



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

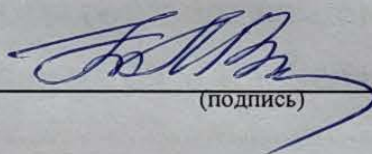
На тему: «Разработка и повышение достоверности измерений автономного
дозиметрического комплекса»

Исполнитель Хохлин Арсений Олегович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 25 » мая 2026 года

Санкт-Петербург
2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ АВТОНОМНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	6
1.1 Ионизирующее излучение и дозиметрические величины	6
1.2 Газоразрядная регистрация излучения и особенности счётчика Гейгера-Мюллера СБМ-20	7
1.3 Достоверность измерений и метрологическая обработка результатов	10
1.4 Аппаратная архитектура мобильного дозиметрического комплекса	12
1.5 Программная архитектура, регистрация и хранение данных	17
1.6 Теоретические основы повышения достоверности дозиметрического канала	19
1.7 Теоретические основы повышения достоверности метеорологических измерений	21
1.8 Требования к корпусу, питанию и автономности комплекса	23
1.9 Выводы по первой главе	24
ГЛАВА 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	26
2.1 Итоговая аппаратная структура готового комплекса	26
2.2 Общий алгоритм работы готового комплекса	29
2.3 Дозиметрический канал на базе RadSens и счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20	31
2.4 Метеорологический канал и вспомогательные датчики	32
2.5 Локальное хранение, веб-интерфейс и OLED-управление	34
2.6 Программная архитектура ESP32-S3	37
2.7 Ранний прототип на ESP8266 как исходная точка разработки	38
2.8 Выявленные проблемы и способы их устранения	41
2.9 Первые опыты записи данных: температурный ряд в помещении	42
2.10 Корпус и подготовка к полевым измерениям	43
2.11 Полевые измерения в центральной части Васильевского острова	46
2.12 Детальное обследование набережной Большой Невы	49
2.13 Измерения при удалении от гранитной поверхности	51
2.14 Передача данных на домашний сервер	53
2.15 Оценка применимости SIM800C и развитие в сторону 4G LTE	57
2.16 Что удалось улучшить в готовом варианте	59
2.17 Выводы по второй главе	60
ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСА	62
3.1 Методика экспериментальных исследований	63
3.2 Исследование характеристик счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20	71
3.3 Исследование влияния спектральной фильтрации	78
3.4 Подбор и коррекция коэффициента пересчёта	82

3.5 Калибровка метеорологических датчиков	85
3.6 Анализ факторов, влияющих на достоверность измерений	93
3.7 Выводы по третьей главе	97
ГЛАВА 4. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АВТОНОМНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	98
4.1 Практическое применение комплекса и возможность создания сети автономных дозиметрических постов.....	99
4.2 Перспективы перехода на LTE/4G	102
4.3 Развитие домашнего сервера до станции обработки данных	105
4.4 Анализ автономности и энергопотребления	108
4.5 Расчёт объёма данных и ресурса SD-карты.....	111
4.6 Анализ устойчивости программно-аппаратной архитектуры.....	113
4.7 Экономическая оценка опытного образца и сравнение с аналогами	116
4.8 Выводы по четвертой главе	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
ЛИТЕРАТУРА.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ	131

ВВЕДЕНИЕ

Контроль мощности дозы ионизирующего излучения относится к задачам, где результат определяется чувствительностью детектора и устойчивостью всей измерительной системы: питания, алгоритма счёта, способа усреднения, сохранения данных, температурного режима корпуса и правильности калибровки. Для мобильного дозиметрического комплекса особенно важна воспроизводимость измерений в полевых условиях, поскольку прибор работает вне лаборатории, перемещается между точками наблюдений и должен сохранять данные независимо от наличия связи. Работа находится на стыке метеорологии и радиационной экологии.

Актуальность темы связана с необходимостью доступных мобильных средств радиационного мониторинга, пригодных для обследования городской территории, поиска локальных участков с повышенным уровнем ионизирующего излучения и последующего анализа результатов с координатной и временной привязкой. Готовые бытовые дозиметры обычно отображают только текущие значения, а исследовательская работа требует регистрации исходных данных, контроля условий измерения и возможности последующей статистической обработки.

В рамках данной магистерской диссертации мной самостоятельно разработан мобильного дозиметрический комплекс. Работа началась с прототипа на базе ESP8266, на котором была проверена возможность совместной работы дозиметрического модуля, датчиков окружающей среды, спутниковой навигации, локального веб-интерфейса и записи данных. По мере усложнения проекта была создана новая аппаратно-программная архитектура на базе ESP32-S3, дополненная локальным дисплеем, кнопочным управлением, модулем microSD, GNSS-приёмником, датчиками метеорологических параметров, экспериментальным GSM/GPRS-каналом передачи данных и специально спроектированным корпусом.

Объектом исследования является мобильный дозиметрический комплекс для регистрации мощности дозы ионизирующего излучения и сопутствующих параметров окружающей среды. Предметом исследования являются аппаратные решения, программные алгоритмы и методы метрологической обработки, влияющие на достоверность измерений.

Цель работы состоит в разработке и повышении достоверности измерений мобильного дозиметрического комплекса на базе ESP32-S3, дозиметрического модуля RadSens со счётчиком Гейгера-Мюллера СБМ-20, датчиков метеорологических параметров и средств локального хранения данных.

Задачи работы связаны с анализом физических основ регистрации ионизирующего излучения, выбором аппаратной архитектуры комплекса, описанием принципов работы его основных модулей, разработкой способов регистрации и хранения данных, оценкой факторов, влияющих на погрешность дозиметрического и метеорологического каналов, а также с обоснованием методов калибровки и статистической обработки результатов.

Практическая значимость работы заключается в создании авторского инженерного решения, пригодного для полевых измерений и дальнейшего развития. Разработанный дозиметр-радиометр отображает текущие показания, сохраняет временные ряды, фиксирует координаты, учитывает условия окружающей среды и поддерживает последующую проверку полученных результатов по исходным данным.

Кроме того, комплекс фиксирует температуру, влажность и давление, что позволяет не только контролировать условия измерений, но и получать самостоятельные метеорологические данные, привязанные к координатам. Такие данные могут использоваться для микроклиматического анализа городской среды и верификации моделей приземного слоя атмосферы.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ АВТОНОМНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

1.1 Ионизирующее излучение и дозиметрические величины

Ионизирующим называется излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию ионов разного знака. В задачах радиационного контроля наибольшее значение имеют альфа-, бета-, гамма- и рентгеновское излучения. Альфа-частицы обладают высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью, бета-частицы имеют больший пробег в веществе, а гамма-кванты и рентгеновское излучение обладают высокой проникающей способностью и регистрируются многими типами дозиметров-радиометров [6-9].

Для описания источников ионизирующего излучения используется активность A , измеряемая в беккерелях. Один беккерель соответствует одному ядерному превращению в секунду. При оценке воздействия излучения на человека важны поглощённая, эквивалентная и эффективная дозы. Поглощённая доза характеризует энергию, переданную единице массы вещества, и выражается в греях. Эквивалентная доза учитывает вид излучения и выражается в зивертах. В прикладной дозиметрии при обследовании местности часто используют мощность дозы, то есть дозу, отнесённую ко времени [6, 9].

В задачах контроля окружающей среды существенную роль играет естественный радиационный фон. Он формируется за счёт космического излучения и природных радионуклидов, содержащихся в земной коре, строительных материалах, воздухе и воде. Для городской среды характерны пространственные различия фоновых значений: гранитная облицовка, минеральные материалы и особенности рельефа могут давать локальное увеличение мощности дозы ионизирующего излучения без признаков техногенного загрязнения.

Нормативные документы в области радиационной безопасности задают общие принципы ограничения облучения населения и персонала, требования к обращению с источниками ионизирующего излучения и контрольные уровни для практической деятельности [6-8]. Мобильный дозиметрический комплекс мониторингового назначения не заменяет специализированные лабораторные средства измерений, однако может применяться для поисковых и сравнительных обследований, предварительного выявления неоднородностей и накопления данных для последующей проверки.

1.2 Газоразрядная регистрация излучения и особенности счётчика Гейгера-Мюллера СБМ-20

Газоразрядные детекторы основаны на ионизации газа внутри герметичного объёма. При прохождении частицы или фотона через рабочий объём образуются первичные ионные пары. Под действием высокого электрического поля электроны ускоряются и вызывают лавинную ионизацию. В режиме Гейгера-Мюллера амплитуда выходного импульса практически не зависит от энергии зарегистрированной частицы, поэтому детектор хорошо подходит для счёта событий, но не позволяет напрямую определять энергию излучения [13].

Счётчик Гейгера-Мюллера СБМ-20 представляет собой цилиндрический газоразрядный детектор со стальным корпусом, предназначенный преимущественно для регистрации гамма-излучения и жёсткого бета-излучения. Трубка не имеет тонкого слюдяного окна, поэтому альфа-частицы практически не достигают чувствительного объёма. Такая особенность важна при интерпретации показаний: прибор на базе СБМ-20 характеризует главным образом гамма-составляющую внешнего поля и частично реагирует на достаточно энергичные бета-частицы [13].

К основным паспортным характеристикам счётчика Гейгера-Мюллера СБМ-20 относятся рабочее напряжение порядка 350-475 В, рекомендуемое напряжение около 400 В, собственный фон не более нескольких импульсов в секунду, длина чувствительной части около 90 мм, диаметр корпуса около 10 мм, ресурс порядка 10^8 импульсов и время разрешения порядка 190 мкс. Для гамма-излучения ^{137}Cs чувствительность обычно задаётся через счётную скорость при известной экспозиционной или эквивалентной мощности дозы. На практике эти параметры зависят от схемы включения, напряжения питания, экранирования, геометрии измерения и энергетического состава излучения [13].

Металлическая стенка счётчика Гейгера-Мюллера СБМ-20 одновременно выполняет защитную и фильтрующую функцию. Она снижает вклад мягкого бета-излучения и низкоэнергетических фотонов, но не устраняет его полностью. При лабораторной проверке рядом с контрольным источником это может приводить к завышению показаний относительно поверенного дозиметра, ориентированного на измерение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения. Поэтому в данной работе важное место занимает подбор коэффициента пересчёта и оценка влияния дополнительного свинцового экранирования, результаты которых приведены в экспериментальной части диссертации.

При регистрации излучения газоразрядный детектор формирует последовательность импульсов. За интервал измерения t подсчитывается число импульсов N , после чего определяется счётная скорость n :

$$n = N / t,$$

где n — счётная скорость, имп./с;

N — число зарегистрированных импульсов;

t — длительность измерения, с.

Переход от счётной скорости к мощности дозы выполняется с применением коэффициента пересчёта k . Для конкретного детектора и конкретной энергетической области коэффициент подбирается по результатам сравнительных измерений с поверенным средством измерений:

$$\dot{H} = k \cdot n,$$

где $\dot{H}$ — мощность дозы, мкЗв/ч;

k — коэффициент пересчёта, мкЗв·с/(ч·имп.);

n — счётная скорость, имп./с.

Статистическая природа радиоактивного распада приводит к флуктуациям числа импульсов. Для пуассоновского счёта стандартное отклонение числа зарегистрированных импульсов приблизительно равно $\sqrt{N}$, а относительная статистическая неопределённость убывает при увеличении времени накопления:

$$u_r(N) \approx 1 / \sqrt{N}.$$

где $u_r(N)$ — относительная статистическая неопределённость счёта;

N — число зарегистрированных импульсов за выбранный интервал.

Из этой зависимости следует практический вывод для мобильного дозиметра-радиометра: короткие интервалы измерения дают более быстрый отклик, а длинные интервалы повышают статистическую устойчивость результата. Алгоритм работы прибора должен обеспечивать разумный компромисс между оперативностью отображения и достоверностью усреднённого значения.

Дополнительным фактором является мёртвое время детектора. После формирования импульса трубке требуется небольшой интервал восстановления, в течение которого новая частица может не быть зарегистрирована. При фоновых значениях мощности дозы влияние мёртвого времени обычно невелико, а при

повышенной счётной скорости оно способно приводить к занижению числа импульсов. Для мониторингового прибора это учитывается выбором диапазона применения, проверкой линейности отклика и сравнением с поверенным дозиметром.

1.3 Достоверность измерений и метрологическая обработка результатов

Достоверность измерений в мобильном дозиметрическом комплексе определяется совокупностью свойств: правильностью выбранной физической модели, стабильностью измерительного канала, воспроизводимостью повторных наблюдений, корректностью временной и пространственной привязки, а также возможностью сопоставления с поверенными средствами измерений. Для разработанного комплекса это означает необходимость регистрации итоговой мощности дозы и исходных параметров: числа импульсов, времени накопления, координат, состояния датчиков и диагностической информации.

Погрешность результата удобно рассматривать как сумму систематической и случайной составляющих. Систематическая составляющая проявляется в устойчивом смещении показаний относительно эталонного значения. Случайная составляющая связана с флуктуациями счёта, шумами датчиков, нестабильностью условий измерений и ограниченным числом повторений. Разделение этих составляющих позволяет выбирать подходящий способ повышения достоверности: калибровочную поправку, увеличение времени усреднения, фильтрацию, изменение конструкции или доработку алгоритмов [4, 5].

В работе с датчиками и дозиметрическим каналом целесообразно использовать единый набор статистических показателей. Для i -го контрольного измерения погрешность может быть записана как:

$$\Delta_i = X_{\text{эт},i} - X_{\text{изм},i},$$

где $X_{эт,i}$ — значение поверенного средства измерений;

$X_{изм,i}$ — значение исследуемого канала;

Δ_i — отклонение исследуемого канала от эталонного значения.

Среднее значение погрешности характеризует систематическое смещение:

$$\text{bias} = (1 / m) \cdot \Sigma \Delta_i,$$

где bias — среднее смещение;

m — число контрольных точек;

$\Sigma \Delta_i$ — сумма отклонений по всем контрольным точкам.

Для оценки общего расхождения применяются средняя абсолютная ошибка и среднеквадратическая ошибка:

$$\text{MAE} = (1 / m) \cdot \Sigma |\Delta_i|,$$

где MAE — средняя абсолютная ошибка;

m — число контрольных точек;

$|\Delta_i|$ — модуль отклонения в i -й контрольной точке.

$$\text{RMSE} = \sqrt{[(1 / m) \cdot \Sigma (\Delta_i)^2]},$$

где RMSE — среднеквадратическая ошибка;

m — число контрольных точек;

Δ_i — отклонение исследуемого канала от эталонного значения.

Введение постоянной поправки, равной оцененному систематическому смещению, относится к простым и эффективным способам повышения достоверности измерений. Для температурных и влажностных датчиков такая

процедура часто даёт заметный эффект, поскольку часть недорогих цифровых сенсоров имеет устойчивое смещение относительно поверенного средства измерений. Для дозиметрического канала аналогичную роль выполняет подбор коэффициента пересчёта по результатам сравнения с поверенным дозиметром.

В метрологической практике неопределённость измерений выражает степень сомнения в значении измеряемой величины. Подход GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement — Руководство по выражению неопределённости измерений) рассматривает неопределённость как количественную характеристику, связанную с результатом измерения и отражающую разброс значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине [11]. Для мобильного дозиметра-радиометра в бюджет неопределённости входят статистика счёта, неопределённость эталонного прибора, повторяемость установки источника, нестабильность питания, температурные влияния, алгоритм усреднения и погрешность временной привязки.

Повышение достоверности измерений должно рассматриваться как инженерная процедура, объединяющая аппаратные и программные меры. К аппаратным мерам относятся стабильное питание высоковольтного преобразователя, правильная геометрия размещения датчиков, защита от осадков и перегрева, экранирование помех и разделение тепловыделяющих модулей. К программным мерам относятся контроль ошибок связи, запись исходных данных, усреднение, фильтрация выбросов, хранение диагностических признаков и возможность последующего пересчёта.

1.4 Аппаратная архитектура мобильного дозиметрического комплекса

Разработка комплекса начиналась с прототипа на базе ESP8266. Эта платформа позволила проверить основную идею проекта: объединить

дозиметрический канал, датчики окружающей среды, GNSS-навигацию, веб-интерфейс и локальное хранение данных в одном мобильном приборе. На начальном этапе такой подход был оправдан простотой, доступностью NodeMCU и наличием Wi-Fi, однако дальнейшее развитие комплекса выявило ограничения однопроцессорной архитектуры, малого объёма оперативной памяти и ограниченного числа аппаратных интерфейсов.

По мере добавления microSD, OLED-дисплея, веб-сервера, GNSS-потока, датчиков BME280 и АНТ30, а также экспериментального канала связи, нагрузка на ESP8266 стала распределяться неравномерно. Запись на карту памяти, формирование JSON-ответов, обработка NMEA-сообщений и обслуживание веб-интерфейса выполнялись в одном основном цикле. Из-за этого отдельные блокирующие операции могли снижать отзывчивость интерфейса и нарушать регулярность опроса датчиков. Переход на ESP32-S3 стал инженерно обоснованным этапом модернизации, поскольку новая платформа дала запас вычислительных ресурсов, больше памяти, несколько аппаратных UART/SPI/I²C-интерфейсов и возможность разделить задачи средствами FreeRTOS [14].

Таблица 1.1 – Сравнение ESP8266 и ESP32-S3 применительно к мобильному дозиметрическому комплексу

Критерий	ESP8266 на начальном этапе проекта	ESP32-S3 в модернизированной версии
Архитектура	Одно вычислительное ядро. Все основные операции выполняются в общем цикле программы.	Два ядра Xtensa LX7 с поддержкой FreeRTOS. Измерения, логирование, интерфейс и обмен данными могут выполняться независимыми задачами.
Оперативная память	Свободный объём heap ограничен; при веб-интерфейсе, строковых операциях и JSON возрастает риск фрагментации.	Существенно больший объём SRAM и наличие вариантов с PSRAM. Удобнее хранить буферы, JSON-структуры и диагностические данные.
Интерфейсы	Ограниченное число аппаратных UART и GPIO усложняет одновременное подключение GNSS, дисплея, SD-карты и дополнительных датчиков.	Больше GPIO и аппаратных шин I ² C, SPI, UART. Проще развести GNSS, RadSens, microSD, OLED и SIM800C без конфликтов.
Работа с веб-интерфейсом	HTTP-запросы конкурируют с опросом датчиков и записью на карту памяти.	Веб-сервер может обслуживаться отдельной задачей, что повышает отзывчивость интерфейса.
Запись данных	Операции microSD способны задерживать основной цикл.	Логирование можно вынести в фоновую задачу, сохраняя регулярность измерений.
Причина перехода	Подходит для проверки идеи и раннего прототипа.	Выбран как основа текущего комплекса из-за многозадачности, запаса памяти и устойчивой работы нескольких модулей одновременно.

ESP8266 в проекте выполняет роль исходной экспериментальной платформы, а ESP32-S3 является основной платформой текущей версии комплекса. Переход связан с изменением класса задачи: от проверки работоспособности отдельных модулей к созданию мобильной системы,

способной длительно регистрировать данные, обслуживать интерфейсы и сохранять измерения при переменных условиях эксплуатации.

Основные модули комплекса и их значение для достоверности измерений приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные модули мобильного дозиметрического комплекса

Модуль	Назначение модуля
ESP32-S3	Центральный микроконтроллер комплекса. Двухъядерная архитектура Xtensa LX7 до 240 МГц, Wi-Fi 2,4 ГГц, Bluetooth LE, аппаратные интерфейсы I ² C, SPI и UART. Обеспечивает параллельную обработку измерений, веб-интерфейса, локального дисплея и записи данных [14].
RadSens	Дозиметрический модуль с I ² C-интерфейсом, содержащий высоковольтный преобразователь, узел формирования импульсов и цифровой интерфейс. Используется для включения счётчика Гейгера-Мюллера СБМ-20 в микроконтроллерный комплекс и получения измерительных параметров [12].
Счётчик Гейгера-Мюллера СБМ-20	Газоразрядный детектор для регистрации преимущественно гамма-излучения и жёсткого бета-излучения. Рабочее напряжение порядка 350-475 В, рекомендуемое около 400 В, время разрешения порядка 190 мкс. Требуется калибровочного коэффициента пересчёта и учёта статистической природы счёта [13].
BME280	Цифровой датчик температуры, относительной влажности и атмосферного давления с I ² C/SPI-интерфейсом. По паспортным данным обеспечивает диапазон температуры от -40 до +85 °С, диапазон давления 300-1100 гПа и измерение относительной влажности 0-100 % [16].
АНТ30	Цифровой датчик температуры и относительной влажности с I ² C-интерфейсом. Характеризуется заводской калибровкой, малым энергопотреблением и используется как независимый температурно-влажностный канал [17].

Модуль	Назначение модуля
GNSS-модуль GPS/ГЛОНАСС	Модуль спутниковой навигации, передающий координаты и время по UART. Для модулей семейства u-blox NEO-M8 характерна одновременная работа с несколькими системами GNSS, включая GPS и ГЛОНАСС [15].
microSD-модуль	Энергонезависимый носитель данных, подключаемый по SPI. Позволяет сохранять измерения в формате CSV с временной меткой и координатами, что снижает риск потери данных при отсутствии связи.
OLED-дисплей 128×64 с кнопками	Локальный интерфейс оператора. Контроллер SSD1306 поддерживает графическую OLED-матрицу и обмен данными по I ² C/SPI. Кнопки позволяют переключать экраны и запускать сервисные функции без внешнего клиента [19].
TEMT6000	Аналоговый датчик освещённости на основе фототранзистора, спектрально адаптированного к видимой области. Используется для регистрации условий освещения и анализа внешних факторов при полевых измерениях [20].
SIM800C	GSM/GPRS-модуль с UART-интерфейсом. Поддерживает пакетную передачу данных в сетях 2G и может использоваться для отправки результатов на сервер. Требуется отдельное внимание к питанию из-за импульсного потребления тока при регистрации в сети и передаче данных [18].

Выбор модуля RadSens связан с тем, что он содержит высоковольтную часть, узел формирования импульсов и цифровой интерфейс. Такой подход уменьшает объём самостоятельной высоковольтной схемотехники и снижает риск ошибок при проектировании. Для магистерской работы основное внимание сосредоточено на создании мобильного комплекса, повышении достоверности измерений и проверке метрологических характеристик.

Датчики BME280 и АНТ30 включены в комплекс для описания условий окружающей среды. Температура, влажность и давление не являются прямыми дозиметрическими величинами, однако они характеризуют условия работы прибора, помогают анализировать полевые измерения и позволяют оценивать влияние корпуса, вентиляции и нагрева электроники на стабильность показаний. GNSS-модуль обеспечивает пространственную и временную привязку

измерений, а microSD-модуль выполняет роль основного канала сохранения результатов.

OLED-дисплей и кнопочный интерфейс обеспечивают эксплуатацию комплекса без компьютера или смартфона. Отображение текущей мощности дозы, счётной скорости, координат, состояния карты памяти и диагностических сообщений повышает удобство полевых работ. Модуль SIM800C рассматривается как экспериментальный канал связи. Он расширяет автономность комплекса за счёт передачи данных через сеть GSM/GPRS, но предъявляет высокие требования к источнику питания и электромагнитной совместимости. Поэтому локальная запись на карту памяти остаётся базовым и наиболее надёжным способом сохранения измерений.

1.5 Программная архитектура, регистрация и хранение данных

Программная архитектура мобильного дозиметрического комплекса должна обеспечивать непрерывность измерений, предсказуемость временных интервалов, корректное сохранение данных и устойчивую работу пользовательских интерфейсов. Для ESP32-S3 целесообразна многозадачная организация: отдельные задачи отвечают за опрос дозиметрического канала, чтение GNSS, регистрацию метеорологических параметров, запись на microSD, обновление дисплея, обслуживание веб-интерфейса и работу с внешним каналом связи.

Такое разделение уменьшает влияние блокирующих операций. Запись строки на microSD-карту, обработка HTTP-запроса или ожидание ответа модуля связи не должны останавливать обработку импульсов и обновление измерительных данных. Для обмена между задачами могут использоваться очереди, мьютексы и общие структуры с контролем доступа. При этом важно

сохранять простоту архитектуры, поскольку чрезмерное усложнение прошивки повышает риск ошибок.

