности почвы и транспирация растений. Если дефицит влаги сохраняется длительное время, корнеобитаемый слой почвы полностью иссушается. Далее в дело вступают капиллярные силы: иссушенный верхний горизонт начинает активно "отсасывать" влагу из нижележащих слоев, включая зону капиллярной каймы, которая располагается непосредственно над зеркалом грунтовых вод. При неглубоком залегании грунтовых вод (в пределах первых метров) капиллярная кайма может достигать поверхности, и вода из нее начинает беспрепятственно испаряться в атмосферу. Фактически, сухой воздух работает как мощный насос, непрерывно удаляя влагу из подземных горизонтов. В результате этого процесса зеркало грунтовых вод постепенно опускается. Чем выше испаряемость и чем дольше сохраняется дефицит осадков, тем быстрее и глубже происходит это опускание.

Второе, не менее важное влияние является косвенным и связано с питанием грунтовых вод. Для того чтобы уровень грунтовых вод оставался стабильным или повышался, необходимо постоянное пополнение запасов за счет инфильтрации атмосферных осадков. Высокий дефицит влаги означает, что выпадающие осадки (если они вообще выпадают) практически полностью расходуются на испарение и транспирацию, не достигая уровня грунтовых вод. Даже ливневые дожди в условиях сильной иссушенности почвы часто не дают эффективного пополнения, так как влага задерживается в верхних горизонтах и быстро испаряется обратно.

Таким образом, дефицит влаги одновременно и усиливает "выкачивание" воды из земли, и перекрывает каналы ее пополнения. В результате баланс грунтовых вод становится резко отрицательным, что приводит к устойчивому и долговременному снижению их уровня, а в ряде случаев и к полной деградации водоносных горизонтов.

Однако характер и интенсивность этого влияния зависят от ряда дополнительных факторов. Ключевое значение имеет глубина залегания грунтовых вод.

Также важны тип почв и характер растительного покрова. Песчаные почвы, имея слабую капиллярность, медленнее подтягивают воду снизу, но при этом быстрее теряют влагу из верхних горизонтов. Глинистые почвы обладают отличной капиллярностью и могут эффективнее "выкачивать" воду из грунтовых вод, ускоряя их истощение. Растения с глубокой стержневой корневой системой способны напрямую достигать зеркала грунтовых вод и интенсивно транспортировать влагу, что также ведет к понижению уровня.

В итоге влияние дефицита влаги и испаряемости на уровень грунтовых вод является критическим и многоаспектным. Высокая испаряемость в сочетании с недостатком осадков ведет к прямому откачиванию влаги из подземных горизонтов через капиллярную кайму и к прекращению их инфильтрационного питания. Это один из главных механизмов формирования засушливых и полузасушливых ландшафтов, опустынивания и деградации водных ресурсов.

Ветер

Влияние ветра на уровень грунтовых вод – это классический пример косвенного, но весьма значимого фактора, который часто недооценивают. Сам по себе ветер не может "выдуть" воду из глубоких слоев земли, но он кардинально меняет условия испарения, что напрямую сказывается на балансе подземных вод.

Основной механизм влияния ветра на грунтовые воды связан с его воздействием на испаряемость. Испаряемость – это потенциально возможное испарение при данных метеоусловиях. Ветер сдувает

насыщенный водяными парами пограничный слой воздуха, который всегда формируется над влажной поверхностью (будь то водная гладь, мокрая почва или лист растения). Удаляя этот влажный воздух, ветер постоянно поддерживает высокий градиент влажности между испаряющей поверхностью и атмосферой. Чем сильнее ветер, тем быстрее происходит этот процесс, и тем выше становится испаряемость. Следовательно, ветер выступает в роли мощного катализатора испарения, особенно в условиях сухого и теплого климата.

Этот процесс напрямую влияет на уровень грунтовых вод, когда зеркало подземных вод залегает относительно неглубоко (обычно до 3–5 метров). В такой ситуации над уровнем грунтовых вод существует зона капиллярного поднятия. Ветер, усиливая испарение с поверхности почвы, иссушает верхние горизонты. Это вызывает подтягивание влаги из нижележащих слоев по капиллярам. Если интенсивность этого "вытягивания" достаточно высока, капиллярная кайма достигает зоны активного испарения, и вода начинает напрямую теряться из грунтового горизонта.

Фактически, сильный и устойчивый ветер работает как насос, непрерывно откачивающий воду из-под земли в атмосферу. В результате уровень грунтовых вод начинает постепенно, но неуклонно снижаться. Особенно ярко это влияние проявляется в засушливых и полузасушливых регионах, где грунтовые воды часто являются основным источником влаги. В пустынях и степях сильные ветры в сочетании с высокими температурами и низкой влажностью воздуха приводят к колоссальным потерям воды на испарение. Именно этот механизм является одной из главных причин засоления почв. При этом сам уровень грунтовых вод неуклонно падает, что может привести к полной деградации неглубоких водоносных горизонтов.

Важно различать влияние ветра на грунтовые воды в разных климатических зонах. В гумидных (влажных) регионах с частыми осадками и высоким стоянием грунтовых вод ветер также усиливает испарение, но его

влияние на уровень часто нивелируется обильным инфильтрационным питанием. Однако даже там на открытых пространствах (поля, луга, водохранилища) ветер может быть причиной существенных сезонных колебаний уровня грунтовых вод в засушливые периоды.

Также огромное значение имеет скорость ветра. Штилевая погода способствует сохранению влаги, в то время как длительные, штормовые ветры способны за сравнительно короткий срок заметно понизить уровень грунтовых вод на значительной площади.

Атмосферное давление

Атмосферное давление влияет на уровень грунтовых вод напрямую через барометрический эффект, который наиболее ярко проявляется в напорных горизонтах и глубоких закрытых скважинах.

Механизм таков: при росте атмосферного давления вес воздушного столба давит на перекрывающие породы, выдавливая воду из скважины обратно в пласт, что приводит к понижению уровня воды; при падении давления нагрузка уменьшается, и вода из пласта поднимается по стволу скважины, фиксируя повышение уровня. Это обратная пропорциональная связь, и изменение уровня может достигать нескольких сантиметров в сутки при прохождении циклонов, при этом реальный объем воды в пласте не меняется. Чувствительность (барометрический коэффициент) обычно составляет 5–8 мм на 1 гПа. В безнапорных неглубоких грунтовых водах, непосредственно сообщающихся с атмосферой, этот эффект практически не проявляется.

Облачность и солнечная радиация

Солнечная радиация и облачность оказывают на уровень грунтовых вод сильное, но всегда косвенное и разнонаправленное влияние, которое сводится к управлению двумя конкурирующими процессами: испарением и инфильтрацией.

Высокая солнечная радиация в условиях ясного неба резко усиливает испарение с поверхности почвы и транспирацию растений, действуя как мощный насос, выкачивающий воду из грунтовых горизонтов, что приводит к снижению их уровня.

Облачность, в свою очередь, выполняет двойную роль: с одной стороны, она снижает испаряемость, затеняя поверхность и уменьшая приток тепла (особенно важна плотная низкая облачность в теплое время года); с другой стороны, а самое главное – облака являются единственным источником осадков (дождя и снега), которые пополняют запасы подземных вод.

Наиболее эффективное пополнение грунтовых вод происходит не в ясную погоду, а в периоды длительной слоисто-дождевой облачности, которая обеспечивает продолжительные, умеренные осадки с высокой инфильтрацией и одновременно снижает потери на испарение. В годовом цикле максимум уровня грунтовых вод обычно наблюдается осенью, когда солнечная радиация минимальна, облачность частая, а испарение слабое, а минимум – в конце лета, после длительного периода высокой радиации и связанной с ней интенсивной эвапотранспирации-процесса переноса воды с земной поверхности, включающего испарение и транспирацию.

Таким образом, управление режимом грунтовых вод через климатические факторы облачности и радиации является ключевым для понимания гидрологии засушливых территорий и прогноза многолетних колебаний уровня подземных вод.

3.2 Методы измерения параметров, характеризующих метеорологические факторы влияния на уровень грунтовых вод

Нормативно-методическая база гидрометеорологических и гидрогеологических наблюдений в системе Росгидромета

Система гидрометеорологических и гидрогеологических наблюдений в Российской Федерации организована в соответствии с нормативно-методическими документами Росгидромета и обеспечивает получение репрезентативной информации о состоянии атмосферы, поверхностных и подземных вод. Нормативная база наблюдений включает федеральные законы, государственные стандарты, руководящие документы, методические указания и инструкции, регламентирующие порядок организации сети наблюдений, методы проведения измерений, обработки и передачи гидрометеорологической информации [63].

Федеральный закон от 19.07.1998 № 113-ФЗ «О гидрометеорологической службе» определяет правовые основы деятельности единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в части гидрометеорологических наблюдений и прогнозов. Закон устанавливает, что государственная наблюдательная сеть включает метеорологические станции, гидрологические посты, гидрогеологические посты, аэрологические станции и другие пункты наблюдений, обеспечивающие систематический мониторинг состояния окружающей среды. Наблюдения на государственной наблюдательной сети проводятся по единым методикам, что обеспечивает сопоставимость данных и возможность их совместного анализа [64].

Сеть метеорологических станций Росгидромета обеспечивает наблюдения за основными метеорологическими элементами: атмосферным давлением, температурой и влажностью воздуха, количеством и

интенсивностью атмосферных осадков, характеристиками ветра, облачностью, продолжительностью солнечного сияния. Наблюдения проводятся по программе метеорологических станций различных разрядов в сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 час по всемирному координированному времени. Метеорологические данные передаются в региональные управления Росгидромета и в ФГБУ «Гидрометцентр России» для обработки, контроля качества и включения в Государственный фонд данных о состоянии окружающей природной среды [65].

Классификация методов

Методы измерения метеопараметров можно разделить на несколько групп:

Визуальные. Является наиболее простым и не требующим специального оборудования. Ключевыми недостатками данного метода является его низкая точность и отсутствие возможности измерить некоторые метеопараметры, например атмосферное давление или количество солнечной радиации.

Инструментальные. Суть инструментального методы заключается в измерении показателей различных параметров (температура, влажность, атмосферное давление, количество осадков) непосредственно на самой метеоплощадке, станции с помощью специализированного оборудования(приборов). Является наиболее практичным и традиционным из перечисленных.

Дистанционные. Суть дистанционного метода заключается в получении метеопараметров без контакта с окружающей средой с помощью регистрации электромагнитного излучения от атмосферы и земной поверхности. Позволяет получить информацию со спутников и ДМРЛ.

Расчетные. Расчетный метод позволяет получить информацию без прямых измерений-через эмпирические формулы, интерполяцию и климатические закономерности.

В своей работе я буду рассматривать инструментальный метод, так как он является наиболее точным и практичным.

Измерение и определение величины метеорологических факторов

Атмосферные осадки

Измерение атмосферных осадков проводится с помощью осадкомеров Третьякова (рисунок 12), которые обеспечивают стандартизированные измерения жидких и твердых осадков. Количество осадков выражается в миллиметрах слоя воды, что позволяет напрямую сопоставлять осадки с элементами водного баланса территории. В зимний период проводятся снегомерные съемки для определения высоты снежного покрова и запасов воды в снеге, что особенно важно для прогнозирования весеннего инфильтрационного питания грунтовых вод. Снегомерные съемки выполняются по маршрутам, охватывающим различные типы подстилающей поверхности: открытые участки, лес, овраги, что позволяет учитывать пространственную неоднородность снегонакопления.



Рисунок 12 – Осадкомер Третьякова.



Рисунок 13 – Классификация осадков по агрегатному состоянию вещества.

Классификация осадков по характеру выпадения:

Обложные. Долгие, монотонные из серых слоистых облаков.

Ливневые. Внезапно начинаются и заканчиваются, меняют интенсивность, часто наблюдаются совместно с грозой.

Моросящие. Слабая морось из тумана или низких облаков.

Снеготаяние

Измерение снеготаяния на метеоплощадке-комплексная задача, которая включает не только фиксацию качества таяния, но и количественную оценку интенсивности процесса. Согласно руководящим документам Росгидромета измерения основывается на методах теплового и водного баланса снежного покрова.

Измерение высоты снежного покрова самый частый и простой вид наблюдений, показывающий динамику накопления и разрушения снежного покрова. Для измерений высоты покрова осенью, до выпадения снега устанавливаются несколько реек в различных частях метеоплощадки. Нулевое деление совмещается с поверхностью почвы. Измерения

проводятся визуально для того, чтобы не нарушить естественный покров и провести корректные изменения, затем вычисляется среднее значение между всеми установленными рейками.

В период интенсивного снеготаяния наблюдения могут проводиться чаще, чтобы зафиксировать быстрое разрушение покрова.

Для измерения плотности снега используется весовой снегомер (цилиндр с заостренными краями +весы). Цилиндр опускают вертикально в снег до уровня почвы, извлекают керн и взвешивают. Зная объем цилиндра и массу снега, вычисляют плотность. Стандартные снегомерные съемки проводятся в 20-х числах каждого месяца.

Наиболее точным методом для прямого измерения водоотдачи рекомендованным Росгидрометом является метод прямого измерения водоотдачи. Метод основан на использовании снегомерных лизисметров (представлен на рисунке 14).



Рисунок 14 – Снегомерный лизистор.