Формат записи должен быть простым, читаемым и пригодным для последующей обработки. Для этой цели подходит CSV-строка, содержащая время, широту, долготу, температуру, относительную влажность, давление, мощность дозы, счётную скорость, число импульсов и диагностические признаки. Сохранение исходных и промежуточных параметров повышает достоверность результатов: при необходимости можно повторно рассчитать мощность дозы с другим коэффициентом, исключить повреждённые строки или оценить стабильность показаний.

При работе с временными рядами важна единая политика времени. GNSS-модуль может быть источником точного времени, однако до получения валидного спутникового решения прибор должен помечать данные как неполные. Серверная временная метка при удалённой передаче также полезна, но она не заменяет локальную регистрацию времени измерения. Для последующего анализа необходимо различать время формирования измерения, время записи на карту и время передачи на сервер.

Веб-интерфейс комплекса выполняет функции оперативного просмотра и выгрузки данных. Он удобен при лабораторной настройке, проверке датчиков и быстрых полевых измерениях. Локальный дисплей выполняет роль независимого интерфейса, доступного без Wi-Fi. Совместное использование веб-интерфейса, дисплея и файлового хранения повышает отказоустойчивость комплекса, поскольку выход из строя одного способа взаимодействия не делает прибор полностью непригодным к работе.

Передача данных через GSM/GPRS или другой внешний канал должна выполняться после записи результата в локальную память. Такая последовательность защищает измерения от потери при сбое сети. Для удалённой передачи важны аутентификация запроса, контроль ответа сервера,

повторные попытки при ошибке и диагностическая запись результата передачи. Эти меры относятся к информационной безопасности и к достоверности данных, поскольку позволяют доказать факт сохранения и передачи конкретного измерения.

1.6 Теоретические основы повышения достоверности дозиметрического канала

Дозиметрический канал комплекса включает счётчик Гейгера-Мюллера СБМ-20, высоковольтный источник, узел формирования импульсов, программный счётчик, алгоритм усреднения и коэффициент пересчёта. Достоверность результата определяется согласованной работой всех этих элементов. Даже исправный детектор может давать некорректные значения мощности дозы при неверном коэффициенте пересчёта, недостаточном времени накопления или нестабильном питании.

К повышению достоверности измерений относится калибровка разработанного комплекса по поверенному дозиметру. Такой подход позволяет уменьшить систематическое расхождение между показаниями опытного образца и эталонного прибора, а также подобрать коэффициент пересчёта, обеспечивающий наилучшее согласование результатов. Сравнение выполняется в фиксированной геометрии, при одинаковом положении источника, исследуемого прибора и эталонного средства измерений. Повторные измерения на каждой точке позволяют уменьшить влияние случайных флуктуаций и получить устойчивые средние значения. Для источников малой активности особое значение имеют фоновые измерения, поскольку вклад естественного фона может быть сопоставим с полезным сигналом.

Коэффициент пересчёта целесообразно корректировать по регрессионной модели. При исходной зависимости между показаниями исследуемого прибора и

эталона значение коэффициента уточняется так, чтобы наклон линии регрессии приближался к единице:

$$k_{нов} = k_{исх} / a,$$

где $k_{нов}$ — скорректированный коэффициент пересчёта;

$k_{исх}$ — исходный коэффициент пересчёта;

a — наклон регрессионной зависимости между показаниями исследуемого прибора и эталона.

Отдельное значение имеет спектральная фильтрация. Счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20 обладает чувствительностью к бета-излучению и низкоэнергетическим фотонам, что оказывает влияние на сопоставимость результатов с показаниями эталонного дозиметра. Применение свинцовой фольги позволяет снизить вклад низкоэнергетической составляющей и уменьшить масштабные отклонения. Эффективность такого подхода должна оцениваться экспериментально, поскольку чрезмерное экранирование способно снизить чувствительность и ухудшить статистику счёта.

Существенное влияние на устойчивость результатов оказывает выбор интервала усреднения. Увеличение времени накопления импульсов снижает влияние статистического разброса, характерного для регистрации ионизирующего излучения, и делает результаты измерений более стабильными. Для фоновых измерений характерно малое число импульсов за короткое время, поэтому мгновенные значения обладают большой относительной неопределённостью. Увеличение времени накопления уменьшает разброс, но снижает пространственное разрешение при движении прибора. В мобильном комплексе полезно хранить как оперативное значение для отображения, так и более устойчивое усреднённое значение для анализа.

Для получения воспроизводимых результатов необходим контроль внешних условий проведения эксперимента. На показания дозиметрического канала могут влиять расстояние до источника, геометрия расположения приборов, свойства окружающих материалов, температура, влажность и наличие экранирующих поверхностей. Разделение питания, применение конденсаторов, уменьшение длины сигнальных проводов, корректная разводка земли и пространственное разделение модулей являются практическими мерами повышения стабильности.

Дополнительным фактором повышения достоверности является сохранение исходных и диагностических данных. Архивирование результатов измерений, координат, времени регистрации и служебной информации позволяет проводить повторную обработку данных, проверять корректность работы комплекса и анализировать возможные причины отклонений. Запись только пересчитанной мощности дозы ограничивает возможности последующей проверки. Наличие числа импульсов, длительности измерения, коэффициента пересчёта, состояния GPS, температуры внутри корпуса и признаков ошибок связи позволяет выполнять повторный анализ и объяснять отдельные выбросы.

1.7 Теоретические основы повышения достоверности метеорологических измерений

Метеорологический блок мобильного комплекса предназначен для регистрации температуры, относительной влажности и атмосферного давления. Эти параметры описывают условия работы прибора и расширяют интерпретацию результатов. При полевых измерениях температура и солнечный нагрев могут влиять на электронику, аккумулятор и корпус, а влажность и осадки определяют требования к защите датчиков.

Датчик BME280 совмещает измерение температуры, относительной влажности и давления. Его преимущества связаны с компактностью, цифровым интерфейсом и устойчивой работой в микроконтроллерных устройствах [16]. Барометрический канал обычно является наиболее стабильным каналом BME280; в рамках данной диссертации это подтверждается экспериментальными данными калибровки, которые будут приведены далее в разделе с результатами исследования. Температурный и влажностный каналы требуют сопоставления с поверенными средствами измерений, поскольку размещение датчика внутри корпуса и тепловыделение электроники могут формировать устойчивое смещение.

Датчик АНТ30 используется как независимый температурно-влажностный канал. Его паспортные свойства включают заводскую калибровку, I²C-интерфейс и малое энергопотребление [17]. Сравнение BME280 и АНТ30 позволяет оценить абсолютную близость к эталону и характер временного ряда. Более сглаженный сигнал удобен для мониторинга, а более чувствительный сигнал лучше отражает кратковременные изменения среды.

Для повышения качества метеорологических измерений применяется сопоставление с поверенными средствами измерений. В каждой контрольной точке значение исследуемого датчика целесообразно брать как среднее нескольких последних измерений перед моментом фиксации эталонного значения. Такой подход уменьшает влияние одиночных шумовых выбросов и делает сравнение более устойчивым. В данной работе такой принцип используется при обработке результатов калибровки метеорологических датчиков.

Bias correction основана на введении постоянной поправки, равной среднему смещению относительно эталона. Метод особенно эффективен для датчиков, у которых преобладает систематическая составляющая погрешности. После введения поправки необходимо повторно рассчитать RMSE, MAE и

доверительный интервал смещения, поскольку уменьшение среднего отклонения не всегда означает уменьшение случайного разброса.

Конструктивная защита метеорологических датчиков должна выполнять две задачи: снижать влияние солнечного нагрева и сохранять естественную вентиляцию. Геометрия жалюзи, белый материал корпуса и отделение тепловыделяющих компонентов от измерительных элементов позволяют приблизить условия измерения к требованиям метеорологической практики [10]. Для мобильного комплекса это особенно важно, поскольку прибор должен работать на открытом воздухе и не всегда может размещаться в стандартной психрометрической будке.

1.8 Требования к корпусу, питанию и автономности комплекса

Корпус мобильного дозиметрического комплекса выполняет измерительную и защитную функцию. Он должен защищать электронику от осадков, пыли, случайного механического воздействия и прямого солнечного излучения. При этом корпус не должен превращаться в замкнутый нагретый объём, поскольку перегрев ухудшает качество метеорологических измерений и может влиять на стабильность электроники.

Разделение внутреннего объёма корпуса на функциональные зоны повышает стабильность показаний. Микроконтроллер, модуль связи и стабилизаторы питания являются источниками тепла, поэтому их размещение рядом с температурно-влажностными датчиками нежелательно. Дозиметрический модуль и счётчик Гейгера-Мюллера СБМ-20 также должны иметь фиксированное положение, так как изменение геометрии относительно корпуса или экрана влияет на воспроизводимость измерений.

Система питания относится к ключевым факторам достоверности. Высоковольтный преобразователь дозиметрического модуля должен получать

стабильное напряжение, поскольку изменение режима питания может повлиять на работу газоразрядного детектора. Для ESP32-S3, microSD и дисплея важны кратковременные токовые пики. Для SIM800C проблема выражена сильнее: при регистрации в сети и передаче данных модуль может потреблять импульсный ток до единиц ампер, что требует отдельной линии питания, ёмкостной поддержки и качественной общей земли [18].

Автономность комплекса определяется ёмкостью источника питания, средним током потребления, режимом работы дисплея, частотой записи и активностью радиомодуля. Снижение частоты обновления дисплея, отключение неиспользуемых интерфейсов, пакетная запись на карту памяти и ограничение сеансов передачи данных позволяют уменьшить энергопотребление без ухудшения качества измерений. Для полевых работ важны расчёт времени работы и предсказуемость поведения прибора при снижении напряжения питания.

С точки зрения надёжности обосновано применять принцип локального приоритета данных. Измерение сначала сохраняется на карту памяти, а затем передаётся во внешний канал связи. Такой порядок снижает риск потери результата при сетевой ошибке. Для длительных измерительных кампаний также целесообразно сохранять диагностический журнал, включающий перезагрузки, ошибки SD-карты, потерю GNSS-сигнала и неудачные попытки передачи данных.

1.9 Выводы по первой главе

В первой главе мы рассмотрели физические основы регистрации ионизирующего излучения, дозиметрические величины и особенности применения счётчика Гейгера-Мюллера СБМ-20 в составе мобильного дозиметра-радиометра. Для такого детектора принципиальны статистический

характер счёта, зависимость результата от времени накопления, энергетическая чувствительность и необходимость экспериментального подбора коэффициента пересчёта.

Мы также показали, что достоверность измерений формируется дозиметрическим модулем и всей архитектурой комплекса. Начальный вариант на ESP8266 позволил проверить идею проекта, однако переход на ESP32-S3 сделал возможной более устойчивую многозадачную работу, отдельную обработку измерений, интерфейсов, записи данных и диагностических функций. Это особенно важно для прибора, который должен работать автономно и сохранять результаты в полевых условиях.

Отдельное внимание уделено метеорологическим датчикам, локальному хранению данных, GNSS-привязке, корпусу и питанию. Эти элементы не являются второстепенными, поскольку от них зависит воспроизводимость условий измерения, сохранность временных рядов и возможность последующей проверки результатов. Поэтому повышение достоверности в данной работе рассматривается как сочетание калибровки, статистической обработки, продуманной аппаратной схемы и инженерной защиты прибора от внешних воздействий.

Сформированная теоретическая основа будет использоваться далее при описании разработки комплекса, лабораторной проверки счётчика Гейгера-Мюллера СБМ-20, подбора коэффициента пересчёта, оценки влияния экранирования и калибровки метеорологических каналов.

ГЛАВА 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Теоретическая часть первой главы показала, что достоверность мобильного дозиметра-радиометра определяется не только работой счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20, но и всей архитектурой прибора: временем накопления импульсов, устойчивостью питания, корректной координатной привязкой, условиями размещения датчиков, сохранностью данных и организацией программной обработки.

Готовый комплекс представляет собой авторскую аппаратно-программную систему для регистрации мощности дозы ионизирующего излучения с одновременной фиксацией координат, времени и параметров окружающей среды. В его состав входят измерительный канал на базе модуля RadSens со счетчиком Гейгера-Мюллера СБМ-20, микроконтроллер ESP32-S3, датчик метеорологических параметров, модуль спутниковой навигации, карта памяти microSD, OLED-дисплей с локальными кнопками управления, веб-интерфейс и канал передачи данных на домашний сервер. Такой состав сформировался в результате практической разработки: начальный вариант на ESP8266 позволил проверить общую идею прибора, а последующие испытания показали необходимость перехода на более производительную платформу, локальное хранение, расширенный интерфейс и более устойчивую программную архитектуру.

2.1 Итоговая аппаратная структура готового комплекса

Центральным узлом готового комплекса является ESP32-S3. Переход на эту платформу был сделан после практической проверки прототипа на ESP8266, когда стало ясно, что для одновременной работы дозиметрического канала, GPS, SD-карты, веб-интерфейса, дисплея и сетевого обмена нужен больший запас вычислительных ресурсов. ESP32-S3 обеспечивает двухъядерную архитектуру,

поддержку FreeRTOS, большой объем оперативной памяти и большее количество аппаратных интерфейсов. Это позволило перейти от последовательного выполнения всех операций в одном цикле к разделению задач по функциональным потокам.

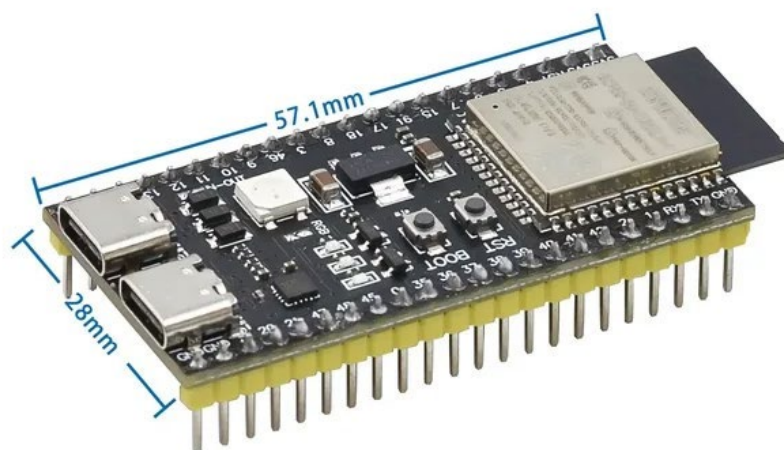


Рисунок 2.1 - Микроконтроллерная плата ESP32-S3, использованная в модернизированном варианте комплекса

Готовая схема комплекса построена вокруг принципа независимости основных подсистем. Дозиметрический канал выполняет регистрацию ионизирующего излучения, метеорологический канал фиксирует условия измерения, навигационный модуль задает координатную привязку, SD-карта обеспечивает локальную сохранность данных, веб-интерфейс и OLED-дисплей служат для контроля состояния прибора, а модуль мобильной связи передает результаты на сервер. Такая структура делает прибор не просто набором

датчиков, а полноценным автономным регистратором, в котором измерение, хранение, отображение и передача данных связаны в единую систему.

Таблица 2.1 - Основные узлы готового дозиметрического комплекса

Узел комплекса	Назначение в готовой архитектуре	Инженерная роль
ESP32-S3	Управление измерениями, веб-интерфейсом, файловой системой, дисплеем и передачей данных	Обеспечивает многозадачность и запас ресурсов по сравнению с ESP8266
RadSens + счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20	Регистрация импульсов и формирование оценки мощности дозы ионизирующего излучения	Основной измерительный канал комплекса
BME280	Измерение температуры, относительной влажности и давления	Фиксация условий, при которых проводится дозиметрическое измерение
GPS/ГЛОНАСС-модуль	Определение координат и времени	Привязка каждой записи к месту измерения
microSD	Сохранение CSV-файлов с результатами измерений	Резервная и основная локальная память при отсутствии связи
OLED 128x64 с кнопками	Отображение текущих параметров и локальное управление	Работа с прибором без компьютера и веб-клиента
SIM800C	Передача данных на домашний сервер через мобильную сеть	Проверенный канал удаленной телеметрии и основа для дальнейшего перехода к 4G LTE
Корпус с жалюзи	Защита электроники и датчиков от внешних воздействий	Снижение влияния солнца, осадков и локального нагрева

Такой состав модулей сформировался не сразу. В начале проекта использовался NodeMCU ESP8266, простая макетная сборка, веб-страница и базовый набор датчиков. Затем были добавлены SD-карта, экспериментальный датчик освещенности TЕМТ6000, файловый менеджер, ОТА-обновление и

дополнительные графики. После практических испытаний стало понятно, что часть этих решений полезна только на этапе исследования, а часть необходима для готового комплекса. Поэтому в окончательной логике основной упор сделан на надежную регистрацию мощности дозы, координат, времени и метеорологических параметров, а дополнительные каналы рассматриваются как вспомогательные или экспериментальные.

2.2 Общий алгоритм работы готового комплекса

Работа комплекса начинается с инициализации аппаратных интерфейсов. ESP32-S3 запускает шины I2C и SPI, проверяет доступность RadSens, BME280 и карты памяти, подготавливает UART для GPS/ГЛОНАСС-модуля и SIM800C, включает веб-сервер и локальный интерфейс на OLED-дисплее. После запуска прибор переходит в режим непрерывного сбора данных. В этом режиме измерительные подсистемы работают параллельно, а итоговая запись формируется из последних корректных значений.

Важнейшей особенностью готового варианта является разделение функций. GPS-поток обрабатывается отдельно, так как NMEA-пакеты приходят непрерывно и требуют регулярного чтения. Запись на SD-карту выполняется так, чтобы не блокировать обновление веб-интерфейса и дисплея. Подготовка JSON-ответов для веб-страницы отделена от логики физического измерения. Передача данных через SIM800C инициируется отдельным действием и не должна нарушать локальную регистрацию. Благодаря этому сбой в одном вспомогательном канале не приводит к потере основной функции прибора.

В готовом варианте каждая запись представляет собой набор параметров, достаточный для последующей проверки и анализа. В CSV-файл заносятся время, координаты, температура, влажность, давление и мощность дозы ионизирующего излучения. При отсутствии валидных координат прибор не

должен записывать случайные или неопределенные значения как достоверные. Для этого используется проверка состояния навигационного модуля и сохранение последней корректной позиции, когда это допустимо по логике измерений.

time;lat;lng;temp;hum;pres;rad

12:35:10;59.933284;30.276584;22.3;30.2;1024.5;0.20

Такой формат выбран из практических соображений. CSV-файл легко открыть в табличном редакторе, загрузить в Python, объединить с картографическими данными и использовать для построения временных рядов. На этапе отладки это оказалось особенно удобно: можно было быстро проверить, не нарушается ли порядок полей, корректно ли записываются координаты, сохраняется ли временная последовательность и нет ли пропусков при длительной работе.

Таблица 2.2 - Логика работы основных программных блоков

Функциональный блок	Что выполняет в готовой версии	Почему это важно для достоверности
Опрос RadSens	Получает текущие данные дозиметрического канала	Сохраняет связь между зарегистрированными импульсами и итоговой мощностью дозы
GPS-обработка	Читает поток координат и времени	Позволяет доказать, где именно получено значение
Метеоканал	Фиксирует температуру, влажность и давление	Дает контекст условий измерения и работы корпуса
Логирование	Записывает строки в CSV на microSD	Предотвращает потерю данных при отсутствии сети
Веб-интерфейс	Показывает карту, текущие значения, графики и файлы	Позволяет контролировать

		прибор без подключения по USB
OLED-интерфейс	Отображает состояние прибора и режимы	Дает локальный контроль в полевых условиях
Передача на сервер	Отправляет данные на домашний сервер	Создает удаленную копию и упрощает централизованный сбор

2.3 Дозиметрический канал на базе RadSens и счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20

Основной измерительный канал готового комплекса построен на модуле RadSens со счетчиком Гейгера-Мюллера СБМ-20. В рамках данной главы мы рассмотрим этот канал с инженерной точки зрения: как источник данных для всей системы, как часть программного цикла и как элемент, требующий аккуратной обработки результатов. Более подробная метрологическая проверка, подбор коэффициента пересчета и сопоставление с поверенным дозиметром рассматриваются в следующей главе.

Счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20 регистрирует отдельные события, возникающие при взаимодействии ионизирующего излучения с чувствительным объемом газоразрядной трубки. На выходе измерительного канала появляются импульсы, число которых за выбранный интервал связано с интенсивностью излучения. Поскольку регистрация имеет статистический характер, отдельные короткие измерения могут отличаться друг от друга даже при неизменном положении прибора. Поэтому в программной логике комплекса важны усреднение, контроль времени накопления и корректная интерпретация кратковременных всплесков.

Модуль RadSens упрощает аппаратную часть, так как на его плате реализованы узлы, необходимые для работы трубки. Для микроконтроллера этот

модуль выглядит как цифровой источник данных. ESP32-S3 считывает показания по интерфейсу I2C и помещает их в общую структуру измерений. После этого данные становятся доступны одновременно для веб-страницы, OLED-дисплея, CSV-журнала и отправки на сервер. Такая схема снижает риск расхождения между тем, что отображается пользователю, и тем, что сохраняется в файл.

Большое значение при создании дозиметрического комплекса имела непрерывность регистрации. Дозиметрический канал не должен зависеть от того, открыт ли веб-интерфейс, идет ли передача по SIM800C или выполняется ли скачивание файла с SD-карты. Поэтому в готовом варианте измерительная логика рассматривается как приоритетная. Все остальные функции являются обслуживающими: они отображают, сохраняют или передают уже полученные данные, но не должны останавливать процесс регистрации.

2.4 Метеорологический канал и вспомогательные датчики

Метеорологический канал включен в комплекс для фиксации условий, в которых выполняется дозиметрическое измерение. Основным датчиком этого канала является BME280. Он измеряет температуру воздуха, относительную влажность и атмосферное давление. Эти параметры важны не как замена профессиональной метеостанции, а как сопроводительная информация к каждой дозиметрической записи. Для мобильного прибора это особенно полезно, потому что корпус, солнечный нагрев, вентиляция и влажность могут влиять на условия работы электроники и датчиков.

BME280 был выбран еще на раннем этапе проекта и сохранился в готовой архитектуре. На первом прототипе его данные выводились в веб-интерфейс и отображались на графиках. После добавления SD-карты значения температуры, влажности и давления стали сохраняться вместе с мощностью дозы и координатами. Дальнейшие испытания, которые описываются в последующей

части диссертации, показали высокую стабильность барометрического канала BME280. Поэтому утверждение о его удобстве для регистрации давления основано не только на паспортных характеристиках, но и на собственных данных, полученных при калибровке датчиков.

Дополнительно в ходе работы использовался датчик АНТ30. Его роль связана с проверкой и сравнением температурно-влажностных измерений. В готовой структуре он важен как дополнительный сенсор для оценки точности и сопоставления с BME280. Такой подход позволил не ограничиваться одним цифровым датчиком и в дальнейшем выделить, какой канал лучше подходит для температуры, а какой - для относительной влажности.

На этапе расширения прототипа был подключен аналоговый датчик освещенности ТЕМТ6000. Его задача состояла в проверке возможности включения дополнительных контекстных параметров в общую запись. Датчик позволил протестировать аналоговый вход, добавить новый график в веб-интерфейс и проверить структуру CSV с расширенным набором полей. Внешний вид этого модуля приведен на рисунке 2.2.

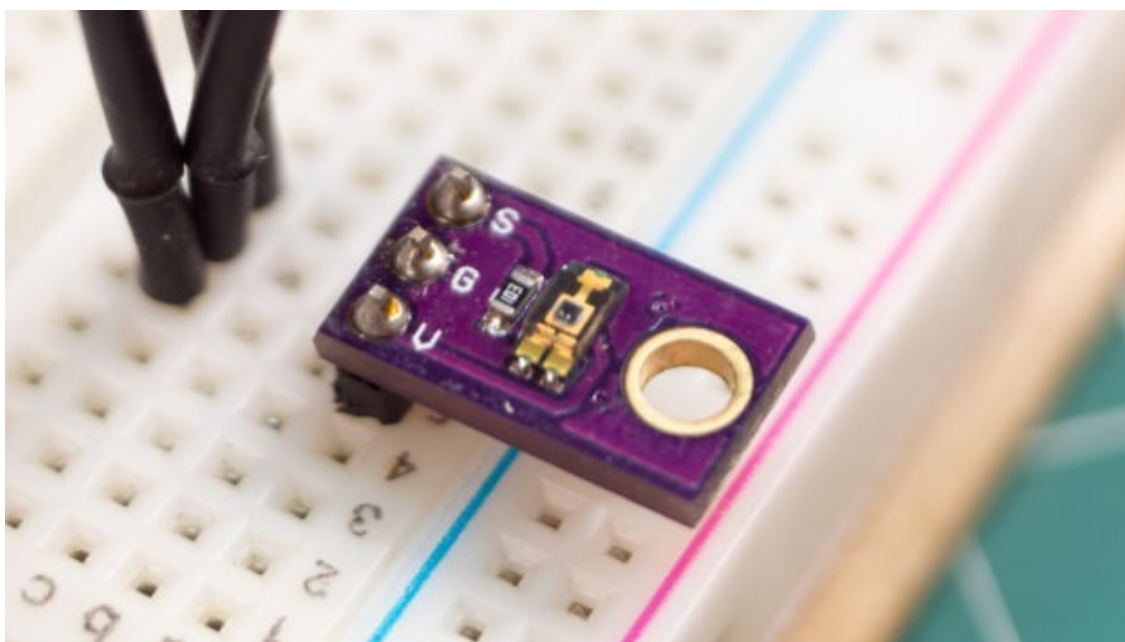


Рисунок 2.2 - Датчик освещенности ТЕМТ6000, использовавшийся на этапе расширения прототипа

После практической оценки ТЕМТ6000 не был включен в основное измерительное ядро. Причина не в неработоспособности датчика, а в том, что освещенность не является ключевым параметром для достижения цели диссертации. Основная задача комплекса связана с повышением достоверности дозиметрических измерений, а для этого важнее обеспечить устойчивость счетного канала, корректную координатную привязку, надежную запись на SD-карту, понятный интерфейс и возможность передачи данных. ТЕМТ6000 выполнил роль экспериментального модуля, показал расширяемость архитектуры и помог проверить работу с дополнительными данными, но в готовой логике приоритет был отдан более значимым каналам.

2.5 Локальное хранение, веб-интерфейс и OLED-управление

Готовый комплекс рассчитан на автономную работу, поэтому локальное хранение данных является одной из основных функций. Карта памяти microSD подключена по SPI-интерфейсу и используется для записи CSV-файлов. Каждая строка добавляется последовательно, без накопления большого массива в оперативной памяти. Такой способ снижает риск потери данных при длительной работе и упрощает обработку результатов после измерительного выезда.

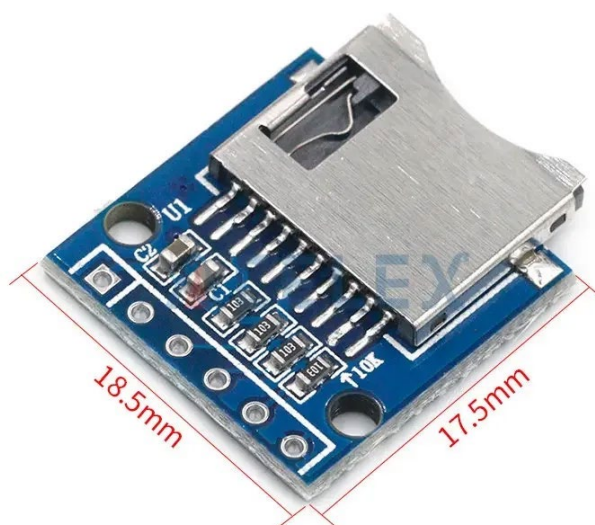


Рисунок 2.3 - Модуль microSD для локального хранения результатов измерений

Использование SD-карты изменило саму идеологию прибора. В раннем варианте данные в основном наблюдались через веб-интерфейс, поэтому работа зависела от подключения пользователя к локальной странице. После добавления накопителя комплекс стал автономным регистратором. Измерение может выполняться без ноутбука, телефона или постоянной сети. Даже при сбое передачи на сервер данные сохраняются на носителе и остаются доступными для последующей выгрузки.

Веб-интерфейс в готовой архитектуре выполняет несколько функций. Он показывает текущие значения, карту, графики и состояние прибора. Также через него реализована работа с файлами на SD-карте: просмотр списка, скачивание и удаление. Это особенно важно после установки корпуса, поскольку постоянное извлечение карты памяти неудобно и повышает риск механического повреждения. Веб-интерфейс превращает прибор в самостоятельное устройство, с которым можно работать через браузер без подключения к среде разработки.

Для локального управления установлен OLED-дисплей 128x64 с блоком кнопок. В отличие от ранней версии, где дисплей играл второстепенную роль, в готовом комплексе он используется как панель состояния. На экран можно вывести мощность дозы, параметры окружающей среды, координаты, состояние SD-карты и связи. Кнопки позволяют переключать страницы, запускать отдельные действия и контролировать прибор в поле, когда веб-интерфейс недоступен или неудобен.



Рисунок 2.4 - OLED-дисплей с кнопками для локального интерфейса комплекса

Сочетание SD-карты, веб-страницы и локального дисплея повысило устойчивость эксплуатации. Пользователь может наблюдать текущие параметры на экране, загружать полные файлы через браузер, а при необходимости передавать отдельные записи на сервер. Эти каналы не дублируют друг друга полностью, а образуют несколько уровней контроля: локальный быстрый контроль, локальное долговременное хранение и удаленное централизованное хранение.

2.6 Программная архитектура ESP32-S3

Переход на ESP32-S3 стал одним из наиболее важных изменений. На ESP8266 вся логика выполнялась в одном основном цикле. По мере увеличения числа функций такой подход стал создавать задержки: GPS требовал регулярного чтения потока, SD-карта могла занимать десятки миллисекунд на запись, веб-сервер должен был обслуживать запросы, а формирование JSON потребляло память. В готовой версии эти подсистемы разделены по задачам, что делает поведение прибора более предсказуемым.

В архитектуре ESP32-S3 логически выделяются задачи измерения, навигации, логирования, интерфейса и передачи данных. Измерительная задача получает данные RadSens и BME280. Навигационная задача обрабатывает поток GPS. Задача логирования формирует CSV-строку и записывает ее на карту памяти. Веб-сервер подготавливает JSON и HTML-ответы. Отдельная логика отвечает за отправку данных через SIM800C. Такой подход уменьшает вероятность ситуации, при которой длительная операция передачи или записи блокирует измерение.

Таблица 2.3 - Сравнение программной организации ранней и готовой версии

Подсистема	ESP8266 на раннем этапе	ESP32-S3 в готовой архитектуре
GPS-обработка	Чтение в основном цикле, возможный рост времени цикла при большом числе NMEA-пакетов	Отдельная задача, данные обновляются независимо от веб-интерфейса
Запись на SD-карту	Блокирующая операция, способная задерживать остальные действия	Фоновая логика записи, влияние на интерфейс снижено
Веб-интерфейс	Зависит от загрузки основного цикла	Обслуживается независимо от измерительной логики
JSON-ответы	Конкатенация строк и риск фрагментации heap	Структурированное формирование данных с

		учетом большего объема RAM
Дисплей	Частое обновление влияло на основной цикл	Обновляется с разумным интервалом и не мешает регистрации
Передача данных	Сложно совмещать с остальными блоками	Выделена как отдельная процедура, не должна останавливать локальную запись

Это показывает, почему начальный ESP8266 следует рассматривать как этап проверки идеи, а не как полноценную финальную платформу. Он позволил быстро собрать прототип, проверить RadSens, BME280, GPS и веб-страницу. Однако готовый комплекс требует большего: одновременной работы нескольких интерфейсов, устойчивой записи, приема команд пользователя, обновления дисплея и передачи данных. Для такого режима ESP32-S3 оказался более подходящим вариантом.

2.7 Ранний прототип на ESP8266 как исходная точка разработки

После описания готовой архитектуры важно вернуться к началу проекта, потому что именно ранний прототип показал, какие функции действительно нужны прибору. Первая версия была собрана на NodeMCU ESP8266 и объединяла RadSens, BME280, GPS/ГЛОНАСС-модуль и дисплей. Ее задача состояла не в окончательной реализации, а в проверке принципа: можно ли собрать данные о мощности дозы, координатах и метеопараметрах в одном устройстве и вывести их пользователю через веб-интерфейс.

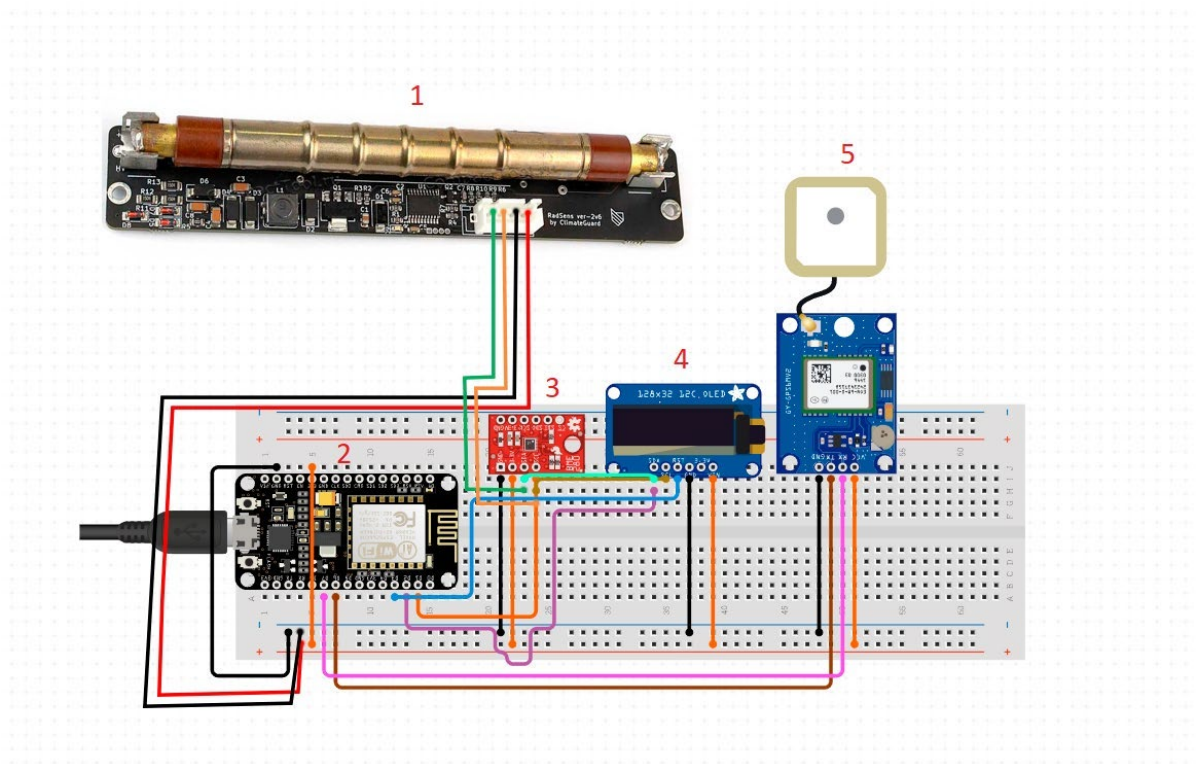


Рисунок 2.5 - Схема начального варианта комплекса на ESP8266

Ранний веб-интерфейс показывал координаты, карту, показания RadSens и графики параметров. Благодаря ему стало понятно, что браузер может быть удобным инструментом для отладки и просмотра данных. На рисунке 2.6 показан внешний вид этой страницы. Несмотря на простоту, именно этот интерфейс стал основой для дальнейшего развития: позднее в него были добавлены графики, файловый менеджер, кнопки управления и отправка данных.

08.12.2024, 16:02

Environmental Monitor

Environmental Monitor

GPS Data

Latitude: 59.9375
Longitude: 30.242366
GPS Time: 1307.23

1

Location Map



2

Radiation Data

Uptime: 0h 7m 54s
Dynamic: 0.18 µSv/h
Static: 0.13 µSv/h
Pulse: 217

3

Temperature



4

Humidity



Pressure



Radiation



Refresh Data

192.168.1.103

1/1

Рисунок 2.6 - Ранняя версия веб-интерфейса с картой, графиками и показаниями датчиков

Первый прототип был полезен именно как инженерный макет. Он позволил быстро проверить совместимость модулей, структуру данных, работу Wi-Fi и возможность отображения результатов без компьютера. При этом он же выявил ограничения, которые стали причиной последующей модернизации.

2.8 Выявленные проблемы и способы их устранения

При длительной работе макета был выявлен ряд проблем. Первая группа проблем была связана с временной организацией программы. В раннем варианте дисплей обновлялся слишком часто: интервал около 150 мс создавал избыточную нагрузку, хотя пользователь не нуждался в настолько быстрой перерисовке. В готовой логике интервал обновления был увеличен до примерно 1000 мс. Это не ухудшило читаемость, но снизило нагрузку на микроконтроллер и сделало поведение интерфейса спокойнее.

Вторая проблема касалась GPS. В городской среде спутниковый сигнал может пропадать или появляться с задержкой. Ранняя программа могла корректно вывести сообщение о потере сигнала на дисплей, но веб-карта при отсутствии валидных координат получала неопределенное состояние. Это было устранено введением проверки координат и использованием последней корректной позиции. В готовой версии отсутствие новых координат рассматривается как состояние системы, которое должно быть явно обработано, а не как исключительная ошибка.

Третья проблема возникала при подключении к Wi-Fi. Бесконечное ожидание соединения блокировало работу прибора при неверном пароле или недоступной сети. Для мобильного дозиметрического комплекса такая логика неприемлема, потому что измерение и запись должны продолжаться даже без сети. В программу был добавлен тайм-аут подключения. После истечения заданного времени прибор не зависает, а продолжает работу с доступными локальными функциями.

Четвертая проблема относилась к памяти. Формирование JSON через постоянную конкатенацию строк на ESP8266 могло приводить к фрагментации heap-памяти. При короткой демонстрации это не всегда заметно, но при

длительной работе веб-интерфейса такие эффекты становятся опасными. Для решения была применена библиотека ArduinoJson, предназначенная для формирования структурированных JSON-документов во встраиваемых системах [21]. В сочетании с переходом на ESP32-S3 это повысило устойчивость формирования ответов для веб-интерфейса.

Пятая группа проблем была связана с блокирующими операциями. Запись на SD-карту, обработка GPS-потока и сетевые действия занимали время. На ESP8266 эти операции конкурировали друг с другом внутри одного цикла. В готовой архитектуре тяжелые действия разнесены логически, а передача данных через SIM800C не должна нарушать локальную запись. Это особенно важно, потому что удаленная связь может быть нестабильной, а локальные данные должны сохраняться при любых условиях.

2.9 Первые опыты записи данных: температурный ряд в помещении

До выхода в город была проведена простая, но важная проверка мобильной записи. Прибор регистрировал температуру воздуха в помещении с интервалом около 10 секунд в течение примерно одного часа. Цель опыта заключалась не в получении метеорологически значимого результата, а в проверке всей цепочки данных: датчик - микроконтроллер - CSV-файл - SD-карта - последующая обработка на компьютере.

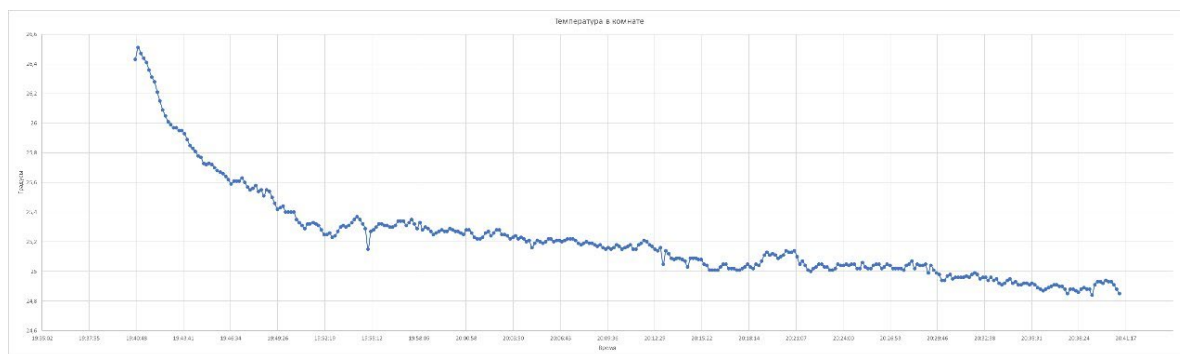


Рисунок 2.7 - Первый опыт записи температурного ряда в помещении

На графике видно постепенное снижение температуры примерно с 26,4 °С до 24,8 °С. Наиболее быстрый спад наблюдался в первые 10-15 минут, затем ход стал более плавным. Небольшие флуктуации могли быть связаны с перемешиванием воздуха в помещении, открытием двери, перемещением рядом с прибором или шумом измерительного канала. Для разработки это был полезный результат: он показал, что система способна сохранять непрерывный временной ряд с достаточной детализацией и что данные после выгрузки пригодны для построения графиков.

Этот опыт стал промежуточным этапом между макетной отладкой и полевыми измерениями. После него стало понятно, что SD-карта работает не только как формальное дополнение, а как полноценный регистратор. В дальнейшем тот же принцип записи был использован при измерениях на Васильевском острове, где каждая точка дополнялась координатами и значением мощности дозы ионизирующего излучения.

2.10 Корпус и подготовка к полевым измерениям

Для готового комплекса корпус является не декоративной деталью, а частью измерительной системы. Он должен защищать электронику, снижать влияние прямого солнечного излучения и осадков, обеспечивать вентиляцию и не создавать сильного локального нагрева около метеорологических датчиков. На ранних выездах использовался простой защитный корпус, который позволил проверить идею полевой эксплуатации. Позднее была разработана более продуманная конструкция.



Рисунок 2.8 - Защитный корпус прибора во время полевых измерений

Итоговый корпус был спроектирован с учетом принципов психрометрической будки. Нижняя часть с жалюзи обеспечивает приток воздуха и одновременно защищает датчики от прямого воздействия внешней среды. Верхняя часть предназначена для размещения ESP32-S3, модулей связи,

навигации, SD-карты и дисплея. Разделение отсеков важно, потому что микроконтроллер и модуль связи могут нагреваться, а этот нагрев не должен напрямую влиять на показания BME280.

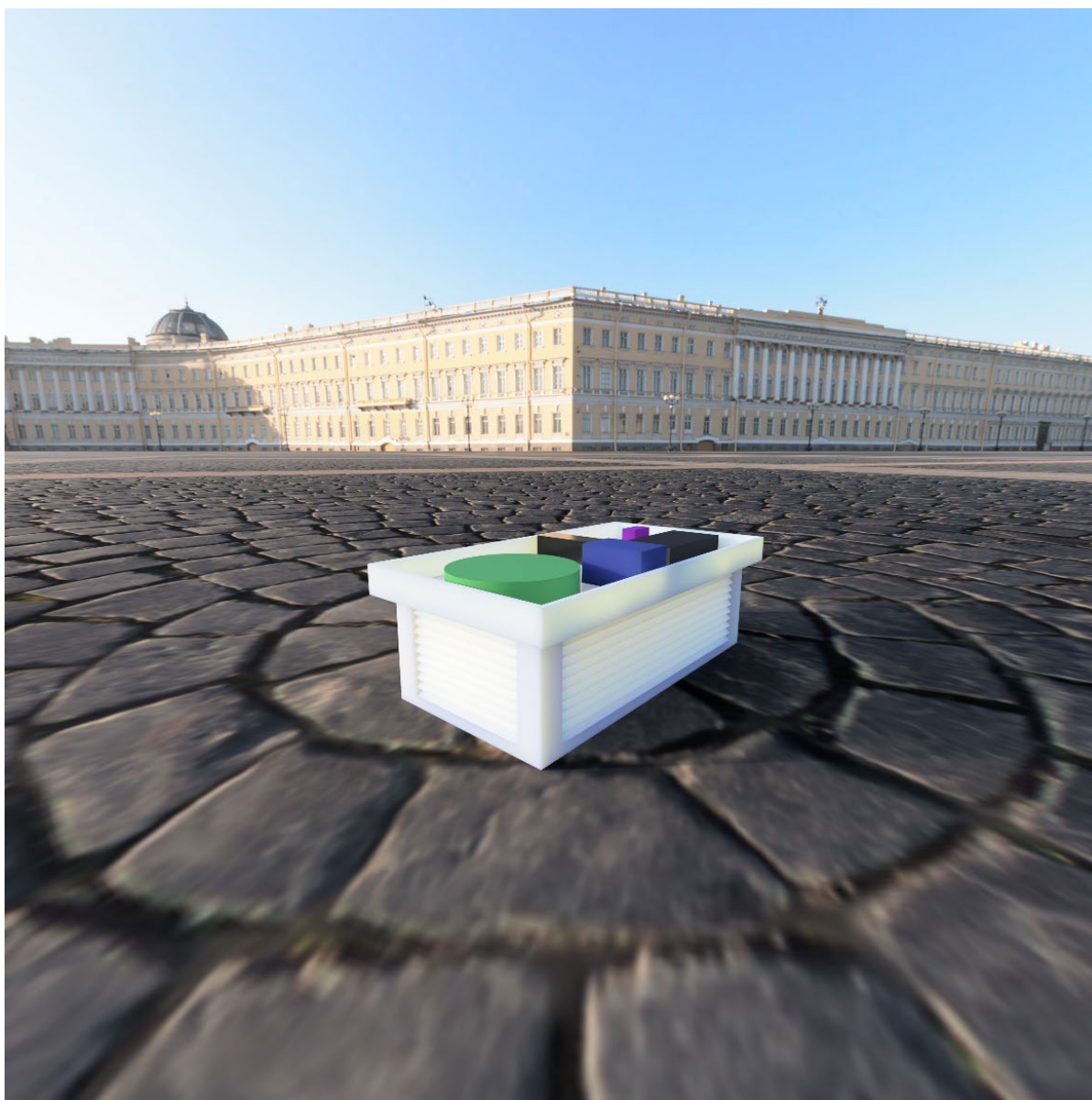


Рисунок 2.9 - Проект защитного корпуса для готового варианта комплекса

Корпус из белого пластика выбран для уменьшения нагрева под солнцем. Жалюзийная геометрия позволяет сохранить вентиляцию и одновременно уменьшить попадание прямых солнечных лучей и осадков. Такой подход важен для достоверности метеорологического сопровождения дозиметрических данных. Даже при том, что основной измерительный канал связан с

ионизирующим излучением, условия работы датчиков и электроники должны быть стабильными и контролируемыми.

2.11 Полевые измерения в центральной части Васильевского острова

Практическая проверка комплекса началась с полевых измерений в центральной части Васильевского острова Санкт-Петербурга. Эти измерения имели двойное значение. С одной стороны, они позволили получить первые данные о пространственном изменении мощности дозы ионизирующего излучения. С другой стороны, они стали проверкой прибора как системы: оценивалась устойчивость питания, работа GPS, запись данных, поведение корпуса и удобство эксплуатации в реальных городских условиях. Полевые измерения на Васильевском острове — это микроклиматическая съёмка городской территории.

Маршрут включал десять точек. Среди них были участки около Балтийского завода, набережная, Благовещенский сад, район школы, Смоленское кладбище, Приморская и другие точки с различным характером поверхности и городской застройки. Точки измерений показаны на рисунке 2.10.