На площадке устанавливается специальный ящик с естественным ненарушенным снежным покровом. Талая вода, стекающая с этого прибора, собирается и измеряется ее объем. Это прямое измерение того, сколько воды выделилось из снега за определенный период времени.

Измерение температуры воздуха

Измерение температуры воздуха и продолжительности морозного периода – две взаимосвязанные задачи. Температура воздуха измеряется инструментально в отличии от продолжительности морозного периода-он находится путем математической обработки многолетних климатических рядов.

Температуру воздуха измеряет в психрометрической будке. Это деревянная будка с жалюзийными шторками, защищающая термометры от прямых солнечных лучей, осадков и ветра, а также, обеспечивающая свободную циркуляцию воздуха, чтобы приборы находились в тех же условиях, что и окружающая атмосфера. Будка располагается на высоте 2 метров от земли, на метеоплощадке с естественным травяным покровом.

В зависимости от задачи метеорологи используют разные термометры, которые находятся в психрометрической будке:

-психрометрические термометры (ТМ-4). Два одинаковых термометра для измерения текущей температуры и влажности воздуха;

-максимальный термометр (ТМ-1). Ртутный термометр с особой конструкцией, который фиксирует самую высокую температуру между сроками наблюдений;

-минимальный термометр (ТМ-2). Спиртовой термометр с толкателем (штифтом), который показывает самую низкую температуру за прошедший период.

Измерение испаряемости и дефицита влаги

Для измерения испаряемости используется прибор испаритель ГГИ-3000. Он представляет собой большой металлический бак, закопанный в

грунт. Принцип работы основан на вычислении разницы между уровнем воды в баке и количеством выпавших осадков.

Дефицит влажности воздуха рассчитывается по показаниям психрометра.

$$d = E - \text{e}; (19)$$

где

d – дефицит влажности

E – упругость насыщенного водяного пара

e – фактическая упругость водяного пара

Измерение скорости и направления ветра

Измерение ветра характеризуется двумя основными параметрами: направлением и скоростью. Направление ветра определяется той стороной горизонта откуда дует ветер. Измеряется в градусах или в румбах. Скорость ветра расстояния, которое воздух проходит за единицу времени, измеряется в м/с.

Для корректных измерений важно правильное расположение приборов: высота флюгера 10–12 метров над уровнем земли, открытость – в радиусе 30–50 метров не должно быть высоких зданий и деревьев, которые создавали бы турбулентность, у флюгеров должно быть точная ориентация по сторонам света. Скорость и направление ветра измеряются при помощи анеморумбометра (представлен на рисунке 15), состоящего из чашечного анемометра (скорость ветра) и флюгера (направление ветра).

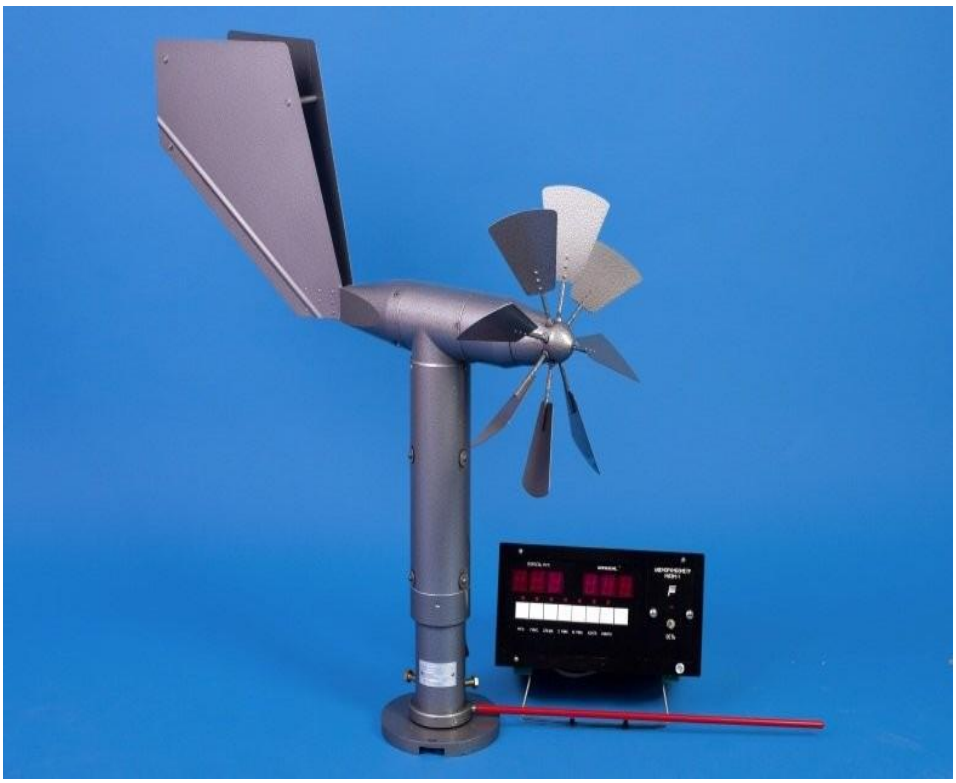


Рисунок 15 – Анеморумбометр.

Атмосферное давление

Атмосферное давление является одним из фундаментальных метеопараметров наряду с влажностью и температурой воздуха, который характеризует массу воздуха над точкой наблюдения. Главным отличием в измерениях в этом случае является измерение этого параметра в помещении, так как приборы требуют защиты от солнечного света. На метеостанциях атмосферное давление измеряется в гПа, ключевой особенностью измерений является приведение значения к уровню моря, из-за различной высоты расположения станций.

Барометры находятся в служебном помещении станции на расстояние не более 300 метров от метеоплощадки. Аналогичными требованиями являются вертикальное расположение прибора, защита от попадания прямого солнечного света и стабильность температуры в помещении.

Эталонным прибором для измерения атмосферного давления является ртутный барометр. Принцип его работы состоит в уравновешивании столба ртути в трубке давлением атмосферного воздуха на открытую чащу. Вводятся 3 поправки:

- инструментальная. Устраняет погрешность изготовления;

- температурная. Приводит объем ртути к 0°С, так как при нагреве ртуть расширяется;

- поправка на силу тяжести. Приводит показания к широте 45°, так как вес ртути зависит от широты места.

Барометр-анероид является классическим и самым компактным прибором для измерения атмосферного давления (рисунок 16). Принцип его работы основан на запаянной гофрированной коробки, из которой выкачан воздух. При изменении давления стенки коробки деформируются и через систему рычагов это передается на стрелку. Аналогично ртутному барометру вводятся 3 поправки: шкаловая-смотрится по паспорту прибора, в зависимости от положения стрелки, температурная-учитывает изменение упругости металла при изменении температуры в помещении, добавочная-компенсирует старение металла и изменение упругости со временем.



Рисунок 16 – Барометр-анероид.

Барограф(самописец)-регистрирующий, который чернилами на ленте (либо электронно) вычерчивает барограмму-непрерывную кривую давления. (рисунок 17). Преимуществом является отображение тенденции хода, что позволяет определить падает или растет давление и с какой скоростью.

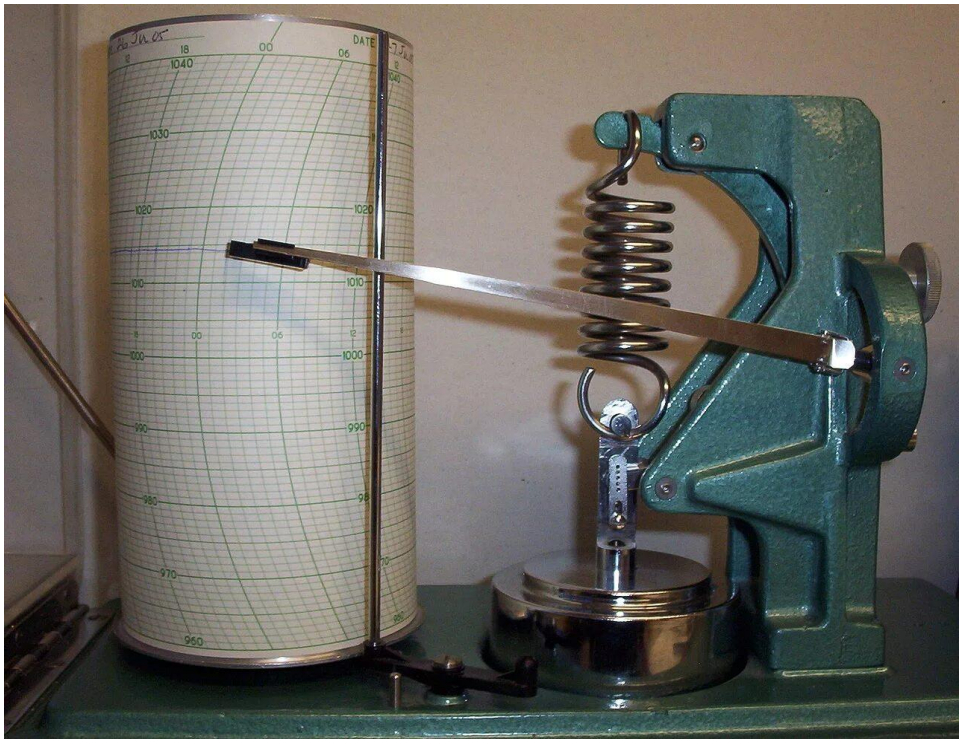


Рисунок 17 – Самописец.

Порядок измерения атмосферного давления:

Подготовка. За 10–15 минут до срока наблюдатель заходит в помещение, чтобы прекратить сквозняки и дать температуре выровняться;

отсчет температуры. Снимает показания термометра, находящегося рядом с анероидом (с точностью до 0,1°С);

«стряхивание» трения. Легко постукивает пальцем по стеклу анероида. Это необходимо, чтобы преодолеть трение в передаточном механизме и стрелка заняла истинное положение;

отсчет давления. Смотрим на шкалу перпендикулярно и записываем значение с точностью до 0,1 мм рт. ст. (или 0,1 гПа);

введение поправок. В отсчет последовательно вводят все поправки, получая исправленное значение на станции;

Приведение значения к уровню моря. Зная высоту станции Н и среднюю температуру воздуха t, давление пересчитывают по барометрической формуле:

$$P_0 = P_{ст} + \frac{H}{Z}\ ; (20)$$

где

Z – барометрическая ступень (высота, на которую надо подняться, чтобы давление упало на 1 гПа)

H – высота станции в метрах

$P_{ст}$ – давление на станции в гПа

Облачность и солнечная радиация

На метеостанциях облачность характеризуется по трем основным параметрам: высота нижней границы, количество и тип облачности.

Форма и количество облаков определяются визуально. Весь видимый небосвод принимается за 10 баллов.



Рисунок 18 – Шкала определения облачности.

Оценивают не только общую облачность, но и количество облачности нижнего яруса, влияющие на погоду у земли.

Форма облаков определяется по Международному атласу облаков и записывается символами, например, Cu-кучевая, Ci-перистая, Ns-слоисто-дождевая.

Для измерения ВНГ на современных станциях используется светолокационный метод, например ИВО-1М. Прибор посылает строго вверх короткий световой импульс и засекает время, за которое отраженный от облака сигнал возвращается обратно. Зная скорость ветра прибор автоматически вычисляет высоту в метрах.

Измерение солнечной радиации проводится на актинометрической площадке. На станции измеряется несколько видов радиации:

- прямая радиация. Солнечные лучи;

- рассеянная радиация. Излучение, приходящее после рассеяния в атмосфере;

- суммарная радиация. Сумма прямой и рассеянной радиаций;

- отраженная радиация. Количество солнечной радиации, отраженной от земной поверхности;

- Альбедо. Отношение отраженной радиации к суммарной в %.

Главным прибором для измерения количества солнечной радиации является пиранометр (рисунок 19).



Рисунок 19 – Пиранометр.

У него есть чувствительная головка (черный и белый диск, который нагревается по-разному) под прозрачным стеклянным колпаком для защиты от ветра и осадков. Принцип действия: основан на преобразовании тепла от

солнечных лучей в электрический сигнал. Чем ярче солнце, тем сильнее нагревается датчик, и тем больше сигнал. Устанавливается на открытом месте, на высоте около 2 метров. Для измерения рассеянной радиации на пиранометр надевают специальный экранчик (теневой диск), который загораживает прямые лучи Солнца. В некоторых случаях используют альбедометр-тот же самый пиранометр, умеющий поворачиваться вниз, чтобы измерить отраженную радиацию.

Существует несколько режимов наблюдения:

- срочные наблюдения. Метеоролог снимает показания приборов вручную в установленные сроки (каждые 3 часа);

- непрерывная регистрация. Актинограмма ,показывающая ход радиации в течении суток;

- интегрирование. Суммирование радиации за сутки.

3.3 Анализ метеорологических условий и динамики уровня грунтовых вод в Санкт-Петербурге и Астрахани

Сравнительная физико-географическая и климатическая характеристика районов

Санкт-Петербург

Санкт-Петербург и Астрахань представляют собой контрастные в физико-географическом и климатическом отношении регионы Европейской части России, что определяет существенные различия в формировании режима грунтовых вод. Санкт-Петербург расположен в северо-западной части страны на побережье Финского залива Балтийского моря в пределах Приневской низменности. Территория города и его окрестностей характеризуется равнинным рельефом с абсолютными высотами преимущественно от 0 до 30 метров, что обусловливает близкое к поверхности залегание грунтовых вод и интенсивную гидрологическую связь с поверхностными водотоками [36].