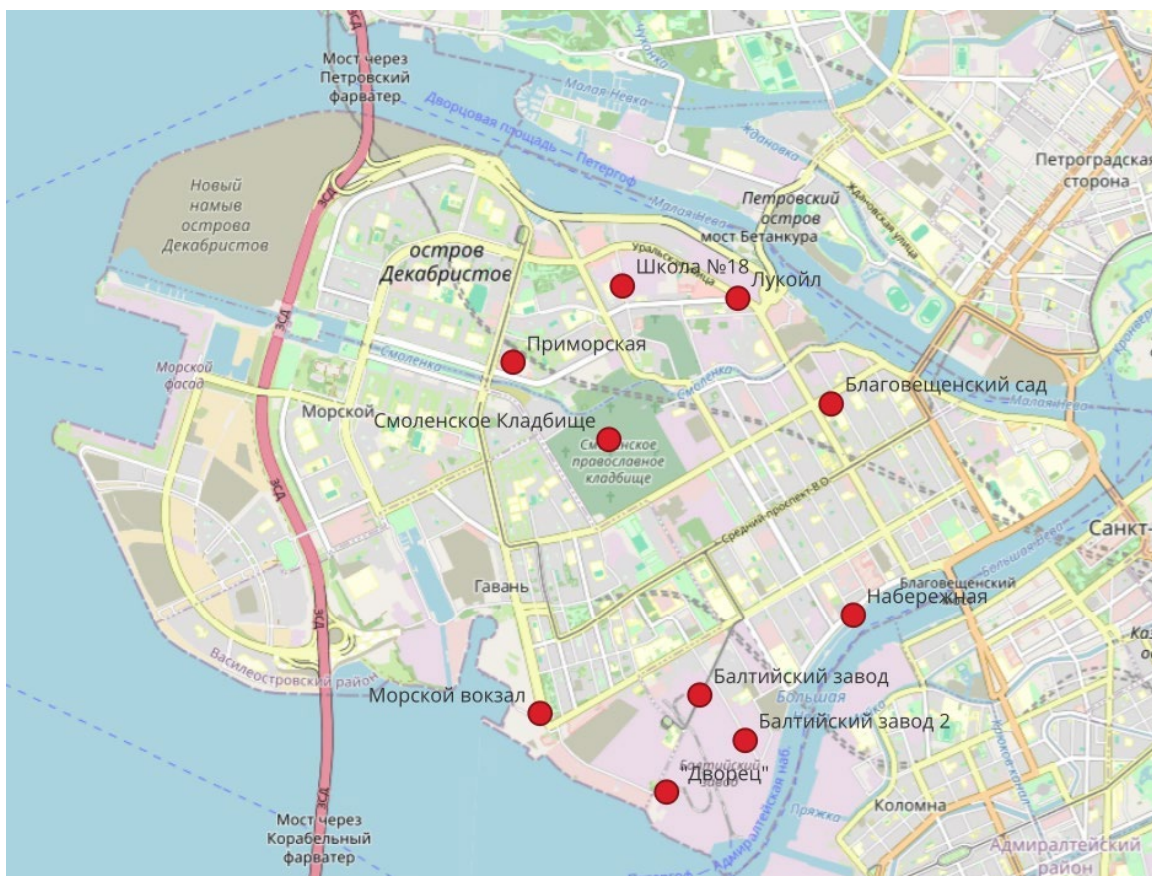


Рисунок 2.10 - Точки измерений в центральной части Васильевского острова

Таблица 2.4 - Результаты измерений в точках Васильевского острова

Место	Широта	Долгота	Мощность дозы, мкЗв/ч
Морской вокзал	59.92722046	30.23801837	0.11
«Дворец»	59.92238307	30.25363434	0.13
Балтийский завод	59.92833932	30.25770578	0.14
Балтийский завод 2	59.92556751	30.26327780	0.11
Набережная	59.93328429	30.27658420	0.26
Благовещенский сад	59.94636285	30.27393405	0.15
Лукойл	59.95285427	30.26238188	0.11
Школа №18	59.95364405	30.24814115	0.11
Смоленское кладбище	59.94413424	30.24655354	0.10
Приморская	59.94888000	30.23468800	0.11

Полученные значения в большинстве точек находились в диапазоне 0,10-0,15 мкЗв/ч. Такой результат соответствует ожидаемым фоновым значениям для городской территории и показывает отсутствие резких превышений в

большинстве обследованных мест. На этом фоне выделилась точка «Набережная», где было зафиксировано значение 0,26 мкЗв/ч. Это значение более чем в два раза выше условного среднего по остальным точкам выборки.

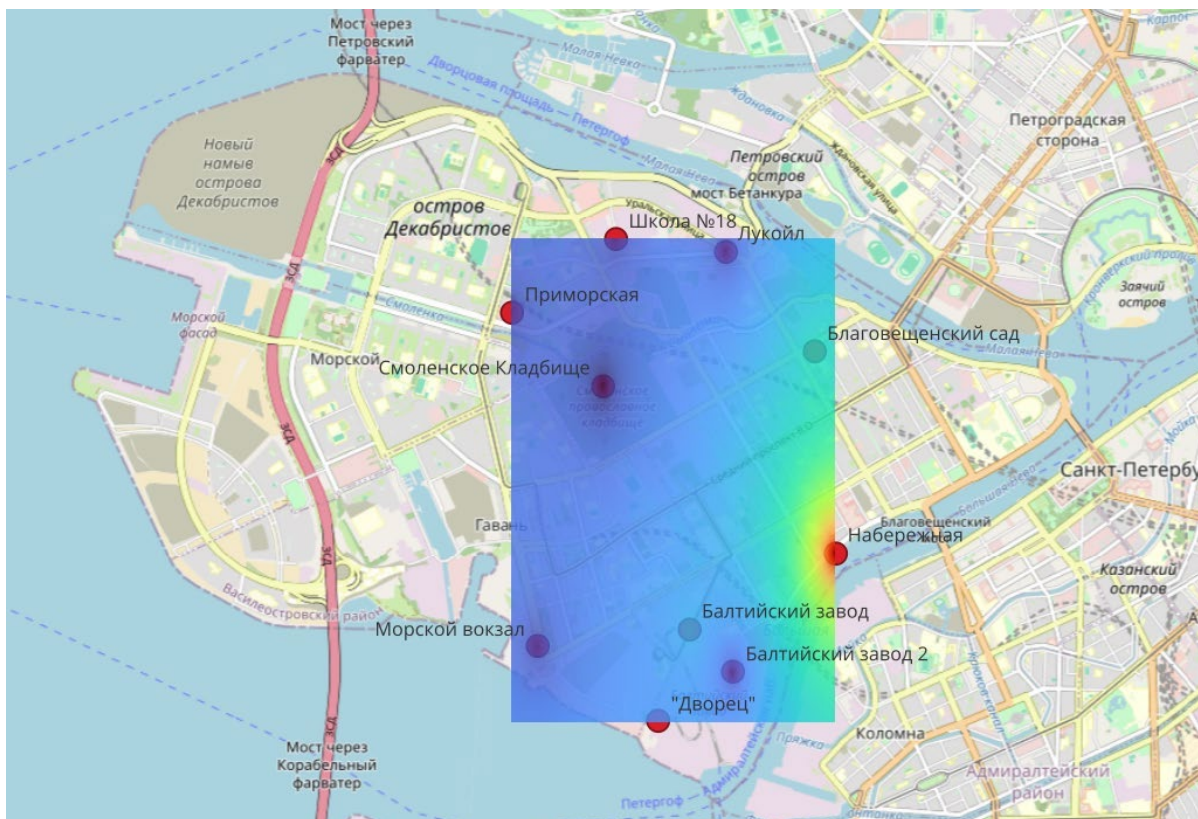


Рисунок 2.11 - Интерполяция результатов измерений по Васильевскому острову

Интерпретация этого результата связана с характером поверхности. На набережных Санкт-Петербурга широко используется гранит, а природные каменные материалы могут содержать калий-40, уран и торий. Поэтому повышенное значение на набережной было воспринято не как признак аварийного загрязнения, а как локальная особенность строительного материала. Для проверки этого предположения был выполнен отдельный этап измерений вдоль набережной Большой Невы.

2.12 Детальное обследование набережной Большой Невы

После обнаружения повышенного значения на набережной было важно понять, является ли оно случайным единичным пиком или устойчивой особенностью участка. Для этого были выбраны семь точек вдоль набережных Большой Невы, включая контрольную точку на Благовещенском мосту. Такая постановка опыта позволила сравнить значения у гранитных конструкций и значение над акваторией, где влияние облицовочного материала должно быть существенно меньше. Естественный радиационный фон зависит от переноса радона в атмосфере, вымывания осадками, инверсий. Это такой же атмосферный процесс, как перенос тепла или влаги.

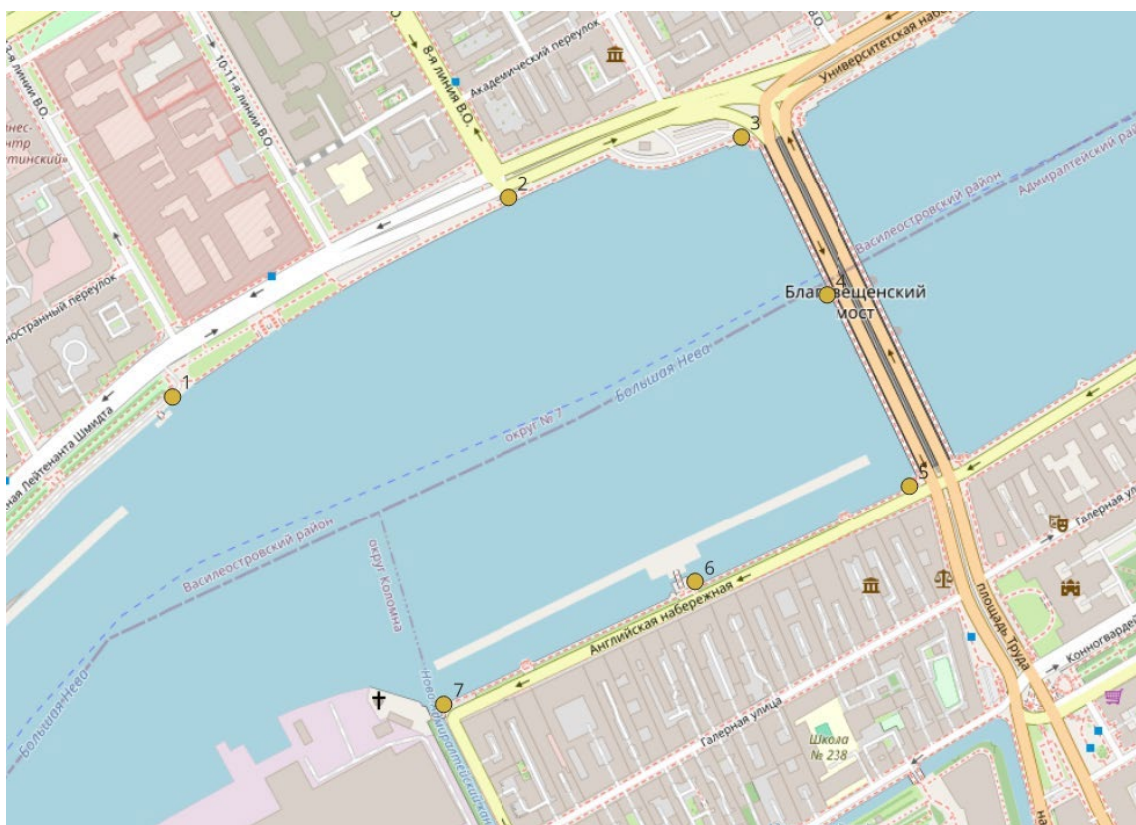


Рисунок 2.12 - Точки измерений на набережной Большой Невы

Таблица 2.5 - Результаты измерений на набережной Большой Невы

№	Широта	Долгота	Мощность дозы, мкЗв/ч
1	59.93400649	30.27843805	0.24

2	59.93563467	30.28391588	0.25
3	59.93612640	30.28772774	0.22
4	59.93483823	30.28912784	0.06
5	59.93327800	30.29047600	0.24
6	59.93249400	30.28696900	0.25
7	59.93149500	30.28287200	0.22

Результаты показали устойчиво повышенные значения у набережных конструкций: от 0,22 до 0,25 мкЗв/ч. Это хорошо согласуется с первым этапом, где в точке «Набережная» было получено 0,26 мкЗв/ч. Контрольная точка на Благовещенском мосту дала 0,06 мкЗв/ч, то есть заметно меньше значений у гранитной поверхности. Такая картина подтверждает локальный характер источника ионизирующего излучения.

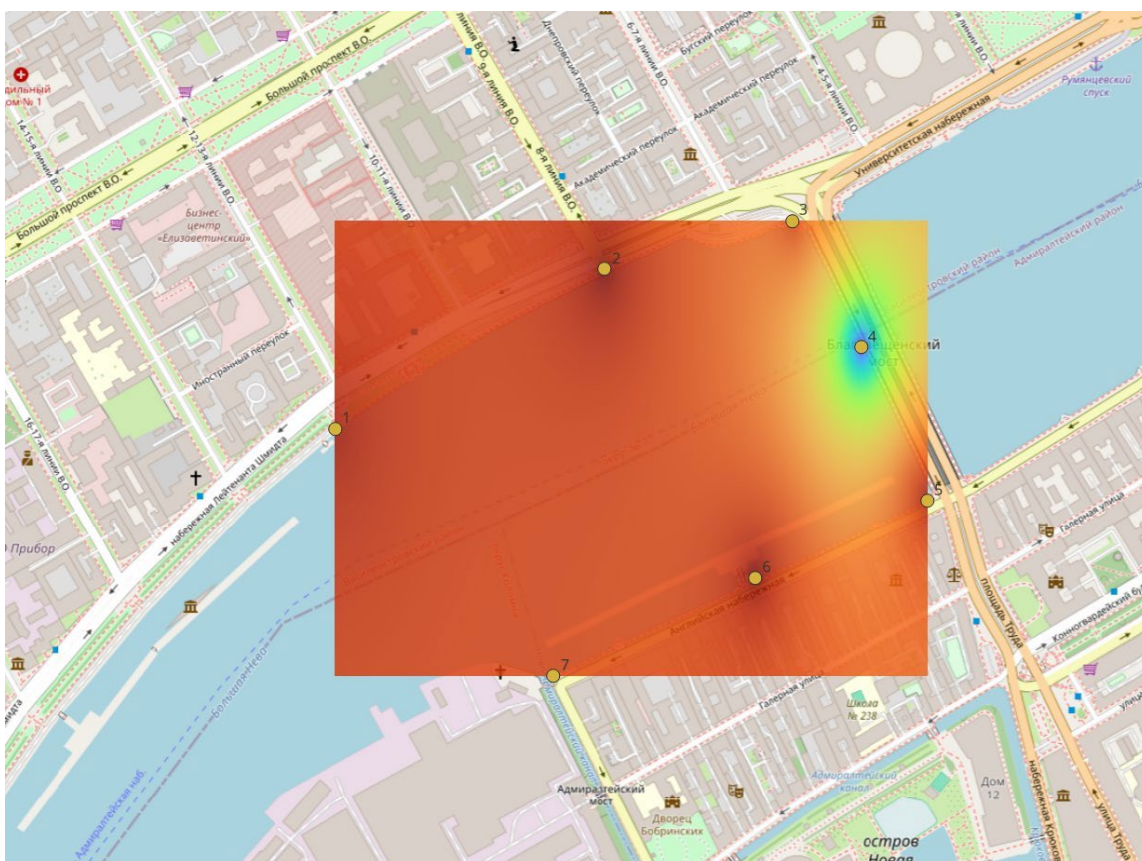


Рисунок 2.13 - Интерполяция результатов измерений на набережной

Для готового комплекса этот опыт был важен как проверка практической чувствительности. Прибор показал различие между участками, находящимися на небольшом расстоянии друг от друга, а координатная привязка позволила

нанести результаты на карту. Значения не свидетельствуют об опасной ситуации для кратковременного пребывания, но демонстрируют способность комплекса фиксировать локальные изменения уровня ионизирующего излучения, связанные с материалом поверхности.

2.13 Измерения при удалении от гранитной поверхности

Для уточнения характера выявленного эффекта были проведены измерения при удалении от поверхности гранитной набережной. Измерения выполнялись в точках на расстояниях 0, 0,3, 1 и 2 м. Такая схема позволила оценить, насколько быстро влияние гранитной поверхности уменьшается при отходе от нее. Результаты приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Измерения при удалении от гранитной поверхности

Расстояние от набережной, м	Широта	Долгота	Мощность дозы, мкЗв/ч
0	59.92836	30.26890	0.22
0.3	59.92839	30.26891	0.20
1	59.92842	30.26892	0.16
2	59.92847	30.26888	0.11

Максимальное значение было получено непосредственно на поверхности гранита: 0,22 мкЗв/ч. Уже на расстоянии 1 м значение снизилось до 0,16 мкЗв/ч, а на 2 м приблизилось к 0,11 мкЗв/ч. Это подтверждает, что повышенные показания имеют поверхностный локальный характер и быстро уменьшаются при удалении от материала набережной.

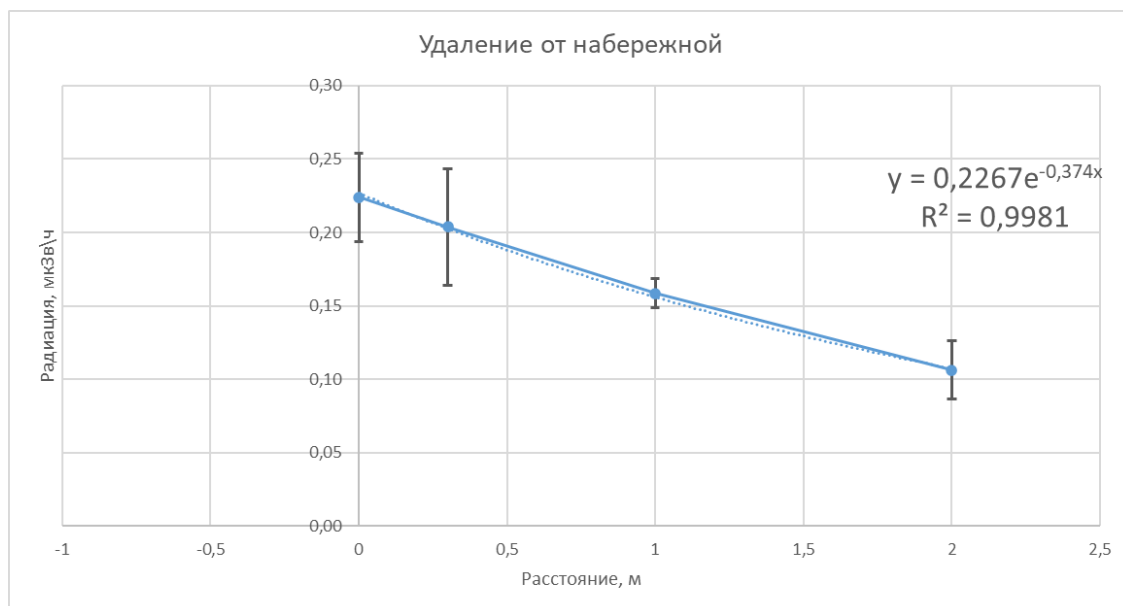


Рисунок 2.14 - Зависимость мощности дозы от расстояния до гранитной набережной

Для количественной оценки снижения радиационного фона с увеличением расстояния от поверхности гранитной набережной была построена линия тренда по полученным данным с помощью инструмента регрессии в Microsoft Excel, рисунок 2.14. Так же было посчитано СКО для этих 4 точки: 0,03; 0,04; 0,01; 0,02 – соответственно для каждой точки.

Полученное уравнение зависимости радиационного фона от расстояния до гранитной набережной имеет экспоненциальный вид:

$$y = 0,2267 * e^{-0,374x}$$

В этом выражении:

- y — радиационный фон (в микрозивертах в час, мкЗв/ч),
- x — расстояние от поверхности гранита набережной в метрах,
- коэффициент 0,2267 — начальное значение радиационного фона на самой поверхности гранита (при $x=0$),

- коэффициент 0,374 — характеризует интенсивность затухания радиации по мере удаления от источника.

Этот коэффициент затухания $\lambda=0,374$ показывает, насколько быстро уменьшается уровень излучения при увеличении расстояния. Его обратная величина представляет собой характерную длину затухания. Это означает, что при удалении от гранитной поверхности на 2,67 метра, уровень радиации ослабляется примерно в e раз (то есть, в $\sim 2,718$ раза), что является стандартной характеристикой экспоненциальных процессов.

Из этого следует, что если на самой набережной радиационный фон составляет 0,2267 мкЗв/ч, то уже на расстоянии 2.67 м от неё, согласно модели, он упадёт примерно до:

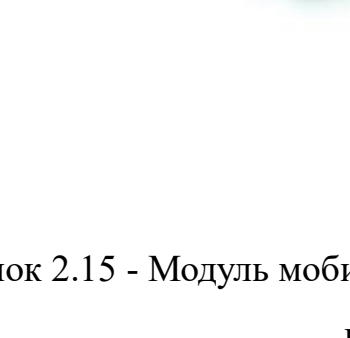
$$0,2267 * e^{-1} \approx \frac{0,2267}{2,718} \approx 0,0834 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

Это значение близко к естественному городскому фону и показывает, что влияние гранитной облицовки быстро ослабевает с расстоянием. Экспоненциальная модель затухания радиации от гранита - пространственное моделирование влияния подстилающей поверхности.

Точность подобранной модели подтверждается высоким значением коэффициента детерминации: $R^2=0,9981$. Это означает, что более 99,8% разброса экспериментальных данных объясняется данной моделью. Такой результат свидетельствует о корректности выбора экспоненциальной аппроксимации и о высокой надёжности экспериментальных измерений.

2.14 Передача данных на домашний сервер

Следующим этапом развития готового комплекса стала удаленная передача данных. Локальная SD-карта обеспечивает надежное хранение, но для



отличие от протокола F
 вки текущих измерен
 добен для микроконтр
 оса, сервер принимает
 понятным для послед

координаты, температура, влажность, давление и мощность дозы ионизирующего излучения. Для защиты от случайных или посторонних обращений использовались секретный путь API и токен в теле запроса.

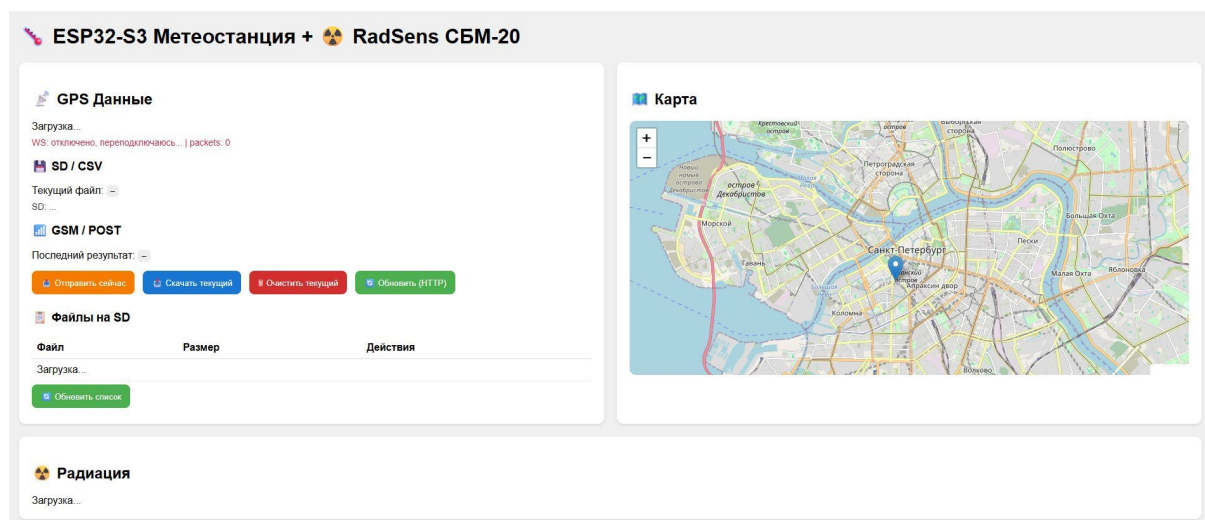


Рисунок 2.16 - Веб-интерфейс комплекса с командой отправки данных

Серверная часть была реализована максимально просто. На домашнем сервере запускался Python-скрипт на основе стандартного HTTP-сервера. При поступлении POST-запроса скрипт проверял путь, проверял токен, удалял служебные параметры и дописывал строку в текстовый файл. Временная метка могла формироваться на стороне сервера, что полезно при отсутствии корректного времени на приборе. Такой подход не требует сложной инфраструктуры, но уже позволяет организовать централизованный сбор данных.

2026-04-12 00:20:56
time=00:00:00&lat=NA&lng=NA&temp=22.3&hum=30.2&pres=1024.5&rad=0.20

На рисунке 2.17 показана общая логика передачи. Пользователь или программа инициирует отправку, ESP32-S3 подготавливает параметры, SIM800C устанавливает GPRS-соединение, выполняется HTTP POST-запрос, сервер проверяет запрос и записывает данные. При ошибке связи локальная запись на

SD-карту остается основным способом сохранения результатов, поэтому потеря мобильного соединения не должна приводить к потере измерений.

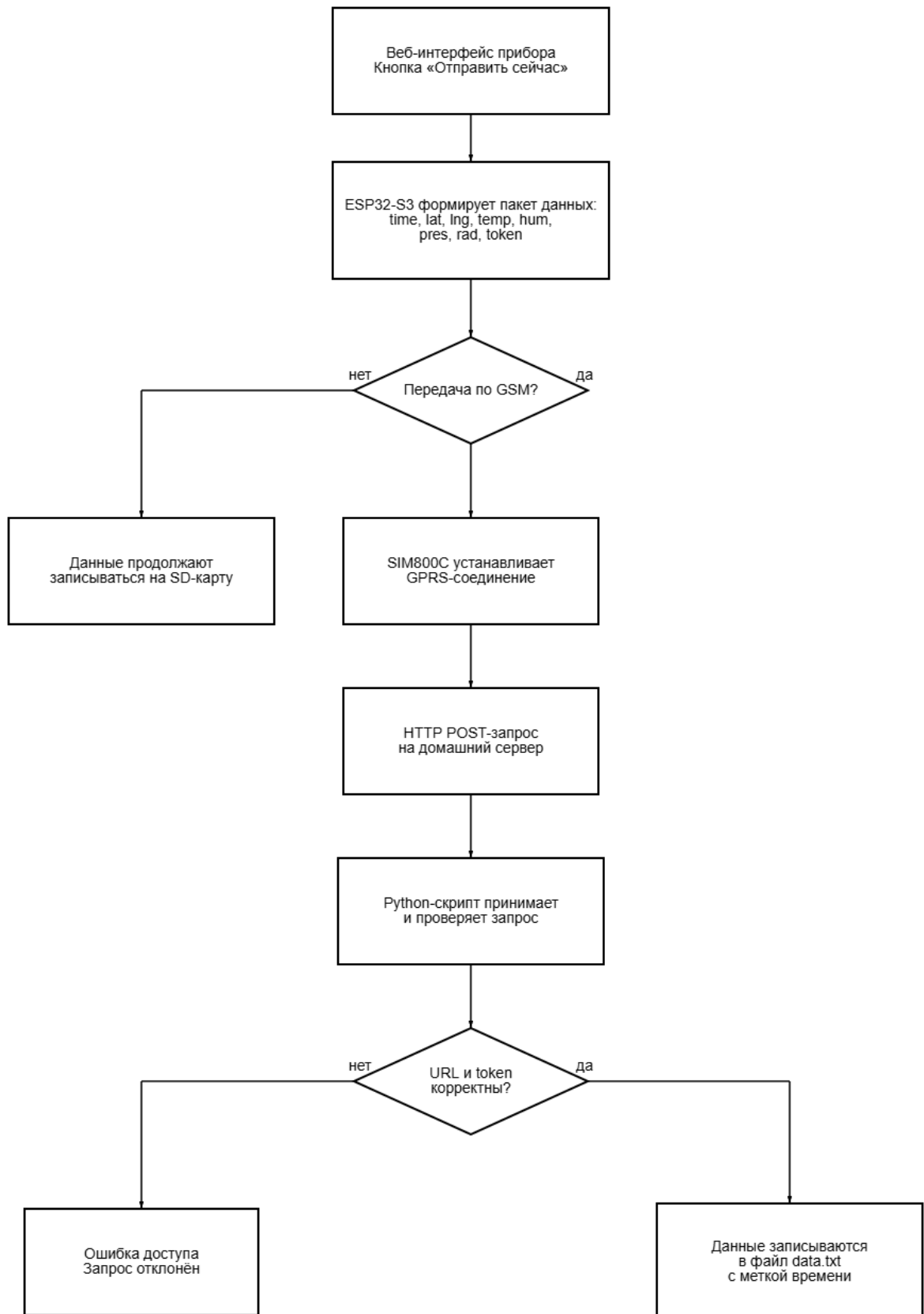


Рисунок 2.17 - Диаграмма передачи данных на домашний сервер

Важным составляющим этой схемы является то, что прибор может передавать данные без подключения к локальной Wi-Fi-сети. Это особенно важно для полевых измерений. В то же время реализованная серверная архитектура остается открытой для развития: в дальнейшем можно добавить автоматическое построение графиков, загрузку CSV-файлов, хранение данных в базе, отображение точек на карте и контроль нештатных значений.

2.15 Оценка применимости SIM800C и развитие в сторону 4G LTE

Испытания SIM800C показали, что сама идея мобильной передачи данных для дозиметрического комплекса работоспособна. Модуль позволяет отправлять короткие строки телеметрии и тем самым дополняет локальную запись на SD-карту удаленным хранением. При этом практическая эксплуатация выявила ряд особенностей, которые нужно учитывать при дальнейшем развитии конструкции.

Одна из особенностей связана с питанием. SIM800C в моменты регистрации в сети и передачи данных потребляет импульсный ток, поэтому линия питания должна иметь достаточный запас. В макетных устройствах это часто становится источником нестабильности: просадка напряжения может вызвать перезагрузку микроконтроллера, ошибку SD-карты или сбой связи. В готовой архитектуре это учитывается отдельным питанием модуля, емкостной поддержкой и более аккуратной разводкой.

Другая особенность связана с электромагнитной совместимостью. GSM-модуль работает импульсно, а длинные провода макетной сборки могут принимать наводки. Поэтому при дальнейшем развитии важны короткие линии питания, общая земля, фильтрация, правильное расположение антенны и физическое разделение радиомодуля от чувствительных цепей. Этот вывод был

получен именно из практического опыта, когда коммуникационный модуль оказывал влияние на общую устойчивость прибора.

Так же была особенность связана со стандартом связи. SIM800C относится к GSM/GPRS-модулям и поддерживает передачу данных GPRS до 85,6 кбит/с [18]. Этого достаточно для одиночных POST-запросов с несколькими параметрами, но для быстрой выгрузки накопленных CSV-файлов, устойчивой работы с более сложным серверным API и перспективного развития прибора такой запас ограничен. Поэтому дальнейшее развитие связи целесообразно направить в сторону более современных 4G LTE-модулей.

Переход к 4G LTE обоснован не желанием заменить работающий канал ради замены, а развитием требований к комплексу. LTE Cat 1 модули, например семейство A7670, ориентированы на IoT-сценарии и обеспечивают скорости порядка 10 Мбит/с на прием и 5 Мбит/с на передачу [22]. Более производительные LTE Cat 4 модули, например A7608SA-H, поддерживают до 150 Мбит/с на прием и до 50 Мбит/с на передачу [23]. Для одной строки телеметрии такие скорости избыточны, но для выгрузки файлов, обновлений, диагностики и работы с защищенными протоколами они дают существенный запас.

Таблица 2.7 - Сравнение SIM800C и перспективных 4G LTE-модулей

Параметр	SIM800C	4G LTE Cat 1, пример A7670	4G LTE Cat 4, пример A7608SA-H
Тип сети	GSM/GPRS	LTE Cat 1 с поддержкой IoT- сценариев	LTE Cat 4 с более высокой пропускной способностью
Роль в проекте	Проверка мобильной передачи коротких строк	Перспективный канал телеметрии и небольших файлов	Перспективный канал быстрой выгрузки данных
Скорость передачи	До 85,6 кбит/с [18]	До 10/5 Мбит/с [22]	До 150/50 Мбит/с [23]

Практический смысл	Достаточно для POST-запросов с текущими измерениями	Больше запас скорости и современная сеть	Удобнее для больших CSV и расширенной диагностики
Требования к внедрению	Тщательное питание и фильтрация	Оценка питания, антенны и библиотеки AT-команд	Дополнительная тепловая и энергетическая оценка

Поэтому корректнее говорить не о прекращении использования SIM800C, а о развитии канала связи. SIM800C подтвердил принцип удаленной передачи и помог отработать серверную часть. Следующим инженерным шагом является выбор более продвинутого 4G LTE-модуля, который сохранит проверенную идею, но даст больший запас по скорости, перспективности сети и возможностям обмена данными.

2.16 Что удалось улучшить в готовом варианте

В готовом варианте по сравнению с исходным макетом улучшены сразу несколько уровней системы. На аппаратном уровне главным улучшением стал переход на ESP32-S3. Прибор получил больший запас вычислительных ресурсов, возможность разделения задач и более удобное подключение периферии. Это особенно важно для комплекса, где одновременно работают дозиметрический канал, метеодатчики, GPS, SD-карта, веб-интерфейс, дисплей и модуль связи.

На уровне хранения данных переход от отображения текущих значений к записи CSV на SD-карту сделал комплекс автономным регистратором. Теперь отсутствие сети или веб-клиента не мешает сбору данных. На уровне интерфейса были объединены локальный OLED-дисплей, кнопки и веб-страница. Пользователь может контролировать прибор в поле, а затем скачать файлы или отправить данные на сервер.

На уровне программы были устранены зависания при ошибках Wi-Fi, обработано отсутствие GPS-сигнала, снижена частота обновления дисплея,

улучшено формирование JSON, добавлена работа с файлами и реализована передача данных. На уровне конструкции был разработан корпус, учитывающий защиту от внешних факторов и вентиляцию. На уровне методики полевые измерения подтвердили, что комплекс способен фиксировать пространственные различия мощности дозы ионизирующего излучения и сохранять их с координатной привязкой.

2.17 Выводы по второй главе

Во второй главе мы рассмотрели готовый вариант мобильного дозиметрического комплекса как законченную аппаратно-программную систему. Основой комплекса является ESP32-S3, на котором объединены дозиметрический канал RadSens со счетчиком Гейгера-Мюллера СБМ-20, метеорологический канал, GPS/ГЛОНАСС-привязка, microSD-регистрация, OLED-интерфейс, веб-страница и передача данных на домашний сервер.

Ранний вариант на ESP8266 использован как объяснение эволюции проекта. Он позволил проверить идею и выявить ограничения: блокирующее выполнение операций, недостаточный запас памяти, зависания при ошибках Wi-Fi, некорректную обработку отсутствия координат, избыточное обновление дисплея и риск фрагментации памяти при формировании JSON. Эти проблемы были учтены в готовой архитектуре.

Полевые измерения на Васильевском острове и набережной Большой Невы показали, что комплекс пригоден для практической регистрации локальных изменений уровня ионизирующего излучения. В большинстве точек были получены значения порядка 0,10-0,15 мкЗв/ч, а на гранитных участках набережной значения достигали 0,22-0,26 мкЗв/ч. Измерения при удалении от гранитной поверхности подтвердили локальный характер повышенных показаний.

Гамма-фон, который мы измеряем, в приземном слое на 80% определяется концентрацией радона-222. А концентрация радона — это прямой индикатор вертикального перемешивания в атмосфере. Ночью при инверсиях радон накапливается у земли, и наш дозиметр показывает повышенные значения. Днём при турбулентности он поднимается вверх, и фон падает. Осадки вызывают резкие пики за счёт вымывания из атмосферы на поверхность и вытеснения радона водой из пор почвы. Таким образом, регистрируя γ -фон с привязкой к координатам и времени, мы фактически картируем динамику приземного слоя атмосферы. Это прямое применение в задачах моделирования атмосферных процессов, где радон используется как естественный трассер.

Передача данных на домашний сервер через SIM800C стала важным этапом повышения автономности. Этот модуль подтвердил работоспособность мобильной телеметрии, а выявленные ограничения по питанию, электромагнитной совместимости и скорости GPRS показали направление дальнейшего развития. Следующим обоснованным шагом является переход к более современным 4G LTE-модулям, которые сохраняют уже проверенную серверную архитектуру и расширяют возможности комплекса.

Полевые измерения показали, что комплекс пригоден для метеорологической съёмки городской территории: координатная привязка и регистрация метеопараметров позволяют связывать радиационный фон с типом подстилающей поверхности и условиями погоды.

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСА

Разработка мобильного дозиметрического комплекса завершает только инженерную часть работы. Для применения прибора в полевых условиях требуется подтвердить устойчивость измерительного канала, оценить погрешности, определить влияние внешних факторов и подобрать такие алгоритмы обработки, которые уменьшают случайные флуктуации без потери информативности данных. В данной главе рассматривается экспериментальная оценка готового комплекса: калибровка дозиметрического канала на основе счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20, подбор коэффициента пересчёта импульсов в мощность дозы, проверка влияния свинцовой фильтрации, оценка чувствительности к различным видам ионизирующего излучения, а также калибровка метеорологических датчиков, входящих в состав комплекса.

Основной задачей экспериментальной части является повышение достоверности измерений. Под достоверностью в рамках данной работы понимается близость показаний к эталонному средству измерений, устойчивость результата при повторных измерениях, воспроизводимость в одинаковой геометрии, корректное хранение исходных данных, возможность последующей статистической обработки и наличие физически объяснимой связи между показаниями разработанного прибора и контрольными значениями.

Дозиметрический канал комплекса регистрирует отдельные импульсы, возникающие при срабатывании газоразрядного детектора. Такой принцип измерения имеет вероятностную природу. Даже при постоянной мощности дозы число зарегистрированных импульсов за одинаковые интервалы времени изменяется из-за статистики радиоактивного распада и случайного характера взаимодействия частиц и квантов с детектором. По этой причине единичное измерение не может рассматриваться как достаточное основание для вывода о точности прибора. Для оценки метрологических характеристик использовались

повторные измерения, усреднение и сравнительный анализ с поверенными средствами измерений.

3.1 Методика экспериментальных исследований

Экспериментальная оценка дозиметрического канала выполнялась в контролируемых условиях с использованием поверенного дозиметра ДБГ-06Т №2024 и контрольного источника ОСГИ ^{137}Cs №2396. Поверенный прибор использовался как средство сравнения, а источник ^{137}Cs формировал воспроизводимое поле гамма-излучения. По данным, использованным при обработке результатов, погрешность поверенного дозиметра составляла 20 %, активность контрольного источника на момент эксперимента составляла 1255 Бк.



Рисунок 3.1 – Внешний вид дозиметра ДБГ-06Т №2024

Дозиметр ДБГ-06Т применялся как эталонное средство сравнения для определения расхождения между контрольными значениями и показаниями разработанного комплекса. Выбор такого прибора обусловлен его назначением для дозиметрического контроля и наличием поверки. В эксперименте он выполнял функцию опорного измерительного прибора, относительно которого

рассчитывались отклонения, относительные ошибки, средняя абсолютная ошибка и среднеквадратичная ошибка.



Рисунок 3.2 – Контрольный источник ОСГИ ^{137}Cs №2396

Контрольный источник ОСГИ ^{137}Cs был выбран из-за возможности получить устойчивую зависимость мощности дозы от расстояния при сохранении одинаковых условий измерения. Изотоп ^{137}Cs является удобным источником для проверки гамма-чувствительности дозиметрического канала, поскольку его излучение позволяет оценить работу счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20 именно в том диапазоне, который наиболее важен для мониторинга внешнего гамма-фона окружающей среды.

Для проведения эксперимента была подготовлена рабочая поверхность с линейной разметкой от 0 до 120 см с шагом 10 см. Разрабатываемый дозиметрический комплекс и поверенный дозиметр размещались в фиксированном положении на отметке 120 см. Контрольный источник последовательно устанавливался на размеченные позиции. Такая геометрия обеспечивала воспроизводимость расстояния между источником и детекторами, а также позволяла получить серию точек в широком диапазоне мощностей дозы.

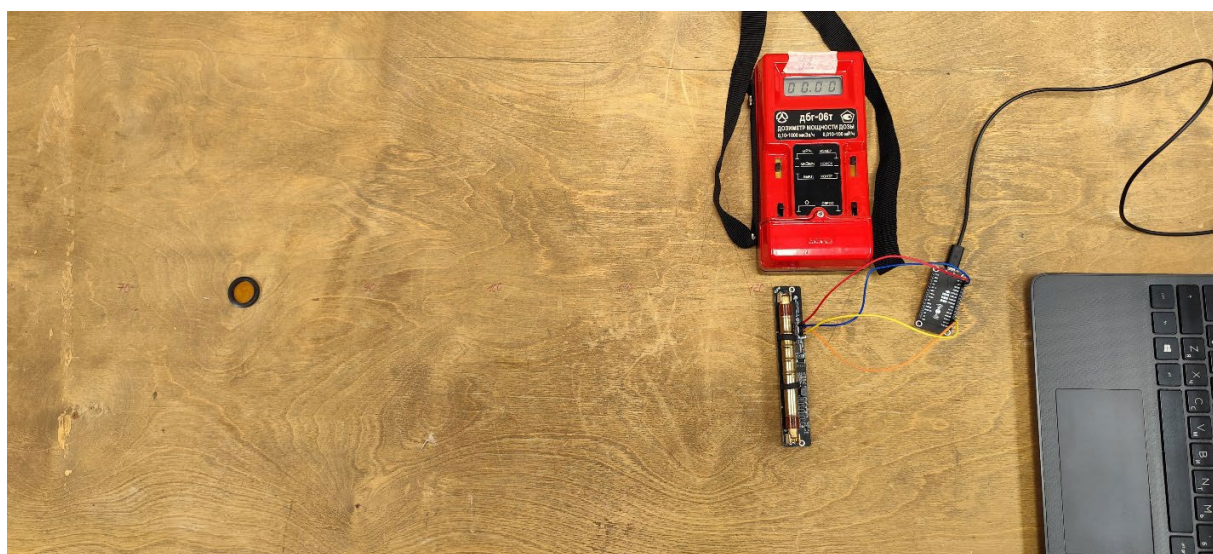


Рисунок 3.3 – Размеченная рабочая поверхность для проведения эксперимента

Экспериментальная проверка дозиметрического канала проводилась с использованием поверенного дозиметра ДБГ-06Т №2024 в качестве средства сравнения и контрольного источника ОСГИ ^{137}Cs №2396 с активностью 1255 Бк на момент проведения измерений. Согласно паспортным характеристикам эталонного прибора, его допустимая погрешность составляет $\pm 20\%$, что учитывалось при последующей оценке результатов. Для обеспечения воспроизводимости условий эксперимента была подготовлена рабочая поверхность с линейной разметкой от 0 до 120 см с шагом 10 см. Поверенный дозиметр и разработанный комплекс размещались в фиксированном положении на отметке 120 см, после чего источник последовательно перемещался между контрольными точками. На каждой позиции выполнялось три повторных

измерения, что позволило уменьшить влияние статистической природы счета импульсов и оценить устойчивость результатов.

Дополнительно проводилось измерение фонового уровня, вследствие чего полный объём экспериментальной серии для одного исследуемого коэффициента пересчёта составил 39 измерений с учётом повторений и фонового значения. Полученные данные использовались для расчёта комплекса статистических показателей, характеризующих качество согласования разработанного прибора с эталонным дозиметром. В ходе обработки определялись систематическое смещение (bias), средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратичная ошибка (RMSE), коэффициент корреляции Пирсона, коэффициент детерминации R^2 , а также доля измерений, попадающих в допустимый коридор отклонений $\pm 20\%$ относительно показаний поверенного прибора.

Перед началом серии измерений фиксировалось фоновое значение. Фоновая составляющая необходима для правильной интерпретации результатов, поскольку счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20 регистрирует вклад контрольного источника, естественный фон помещения, вклад строительных материалов, космическую компоненту и собственные флуктуации счёта. Фоновое значение задаёт начальную точку для дальнейшего сравнения и позволяет оценить, насколько изменение расстояния до контрольного источника проявляется на фоне естественной изменчивости.

На каждой позиции выполнялось по три повторных измерения. Повторность повышает устойчивость оценки, поскольку одиночное значение мощности дозы при работе газоразрядного детектора может заметно отличаться от соседнего значения. Причина связана с тем, что прибор фактически считает дискретные события, а затем переводит их в дозиметрическую величину. При малом числе импульсов статистическая неопределённость становится заметной, поэтому усреднение серии даёт более представительное значение для каждой точки.

Первичной измеряемой величиной является число импульсов, зарегистрированных за заданный интервал времени. На его основе рассчитывается счётная скорость.

$$n = N / t$$

где n — счётная скорость, имп./с;

N — число зарегистрированных импульсов;

t — длительность измерения, с.

После определения счётной скорости выполняется пересчёт в мощность дозы. В программе комплекса для этого используется коэффициент пересчёта, связывающий частоту срабатываний детектора с дозиметрической величиной.

$$\dot{N} = k \cdot n$$

где $\dot{N}$ — мощность дозы ионизирующего излучения, мкЗв/ч;

k — коэффициент пересчёта, мкЗв/ч на имп./с;

n — счётная скорость, имп./с.

Коэффициент пересчёта является одним из ключевых параметров измерительного канала. Его выбор влияет на масштаб показаний прибора: при завышенном коэффициенте рассчитанная мощность дозы будет систематически выше контрольных значений, при заниженном показания будут ниже. Подбор коэффициента выполнялся не по единичному совпадению, а по результатам всей серии измерений, что позволяет учитывать поведение прибора в разных точках диапазона.

Для оценки отклонения показаний разработанного комплекса от эталонного прибора использовались абсолютная и относительная ошибки. В

данной работе отклонение определялось через разность между эталонным значением и показанием исследуемого канала.

$$\Delta = \dot{N}_{\text{Эт}} - \dot{N}_{\text{Изм}}$$

где Δ — отклонение показаний, мкЗв/ч;

$\dot{N}_{\text{Эт}}$ — показание эталонного дозиметра, мкЗв/ч;

$\dot{N}_{\text{Изм}}$ — показание разработанного дозиметрического комплекса, мкЗв/ч.

$$\delta = ((\dot{N}_{\text{Изм}} - \dot{N}_{\text{Эт}}) / \dot{N}_{\text{Эт}}) \cdot 100 \%$$

где δ — относительная ошибка, %;

$\dot{N}_{\text{Изм}}$ — показание разработанного дозиметрического комплекса, мкЗв/ч;

$\dot{N}_{\text{Эт}}$ — показание эталонного дозиметра, мкЗв/ч.

Средняя абсолютная ошибка характеризует среднюю величину отклонения без учёта знака. Она удобна для оценки практической близости показаний к эталону, поскольку положительные и отрицательные отклонения не компенсируют друг друга.

$$MAE = (1 / m) \cdot \sum |\dot{N}_{\text{Изм},i} - \dot{N}_{\text{Эт},i}|$$

где MAE — средняя абсолютная ошибка, мкЗв/ч;

m — число измерений в серии;

$\dot{N}_{\text{Изм},i}$ — i-е показание разработанного комплекса;

$\dot{N}_{\text{Эт},i}$ — i-е показание эталонного дозиметра.

Среднеквадратичная ошибка сильнее реагирует на крупные отклонения. Поэтому RMSE применялась для выявления ситуаций, где отдельные точки резко

ухудшали согласование между разработанным прибором и эталонным дозиметром.

$$RMSE = \sqrt{((1 / m) \cdot \sum (\dot{N}_{изм,i} - \dot{N}_{эт,i})^2)}$$

где RMSE — среднеквадратичная ошибка, мкЗв/ч;

m — число измерений в серии;

$\dot{N}_{изм,i}$ — i-е показание разработанного комплекса;

$\dot{N}_{эт,i}$ — i-е показание эталонного дозиметра.

Для оценки связи между показаниями разработанного комплекса и эталонного прибора применялась линейная регрессия. Она позволила определить общую корреляцию и масштабную ошибку, выраженную через наклон аппроксимирующей прямой. Наклон, близкий к единице, соответствует хорошему согласованию масштаба показаний. Существенное отклонение наклона от единицы указывает на необходимость коррекции коэффициента пересчёта или на влияние дополнительных факторов, связанных со спектральным составом излучения, геометрией и экранированием.