Климат Санкт-Петербурга относится к атлантико-континентальной области умеренного климатического пояса и характеризуется избыточным увлажнением, умеренно теплым летом и относительно мягкой зимой. Среднегодовая температура воздуха составляет +5,8°С, средняя температура самого холодного месяца (февраля) –6,0°С, самого теплого (июля) +18,8°С. Продолжительность безморозного периода достигает 160-170 дней. Устойчивый снежный покров формируется в конце ноября – начале декабря и сохраняется до конца марта – начала апреля, его средняя высота составляет 25–35 см, а запасы воды в снеге к концу зимы достигают 80-120 мм [37].

Атмосферные осадки в Санкт-Петербурге выпадают относительно равномерно в течение года с некоторым преобладанием в летне-осенний период. Среднегодовое количество осадков составляет 660-680 мм, из них

около 400 мм выпадает в теплый период (апрель-октябрь) и 260-280 мм – в холодный период (ноябрь-март). Максимум осадков приходится на август-сентябрь (70-80 мм в месяц), минимум – на февраль-март (30-35 мм в месяц). Количество дней с осадками достигает 200 в год, что свидетельствует о частой повторяемости осадков малой интенсивности, благоприятных для инфильтрационного питания грунтовых вод [38].

Испарение с водной поверхности в Санкт-Петербурге составляет 450-500 мм в год, испарение с поверхности суши (суммарное испарение) – 400-450 мм в год. Коэффициент увлажнения (отношение годовой суммы осадков к годовому испарению) превышает 1,4, что характеризует территорию как избыточно увлажненную. Положительный водный баланс обеспечивает устойчивое формирование инфильтрационного питания грунтовых вод, поверхностного и подземного стока. Годовая сумма суммарного испарения меньше годовой суммы осадков на 200-250 мм, что соответствует величине инфильтрационного питания и подземного стока [39].

Гидрографическая сеть территории Санкт-Петербурга представлена Невой и ее многочисленными рукавами, протоками, каналами, а также малыми реками и ручьями, впадающими в Финский залив. Нева дренирует грунтовые воды Приневской низменности, обеспечивая их разгрузку. Уровни воды в Неве подвержены сгонно-нагонным колебаниям, связанным с ветровым режимом над Финским заливом, что влияет на режим грунтовых вод в прибрежных зонах. Заболоченность территории достигает 10-15%, что также влияет на условия формирования поверхностного и подземного стока [40].

Астрахань

Астрахань расположена в южной части европейской территории России в дельте реки Волги, впадающей в Каспийское море. Абсолютные высоты территории составляют от –27 м (уровень Каспийского моря) до 10-15 м в наиболее возвышенных частях дельты. Рельеф представляет собой

плоскую аллювиальную равнину, изрезанную многочисленными протоками, ериками, озерами. Особенностью территории является ее расположение ниже уровня океана, что создает специфические условия гидрогеологического режима с подпором грунтовых вод со стороны Каспийского моря [41].

Геологическое строение территории Астрахани определяется аллювиальными отложениями дельты Волги, представленными песками, супесями, суглинками с прослоями глин. Мощность аллювиальных отложений достигает 15-20 метров. Грунтовые воды приурочены к аллювиальным отложениям и залегают на глубинах от 1 до 3 метров, характеризуясь слабым напором и тесной связью с уровнями воды в протоках дельты. Минерализация грунтовых вод варьирует от 1 до 10 г/л, что связано с влиянием солоноватых вод Каспийского моря и испарительным концентрированием солей [42].

Климат Астрахани резко континентальный засушливый, относится к аридной зоне умеренного климатического пояса. Среднегодовая температура воздуха составляет +10,6°С, средняя температура самого холодного месяца (января) –5,2°С, самого теплого (июля) +25,4°С. Продолжительность безморозного периода достигает 200-210 дней. Снежный покров неустойчив, формируется в конце декабря и разрушается в начале марта, его средняя высота не превышает 10-15 см, а запасы воды в снеге составляют всего 20-30 мм. Малоснежные зимы способствует глубокому промерзанию грунтов, достигающему 60-80 см [43].

Атмосферные осадки в Астрахани крайне скудны и выпадают неравномерно в течение года. Среднегодовое количество осадков составляет всего 200-230 мм, что в три раза меньше, чем в Санкт-Петербурге. Около 60-70% годовой суммы осадков приходится на теплый период (апрель-октябрь), зимние осадки крайне незначительны. Максимум осадков наблюдается в июне-июле (30-40 мм в месяц), минимум – в феврале-марте (10-15 мм в месяц). Значительная часть осадков выпадает в

виде кратковременных ливней, характеризующихся высокой интенсивностью и малой продолжительностью, что снижает долю инфильтрационного питания грунтовых вод [44].

Испарение с водной поверхности в Астрахани достигает 900-1000 мм в год, с поверхности суши – 600-700 мм в год. Испаряемость (потенциальное испарение) превышает 1200 мм в год, что в 5-6 раз больше количества атмосферных осадков. Коэффициент увлажнения составляет 0,2-0,3, что характеризует территорию как крайне засушливую. Отрицательный водный баланс приводит к тому, что естественное инфильтрационное питание грунтовых вод за счет атмосферных осадков крайне ограничено, и основным источником питания грунтовых вод является фильтрация из протоков дельты Волги [46].

Гидрографическая сеть территории Астрахани представлена системой протоков дельты Волги, включающей более 500 рукавов. Главные протоки – Бахтемир, Болда, Бузан – обеспечивают транзит волжских вод к Каспийскому морю. Уровни воды в протоках подвержены значительным колебаниям, связанным с режимом Волги (весеннее половодье, летняя и зимняя межень) и сгонно-нагонными явлениями на Каспийском море. Высокие уровни воды в протоках в период половодья (апрель-май) обеспечивают дополнительное питание грунтовых вод за счет фильтрации речных вод, тогда как в межень происходит разгрузка грунтовых вод в протоки [47].

Сравнительный анализ климатических характеристик Санкт-Петербурга и Астрахани представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнительная климатическая характеристика Санкт-Петербурга и Астрахани.

Характеристика	Санкт-Петербург	Астрахань
Среднегодовая температура воздуха, °C	+5,8	+10,6

Характеристика	Санкт-Петербург	Астрахань
Средняя температура января, °C	–6,0	–5,2
Средняя температура июля, °C	+18,8	+25,4
Среднегодовое количество осадков, мм	660-680	200-230
Осадки теплового периода, мм	400	140-160
Осадки холодного периода, мм	260-280	60-70
Испарение с водной поверхности, мм/год	450-500	900-1000
Суммарное испарение, мм/год	400-450	600-700
Коэффициент испарения	1,4-1,5	0,2-0,3

Таким образом, Санкт-Петербург и Астрахань характеризуются контрастными физико-географическими и климатическими условиями, определяющими существенные различия в механизмах формирования режима грунтовых вод. В Санкт-Петербурге доминирует инфильтрационное питание за счет атмосферных осадков в условиях избыточного увлажнения, тогда как в Астрахани основным источником питания грунтовых вод является фильтрация из протоков дельты Волги в условиях дефицита атмосферных осадков и высокого испарения.

Статистическая обработка многолетних рядов атмосферных осадков и температуры

Статистическая обработка многолетних рядов гидрометеорологических наблюдений является основой для выявления закономерностей изменчивости климатических характеристик и их влияния на режим грунтовых вод. Для исследования использованы данные метеорологических станций Санкт-Петербург (ВМО индекс 26063) и Астрахань (ВМО индекс 34880) за период 1990-2025 гг., включающие ежедневные наблюдения за температурой воздуха, количеством атмосферных осадков, высотой снежного покрова. Данные получены из

Государственного фонда данных о состоянии окружающей природной среды Росгидромета [48].

Статистическая обработка рядов атмосферных осадков включала расчет средних многолетних значений, стандартных отклонений, коэффициентов вариации, построение кривых обеспеченности. Средние многолетние годовые суммы атмосферных осадков для Санкт-Петербурга за период 1990-2025 гг. составили 672 мм со стандартным отклонением 78 мм. Коэффициент вариации годовых сумм осадков равен 0,12, что свидетельствует об относительно стабильном режиме осадков. Максимальная годовая сумма осадков зафиксирована в 2012 году и составила 863 мм, минимальная – в 2002 году (512 мм) [49].

Внутригодовое распределение атмосферных осадков в Санкт-Петербурге характеризуется максимумом в августе-сентябре (73-76 мм в месяц) и минимумом в феврале-марте (32-34 мм в месяц). Осадки теплого периода (апрель-октябрь) составляют в среднем 402 мм (60% годовой суммы), холодного периода (ноябрь-март) – 270 мм (40%). Анализ многолетних трендов показал незначительное увеличение годовых сумм осадков со скоростью около 3 мм в год, что может быть связано с наблюдаемыми климатическими изменениями [50].

Для Астрахани средние многолетние годовые суммы атмосферных осадков за период 1990-2025 гг. составили 218 мм со стандартным отклонением 52 мм. Коэффициент вариации годовых сумм осадков равен 0,24, что в два раза выше, чем для Санкт-Петербурга, и свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости осадков в засушливом климате. Максимальная годовая сумма осадков зафиксирована в 2005 году (341 мм), минимальная – в 1998 году (153 мм). Внутригодовое распределение осадков характеризуется максимумом в июне (37 мм) и минимумом в феврале (13 мм) [51].

Сравнительный анализ атмосферных осадков в Санкт-Петербурге и Астрахани представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Статистические характеристики атмосферных осадков в Санкт-Петербурге и Астрахани (1990-2025 гг.)

Характеристика	Санкт-Петербург	Астрахань
Средняя годовая сумма осадков, мм	672	218
Стандартное отклонение, мм	78	52
Коэффициент вариации	0,12	0,24
Максимальная годовая сумма, мм	863 (2012)	341 (2005)
Минимальная годовая сумма, мм	512 (2002)	153 (1998)
Осадки теплого периода, мм	402	152
Осадки холодного периода, мм	270	66
Тренд, мм/год	+3,1	+1,2

Анализ распределения осадков по градациям интенсивности показал, что в Санкт-Петербурге преобладают осадки малой интенсивности (менее 5 мм в сутки), составляющие около 70% от числа дней с осадками. Осадки средней интенсивности (5–15 мм в сутки) наблюдаются в 25% дней с осадками, интенсивные осадки (более 15 мм в сутки) – в 5% случаев. Такое распределение благоприятно для инфильтрационного питания грунтовых вод, поскольку осадки малой интенсивности практически полностью инфильтруются в грунт [52].

В Астрахани распределение осадков по интенсивности существенно отличается: доля осадков малой интенсивности составляет около 50%, средней интенсивности – 35%, интенсивных осадков – 15%. Более высокая доля интенсивных осадков связана с преобладанием ливневого характера осадков в летний период, что приводит к формированию значительного поверхностного стока и снижению доли инфильтрации. Интенсивность ливней может достигать 30-40 мм за несколько часов, что превышает инфильтрационную способность суглинистых грунтов [53].

Статистическая обработка рядов температуры воздуха включала расчет средних многолетних значений для различных временных

интервалов (год, сезон, месяц), анализ трендов, определение сумм активных температур. Средняя годовая температура воздуха в Санкт-Петербурге за период 1990-2025 гг. составила +6,2°C, что на 0,4°C выше климатической нормы (1961-1990 гг.). Средняя температура самого холодного месяца (февраля) составила –5,3°C, самого теплого (июля) +19,2°C. Продолжительность периода с температурой выше 0°C составляет 240 дней, выше +10°C – 140 дней [54].

Для Астрахани средняя годовая температура воздуха за период 1990-2025 гг. составила +11,1°C, что на 0,5°C выше климатической нормы. Средняя температура самого холодного месяца (января) составила –4,8°C, самого теплого (июля) +26,1°C. Продолжительность периода с температурой выше 0°C составляет 275 дней, выше +10°C – 185 дней. Сумма активных температур (сумма среднесуточных температур выше +10°C) для Санкт-Петербурга составляет 1950-2050°C, для Астрахани – 3400-3500°C.

Анализ трендов температуры воздуха выявил статистически значимое повышение средних годовых температур для обоих регионов. Скорость роста температуры в Санкт-Петербурге составила +0,04°C в год, в Астрахани – +0,05°C в год. Наибольшее потепление наблюдается в зимние месяцы: для Санкт-Петербурга тренд зимней температуры составляет +0,06°C в год, для Астрахани – +0,07°C в год. Летние температуры также растут, но менее интенсивно (+0,03°C в год для обоих регионов). Повышение температуры воздуха влияет на режим грунтовых вод через увеличение испарения, сокращение продолжительности снежного покрова, изменение сроков снеготаяния.

Характеристики снежного покрова существенно различаются между регионами. В Санкт-Петербурге устойчивый снежный покров формируется в среднем 5 декабря и разрушается 8 апреля, его продолжительность составляет 125 дней. Средняя высота снежного покрова за зиму составляет 28 см, максимальная высота к концу зимы достигает 35-40 см. Запасы воды

в снеге к моменту начала снеготаяния составляют в среднем 95 мм с колебаниями от 60 до 140 мм в разные годы [55].