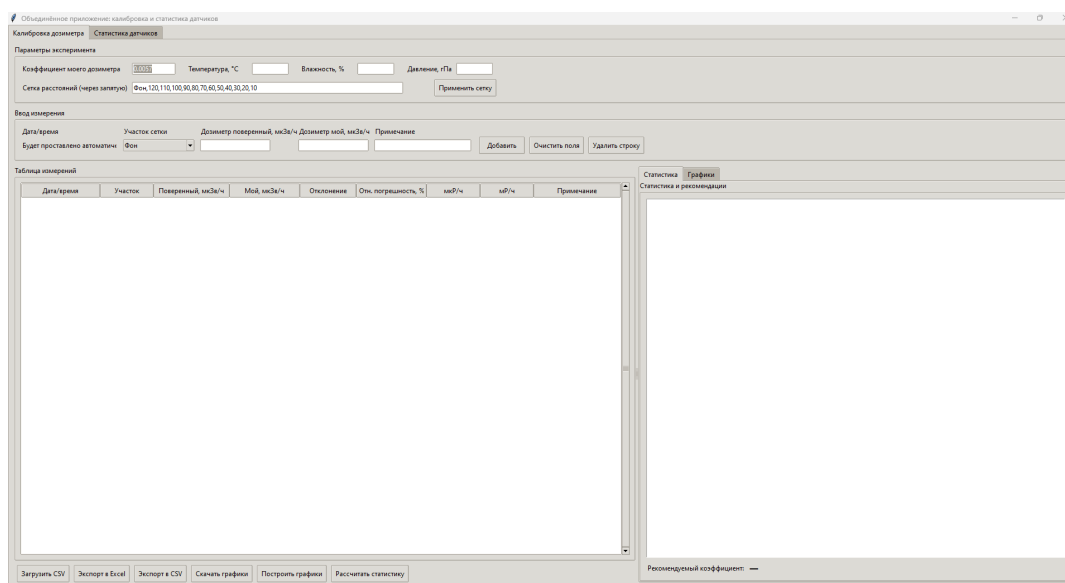


Рисунок 3.4 – Интерфейс программы обработки результатов поверки дозиметрического канала

Для систематизации измерений была разработана программа на языке Python. Приложение использовалось для ввода результатов по каждой точке шкалы, хранения значений эталонного и разработанного приборов, расчёта отклонений, относительных ошибок, MAE, RMSE, коэффициента корреляции Пирсона, коэффициента детерминации R^2 и рекомендуемого коэффициента пересчёта. Наличие отдельного программного инструмента снизило вероятность ручных ошибок при обработке и позволило быстро сравнивать разные варианты коэффициента.

Время накопления оказывает прямое влияние на статистическую устойчивость измерения. При увеличении длительности измерения возрастает число зарегистрированных импульсов, а относительная статистическая неопределённость уменьшается. Для счётных процессов стандартное отклонение числа импульсов приближённо оценивается через квадратный корень из числа зарегистрированных событий.

$$\sigma N \approx \sqrt{N}$$

где σN — стандартное отклонение числа зарегистрированных импульсов;

N — число зарегистрированных импульсов за интервал накопления.

Относительная статистическая неопределённость уменьшается с ростом числа импульсов. Практически это означает, что увеличение времени накопления делает результат более устойчивым, но снижает скорость реакции прибора на быстрые изменения мощности дозы. Для мобильного комплекса требуется компромисс между сглаживанием случайных флуктуаций и сохранением достаточной временной детализации. Поэтому в дальнейшей обработке учитывались как средние значения по сериям, так и разброс отдельных измерений.

3.2 Исследование характеристик счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20

Дозиметрический канал разработанного комплекса построен на газоразрядной регистрации ионизирующего излучения. Основным чувствительным элементом является счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20, подключённый через модуль RadSens. При прохождении ионизирующей частицы или гамма-кванта через рабочий объём детектора происходит ионизация газа. В электрическом поле возникает лавинный разряд, который формирует электрический импульс. Электронная схема фиксирует импульсы, а программная часть рассчитывает счётную скорость и мощность дозы.

Главная особенность такого измерительного канала заключается в дискретности регистрации. Дозиметр не измеряет мощность дозы как непрерывный аналоговый сигнал, а формирует оценку на основе числа событий за определённый интервал времени. Поэтому на малых значениях мощности дозы возможен заметный статистический разброс. Чем меньше число зарегистрированных импульсов, тем сильнее влияние случайной составляющей на итоговую величину. Эта особенность определяет необходимость усреднения, выбора времени накопления и проверки повторяемости результатов.

В ходе эксперимента оценивалось влияние расстояния между источником и детектором. При увеличении расстояния поток излучения, попадающий в чувствительный объём, уменьшается, поэтому счётная скорость и рассчитанная мощность дозы снижаются. Для лабораторного контрольного источника важную роль играет геометрия размещения, точность установки источника на разметке, положение чувствительной зоны детектора и неизменность ориентации приборов. Даже небольшое смещение на малых расстояниях способно заметно изменить показание, поскольку поле излучения вблизи источника имеет выраженный пространственный градиент.

Полученные зависимости показали, что разработанный дозиметрический канал реагирует на изменение расстояния до источника и сохраняет связь с показаниями эталонного прибора. Эта связь оценивалась через коэффициент корреляции Пирсона и линейную регрессию. Наличие корреляции подтверждает работоспособность детектора как регистрирующего элемента, а параметры регрессии позволяют оценить правильность масштабирования импульсов в мощность дозы.

На первом этапе анализировалась работа без дополнительной свинцовой фильтрации. Были рассмотрены три коэффициента пересчёта: 0,005; 0,0045 и 0,0057. Во всех вариантах сохранялась общая зависимость между показаниями разработанного комплекса и эталонного дозиметра, но статистические показатели и масштабная ошибка различались.

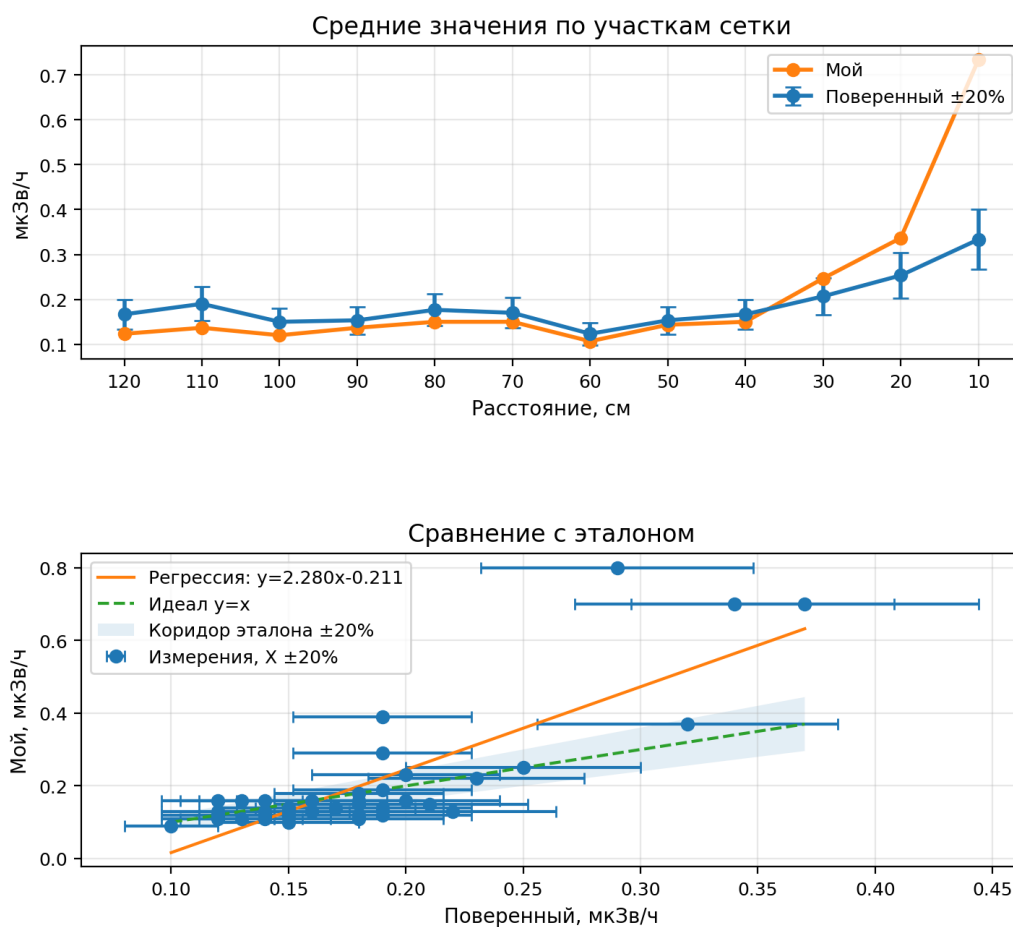


Рисунок 3.5 – Результаты сопоставления при $k = 0,005$ без свинцовой фольги

При коэффициенте $k = 0,005$ коэффициент корреляции Пирсона составил 0,8257. Это указывает на устойчивую связь между показаниями, однако наклон линейной регрессии оказался равным 2,2796. Такое значение показывает выраженную масштабную ошибку: показания разработанного комплекса возрастали быстрее, чем показания эталонного дозиметра. Средняя абсолютная относительная погрешность составила 28,22 %, RMSE — 0,1234 мкЗв/ч, попадание в коридор ± 20 % от эталона составило 59,0 % точек.

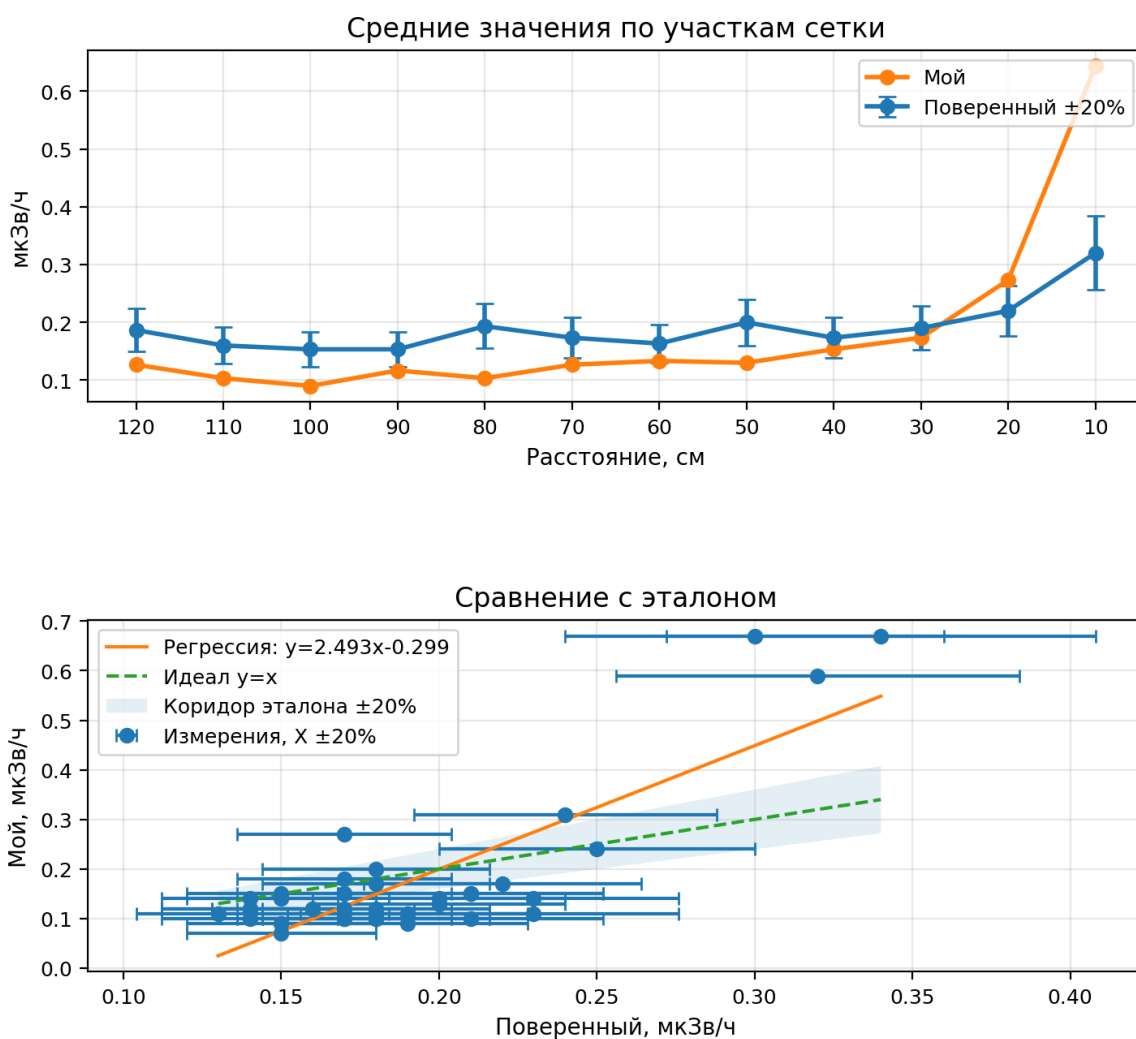


Рисунок 3.6 – Результаты сопоставления при $k = 0,0045$ без свинцовой фольги

При коэффициенте $k = 0,0045$ коэффициент корреляции остался практически на том же уровне и составил 0,8252. Одновременно средняя абсолютная относительная погрешность увеличилась до 34,66 %, а доля точек в коридоре ± 20 % снизилась до 28,2 %. Наклон регрессии составил 2,4933, что

показывает сохранение масштабного несоответствия. Простое уменьшение коэффициента пересчёта не дало требуемого улучшения, поскольку расхождение определялось численным значением коэффициента и вкладом дополнительных компонент излучения.

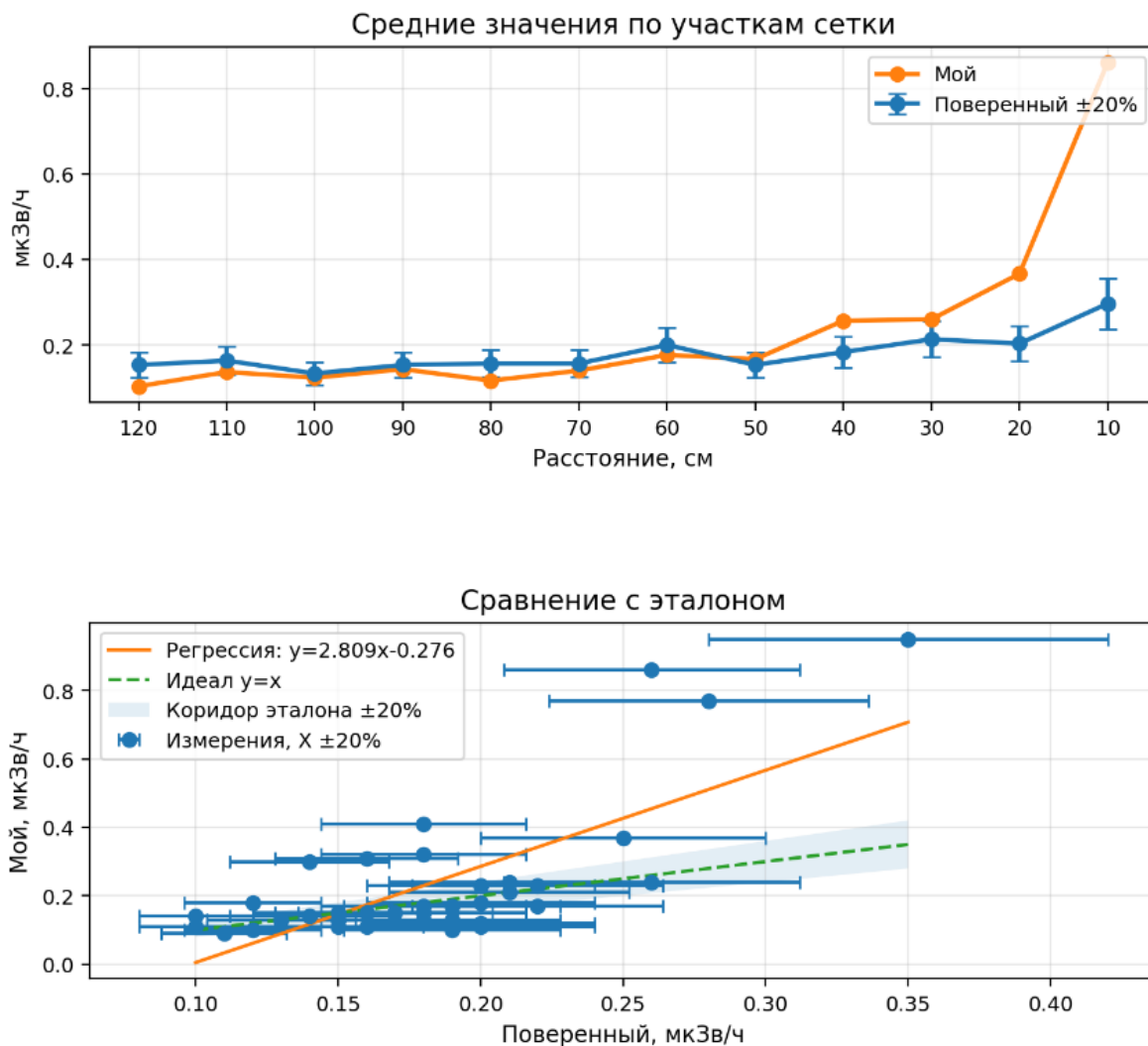


Рисунок 3.7 – Результаты сопоставления при $k = 0,0057$ без свинцовой фольги

При коэффициенте $k = 0,0057$ средняя относительная погрешность составила 19,20 %, средняя абсолютная относительная погрешность достигла 40,94 %, RMSE увеличилась до 0,1712 мкЗв/ч. Коэффициент корреляции снизился до 0,7364, а коэффициент детерминации R^2 — до 0,5423. Такой результат показывает ухудшение согласования в сравнении с предыдущими вариантами. На малых расстояниях наблюдались наиболее крупные отклонения,

что указывает на влияние геометрии, интенсивного локального потока и компонент излучения, к которым детектор имеет дополнительную чувствительность.

Таблица 3.2 – Сводные результаты калибровки без свинцовой фольги

Показатель	k = 0,005	k = 0,0045	k = 0,0057
Количество измерений	39	39	39
Среднее отклонение, мкЗв/ч	0,0226	−0,0144	0,0492
Средняя относительная погрешность, %	4,52	−13,65	19,20
Средняя абсолютная относительная погрешность, %	28,22	34,66	40,94
MAE, мкЗв/ч	0,0636	0,0744	0,0877
RMSE, мкЗв/ч	0,1234	0,1086	0,1712
Коэффициент корреляции Пирсона	0,8257	0,8252	0,7364
R ²	0,6818	0,6809	0,5423
Линейная регрессия	$Y = 2,2796X - 0,2114$	$Y = 2,4933X - 0,2992$	$Y = 2,8094X - 0,2760$
Попадание в коридор ±20 %, % точек	59,0	28,2	53,8
Рекомендуемый коэффициент	0,002193	0,001805	0,002029

Сводная таблица показывает, что без свинцовой фольги во всех вариантах сохранялось заметное отклонение наклона регрессии от единицы. Это важно для интерпретации результатов: сам счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20 регистрировал изменение поля излучения, но пересчёт импульсов в мощность дозы не обеспечивал устойчивого совпадения с эталонным прибором во всём диапазоне. Наиболее проблемными оказались точки с малым расстоянием до источника, где возрастает вклад бета-излучения, низкоэнергетического гамма-излучения, рентгеновской составляющей и вторичных процессов взаимодействия излучения с окружающими материалами.

Проверка чувствительности к различным видам излучения была выполнена с использованием контрольного источника альфа- и бета-излучения №1080. Экспериментальная задача состояла в подтверждении того, какие виды излучения реально влияют на показания дозиметрического канала в выбранной конструкции.



Рисунок 3.8 – Контрольный источник альфа- и бета-излучения №1080

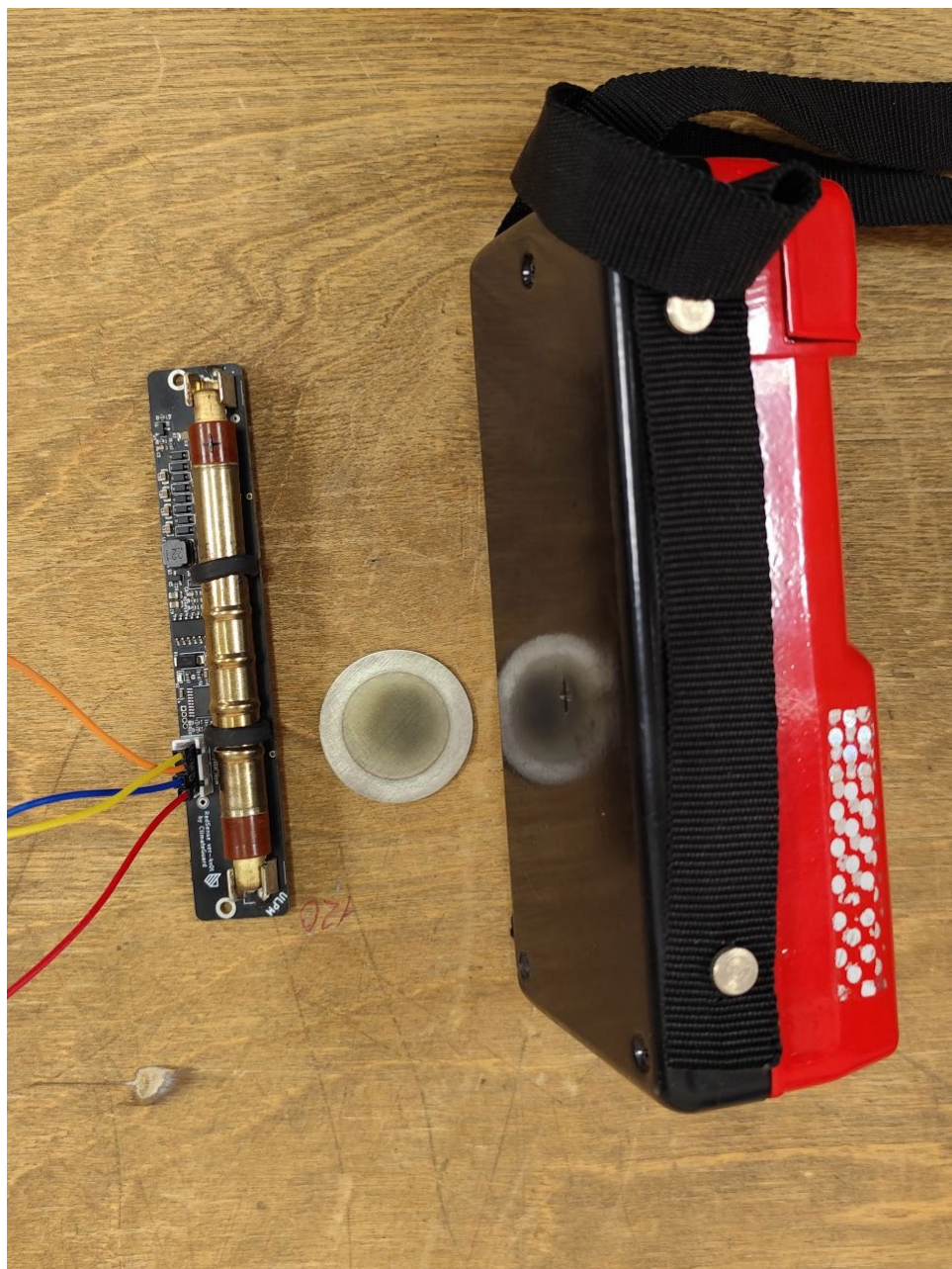


Рисунок 3.9 – Проверка отклика дозиметрического канала на альфа- и бета-излучение

Результаты проверки показали отсутствие значимого увеличения счётной скорости относительно фоновых значений. Такой результат соответствует конструктивным особенностям счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20. Альфа-частицы обладают малой проникающей способностью и не проходят через металлическую оболочку детектора. Бета-излучение регистрируется ограниченно и зависит от энергии частиц, геометрии и наличия экранирующих материалов. Основной вклад в показания прибора при полевых измерениях

окружающей среды вносит гамма-компонента. Это обстоятельство важно для последующего использования комплекса при оценке гамма-фона городской среды.