В Астрахани устойчивый снежный покров формируется нерегулярно, в среднем 25 декабря, и разрушается 5 марта, его продолжительность составляет всего 70 дней. Средняя высота снежного покрова не превышает 12 см, максимальная высота – 15-18 см. Запасы воды в снеге составляют в среднем 25 мм с колебаниями от 10 до 45 мм. Малая мощность снежного покрова в Астрахани приводит к глубокому промерзанию грунтов и ограничению инфильтрационного питания грунтовых вод в зимне-весенний период [56].

Статистические характеристики температурного режима и снежного покрова представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Статистические характеристики температуры воздуха и снежного покрова в Санкт-Петербурге и Астрахани (1990-2025 гг.)

Характеристика	Санкт-Петербург	Астрахань
Средняя годовая температура, °C	+6,2	+11,1
Среднее температура января, °C	–5,8	–4,8
Средняя температура июля, °C	+19,2	+26,1
Сумма активных температур, °C	2000	3450
Тренд годовой температуры, °C/год	+0,04	+0,05
Продолжительность снежного покрова, дни	125	70
Средняя высота снежного покрова, см	28	12
Запасы воды в снеге, мм	95	25
Глубина промерзания грунтов, см	40-60	60-80

Корреляционный анализ связи температуры воздуха и количества атмосферных осадков показал отсутствие статистически значимой корреляции для Санкт-Петербурга (коэффициент корреляции r = –0,08) и слабую отрицательную корреляцию для Астрахани (r = –0,23). Это свидетельствует о том, что температура и осадки формируются под влиянием различных атмосферных процессов и их совместное воздействие на режим грунтовых вод требует комплексного анализа.

Анализ экстремальных гидрометеорологических явлений выявил увеличение повторяемости интенсивных осадков в обоих регионах. В Санкт-Петербурге количество дней с суточной суммой осадков более 20 мм увеличилось с 2–3 случаев в год в 1990-е годы до 4-5 случаев в 2010-е годы. В Астрахани повторяемость ливней с суточной суммой осадков более 30 мм возросла с 1–2 до 3-4 случаев в год. Увеличение повторяемости экстремальных осадков связано с изменением циркуляционных процессов в атмосфере и может приводить к более резким колебаниям уровней грунтовых вод.

Расчет коэффициентов увлажнения по методу Н. Н. Иванова (отношение годовой суммы осадков к испаряемости) подтвердил принадлежность Санкт-Петербурга к зоне избыточного увлажнения (коэффициент увлажнения 1,42) и Астрахани - к зоне крайне недостаточного увлажнения (коэффициент увлажнения 0,22). Для Санкт-Петербурга испаряемость составляет 470 мм в год, для Астрахани – 980 мм в год.

Таким образом, статистическая обработка многолетних рядов атмосферных осадков и температурного режима выявила существенные различия между Санкт-Петербургом и Астраханью, определяющие контрастные условия формирования инфильтрационного питания и режима грунтовых вод. Санкт-Петербург характеризуется избыточным увлажнением, относительно стабильным режимом осадков, преобладанием осадков малой интенсивности и устойчивым снежным покровом, тогда как Астрахань -дефицитом атмосферных осадков, высокой межгодовой

изменчивостью, преобладанием ливневых осадков и малоснежными зимами.

Мониторинг и анализ зеркала состояния зеркала грунтовых по данным репрезентативных постов

Мониторинг уровней грунтовых вод проводится на сети гидрогеологических постов Росгидромета, расположенных на территории Санкт-Петербурга и Астрахани. Для настоящего исследования использованы данные репрезентативных постов, характеризующих типичные гидрогеологические условия каждого региона и имеющих длительные ряды наблюдений. В Санкт-Петербурге выбран гидрогеологический пост, расположенный в центральной части города на участке с четвертичными водно-ледниковыми отложениями. В Астрахани использованы данные гидрогеологического поста, расположенного в пределах дельты Волги на аллювиальных отложениях [58].

Гидрогеологический пост в Санкт-Петербурге оборудован на наблюдательной скважине глубиной 8 метров, вскрывающей водоносный горизонт четвертичных отложений. Грунтовые воды залегают на глубине 2,5-4,0 м от поверхности земли, водоупором служат ленточные глины на глубине 7,5 м. Наблюдения за уровнем грунтовых вод проводятся с периодичностью один раз в пять дней в периоды стабильного режима и ежедневно в периоды активных изменений уровней (весеннее снеготаяние, интенсивные осадки). Измерения выполняются электроуровнемером с точностью ±1 см [59].

Гидрогеологический пост в Астрахани оборудован на наблюдательной скважине глубиной 6 метров, вскрывающей водоносный горизонт аллювиальных отложений. Грунтовые воды залегают на глубине 1,5-3,0 м от поверхности земли, водоупором служат суглинки на глубине 5,5

м. Наблюдения проводятся с аналогичной периодичностью с использованием электроуровнемера [60].

Анализ многолетних рядов наблюдений за уровнями грунтовых вод в Санкт-Петербурге за период 2000-2025 гг. выявил выраженный сезонный режим с весенними максимумами и летне-осенними минимумами. Средний многолетний уровень грунтовых вод составляет 3,2 м от поверхности земли (абсолютная отметка +2,8 м БС). Амплитуда сезонных колебаний уровней варьирует от 0,8 до 1,5 м в зависимости от гидрометеорологических условий года. Максимальные уровни наблюдаются в апреле-мае в период снеготаяния и весенних дождей, когда глубина залегания грунтовых вод снижается до 2,5-2,7 м. Минимальные уровни фиксируются в августе-сентябре в период максимального испарения, когда глубина залегания увеличивается до 3,5-4,0 м [61].

Для Астрахани анализ данных за период 2000-2025 гг. показал более сложный характер сезонного режима грунтовых вод, определяемый не только метеорологическими факторами, но и режимом уровней воды в протоках дельты Волги. Средний многолетний уровень грунтовых вод составляет 2,3 м от поверхности земли (абсолютная отметка –23,3 м БС, учитывая отрицательные высоты территории). Амплитуда сезонных колебаний составляет 0,6-1,2 м. Максимальные уровни наблюдаются в мае-июне в период волжского половодья, когда высокие уровни воды в протоках обеспечивают инфильтрационное питание грунтовых вод, глубина залегания снижается до 1,5-1,8 м. Минимальные уровни фиксируются в феврале-марте в период зимней межени, когда глубина залегания увеличивается до 2,7–3,0 м [62].

Статистические характеристики режима грунтовых вод представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Статистические характеристики режима грунтовых вод в Санкт-Петербурге и Астрахани (2000-2025 гг.)

Характеристика	Санкт-Петербург	Астрахань
Средняя глубина залегания ГВ, м	3,2	2,3
Максимальная глубина залегания ГВ, м	4,2	3,1
Минимальная глубина залегания ГВ, м	2,4	1,4
Амплитуда сезонных колебаний, м	0,8-1,5	0,6-1,2
Месяц максимальных уровней	Апрель-май	Май-июнь
Месяц минимальных уровней	Август-сентябрь	Февраль-март
Стандартное отклонение, м	0,38	0,31
Коэффициент вариации	0,12	0,13

Корреляционный анализ связи уровней грунтовых вод с атмосферными осадками показал наличие статистически значимой положительной корреляции для Санкт-Петербурга с временным лагом 10-15 дней. Коэффициент корреляции между месячными суммами осадков и изменениями уровней грунтовых вод составил r = +0,67, что свидетельствует о тесной связи. Временной лаг соответствует времени добегания инфильтрационных вод через зону аэрации мощностью 2,5-3,0 м при средней скорости инфильтрации 0,2-0,3 м/сут. В периоды интенсивных осадков (более 30 мм за декаду) отклик уровней грунтовых вод проявляется в виде подъема на 0,1-0,3 м.

Для Астрахани корреляция уровней грунтовых вод с атмосферными осадками значительно слабее (r = +0,28), что объясняется малым количеством осадков и доминированием фильтрационного питания из протоков дельты. Корреляция уровней грунтовых вод с уровнями воды в ближайшем протоке (расстояние 150 м от наблюдательной скважины)

составила r = +0,81 с временным лагом 3-5 дней, что подтверждает ведущую роль гидрологического режима Волги в формировании режима грунтовых вод. Подъем уровня воды в протоке на 1 м приводит к подъему уровня грунтовых вод на 0,4-0,6 м.

Влияние температуры воздуха на режим грунтовых вод проявляется через механизм испарения. Для Санкт-Петербурга установлена отрицательная корреляция между среднемесячной температурой воздуха в теплый период и уровнями грунтовых вод (r = –0,42). Повышение температуры на 1°С приводит к снижению уровней грунтовых вод на 2–3 см за счет усиления испарения. Наибольшее влияние испарения проявляется в июле-августе, когда при дефиците атмосферных осадков и высоких температурах наблюдается устойчивое снижение уровней грунтовых вод со скоростью 1-2 см в декаду.

Для Астрахани влияние температуры воздуха на режим грунтовых вод выражено слабее (r = –0,31) вследствие более глубокого залегания уровней и ограниченного испарения с зеркала грунтовых вод. Основное влияние высоких температур проявляется в увеличении транспирации растительностью и иссушении верхних слоев зоны аэрации, что снижает инфильтрационное питание от эпизодических летних осадков [38, с. 256].

Многолетняя динамика уровней грунтовых вод выявила тренды, соответствующие изменениям климата. В Санкт-Петербурге наблюдается слабая тенденция к повышению средних годовых уровней грунтовых вод со скоростью +0,8 см/год, что может быть связано с увеличением годовых сумм атмосферных осадков. В Астрахани тренд уровней грунтовых вод отсутствует (изменения статистически незначимы), что объясняется стабильностью гидрологического режима Волги, зарегулированного каскадом водохранилищ.

Анализ экстремальных уровней грунтовых вод показал, что в Санкт-Петербурге максимальные уровни 1%-ной обеспеченности (наблюдаемые в среднем один раз в 100 лет) соответствуют глубине залегания 2,0 м от

поверхности, минимальные уровни 99%-ной обеспеченности – глубине 4,5 м. В Астрахани максимальные уровни 1%-ной обеспеченности соответствуют глубине 1,0 м, минимальные 99%-ной обеспеченности – глубине 3,5 м. Экстремальные уровни имеют важное практическое значение для проектирования фундаментов зданий, дренажных систем, подземных сооружений.

Сопоставление режима грунтовых вод с режимом атмосферных осадков и снеготаяния для Санкт-Петербурга показало, что весенний максимум уровней грунтовых вод формируется в результате инфильтрации талых вод и весенних дождей, составляющих в сумме 120-150 мм. Около 60-70% этой влаги фильтруется к зеркалу грунтовых вод, обеспечивая подъем уровней на 0,8-1,2 м. Летне-осеннее снижение уровней происходит со средней скоростью 0,5-0,8 см/сут и обусловлено превышением суммарного испарения над осадками.

Для Астрахани весенний подъем уровней грунтовых вод определяется преимущественно режимом половодья на Волге. Максимальные уровни воды в протоках дельты наблюдаются в мае и на 2-3 м превышают меженные уровни. Фильтрация речных вод через берега протоков обеспечивает инфильтрационное питание грунтовых вод объемом до 200 мм, что приводит к подъему уровней на 0,6–1,0 м. Вклад атмосферных осадков в весеннее пополнение грунтовых вод не превышает 20–30 %.

Анализ внутригодового распределения изменений уровней грунтовых вод представлен в таблице 11.

Таблица 11 – Средние месячные глубины залегания грунтовых вод в Санкт-Петербурге и Астрахани (2000-2025 гг.), м

Месяц	Санкт-Петербург	Астрахань
Январь	3,4	2,6
Февраль	3,5	2,8

Месяц	Санкт-Петербург	Астрахань
Март	3,3	2,7
Апрель	2,7	2,3
Май	2,5	1,7
Июнь	2,8	1,6
Июль	3,1	1,8
Август	3,6	2,1
Сентябрь	3,7	2,3
Октябрь	3,5	2,4
Ноябрь	3,3	2,5
Декабрь	3,4	2,6

Влияние промерзания грунтов на режим грунтовых вод в Санкт-Петербурге проявляется в замедлении или прекращении инфильтрационного питания в январе-феврале, когда глубина промерзания достигает 40-60 см. В этот период уровни грунтовых вод снижаются за счет подземного стока в реки при отсутствии или ограничении инфильтрационного питания. Оттаивание грунтов в марте-апреле восстанавливает инфильтрацию, и начинается весенний подъем уровней.

В Астрахани промерзание грунтов на глубину 60–80 см также ограничивает зимнее инфильтрационное питание, однако малое количество зимних осадков и так не обеспечивает значительного питания. Зимний минимум уровней грунтовых вод формируется в результате разгрузки в протоки при низких меженных уровнях воды и отсутствии инфильтрационного питания от осадков.

Таким образом, мониторинг и анализ состояния зеркала грунтовых вод по данным репрезентативных постов выявил существенные различия в режиме грунтовых вод между Санкт-Петербургом и Астраханью,

определяемые контрастными климатическими условиями и различными механизмами формирования инфильтрационного питания.

4 Технико-экономическое обоснование проекта по оптимизации измерения уровня грунтовых вод в скважинах.

В наше время наблюдение за уровнем грунтовых вод производятся нерегулярно по трем причинам:

– дорогостоящее оборудование;

– невозможность наблюдателю находится рядом с объектом измерений при выполнении задачи вручную;

– неактуальность получаемых данных: из-за невозможности получить данные в реальном времени делает наблюдения бесполезной тратой бюджета.

Реализация бизнес – идеи по оптимизации и сбору данных об уровне грунтовых вод в скважинах обладает рядом преимуществ:

1. Единая система компилирует данные, имеется возможность выгрузить необходимые файлы для проведения расчетных работ.

2. Исключен человеческий фактор. Все наблюдения ведутся дистанционно. Это позволяет уменьшить ошибку измерений и получать более точные данные в реальном времени без затрат на транспортировку квалифицированного сотрудника и на его работу.

3. Отечественный продукт создан конкретно под рынок РФ, пользоваться российским ПО специалистам будет удобнее.

4. Наличие данных в реальном времени позволит своевременно оповещать регионы, которым грозит потенциальная опасность из-за повышения уровня грунтовых вод и позволит своевременно на эти опасности реагировать, что сэкономит государственным структурам бюджет и спасет немало человеческих жизней.

5. Приборы, собирающие данные, имеют настраиваемые сроки измерения, что добавляет гибкости и позволит создать не только большую единую сеть, но и частные сети наблюдений в рамках одного предприятия

(контроль за техногенным стоком на крупных заводах с повышенной секретностью).

Бизнес-план

Проблема.

Неактуальность получаемых данных об уровне грунтовых вод, ведущая к большим финансовым потерям и жертвам из-за несвоевременной подготовки и оповещения населения. Отсутствие единой системы мониторинга уровня грунтовых вод в скважинах.[2][3]

Business to business и business to government потребители. Целевая аудитория продукта.

Проект подразумевает как частные сети наблюдений, так и общие. Например, можно оборудовать систему наблюдений в пределах одного промышленного предприятия, ведущего сброс и забор воды из реки, для наблюдений за техногенным стоком. Также можно установить сеть наблюдений на скважинах на большой по площади территории и передавать данные государственным службам и населению для заблаговременного оповещения о чрезвычайных ситуациях, которые могут быть вызваны подтоплением территорий из-за повышения уровня грунтовых вод.

Преимущества вложения средств в проект HydroNet.

В долгосрочной перспективе проект может обеспечить безопасность регионов, страдающих от подтоплений грунтовыми водами. Данные, необходимые для сельского хозяйства, строительства, экологического мониторинга, гидрометеорологических изысканий, горнодобывающей и нефтегазовой промышленности, получаемые в реальном времени ускорят

работу и значительно сократят затраты на их получение и выполнение связанных с этими данными работ [6, 7].

Применение данных в гидрометеорологии. По данным уровня грунтовых вод специалисты выполняют воднобалансовые исследования, прогнозируют паводки и засухи, составляют по многолетним данным наблюдений климатические колебания.

Применение данных в строительстве. Перед строительством всегда выясняются гидрогеологические условия, в том числе и уровень грунтовых вод. С помощью этих данных определяется тип фундамента, возможность наличия подземных этажей, дренажных систем. Устойчивость конструкции напрямую зависит от гидрогеологических условий и требует постоянных наблюдений для избежания катастроф [6, 7].

Применение в горнодобывающей промышленности. Постоянные наблюдения за уровнем грунтовых вод в реальном времени позволят исключить подтопление шахт и карьеров и обезопасить персонал, занимающийся горной добычей и позволит проводить оценку воздействия горных работ на грунтовые воды.

Применение в нефтегазовой промышленности. В данной отрасли наблюдения требуются для экологического мониторинга в местах, где идет соприкосновение грунтовых вод и нефтеперерабатывающих заводов (техногенный сток), а также в местах добычи при наличии глубоких подземных бассейнов нефти и газа [12, 13].

Также уровни грунтовых вод в скважинах в реальном времени может быть использован государственными чрезвычайными службами для предотвращения коммунального ущерба [31, 32].

Решение проблемы.

Сеть автономных гидростатических датчиков для измерения уровня грунтовых вод в скважинах и приложение для получения данных в реальном времени.

Дополнительный функционал. Карта в приложении добавляет состоянию уровня грунтовых вод наглядности, что обеспечивает удобство использования приложения. Позволяет за счет увеличения периода наблюдений давать более заблаговременные и качественные прогнозы. Можно настроить сроки наблюдений.

Каналы распространения продукта.

Партнерские программы с МЧС и крупными частными предприятиями, а также УГМС региона, в котором ведутся наблюдения. Таргетированная реклама в разрешенных социальных сетях и частных сайтах со схожей тематикой, рассылки для частных пользователей.

Доходы и расходы проекта.

Так как проект подразумевает не только продажу приборов-измерителей, но и программного обеспечения для постоянного мониторинга можно выделить 2 основных доходных статьи: продажа измерительных комплексов *HydroNet* и платная подписка на платформу, предоставляющей различный спектр услуг взаимодействия с получаемыми данными.

Доход от продажи комплексов.

В состав комплекса входит датчик уровня грунтовых вод контроллер сбора данных модули передачи данных источники питания В таком варианте заказчик покупает готовую штучную продукцию для установки на скважине.

Так как данные собираются в единую систему, можно продавать платную подписку на программное обеспечение, где доход будет формироваться за счет расширенного функционала аналитики, оплаты доступа к облачному сервису и самой подписки на сервис

Пример тарифов:

Тариф	Что входит	Стоимость, руб
Базовый	Значение уровня, уведомления, карта	5000
Профессиональный	Расширенный спектр услуг для специалистов	10000–20000
Корпоративный	Расширенный спектр услуг для специалистов	договорная

Дополнительную доходность проекту может обеспечить продажа доступа к архивным данным, но в ограниченном, единоразовом формате.

Выполнение мониторинга «под ключ» с долгосрочными контрактами и абонентской платой для заказчика, для разового использование в одном проекте.

Самую большую доходность можно получить благодаря госконтракту на установку такой системы наблюдений в масштабах одного или сразу нескольких регионов. Потенциальными государственными покупателями могут быть: экопрограммы субъектов РФ, МЧС, Росгидромет. Ниже в приложении приведены таблицы расходов и полный расчет прибыли проекта.В таблице видно, что теоретическая прибыль проекта за 12 месяцев составит 15715300 рублей по имеющимся данным, эта сумма корректируется при взятии большего количества параметров, однако для

технико-экономического обоснования проекта данной точности расчета прибыли и расходов вполне хватает для оценки.

Ниже будут приведены диаграммы постоянных и переменных расходов на проект, а также диаграмма доходов.

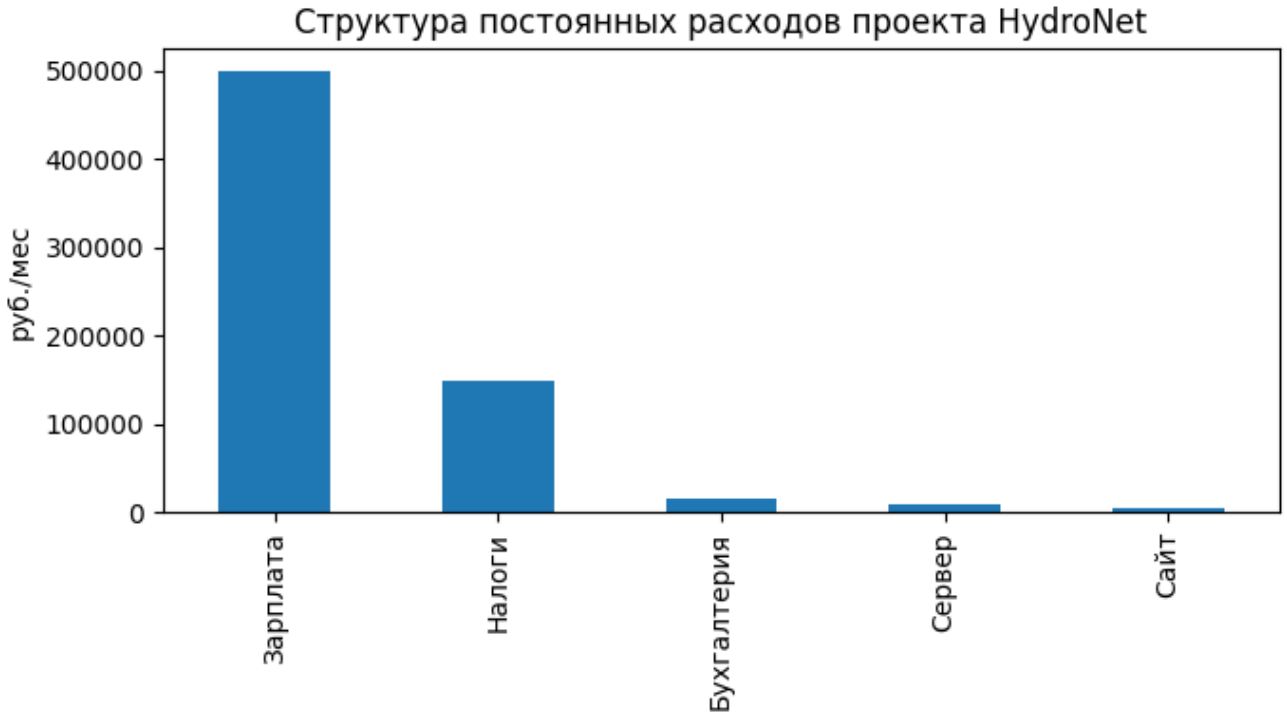


Рисунок 20 – Структура постоянных расходов проекта *HydroNet.*

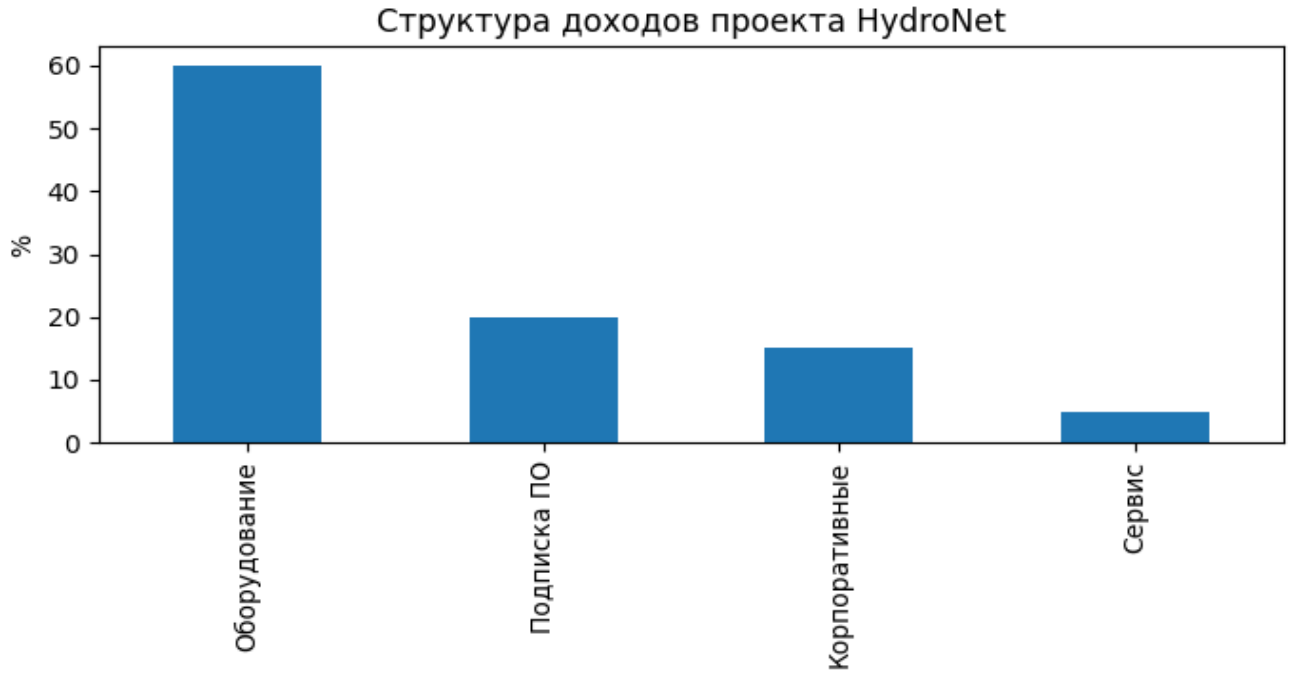


Рисунок 21 – Структура доходов *HydroNet.*



Рисунок 22 – Структура переменных расходов проекта *HydroNet*.

.