Влияние фонового излучения также учитывалось при анализе. На малых мощностях дозы фоновая составляющая становится сопоставимой с полезным сигналом, а относительная статистическая неопределённость возрастает. При увеличении времени накопления и количестве повторений устойчивость результата повышается. Для полевых измерений требуется фиксировать мгновенное значение и усреднённую оценку за интервал, достаточный для накопления представительного числа импульсов.

Влияние расстояния проявляется двояко. В лабораторном эксперименте расстояние задавало изменение вклада контрольного источника в показания приборов. В полевых измерениях, рассмотренных во второй главе, расстояние до локального источника, например гранитной поверхности набережной, определяло быстрое ослабление вклада природных радионуклидов строительного материала. Для таких участков удобна экспоненциальная аппроксимация затухания влияния локального поверхностного источника. Для лабораторного точечного источника главным условием остаётся неизменность геометрии и воспроизводимость расположения детектора относительно источника.

3.3 Исследование влияния спектральной фильтрации

Следующим этапом стала проверка влияния свинцовой фольги, выполняющей функцию спектральной фильтрации. Без фильтрации дозиметрический канал регистрировал основную гамма-компоненту, используемую для сравнения с эталонным дозиметром, дополнительный вклад низкоэнергетического электромагнитного излучения, рентгеновской

составляющей и части бета-излучения. Это приводило к увеличению числа импульсов и росту расхождения с эталонным прибором, особенно на малых расстояниях до источника.

Свинцовая фольга применялась как простой инженерный способ стабилизации энергетического отклика измерительного канала. Свинец эффективно ослабляет низкоэнергетические фотоны и уменьшает вклад частиц с малой проникающей способностью. В результате регистрируемый сигнал становится ближе к тому диапазону, в котором эталонный дозиметр формирует показания мощности дозы гамма-излучения. Такой подход не устраняет статистическую природу счёта, но уменьшает спектральную составляющую систематической ошибки.

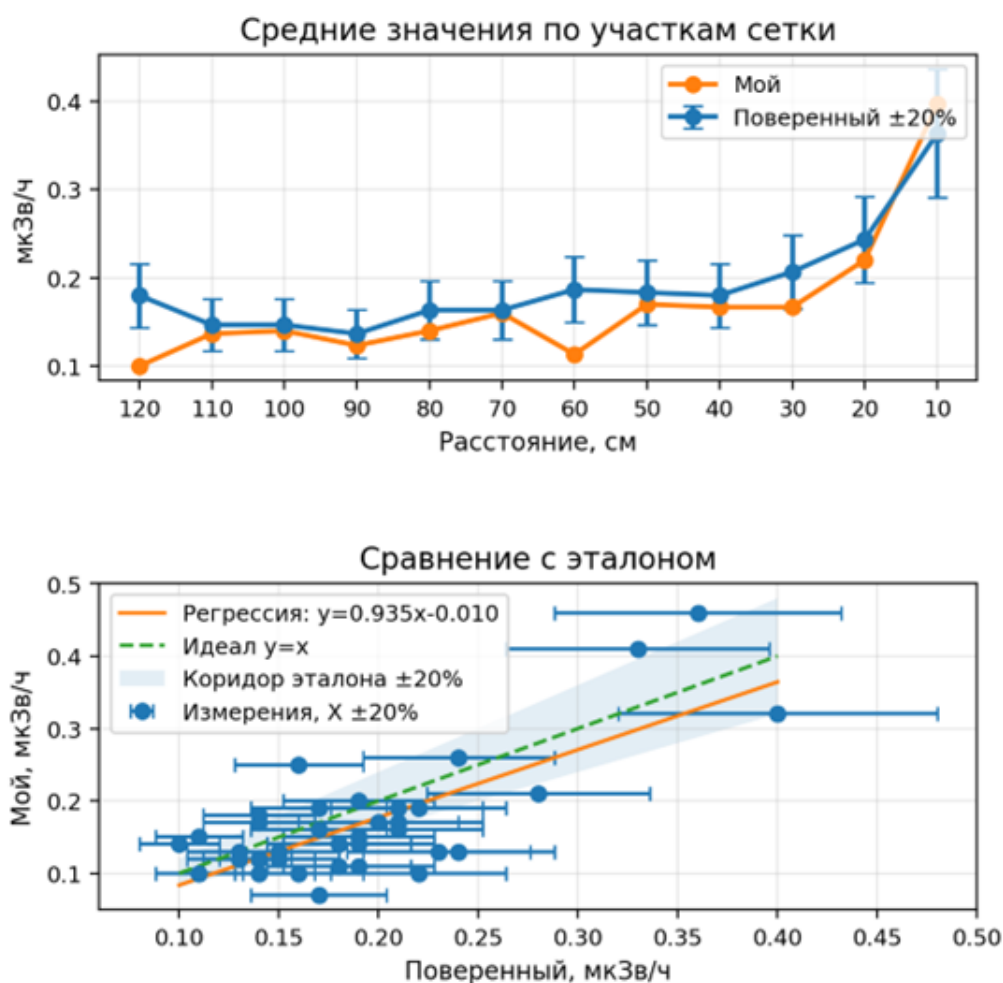


Рисунок 3.10 – Результаты сопоставления при $k = 0,0057$ со свинцовой фольгой

При использовании коэффициента $k = 0,0057$ со свинцовой фольгой характер зависимости изменился существенно. Наклон линейной регрессии стал равным $0,9355$, что значительно ближе к единице по сравнению с результатами без фильтрации. Средняя абсолютная относительная погрешность снизилась до $24,10\%$, RMSE уменьшилась до $0,0560$ мкЗв/ч. Это подтверждает, что свинцовая фольга уменьшила вклад компонент излучения, вызывавших завышение показаний в серии без фильтрации.

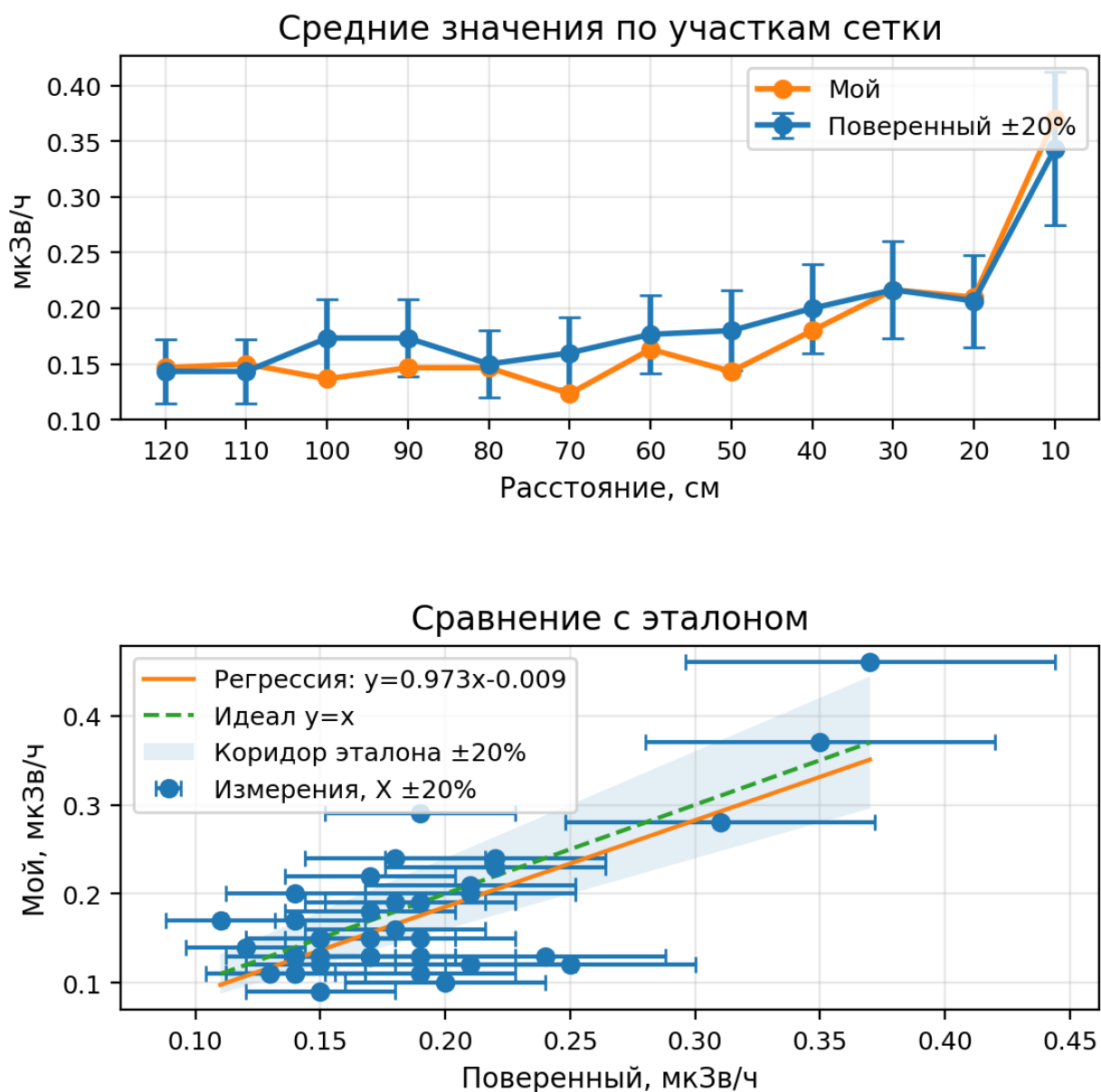


Рисунок 3.11 – Результаты сопоставления при $k = 0,006093$ со свинцовой фольгой

После применения скорректированного коэффициента $k = 0,006093$ согласование с эталонным прибором дополнительно улучшилось. Наклон линейной регрессии составил 0,9734, средняя относительная погрешность по модулю уменьшилась до 6,90 %, средняя абсолютная относительная погрешность составила 22,59 %, RMSE снизилась до 0,0542 мкЗв/ч. Полученный результат сопоставим с погрешностью поверенного дозиметра, равной 20 %, что является важным практическим итогом для разработанного измерительного канала.

Таблица 3.3 – Сводные результаты калибровки со свинцовой фольгой

Показатель	$k = 0,0057$	$k = 0,006093$
Количество измерений	39	39
Среднее отклонение, мкЗв/ч	−0,0221	−0,0144
Средняя относительная погрешность, %	−10,76	−6,90
Средняя абсолютная относительная погрешность, %	24,10	22,59
MAE, мкЗв/ч	0,0462	0,0421
RMSE, мкЗв/ч	0,0560	0,0542
Коэффициент корреляции Пирсона	0,7612	0,7188
R^2	0,5795	0,5166
Линейная регрессия	$Y = 0,9355X - 0,0099$	$Y = 0,9734X - 0,0094$
Попадание в коридор ± 20 %, % точек	43,6	46,2
Рекомендуемый коэффициент	0,006093	0,006260

Сравнение результатов без фольги и с фольгой показывает, что основное улучшение связано с подбором численного коэффициента и изменением условий регистрации. Без фильтрации наклон регрессии находился в диапазоне 2,2796–2,8094, что указывало на значительное завышение масштаба. После установки свинцовой фольги наклон уменьшился до 0,9355–0,9734. Такая динамика демонстрирует значимость спектральной фильтрации для повышения достоверности измерений.

При этом коэффициент корреляции после фильтрации оказался ниже, чем в некоторых сериях без фильтрации. Такой результат не противоречит улучшению точности. Корреляция характеризует форму связи между рядами, а близость наклона к единице и снижение RMSE характеризуют согласование масштаба и абсолютных значений. Для практической дозиметрии важны высокая корреляция и близость показаний к эталонной шкале. В данном случае свинцовая фольга уменьшила систематическую ошибку, что подтверждается снижением MAE и RMSE.

Таблица 3.4 – Изменение ключевых показателей при введении свинцовой фильтрации

Серия	Наклон регрессии	MAE, мкЗв/ч	RMSE, мкЗв/ч	Средняя абсолютная относительная погрешность, %
k = 0,005 без фольги	2,2796	0,0636	0,1234	28,22
k = 0,0045 без фольги	2,4933	0,0744	0,1086	34,66
k = 0,0057 без фольги	2,8094	0,0877	0,1712	40,94
k = 0,0057 с фольгой	0,9355	0,0462	0,0560	24,10
k = 0,006093 с фольгой	0,9734	0,0421	0,0542	22,59

Наиболее показательным является снижение RMSE: для k = 0,0057 без фольги значение RMSE составляло 0,1712 мкЗв/ч, после установки фольги и коррекции коэффициента оно уменьшилось до 0,0542 мкЗв/ч. Уменьшение ошибки более чем в три раза показывает, что свинцовая фильтрация является эффективным элементом повышения достоверности дозиметрического канала.

3.4 Подбор и коррекция коэффициента пересчёта

Коэффициент пересчёта определяет связь между счётной скоростью и мощностью дозы. На практике его нельзя выбирать только по справочным

данным для детектора, поскольку итоговый отклик зависит от конкретной электронной схемы, алгоритмов обработки, геометрии размещения, корпуса, экранирования и спектрального состава излучения. Поэтому в данной работе коэффициент уточнялся экспериментально, через сопоставление с поверенным дозиметром.

В исследовании были последовательно проверены коэффициенты $k = 0,005$; $k = 0,0045$; $k = 0,0057$ и $k = 0,006093$. Первые три значения использовались для оценки поведения канала без свинцовой фольги и определения характера масштабной ошибки. Значение $k = 0,006093$ было получено как скорректированное после анализа серии со свинцовой фольгой при $k = 0,0057$. Такой порядок позволил разделить два фактора: влияние самого коэффициента пересчёта и влияние спектральной фильтрации.

Для вычисления рекомендуемого коэффициента использовалась линейная регрессия между показаниями эталонного дозиметра и разработанного комплекса. При аппроксимации зависимость записывалась в виде

$$Y_{\text{изм}} = a \cdot X_{\text{эт}} + b$$

где $Y_{\text{изм}}$ — показание разработанного дозиметрического комплекса, мкЗв/ч;

$X_{\text{эт}}$ — показание эталонного дозиметра, мкЗв/ч;

a — коэффициент наклона регрессии;

b — свободный член регрессии, мкЗв/ч.

Наклон регрессии показывает масштабное расхождение. Значение a , близкое к единице, соответствует согласованию шкал приборов. При значительном отклонении от единицы коэффициент пересчёта корректируется. Для рассматриваемой схемы расчёта применялась формула

$$k_{\text{corr}} = k_0 / a$$

где k_{corr} — скорректированный коэффициент пересчёта;

k_0 — исходный коэффициент пересчёта;

a — коэффициент наклона регрессии.

Преимущество данного подхода заключается в использовании всей серии измерений, а не отдельной точки. В результате корректировка становится устойчивее к случайным флуктуациям счёта и единичным выбросам. Одновременно сохраняется физический смысл процедуры: коэффициент пересчёта изменяется пропорционально масштабной ошибке, обнаруженной при сравнении с эталонной шкалой.

Таблица 3.5 – Подбор коэффициента пересчёта по результатам регрессионного анализа

Условия измерения	Исходный коэффициент	Наклон регрессии a	Рекомендуемый коэффициент
Без свинцовой фольги	0,005	2,2796	0,002193
Без свинцовой фольги	0,0045	2,4933	0,001805
Без свинцовой фольги	0,0057	2,8094	0,002029
Со свинцовой фольгой	0,0057	0,9355	0,006093
Со свинцовой фольгой	0,006093	0,9734	0,006260

Результаты таблицы показывают, что корректировка коэффициента без свинцовой фольги приводила бы к очень малым значениям около 0,002. Однако такая коррекция устраняла бы только масштабную ошибку в конкретной серии, сохраняя влияние посторонних компонент излучения. Более обоснованным вариантом является совместное применение свинцовой фильтрации и уточнённого коэффициента. В этой конфигурации регрессионный наклон оказался близким к единице, а ошибки заметно снизились.

Практически наиболее удачным оказался коэффициент $k = 0,006093$ при работе со свинцовой фольгой. Он обеспечил среднее отклонение $-0,0144$ мкЗв/ч, среднюю относительную погрешность $-6,90$ %, MAE $0,0421$ мкЗв/ч и RMSE $0,0542$ мкЗв/ч. Средняя абсолютная относительная погрешность составила $22,59$ %, что близко к погрешности поверенного дозиметра. Для самодельного мобильного комплекса такой результат является значимым, поскольку итоговая точность ограничивается характеристиками разработанного измерительного канала, эталонного средства, геометрией эксперимента и статистической природой регистрации.

Подбор коэффициента также показал, что использование одного универсального значения без экспериментального подтверждения может приводить к существенной систематической ошибке. Для дальнейшей эксплуатации комплекса выбранный коэффициент должен рассматриваться как калибровочная характеристика конкретного экземпляра прибора. При замене детектора, изменении корпуса, экрана, электронной схемы или алгоритма усреднения требуется повторная проверка.

3.5 Калибровка метеорологических датчиков

Мобильный дозиметрический комплекс регистрирует мощность дозы ионизирующего излучения и параметры окружающей среды. Температура, относительная влажность и атмосферное давление важны для анализа условий измерений, оценки стабильности работы электроники и последующей интерпретации полевых данных. Поэтому отдельная часть экспериментальной работы была посвящена калибровке метеорологических датчиков ВМЕ280 и АНТ30.

В составе комплекса ВМЕ280 используется для измерения температуры, относительной влажности и атмосферного давления. Датчик АНТ30 применялся

как дополнительный канал температуры и влажности. Сравнение двух сенсоров позволило оценить различия в динамике временных рядов, выявить систематическое смещение и определить, какой канал целесообразнее использовать для конкретного параметра.

Для проверки был собран стенд с разработанным комплексом и установленными датчиками ВМЕ280 и АНТ30. Стенд размещался в психрометрической будке на метеорологической площадке. Такое размещение обеспечивает защиту от прямого солнечного излучения, осадков и локального перегрева, а также создаёт условия естественной вентиляции. Эти условия важны для корректной оценки температуры и влажности, поскольку открытое размещение электронного блока способно привести к завышению температуры из-за нагрева корпуса и микроконтроллера.

В качестве эталонных средств использовались метеорологические датчики НМР45 для температуры и относительной влажности, а также РМТ16А для атмосферного давления. Контрольные значения фиксировались в моменты устойчивого состояния среды. Для сопоставления с эталоном значения ВМЕ280 и АНТ30 усреднялись по нескольким последним измерениям перед временем контрольной точки. В итоговой обработке использовалось усреднение трёх последних измерений, что соответствует интервалу около 30 секунд при периоде опроса 10 секунд.

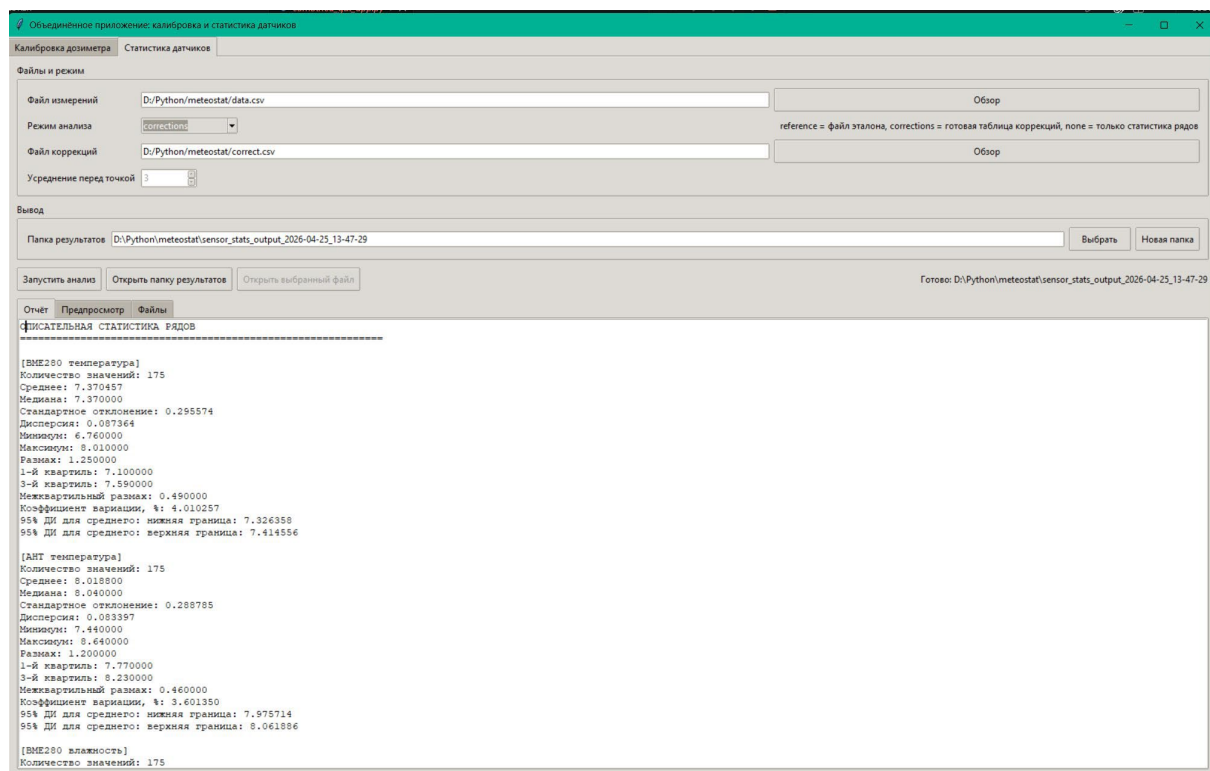


Рисунок 3.12 – Интерфейс программы статистической обработки метеорологических данных

Для обработки данных была разработана отдельная программа на языке Python. Она загружает временные ряды, распознаёт столбцы с измеряемыми параметрами, приводит числовые значения к единому формату, выбирает измерения перед контрольными моментами и рассчитывает статистические показатели. Программа формирует таблицы, отчёт и графические материалы, что делает обработку воспроизводимой и уменьшает количество ручных операций.

Калибровка выполнялась с использованием контрольных точек, сформированных по эталонным приборам. Расширение контрольной выборки до 30 точек повышает устойчивость оценок, поскольку результаты становятся менее чувствительными к единичным флуктуациям и кратковременным локальным изменениям среды. Каждая контрольная точка в такой схеме представляет не одно мгновенное значение датчика, а усреднённую оценку за короткий интервал перед эталонным отсчётом. Такой подход повышает сопоставимость данных, особенно при наличии небольших задержек отклика сенсоров.

Для метеорологических датчиков рассчитывались bias, MAE, RMSE, стандартное отклонение ошибок и доверительный интервал систематической ошибки. Bias показывает среднее смещение датчика относительно эталона. Положительное значение bias при выбранной записи разности соответствует занижению показаний исследуемого датчика относительно эталона, отрицательное значение соответствует завышению. MAE характеризует среднюю величину ошибки, RMSE подчёркивает влияние отдельных крупных отклонений.

$$\text{bias} = (1 / m) \cdot \Sigma(X_{\text{эт},i} - X_{\text{датч},i})$$

где bias — средняя систематическая ошибка;

m — число контрольных точек;

$X_{\text{эт},i}$ — i-е значение эталонного прибора;

$X_{\text{датч},i}$ — i-е значение исследуемого датчика.

Для уменьшения систематической составляющей применялась постоянная корректирующая поправка. Она равна оценке bias и добавляется к показаниям датчика. Такой метод не меняет форму временного ряда и не устраняет случайный шум, но эффективно компенсирует постоянное смещение.

$$X_{\text{корр}} = X_{\text{датч}} + \text{bias}$$

где $X_{\text{корр}}$ — скорректированное значение;

$X_{\text{датч}}$ — исходное показание датчика;

bias — оценка систематической ошибки.

Таблица 3.6 – Описательная статистика температурных рядов

Показатель	BME280	АНТ30
Количество значений	175	175

Показатель	ВМЕ280	АНТ30
Среднее, °C	7,370457	8,018800
Медиана, °C	7,370000	8,040000
Стандартное отклонение, °C	0,295574	0,288785
Дисперсия	0,087364	0,083397
Минимум, °C	6,760000	7,440000
Максимум, °C	8,010000	8,640000
Размах, °C	1,250000	1,200000
Межквартильный размах, °C	0,490000	0,460000
Коэффициент вариации, %	4,010257	3,601350
95 % ДИ среднего, °C	[7,326358; 7,414556]	[7,975714; 8,061886]

Температурные ряды ВМЕ280 и АНТ30 имеют близкую изменчивость: стандартное отклонение составляет 0,296 °C и 0,289 °C соответственно. При этом среднее значение АНТ30 выше среднего значения ВМЕ280 примерно на 0,65 °C. Такая разница указывает на устойчивое смещение между каналами. В дальнейшем именно сопоставление с эталонными приборами позволяет определить, какой из датчиков ближе к контрольной температуре.