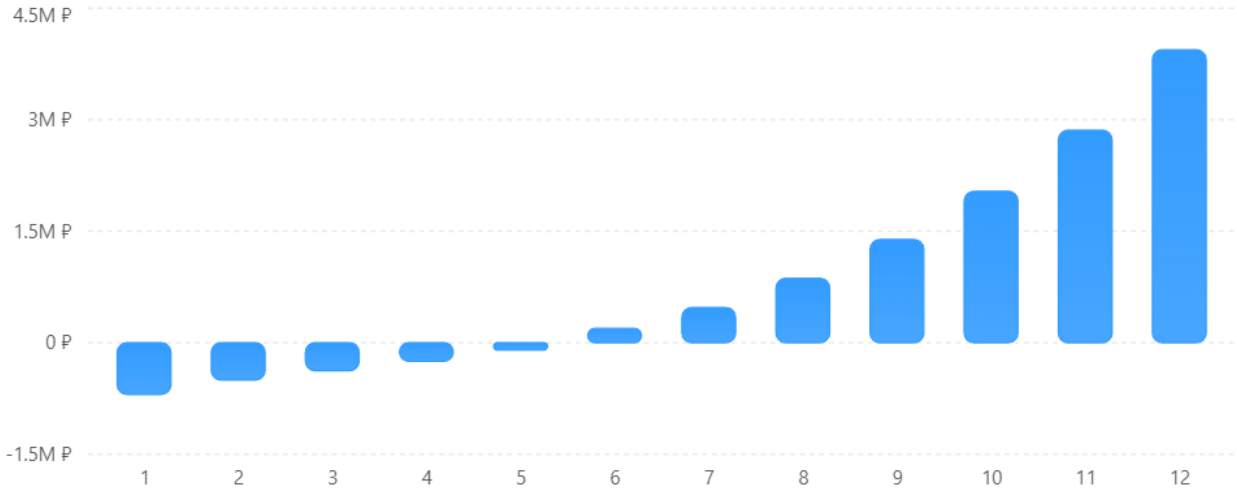


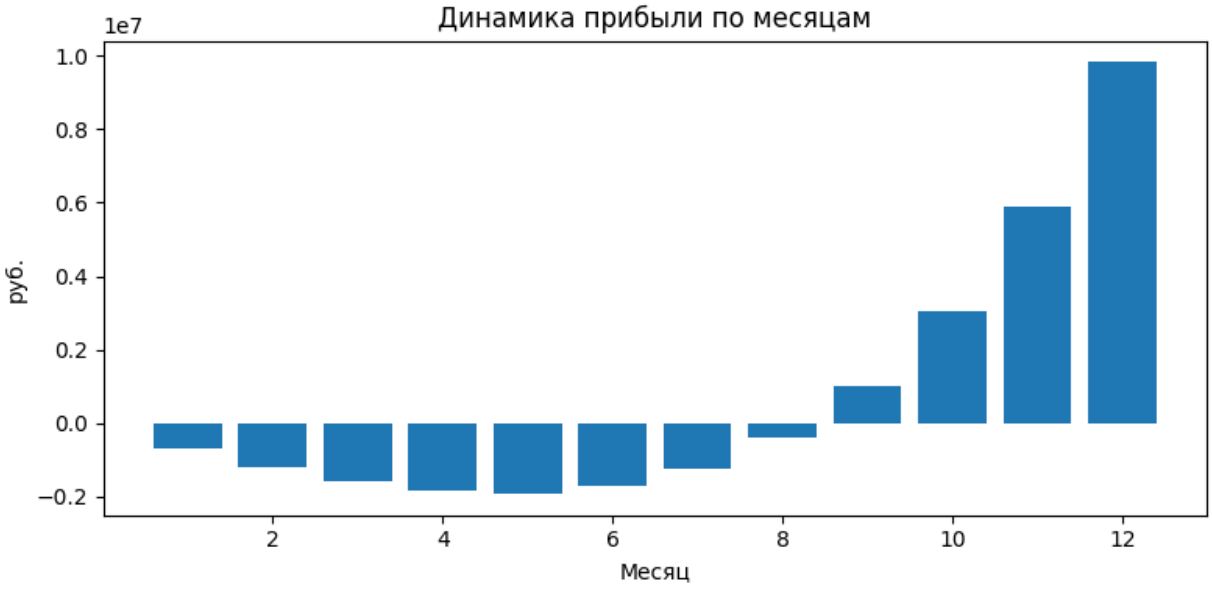
Рисунок 23 – График денежных потоков проекта *HydroNet*.

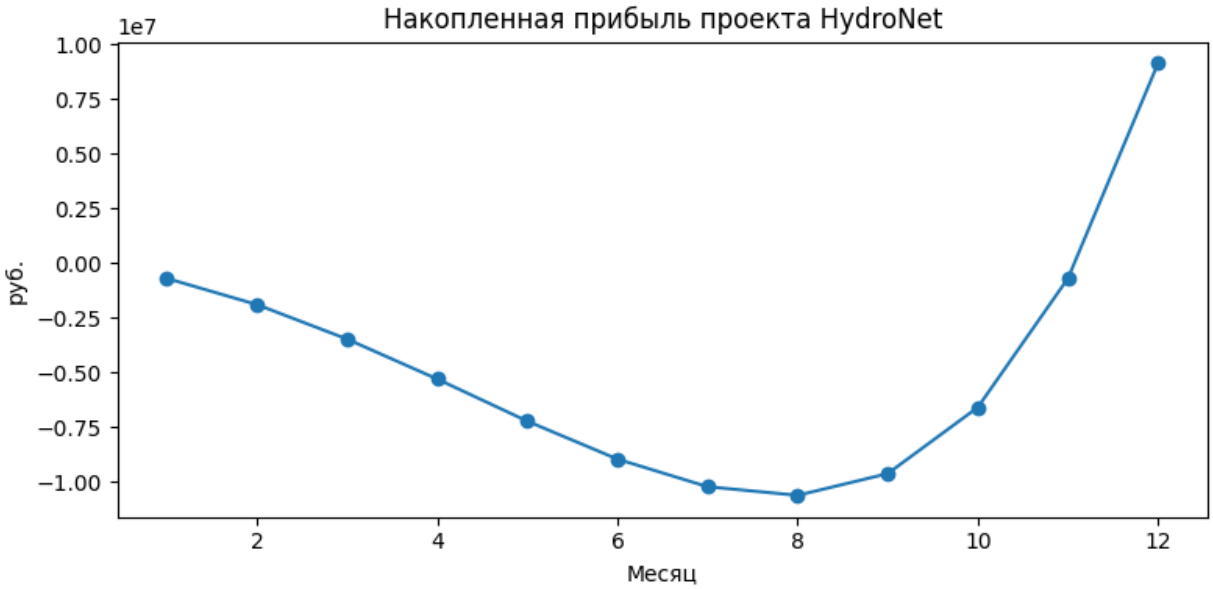
Начальные этапы проекта показывают отрицательные значения из-за затрат на разработку и вывод на рынок продукта.



Рисунок 24 – График безубыточности проекта *HydroNet*.

Из графика видно, что абсолютной безубыточности проект достигает между восьмым и девятым месяцем со старта проекта, после чего формируется устойчивая прибыль.





Анализирую всю построенную графику, можно сказать что проект достигает точки безубыточности на восьмом месяце, а прибыль проекта по итогу двенадцати месяцев после реализации составит более 14 миллионов рублей.

4.1 Анализ рынка проекта *HydroNet*

Общая характеристика рынка

Рынок систем мониторинга грунтовых вод является частью более крупного рынка гидрометеорологического, экологического и геологического мониторинга. В Российской Федерации наблюдения за состоянием подземных вод ведутся в рамках государственного мониторинга водных объектов и государственного мониторинга состояния недр. Законодательство предусматривает регулярное наблюдение за количественными и качественными характеристиками подземных вод, накопление данных и создание специализированных банков данных [29, 30].

В настоящее время государство реализует программы цифровой трансформации природоохранной и гидрометеорологической деятельности, что способствует росту спроса на автоматизированные системы сбора и обработки данных [27, 28, 29, 30].

Таким образом, существует устойчивый спрос на решения, обеспечивающие:

- автоматическое получение данных;
- передачу информации в режиме реального времени;
- централизованное хранение результатов наблюдений;
- интеграцию с государственными информационными системами.

Анализ конкурентов

На российском рынке уже существуют отдельные решения для автоматизированного мониторинга уровня воды.

Примерами являются автоматизированные гидрологические комплексы, интегрируемые в сеть Росгидромета, а также зарубежные решения с облачными платформами для хранения и анализа данных.

Основные недостатки существующих решений:

- высокая стоимость оборудования;
- ориентация преимущественно на крупных заказчиков;
- зависимость от зарубежного программного обеспечения;
- ограниченные возможности адаптации под конкретные задачи региональных наблюдательных сетей.

В современных реалиях зарубежные конкуренты могут просто не существовать на рынке из-за санкционных ограничений.

Конкурентные преимущества HydroNet

На фоне существующих решений проект *HydroNet* обладает рядом преимуществ:

1. Полностью отечественная разработка.
2. Возможность создания как локальных, так и региональных сетей наблюдений.
3. Работа в режиме реального времени.
4. Единая облачная платформа хранения данных.
5. Возможность интеграции с государственными системами мониторинга.
6. Более низкая стоимость внедрения по сравнению с зарубежными аналогами.
7. Возможность последующего расширения функционала за счет подключения дополнительных датчиков.

Оценка емкости рынка

Даже при консервативной оценке рынок проекта можно считать значительным.

Потенциальными клиентами являются:

- территориальные подразделения Росгидромета;
- региональные органы власти;
- предприятия нефтегазовой отрасли;
- горнодобывающие компании;
- строительные организации;
- экологические службы предприятий;
- научно-исследовательские организации.

Учитывая наличие государственной сети мониторинга подземных вод, многочисленных наблюдательных скважин и курс на цифровизацию гидрометеорологической отрасли, можно сделать вывод о наличии устойчивого рынка для внедрения системы *HydroNet*.

Вывод по анализу рынка

Проведенный анализ показывает, что проект *HydroNet* ориентирован на растущий рынок автоматизированного гидрологического мониторинга. Основными драйверами спроса являются цифровизация природоохранной деятельности, необходимость оперативного получения данных о состоянии грунтовых вод и потребность государственных и коммерческих организаций в снижении затрат на проведение наблюдений. Это создает благоприятные условия для коммерциализации проекта и его дальнейшего масштабирования.

Оценка рисков проекта HydroNet

Проведение анализа рисков необходимо при разработке любой идеи, в нашем случае проект связан с рядом технических, организационных и экономических рисков. [21]

Технические риски.

Основной технический риск – отказ оборудования, измеряющего уровень грунтовых вод в скважинах. Причинами могут стать внешнее вмешательство или производственный брак. Последствиями являются потеря доверия заказчиков и дополнительные расходы на ремонт и замену оборудования.

Для снижения данных рисков будут использоваться только сертифицированные компоненты для конструирования прибора, перед внедрением на рынок будут проведены тщательные испытания, также будет предусмотрен резервный фонд оборудования и регулярное техническое обслуживания. Дабы предотвратить некорректное использование будут разработаны методические рекомендации по использованию оборудования и программного обеспечения HydroNet.

Финансовые риски

– Рост стоимости комплектующих для производства приборов. Может быть связано с инфляцией, нарушением логистики или внешнеполитической обстановки.
Может привести к увеличению себестоимости оборудования и снижению рентабельности проекта, однако снизить риски поможет поиск альтернативных поставщиков и формирование складских запасов важных компонентов.

– Недостаток инвестиционных средств. Требования проекта к вовлечению капитала для разработки программного обеспечения, создания прототипов и проведения испытаний могут перенести сроки реализации проекта. Для сокращения данных рисков участниками проекта проводятся

участия в грантовых конкурсах, выступления на государственных конкурсах поддержки инноваций и привлечение инвесторов.

– Рыночные. Недостаточный спрос, может снизить объемы продаж и увеличить срок окупаемости проекта. С этим мы будем бороться с помощью активной маркетинговой кампании, сотрудничеством с государственными предприятиями и крупными корпорациями.

Также появление сильной конкуренции может уменьшить долю рынка, постоянные обновления и ориентация на заказчиков поможет снизить рыночные риски [21].

Организационные риски

Под организационными рисками подразумевается нехватка специалистов, сотрудничество с университетами и организация обучения сотрудников поможет решить эту проблему.

Ниже приведена сводная таблица с оценками всех рисков.

Риск	Вероятность	Влияние	Уровень риска
Отказ датчика	Средняя	Высокое	Высокий
Потеря связи	Высокая	Среднее	Средний
Рост цен на комплектующие	Высокая	Среднее	Средний
Недостаточный спрос	Средняя	Высокое	Высокий
Появление конкурентов	Средняя	Среднее	Средний

4.2 Расчет экономической эффективности проекта *HydroNet*

Оценка эффективности экономической модели проекта является очень важной частью для понимания целесообразности вложений в сам проект.

Для оценки используются следующие параметры:

- Выручка
- Прибыль
- Срок окупаемости
- Рентабельность инвестиций (*ROI*)
- Точка безубыточности

[23–25]

Расчет выручки проекта

Выручка проекта складывается из нескольких источников дохода:

- продажа измерительных комплексов *HydroNet*;
- подписка на программное обеспечение;
- корпоративные тарифы;
- дополнительные сервисные услуги.

Общая выручка определяется по формуле:

$$B = B1 + B2 + B3 (19)$$

где

B_1 – выручка от продажи оборудования;

B_2 – доход от подписки;

B_3 – доход от корпоративных клиентов.

[23–-25]

Согласно разработанной финансовой модели общий оборот к концу двенадцатого месяца составляет:

$$В = 4711000 \text{ руб.}$$

Расчет затрат

Общие затраты состоят из постоянных и переменных расходов.

Формула расчета:

$$З = Зпост + Зпер(20)$$

где

З – общие затраты;

$З_{пост}$ – постоянные расходы;

$З_{пер}$ – переменные расходы.

К постоянным расходам относятся:

- заработная плата сотрудников;
- услуги бухгалтера;
- серверное обслуживание;
- хостинг;
- налоги;
- обслуживание сайта.

К переменным расходам относятся:

- маркетинг;
- закупка датчиков;
- регистрационные расходы;
- эквайринг;
- непредвиденные расходы.

По расчетам финансовой модели суммарные ежемесячные расходы составляют от 756 200 до 809 400 рублей [23–25].

Расчет прибыли

Прибыль определяется как разница между доходами и расходами.

Формула:

$$П = В - З (21)$$

где

П – прибыль;

В – выручка;

З – расходы (затраты).

К концу первого года накопленная прибыль проекта составляет:

$$П = 15715300 \text{ руб.}$$

Полученный результат свидетельствует о высокой потенциальной доходности проекта.

Расчет срока окупаемости

Срок окупаемости показывает период времени, необходимый для возврата первоначальных вложений.

Расчет выполняется по формуле:

$$Т = \frac{I}{Пгод} (22)$$

где

Т – срок окупаемости;

I – первоначальные инвестиции;

$П_{год}$ – годовая прибыль.

В качестве первоначальных инвестиций принимаются расходы на запуск проекта, разработку программного обеспечения и создание прототипов.

Если принять объем первоначальных вложений равным:

I=2500000 руб.

то срок окупаемости составит:

$$\mathrm{T} = \frac{2500000}{15715300}$$

$$T = 0.16 \text{ года}$$

или примерно 2 месяца.

Расчет рентабельности инвестиций (ROI)

Рентабельность инвестиций показывает эффективность использования вложенных средств [25].

Формула расчета:

$$\mathrm{ROI} = \frac{\mathrm{П}}{I} \times 100\% (23)$$

где

П – прибыль проекта;

I – объем инвестиций.

Подставляя значения, получаем:

$$\mathrm{ROI} = \frac{15715300}{2500000} \times 100\%$$

$$\mathrm{ROI} = 628{,}6\%$$

Показатель значительно превышает 100 %, что свидетельствует о высокой инвестиционной привлекательности проекта.

Расчет точки безубыточности

Точка безубыточности характеризует момент, когда доходы полностью покрывают расходы [23–25].

Расчет производится по формуле:

$$Q = \frac{\text{FC}}{P - \text{VC}} (24)$$

где

FC – постоянные расходы;

VC – переменные расходы на единицу продукции;

P – цена реализации.

Согласно финансовой модели, проект выходит на положительный финансовый результат между восьмым и девятым месяцем реализации.

Вывод по расчетам экономической эффективности проекта

Финансовая модель демонстрирует устойчивый рост выручки, высокий уровень рентабельности инвестиций и быструю окупаемость, что свидетельствует о высокой экономической эффективности. Это позволяет сделать вывод о целесообразности реализации проекта.

Перспективы развития HydroNet

Проект будет развиваться технологически в двух направлениях – программное обеспечение и технологическое развитие самого прибора.

Развитие программного обеспечения. Современные информационные технологии имеют галопирующий прогресс, почти каждые полгода выходит очередное поколение нейросетей. Обучив нейросеть под конкретные задачи для проекта, можно будет кратно упростить расчеты, прогнозировать чрезвычайные ситуации достаточно заблаговременно, чтобы свести ущерб к нулю.

Технологическое развитие прибора подразумевает под собой установку на него дополнительных датчиков для получения других важных характеристик, таких как: определение жесткости воды, P(H) и другие. Такие дополнения повысят массовость прибора за счет расширенного

функционала. Также возможны различные производственные модификации под условия, в которых будет работать прибор. Например, партия приборов, усиленных дополнительной защитой от низких температур для работы в Арктических условиях.

4.3 Государственная и социальная польза проекта *HydroNet*

Нормативное регулирование мониторинга подземных вод

Деятельность по наблюдению за состоянием грунтовых и подземных вод в Российской Федерации регулируется рядом законодательных и нормативных документов, определяющих порядок проведения мониторинга, хранения данных и использования результатов наблюдений.

Проект HydroNet предназначен для автоматизации наблюдений за подземными водами, поэтому его разработка и внедрение должно соответствовать ряду законов, регулирующих реализацию подобного рода продуктов:

- Водный кодекс Российской Федерации. Согласно положениям Водного кодекса государство обеспечивает проведение мониторинга водных объектов, сбор информации об их состоянии и принятие мер по предотвращению негативного воздействия вод.
Данные, получаемые системой HydroNet могут использоваться для прогнозирования подтоплений территорий, наблюдений за уровнем подземных вод, принятия решений в области водопользования и оценки водного режима территорий, а также экологического воздействия подземного стока на наземный сток и состояние подстилающей поверхности. Таким образом проект способствует развитию и повышает эффективность государственного контроля за водными ресурсами. [1]

- Закон об охране «окружающей среды» Согласно закону №7 «Об охране окружающей среды», Настоящий Федеральный закон определяет правовые основы государственной политики в области охраны окружающей среды, обеспечивающие сбалансированное решение социально-экономических задач, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов в целях удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности. Тем самым, осуществляя постоянный мониторинг благодаря системе HydroNet, государство сможет вести усиленный контроль хозяйственной деятельности предприятий, повысить эффективность экологического контроля, своевременно выявлять неблагоприятные изменения обстановки грунтовых вод [2].
- Закон Российской федерации «О недрах» Подземные воды классифицируются как объект государственного фонда недр, поэтому деятельность по их изучению регулируется законом «О недрах».

Настоящий Закон регулирует отношения, возникающие в области использования и охраны недр, разработки технологий геологического изучения, разведки и добычи трудноизвлекаемых полезных ископаемых, использования отходов недропользования (вскрышных и вмещающих горных пород, шламов, хвостов обогащения полезных ископаемых и иных отходов геологического изучения, разведки, добычи и первичной переработки минерального сырья, содержащих полезные ископаемые и полезные компоненты или не содержащих полезных ископаемых и полезных компонентов), специфических минеральных ресурсов (рап лиманов и озер, торфа, сапропеля и других минеральных ресурсов), подземных вод, включая попутные воды (воды, извлеченные из недр вместе с нефтью, газом и газовым конденсатом (далее – углеводородное сырье), и вод, использованных пользователями недр [3].

В Российской федерации функционирует система государственного мониторинга состояния недр, обязанное выполнять следующие задачи:

- Получение достоверной информации о состоянии недр
- Прогнозирование опасных геологических процессов
- Обеспечение системы поддержки органов управления

С помощью системы HydroNet может быть организовано постоянное наблюдение за водоносными горизонтами и автоматизирует процесс сбора данных об уровне грунтовых вод, что уменьшит затраты и упростит множество задач для государственной системы мониторинга состояния недр.[1-5]

- Закон «Об информации, информационных технологиях и защите информации» Требования Федерального Закона №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» гласят, что при эксплуатации системы должна обеспечиваться защита информации от несанкционированного доступа, сохранность архивных данных, резервное копирование информации, контроль доступа пользователя к системе.

Как мы видим, проект *HydroNet* выполняет все требования законодательства Российской Федерации и может считаться конкурентоспособным стартапом.

4.4 Оценка предотвращенного экологического и экономического ущерба проектом *HydroNet*

Подземные воды оказывают существенное влияние на сохранность хозяйственных обьектов, зданий, городской и сельской инфраструктуры, техногенный сток. Если не организовывать постоянный мониторинг за уровнем грунтовых вод, то это приведет к пагубным последствиям как в гуманитарном, так и экологическом планах.

Экономический ущерб от подтоплений складывается из прямых и косвенных потерь:

– Прямые потери – расходы на восстановление зданий, дорог, системы коммуникаций, инженерных и гидротехнических сооружений.

– Косвенные потери – снижение эффективности предприятий, разорение малого и среднего бизнеса, затраты на компенсации населению и гуманитарная помощь населению, нарушение работы транспорта.

Оценка ущерба для объектов инфраструктуры

Подтопление территорий за счет повышения уровня грунтовых вод может привести к переувлажнению и размыву почвогрунтов, на которых нахоодятся основания зданий и гидротехнических сооружений. Могут выйти из строя дренажные системы, просадки и дыры на автомобильных дорогах могут привести к летальным исходам и замедляют коммуникацию между субьектами.

Автоматизированная система измерения уровня грунтовых вод в реальном времени даже в качестве небольшой локальной сети позволит заблаговременно проводить работы по укреплению в потенциально опасных местах, где подтопление может вызвать наибольший ущерб. Это, в свою очередь, позволит сэкономить большое количество бюджетных средств, направленных на восстановление после чрезвычайных ситуаций.

Экономический эффект от HydroNet для сельского хозяйства

Сельское хозяйство является наиболее чувствительной к изменениям уровня грунтовых вод сферой. Без своевременного получения данных о повышении или понижении уровня грунтовых вод невозможно понимать

влагозапас почвы, соответственно невозможно проводить мелиоративные работы, необходимые для получения нормального урожая.

Потенциальный ущерб:

– Ухудшение качества продукции
– Гибель урожая
– Расходы на восстановление земель

Благодаря системе *HydroNet*, получающей данные о состоянии грунтовых вод в реальном времени, можно будет своевременно проводить дренажные работы и корректировать использование оросительных систем.

Экономический эффект для промышленных предприятий

Повышение уровня грунтовых вод в местах расположения промышленных предприятий может привести к нарушению работы оборудования, подтоплению площадок, чрезвычайные ситуации могут спровоцировать экологическую катастрофу и даже человеческие жертвы. Внедрение автоматизированной системы для мониторинга за уровнем грунтовых вод обойдется предприятию значительно дешевле потенциального ущерба.

Расчет предотвращенного экономического ущерба

Для расчета предотвращенного экономического ущерба используется показатель предотвращенного ущерба $У_п$. Формула расчета имеет вид:

$$Уп = Ув - Зс(25)$$

где

Уп – предотвращенный ущерб

Ув – ущерб, возможный при отсутствии мониторинга

Зс – затраты на создание и установку, эксплуатацию системы мониторинга

Для того чтобы выяснить предотвращенный ущерб, сперва нужно провести оценку потенциального ущерба, мы можем взять приблизительные суммы, необходимые для восстановления инфраструктуры, они приведены ниже в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет потенциального ущерба от подтоплений грунтовыми водами.

Статья ущерба	Сумма, руб.
Ремонт фундаментов 20 домов	8 000 000
Восстановление дорог	3 000 000
Откачка воды и аварийные работы	1 500 000
Повреждение инженерных сетей	2 500 000
Итого потенциальный ущерб	15 000 000

Теперь, имея конкретное значение ущерба, зная, что установка системы для, к примеру, часто затопляемого участка территории Ростовской области будет стоить примерно 2,5 млн рублей. мы можем вычислить предотвращенный ущерб Уп:

$$\text{Уп} = 15000000 - 2500000 = 12500000 \text{ рублей}$$

Таким образом, экономическая выгода от установки системы *HydroNet* составит 12,5 млн рублей, что в 6 раз превышает затраты на восстановление региона.

Этот пример расчета доказывает, что система является эффективной для использования как инструмент сокращения расходов на восстановление подтопленных грунтовыми водами территорий.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была разработана автоматизированная система мониторинга уровня грунтовых вод *HydroNet*, предназначенная для непрерывного измерения, передачи, хранения и визуализации данных о состоянии подземных вод.

В ходе работы был проведён анализ существующих методов мониторинга уровня грунтовых вод, рассмотрены современные технические средства автоматизированного контроля и выявлены основные требования к системам дистанционного наблюдения. Установлено, что использование автоматизированных измерительных комплексов позволяет значительно повысить оперативность получения данных, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить непрерывность наблюдений.

Было выполнено исследование факторов, оказывающих влияние на уровень грунтовых вод, включая атмосферные осадки, температуру воздуха, снежный покров и другие гидрометеорологические параметры. На основе анализа многолетних наблюдений разработана математическая модель прогнозирования уровня грунтовых вод, позволяющая оценивать возможные изменения уровня при различных гидрометеорологических условиях.

В рамках работы разработан программно-аппаратный комплекс мониторинга, включающий датчик уровня воды, микроконтроллер для обработки данных, средства беспроводной передачи информации и мобильное приложение пользователя. Реализовано автоматическое получение измерений, их передача на удалённый сервер и отображение в удобном пользовательском интерфейсе.

Разработанное мобильное приложение обеспечивает просмотр текущих и архивных данных, визуализацию результатов измерений и повышение удобства взаимодействия пользователя с системой.

Предложенные решения по организации интерфейса позволили обеспечить наглядное представление информации и упростить процесс анализа данных мониторинга.

Проведённое технико-экономическое обоснование показало, что внедрение системы *HydroNet* является экономически целесообразным и может способствовать снижению затрат на проведение наблюдений по сравнению с традиционными методами контроля уровня грунтовых вод.

Таким образом, поставленная цель работы достигнута, а все поставленные задачи выполнены. Разработанная система *HydroNet* представляет собой законченное решение для автоматизированного мониторинга уровня грунтовых вод и может быть использована при проведении гидрологических исследований, экологическом мониторинге территорий, а также в составе информационных систем контроля состояния водных ресурсов.

Перспективы дальнейшего развития системы связаны с расширением функциональных возможностей программного обеспечения, внедрением дополнительных датчиков контроля окружающей среды, совершенствованием методов прогнозирования на основе технологий машинного обучения и организацией масштабируемой сети наблюдательных пунктов для мониторинга состояния подземных вод в режиме реального времени.

Список использованных источников

1. Водный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024). – М. : Проспект, 2024. – 160 с.

2. Об охране окружающей среды : Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 25.12.2023). – М. : Омега-Л, 2024. – 224 с.

3. О недрах: Закон Российской Федерации от 21.02.1992 № 2395-1 (ред. от 25.12.2023). – М. : Юрайт, 2024. – 128 с.

4. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ (ред. от 08.08.2024). – М. : Проспект, 2024. – 96 с.

5. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ. – М. : Норматика, 2024. – 84 с.

6. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – М. : Минстрой России, 2021. – 88 с.

7. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. – М. : ПНИИИС, 2018. – 102 с.

8. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М. : Минстрой России, 2021. – 152 с.

9. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. – М. : Стандартинформ, 2021. – 44 с.

10. ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций. – М. : Стандартинформ, 2019. – 18 с.

11. ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – М. : Стандартинформ, 2021. – 40 с.

12. ГОСТ 17.1.3.07–82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоёмов и водотоков. – М. : Стандартинформ, 2018. – 14 с.

13. Бочевер, Ф. М. Гидрогеология: учебник для вузов / Ф. М. Бочевер. – М. : Недра, 2019. – 512 с.

14. Шестаков, В. М. Динамика подземных вод : учебник / В. М. Шестаков. – М. : Изд-во Московского университета, 2018. – 368 с.

15. Куделин, Б. И. Основы гидрогеологии : учебное пособие / Б. И. Куделин. – М. : Академия, 2020. – 304 с.

16. Пиннекер, Е. В. Гидрогеология : учебник / Е. В. Пиннекер. – М.: Высшая школа, 2018. – 447 с.

17. Гавич, И. К. Сборник задач по гидрогеологии / И. К. Гавич. – М.: Недра, 2019. – 286 с.

18. Зекцер, И. С. Подземные воды и окружающая среда / И. С. Зекцер. – М. : Научный мир, 2018. – 216 с.

19. Алексеевский, Н. И. Гидрология : учебник для вузов / Н. И. Алексеевский. – М. : Юрайт, 2023. – 450 с.

20. Владимиров, А. М. Охрана окружающей среды : учебник / А. М. Владимиров. – М. : Академия, 2021. – 336 с.

21. Балдин, К. В. Управление рисками : учебник / К. В. Балдин. – М. : Дашков и К°, 2022. – 512 с.

22. Савицкая, Г. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия : учебник / Г. В. Савицкая. – М. : ИНФРА-М, 2023. – 378 с.

23. Ковалёв, В. В. Финансовый анализ : методы и процедуры / В. В. Ковалёв. – М. : Финансы и статистика, 2022. – 560 с.

24. Сергеев, И. В. Экономика организации (предприятия) : учебник / И. В. Сергеев. – М. : Юрайт, 2023. – 511 с.

25. Липсиц, И. В. Инвестиционный анализ. Подготовка и оценка инвестиций в реальные активы : учебник / И. В. Липсиц, В. В. Коссов. – М. : Магистр, 2022. – 512 с.

26. Глухов, В. В. Экономика инновационной деятельности : учебное пособие / В. В. Глухов. – СПб. : Питер, 2021. – 432 с.

27. Государственный доклад о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2023 году. – М. : Минприроды России, 2024. – 498 с.

28. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». – М. : Минприроды России, 2024. – 612 с.

29. Стратегия цифровой трансформации Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – М. : Росгидромет, 2023. – 74 с.

30. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». – М. : Правительство Российской Федерации, 2024. – 118 с.

31. Методические рекомендации по организации государственного мониторинга подземных вод. – М. : Роснедра, 2022. – 96 с.

32. Руководство по гидрогеологическому мониторингу территорий. – М: Росгидромет, 2021. – 154 с.

33. Бизнес-модель проекта HydroNet : внутренний документ проекта. – Краснодар, 2025. – 18 с.

34. Финансовая модель проекта HydroNet : расчётные материалы проекта. – Краснодар, 2025. – 12 с.

35. Материалы выпускной квалификационной работы по проекту HydroNet. – Краснодар, 2025. – 25 с.

36. Шестаков, В.М. Гидрогеодинамика / В.М. Шестаков. – М.: МГУ, 1995. – 368 с.

37. Антипова, А.В. Климатология и метеорология: учебное пособие / А.В. Антипова,Л.И. Кураева. – М.: КноРус, 2020. – 248 с.

38. Богословский, В.А. Общая гидрология (гидрология суши) / В.А. Богословский, А.А. Самохин, К.Е. Иванов. – Л.: Гидрометеоизда т, 1984. – 422 с.

39. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. – СПб.: ГГИ, 2008. – 600 с.

40. Воронцов, П.А. Грунтовые воды в зоне многолетней мерзлоты / П.А. Воронцов // Метеорология и гидрология. – 2019. – №5. – С. 88-97.

41. Гидрология: учебник для вузов / под ред. В.Н. Михайлова, А.Д. Добровольского. – М.: Высшая школа, 2007. – 463 с.

42. Гидрометеорологическая безопасность в Российской Федерации: современное состояние и перспективы развития / под ред. А.А. Васильева. – М.: Гидрометцентр России, 2020. – 345 с.

43. ГОСТ Р 22.1.15-2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование природных чрезвычайных ситуаций. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 18 с.

44. Давыдов, Л.К. Гидрология / Л.К. Давыдов, А.А. Дмитриева, Н.Г. Конкина. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 448 с.

45. Евстигнеев, В.М. Режим грунтовых вод Восточно-Европейской равнины / В.М. Евстигнеев. – М.: Наука, 1990. – 216 с.

46. Зайцев, И.К. Гидрология дельт рек / И.К. Зайцев. – М.: ГЕОС, 2012. – 240 с.

47. Зайцева, И.С. Климат Санкт-Петербурга и его изменения / И.С. Зайцева // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. – 2018. – Вып. 590. – С. 45-67.

48. Кондратьев, С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования / С.А. Кондратьев. – СПб.: Наука, 2007. – 255 с.

49. Коронкевич, Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения / Н.И. Коронкевич. – М.: Наука, 1990. – 205 с.

50. Львович, М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее / М.И. Львович. – М.: Мысль, 1974. – 448 с.

51. Методические указания по расчету испарения с поверхности суши. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 96 с.

52. Мироненко, В.А. Динамика подземных вод / В.А. Мироненко, В.М. Шестаков. – М.: Недра, 1978. – 327 с.

53. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. – М.: Росгидромет, 2008. – 227 с.

54. Павлов, А.Н. Гидрогеология Санкт-Петербурга / А.Н. Павлов // Инженерная геология. – 2017. – №3. – С. 12-21.

55. Попов, О.В. Подземные воды в природе и их использование / О.В. Попов. – М.: МГУ, 1985. – 176 с.

56. Романенко, В.А. Гидрологические процессы в дельте Волги / В.А. Романенко // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – №6. – С. 612-620.

57. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край / под ред. Н.М. Жила. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 664 с.

58. Самарина, В.С. Гидрогеохимия / В.С. Самарина. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. – 360 с.

59. Семенов, В.А. Климат и сельское хозяйство России / В.А. Семенов. – М.: Росинформагротех, 2006. – 200 с.

60. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. – М.: Госстрой России, 2003. – 48 с.

61. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – М.: Стандартинформ, 2020. – 115 с.

62. Справочник по климату СССР. Вып. 3. Ленинградская область. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 326 с.

63. Иванов, Н.Н. Ландшафтно-климатические зоны земного шара / Н.Н. Иванов // Записки Географического общества СССР. – 1948. – Т. 1. – С. 1-224.

64. Калинин, Г.П. Проблемы глобальной гидрологии / Г.П. Калинин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 377 с.

65. Кондратьев, С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования / С.А. Кондратьев. – СПб.: Наука, 2007. – 255 с.

66. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – Москва: Минстрой России, 2016. – 78 с.

67. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ. – Москва: Госстрой России, 1997. – 47 с.

68. СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. – Москва: Минстрой России, 2016. – 65 с.

69. Владимиров А. М., Орлов В. Г. Охрана и мониторинг поверхностных вод. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2009. – 120 с.

70. Бродская Н. А., Мякишева Н. В., Александрова К. В. Оценка взаимосвязей поверхностных и подземных вод различных масштабов // Ученые записки РГГМУ. – 2013. – № 38. – С. 36–50.

71. Рождественский А. В., Лобанова А. Г. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2001. – 167 с.

72. Матафонов Е. П. Наблюдения за уровнем подземных вод. Возможности методики // Вестник РГГМУ. – 2020. – № 4. – С. 45–52.

73. Методические рекомендации по гидрологическим измерениям и мониторингу. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2019. – 67 с.

74. Ученые записки РГГМУ. Выпуск 57. Проблемы мониторинга природной среды. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2022. – 250 с.

75. Шестеркин В. П. Гидрология. – Москва: Юрайт, 2022. – 302 с.

76. Короновский Н. В., Ясаманов Н. А. Геология. – Москва: Академия, 2018. – 448 с.

77. Кирюхин В. А. Общая гидрогеология. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2016. – 356 с.

78. Железняк М. Н. Мониторинг подземных вод. – Москва: Инфра-М, 2019. – 215 с.

79. Solinst Levelogger Series User Guide [Электронный ресурс]. URL: https://www.solinst.com (дата обращения: 01.06.2026).

80. Diver Data Loggers Product Manual [Электронный ресурс]. URL: https://www.vanessen.com (дата обращения: 24.05.2026).

81. Keller Pressure Measurement – Water Level Monitoring Guide [Электронный ресурс]. URL: https://www.keller-druck.com (дата обращения: 09.06.2026).

82. ESP8266EX Datasheet. Version 7.0 [Электронный ресурс]. URL: https://www.espressif.com (дата обращения: 25.05.2026).

83. ESP8266 Arduino Core Documentation [Электронный ресурс]. URL: https://arduino-esp8266.readthedocs.io (дата обращения: 03.06.2026).

84. Adafruit BME280 Sensor Library Documentation [Электронный ресурс]. URL: https://learn.adafruit.com (дата обращения: 03.06.2026).

85. RTClib Documentation. Real-Time Clock Library for Arduino [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/adafruit/RTClib (дата обращения: 25.05.2026).

86. Банин А. А. Автоматизированные системы экологического мониторинга. – Москва: Инфра-М, 2021. – 284 с.

87. Иванов С. В. Современные методы автоматизированных гидрологических наблюдений // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 8. – С. 52–58.

88. Полищук В. Ю. Цифровые технологии в мониторинге природной среды. – Москва: КНОРУС, 2022. – 210 с.

89. Гаврилов А. В. Беспроводные технологии передачи данных в системах мониторинга // Автоматизация и современные технологии. – 2023. – № 5. – С. 18–24.

90. DS3231 Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal Datasheet [Электронный ресурс]. URL: https://www.analog.com (дата обращения: 26.05.2026).

91. Коваленок В.В. Динамические и стохастические модели гидрологического цикла. – Минск: Наука и техника, 1988. – 256 с.

92. Коваленок В.В. Моделирование природных процессов: динамические системы, топология и катастрофы. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 312 с.

93. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. – Москва: Наука, 2018. – 284 с.

94. Польшкова И.Н. Математическое моделирование динамики внедрения подземных вод [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-dinamiki-vnedreniya-podzemnyh-vod-pri-otrabotke-gazovogo-mestorozhdeniya/viewer (дата обращения: 09.06.2026).

95. Мотовилов Ю.Г. Система физико-математических моделей формирования речного стока и её применение в задачах гидрологических расчётов и прогнозов. – Москва: Наука, 2019. – 295 с.

96. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. – 218 с.

97. Туркманова Ш., Равшанов Н. Математическое моделирование изменения уровня грунтовых вод в двухслойных средах // Научный вестник. – 2022. [Электронный ресурс]. URL: https://staff.tiiame.uz/storage/users/790/articles/NzqCB8Nizu1oT4jt5UblvgOza3j9BDaFr3aumuVz.pdf (дата обращения: 01.06.2026).

98. Потапова Е.Ю., Рошаль А.А. Гидродинамическое и миграционное моделирование при оценке запасов подземных вод [Электронный ресурс]. URL: https://nedra21.ru/upload/iblock/224/oa143f1dvn7f3s4tnzhqxamr8ksvsz1c6/st_13.pdf (дата обращения: 03.06.2026).

99. Бродская Н.А., Виноград Н.А., Соколова А.А. Полевая гидрогеология: учебно-методическое пособие. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2021. – 148 с.

100. Калутин Ю.И., Сырый В.С. Математические модели регулирования водно-воздушного режима почв на основе расчёта водно-солевых потоков в зоне аэрации. – Москва: Агропромиздат, 2000. – 214 с.

101. Серикова Е.Н., Стрельникова Е.А. Математическое моделирование изменения уровней грунтовых вод в городах с учётом ведущих режимообразующих факторов // Водные ресурсы. – 2014. – № 6. – С. 58–65.

102. Дёмина О.Н., Аксёнов Я.А. Моделирование изменения уровня грунтовых вод при постоянной водоотдаче // Известия вузов. Геология и разведка. – 2016. – № 4. – С. 42–48.

103. Лавебник Е.А., Губенко Н.Е. Система прогноза уровня подземных вод в Ленинградской области // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2013. – № 2. – С. 77–85.

104. Марчук С.Г., Сезонов Я.М. Статистические методы прогноза уровня грунтовых вод. – Москва: Наука, 2011. – 196 с.

105. Бабрыкин Н.В. Оптимальное управление режимом грунтовых вод. – Москва: Недра, 2007. – 184 с.