Таблица 3.7 – Описательная статистика рядов относительной влажности

Показатель	ВМЕ280	АНТ30
Количество значений	175	175
Среднее, %	31,368457	33,000514
Медиана, %	31,230000	32,950000
Стандартное отклонение, %	0,950966	0,791929
Дисперсия	0,904337	0,627151
Минимум, %	29,880000	31,350000
Максимум, %	35,390000	35,290000
Размах, %	5,510000	3,940000
Межквартильный размах, %	1,135000	1,040000
Коэффициент вариации, %	3,031601	2,399746
95 % ДИ среднего, %	[31,226576; 31,510339]	[32,882361; 33,118668]

Ряд влажности АНТ30 оказался более сглаженным: стандартное отклонение и коэффициент вариации ниже, чем у ВМЕ280. Это свидетельствует о меньшем разбросе показаний, что может быть связано с внутренней обработкой сигнала и инерционностью датчика. ВМЕ280 показывает более широкий диапазон изменений и большую чувствительность к кратковременным колебаниям влажности. Для практического применения важны сглаженность и близость к эталонным значениям, поэтому окончательный выбор канала выполнялся по ошибкам относительно НМР45.

Таблица 3.8 – Описательная статистика ряда атмосферного давления ВМЕ280

Показатель	ВМЕ280
Количество значений	175
Среднее, гПа	1024,560000
Медиана, гПа	1024,600000
Стандартное отклонение, гПа	0,050287
Дисперсия	0,002529
Минимум, гПа	1024,500000
Максимум, гПа	1024,700000
Размах, гПа	0,200000
Межквартильный размах, гПа	0,100000
Коэффициент вариации, %	0,004908
95 % ДИ среднего, гПа	[1024,552497; 1024,567503]

Барометрический канал ВМЕ280 продемонстрировал очень низкую изменчивость: стандартное отклонение составило 0,050 гПа, коэффициент вариации — 0,0049 %. Эти результаты свидетельствуют о высокой стабильности давления в обработанном временном ряду. Данные, приведённые ниже в оценке bias-коррекции, дополнительно показывают хорошее согласование с эталонным каналом РМТ16А.

Таблица 3.9 – Результаты bias-коррекции температуры

Показатель	ВМЕ280	АНТ30
Применённая поправка	+0,695 °C	+0,050 °C
Bias до коррекции	0,695 °C	0,050 °C

Показатель	BME280	АНТ30
95 % ДИ bias до коррекции	[0,291925; 1,098075] °C	[-0,312389; 0,412389] °C
Bias после коррекции	0,000 °C	0,000 °C
95 % ДИ bias после коррекции	[-0,403075; 0,403075] °C	[-0,362389; 0,362389] °C
RMSE до → после	0,728800 → 0,219374 °C	0,203470 → 0,197231 °C
MAE до → после	0,695000 → 0,195000 °C	0,180000 → 0,180000 °C

Для температуры BME280 была выявлена выраженная систематическая ошибка: датчик занижал температуру примерно на 0,7 °C. После введения постоянной поправки RMSE снизилась с 0,729 до 0,219 °C, MAE уменьшилась с 0,695 до 0,195 °C. Такой результат показывает преобладание систематической составляющей, хорошо компенсируемой bias-коррекцией. АНТ30 по температуре изначально имел малое смещение: bias составил 0,050 °C, а RMSE после коррекции изменилась незначительно. Это позволяет рассматривать АНТ30 как более точный температурный канал без существенной дополнительной настройки.

Таблица 3.10 – Результаты bias-коррекции относительной влажности

Показатель	BME280	АНТ30
Применённая поправка	+0,707500 %	-0,720000 %
Bias до коррекции	0,707500 %	-0,720000 %
95 % ДИ bias до коррекции	[-0,437103; 1,852103] %	[-2,292281; 0,852281] %
Bias после коррекции	0,000000 %	-0,000000 %
95 % ДИ bias после коррекции	[-1,144603; 1,144603] %	[-1,572281; 1,572281] %
RMSE до → после	0,942669 → 0,622952 %	1,118325 → 0,855716 %
MAE до → после	0,857500 → 0,507500 %	0,815000 → 0,775000 %

Для относительной влажности BME280 показал положительный bias 0,7075 %, что соответствует занижению относительно эталонного канала. После введения поправки RMSE уменьшилась с 0,943 до 0,623 %, MAE — с 0,858 до

0,508 %. Для АНТ30 bias имел отрицательное значение $-0,720$ %, что соответствует завышению влажности. Коррекция уменьшила RMSE с 1,118 до 0,856 %, но MAE снизилась слабо. Такая картина указывает на заметную случайную составляющую погрешности влажностного канала АНТ30.

Таблица 3.11 – Результаты bias-коррекции атмосферного давления ВМЕ280

Показатель	ВМЕ280
Применённая поправка	$-0,025000$ гПа
Bias до коррекции	$-0,025000$ гПа
95 % ДИ bias до коррекции	$[-0,177348; 0,127348]$ гПа
Bias после коррекции	$-0,000000$ гПа
95 % ДИ bias после коррекции	$[-0,152348; 0,152348]$ гПа
RMSE до → после	$0,086603 \rightarrow 0,082916$ гПа
MAE до → после	$0,075000 \rightarrow 0,075000$ гПа

Давление по ВМЕ280 имело минимальное смещение: bias составил $-0,025$ гПа, RMSE — $0,0866$ гПа. После коррекции показатели практически не изменились, поскольку исходное согласование с РМТ16А уже было высоким. Учитывая, что погрешность эталонного датчика РМТ16А составляет $\pm 0,3$ гПа, обнаруженное смещение $-0,025$ гПа является статистически незначимым. Это подтверждает, что ВМЕ280 в данной конфигурации может использоваться без дополнительной калибровки давления.

Сравнение каналов помогает выбрать практическую схему использования датчиков. Для температуры предпочтителен АНТ30, поскольку его систематическое смещение мало, а ошибка относительно эталона ниже уже до коррекции. Для относительной влажности лучше использовать ВМЕ280 после введения поправки, так как он даёт меньшие RMSE и MAE после коррекции. Давление целесообразно регистрировать по ВМЕ280, поскольку этот канал показал высокую стабильность и малое отклонение от РМТ16А.

3.6 Анализ факторов, влияющих на достоверность измерений

Достоверность измерений мобильного комплекса определяется совокупностью аппаратных, программных и внешних факторов. Их анализ важен для понимания того, какие инженерные решения действительно повышают качество данных, а какие ограничения требуют дальнейшей доработки.

К аппаратным факторам относится нагрев электронных компонентов. Микроконтроллер ESP32-S3, стабилизаторы питания, дисплей и модуль связи выделяют тепло, которое способно влиять на показания температурных датчиков при близком размещении внутри корпуса. Для уменьшения такого влияния датчики размещаются в вентилируемой зоне корпуса, отделённой от основной электроники. Корпус с жалюзийной нижней частью обеспечивает приток воздуха и уменьшает влияние прямого солнечного излучения на измерительные элементы.

Отдельное значение имеет питание. SIM800C при регистрации в сети и передаче данных способен создавать кратковременные токовые пики. Такие пики вызывают просадки напряжения, повышенный уровень помех и сбои при недостаточном запасе источника питания. В конструкции использовались отдельные меры стабилизации: развязка питания, ёмкостная поддержка линии и программное разделение передачи данных от измерительного цикла. Эти меры уменьшают вероятность перезагрузки контроллера и снижают влияние радиомодуля на регистрацию данных.

Влияние SIM800C связано с токовыми пиками и электромагнитными помехами. Передающий тракт GSM работает импульсно, поэтому при близком расположении проводов и недостаточной развязке возможны наводки на сигнальные линии. Для повышения достоверности требуется аккуратная разводка питания, укорочение проводов, общий контроль соединений, разделение силовых и сигнальных цепей, а также проверка работы SD-карты во время передачи данных.

Локальное хранение на SD-карту повышает сохранность данных, но само по себе добавляет фактор задержек и возможных блокировок. Запись файла занимает конечное время, а при частом логировании возможны задержки в основном цикле программы. Переход на ESP32-S3 и использование задач FreeRTOS позволяют вынести запись в отдельный поток и уменьшить влияние операций с файловой системой на измерение и веб-интерфейс. Такая организация повышает устойчивость комплекса при длительной работе.

К программным факторам относится период опроса датчиков. Слишком частый опрос увеличивает нагрузку на микроконтроллер, SD-карту и веб-интерфейс, а также может создавать избыточный массив данных без реального повышения точности. Слишком редкий опрос снижает временное разрешение и ухудшает способность фиксировать локальные изменения. В разработанном комплексе период опроса выбирается с учётом динамики измеряемых величин: метеорологические параметры меняются относительно плавно, а дозиметрический канал требует накопления импульсов за интервал, достаточный для статистически устойчивой оценки.

Фильтрация и усреднение являются главными программными методами повышения достоверности. Для дозиметрического канала усреднение уменьшает случайную составляющую счёта. Для метеорологических датчиков усреднение нескольких последних значений перед контрольной точкой повышает сопоставимость с эталонным отсчётом и снижает влияние кратковременных выбросов. При этом чрезмерное сглаживание ухудшает реакцию на реальные изменения среды, поэтому алгоритм обработки должен сохранять баланс между устойчивостью и временной детализацией.

Формирование JSON-структур, обслуживание веб-интерфейса и передача данных также влияют на стабильность. В ранней однопоточной архитектуре такие операции могли задерживать основной цикл. В готовом комплексе задачи разделены: сбор данных, работа с GPS, запись на SD-карту, веб-интерфейс и

коммуникационные операции выполняются более независимо. Это снижает вероятность блокировок и повышает воспроизводимость временных интервалов между измерениями.

К внешним факторам относится естественная неоднородность городской среды. Гранитные поверхности набережных, бетонные конструкции, почва, здания и металлические элементы могут изменять локальный уровень ионизирующего излучения. Полевые измерения на Васильевском острове показали, что гранитная облицовка набережной способна формировать повышенные значения мощности дозы по сравнению с участками, удалёнными от каменной поверхности. Для корректной интерпретации таких данных требуется фиксировать координаты, условия измерения, расстояние до потенциального источника и ориентацию прибора.

Осадки, влажность, температура воздуха и солнечный нагрев влияют как на условия работы электроники, так и на стабильность метеорологических датчиков. Поэтому корпус комплекса имеет защитную и измерительную функцию: он должен защищать датчики от прямого воздействия внешней среды, сохраняя вентиляцию. Размещение прибора в полевых условиях требует контроля ориентации, отсутствия прямого контакта чувствительных элементов с нагретыми поверхностями и достаточного времени для установления теплового равновесия.

Таблица 3.12 – Факторы, влияющие на достоверность измерений мобильного комплекса

Группа факторов	Фактор	Влияние на результат	Принятые меры
Аппаратные	Нагрев ESP32-S3 и электроники	Смещение температуры, ухудшение стабильности датчиков	Разнесение электроники и датчиков, вентиляция корпуса

Группа факторов	Фактор	Влияние на результат	Принятые меры
Аппаратные	Токовые пики SIM800C	Просадки питания, возможные сбои записи и перезагрузки	Развязка питания, ёмкостная поддержка, разделение задач
Аппаратные	Электромагнитные помехи GSM	Наводки на сигнальные линии	Сокращение проводов, разделение силовых и сигнальных цепей
Аппаратные	Запись на SD-карту	Задержки при логировании	Фоновая запись, переход на многозадачность ESP32-S3
Программные	Период опроса	Влияет на временное разрешение и объём данных	Выбор периода с учётом динамики параметров
Программные	Усреднение	Снижает случайный разброс, увеличивает инерционность	Усреднение по нескольким значениям и сериям
Программные	Формирование JSON и веб-интерфейс	Нагрузка на память и процессор	Структурирование данных, разделение задач
Внешние	Гранит и строительные материалы	Локальное повышение мощности дозы	Фиксация координат и расстояния до объекта
Внешние	Осадки и солнечный нагрев	Влияние на датчики и корпус	Защитный корпус с вентиляцией
Внешние	Ориентация и расстояние	Изменение геометрии измерения	Фиксация условий и повторные измерения

Комплексный анализ факторов показывает, что повышение достоверности достигается не одним приёмом, а сочетанием инженерных решений. К ним относятся подбор коэффициента пересчёта, свинцовая фильтрация дозиметрического канала, повторные измерения, статистическая обработка, коррекция систематических ошибок метеорологических датчиков, локальное

хранение данных, многозадачная программная архитектура и конструктивная защита измерительных элементов.

3.7 Выводы по третьей главе

В третьей главе мы выполнили экспериментальную оценку готового мобильного дозиметрического комплекса и рассмотрел основные методы повышения достоверности измерений. Проверка дозиметрического канала показала, что счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20 корректно реагирует на изменение поля гамма-излучения, а связь с показаниями поверенного дозиметра подтверждается регрессионным анализом. Одновременно результаты без свинцовой фольги выявили выраженную масштабную ошибку и значительное влияние дополнительных компонент излучения.

Свинцовая фильтрация дала наиболее заметное улучшение дозиметрического канала. После установки фольги наклон регрессии приблизился к единице, MAE и RMSE уменьшились, а показания стали лучше согласовываться с эталонным прибором. При коэффициенте $k = 0,006093$ средняя относительная погрешность составила $-6,90 \%$, средняя абсолютная относительная погрешность — $22,59 \%$, RMSE — $0,0542$ мкЗв/ч. Эти значения сопоставимы с погрешностью поверенного дозиметра, что подтверждает практическую применимость выбранной схемы фильтрации и калибровки.

Подбор коэффициента пересчёта по линейной регрессии позволил перейти от эмпирического выбора коэффициента к количественно обоснованной процедуре. Наиболее важными результатами являются численное значение коэффициента и понимание условий его применимости. Коэффициент должен использоваться совместно с той конструкцией, экранированием, программной обработкой и геометрией измерения, для которых он был получен.

Калибровка метеорологических датчиков показала разный характер погрешностей BME280 и АНТ30. Для температуры АНТ30 оказался ближе к эталонным значениям и практически не требовал коррекции. Для температуры BME280 была выявлена выраженная систематическая ошибка, которая эффективно компенсировалась постоянной поправкой. Для относительной влажности BME280 после коррекции показал лучшие значения RMSE и MAE, а для давления BME280 подтвердил высокую стабильность и малое расхождение с PMT16A.

Переход на ESP32-S3, разделение задач, локальное хранение данных, защита корпуса, использование свинцовой фильтрации и статистическая обработка результатов в совокупности повысили надёжность и метрологическую обоснованность комплекса. Проведённые эксперименты показали, что разработанный прибор может применяться для полевых измерений мощности дозы ионизирующего излучения с одновременной регистрацией метеорологических параметров, а дальнейшее повышение точности связано с расширением контрольных серий, улучшением питания, применением более устойчивых модулей связи и накоплением данных в разных условиях эксплуатации.

ГЛАВА 4. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АВТОНОМНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Разработанный мобильный дозиметрический комплекс представляет собой опытный образец измерительной системы, объединяющей дозиметрический канал на базе модуля RadSens и счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20, микроконтроллер ESP32-S3, датчики метеорологических параметров, GPS-модуль, локальное хранение данных, веб-интерфейс и канал удалённой передачи телеметрии. Проведённые ранее этапы разработки и экспериментальной проверки показали, что такая архитектура пригодна для разовых маршрутных

измерений и дальнейшего развития в сторону распределённого мониторинга уровня ионизирующего излучения.

Значимость комплекса определяется объединением нескольких свойств. Прибор способен работать автономно, сохранять измерения на SD-карту, привязывать данные ко времени и координатам, передавать результаты на домашний сервер и обеспечивать локальный доступ через веб-интерфейс. При доработке каналов связи, серверной обработки и системы питания такой комплекс может использоваться как основа для сети мобильных или стационарных дозиметрических постов. На данном этапе разработка сохраняет статус опытного образца, а дальнейшее развитие связано с повышением автономности, устойчивости связи, масштабируемости серверной части и снижением эксплуатационных ограничений.

4.1 Практическое применение комплекса и возможность создания сети автономных дозиметрических постов

Основная область практического применения разработанного комплекса связана с регистрацией мощности дозы ионизирующего излучения в городской среде и накоплением пространственно привязанных данных. В отличие от ручного измерения бытовым дозиметром, комплекс формирует структурированную запись, содержащую мощность дозы, координаты, время, температуру, влажность и атмосферное давление. Такая запись может использоваться для последующей статистической обработки, построения карт, сопоставления измерений между точками и анализа влияния внешних факторов на результат наблюдений.

Полевые измерения, выполненные на территории Василеостровского района Санкт-Петербурга, показали пригодность выбранной архитектуры для маршрутного мониторинга. В ходе таких измерений особенно важны сами

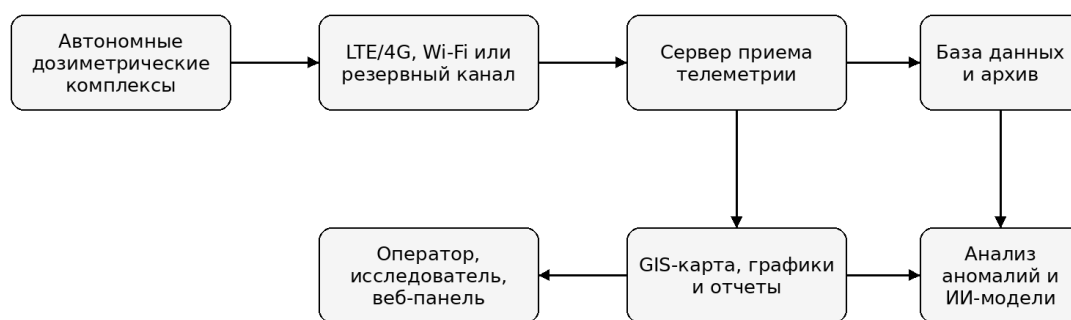
показания дозиметрического канала, сохранение координат, точная временная привязка, устойчивость питания и возможность последующей выгрузки данных. Наличие GPS-модуля позволяет связать каждую запись с конкретной точкой маршрута, а сохранение данных в CSV-формате упрощает обработку в Python, электронных таблицах и геоинформационных системах.

При стационарном применении комплекс может использоваться как мобильный пост наблюдения. В этом режиме прибор размещается в защитном корпусе, выполняет непрерывный сбор данных с заданным периодом и периодически передаёт результаты на сервер. Такое применение особенно полезно для контроля фоновых значений в выбранных точках, например возле промышленных объектов, образовательных учреждений, метеорологических площадок, складских территорий или участков с повышенным интересом к природной радиоактивности строительных материалов.

Наиболее перспективным направлением является создание распределённой сети из нескольких однотипных комплексов. При наличии нескольких приборов появляется возможность сравнивать временные ряды между разными районами, автоматически выделять локальные отклонения, отслеживать устойчивость фоновых значений и формировать карту уровня ионизирующего излучения. Для такой сети важна единая структура данных, согласованное время измерений, централизованный сервер и механизм контроля исправности каждого узла.

Сетевая архитектура может включать несколько автономных постов, канал передачи данных, сервер приёма, базу данных, модуль визуализации и блок автоматического анализа. Общая перспективная схема такой системы представлена на рисунке 4.1.

Перспективная структура сети автономного мониторинга



Сеть может работать как с мобильными измерениями, так и со стационарными постами. Локальная запись на SD-карту сохраняет данные при временном отсутствии связи.

Рисунок 4.1 – Перспективная структура сети мобильного мониторинга уровня ионизирующего излучения

Каждый узел сети может выполнять локальную регистрацию независимо от состояния связи. При временном отсутствии мобильного интернета измерения продолжают записываться на SD-карту. После восстановления связи данные могут быть выгружены на сервер пакетно. Такой принцип повышает устойчивость системы, поскольку кратковременные сбои канала связи не приводят к потере измерительных данных.

Для постоянного мониторинга важно предусмотреть служебные параметры, позволяющие оценивать состояние прибора. К таким параметрам относятся напряжение питания, температура внутри корпуса, наличие GPS-фиксации, состояние SD-карты, время последней записи, время последней передачи данных и диагностический статус модуля связи. Эти сведения не относятся напрямую к мощности дозы ионизирующего излучения, однако позволяют контролировать достоверность накопленного архива. Данные измерительного канала имеют более высокую практическую ценность, когда вместе с ними известны условия регистрации и состояние аппаратной части.

В дальнейшем сеть автономных дозиметрических постов может использоваться для формирования базы фоновых значений. Такая база позволит сравнивать текущие показания с обычными для данного места и времени значениями. Простое превышение единичного порога не всегда достаточно информативно, потому что природный фон зависит от материалов поверхности, высоты над уровнем земли, влажности, осадков, экранирования и геометрии измерения. Накопление собственных рядов для каждой точки повышает интерпретируемость данных и уменьшает риск ошибочной оценки локального отклонения.

4.2 Перспективы перехода на LTE/4G

Использование SIM800C подтвердило работоспособность идеи удалённой передачи данных с мобильного комплекса на сервер. Модуль позволил реализовать передачу телеметрии через мобильную сеть, уменьшить зависимость прибора от локальной Wi-Fi-инфраструктуры и проверить серверную схему приёма данных. При этом практическая эксплуатация показала ряд ограничений, связанных с пиковым током потребления, чувствительностью к качеству питания, влиянием наводок и нестабильностью GPRS-соединения в реальных условиях.

По данным производителя, SIM800C является GSM/GPRS-модулем с поддержкой передачи данных GPRS до 85,6 кбит/с, работает в диапазонах 850/900/1800/1900 МГц, питается от 3,4 до 4,4 В и управляется AT-командами [18]. Для коротких телеметрических строк такой скорости достаточно. Однако при развитии комплекса в сторону сети приборов, удалённого обслуживания, диагностических файлов, обновлений прошивки и расширенной серверной аналитики более перспективным становится переход к LTE/4G-модулям.

Переход к LTE/4G обоснован повышением скорости передачи и общей устойчивости канала связи. Современные модули обычно обеспечивают более устойчивую сетевую инфраструктуру, поддержку актуальных протоколов, работу с HTTPS, MQTT, TCP/IP-стеком, удалённые обновления и более гибкую диагностику соединения. Для мобильного измерительного комплекса это означает сокращение времени активной передачи, меньшую длительность работы радиотракта, более удобную интеграцию с сервером и возможность масштабирования системы до нескольких узлов.

В качестве перспективного варианта для телеметрии может рассматриваться A7670E или близкий LTE Cat.1-модуль. Для A7670E Cat-1 HAT заявлена поддержка LTE-TDD, LTE-FDD, GSM, GPRS и EDGE, а также скорость до 10 Мбит/с на приём и до 5 Мбит/с на передачу [22]. Такой класс модулей хорошо подходит для IoT-устройств, где передаются небольшие пакеты данных, но требуется более современный канал связи по сравнению с GPRS.

Для более производительной конфигурации может рассматриваться A7608SA-H. Согласно данным SIMCom, модуль относится к LTE Cat.4, поддерживает LTE-TDD, LTE-FDD, HSPA+, GSM, GPRS и EDGE, а максимальная скорость составляет до 150 Мбит/с на приём и до 50 Мбит/с на передачу [22]. Такой модуль избыточен для передачи одной строки CSV, но полезен при расширении функциональности комплекса: пакетная выгрузка архивов, передача диагностических журналов, удалённое обновление, интеграция с защищёнными API и работа в составе сети приборов.

Таблица 4.1 – Сравнение направлений развития канала мобильной связи

Модуль	Класс связи	Приём данных	Передача данных	Перспективное применение
SIM800C	GSM/GPRS	до 85,6 кбит/с	до 85,6 кбит/с	короткие POST/FTP-передачи,

				опытная телеметрия
A7670E	LTE Cat.1	до 10 Мбит/с	до 5 Мбит/с	IoT-телеметрия, MQTT/HTTPS, сеть приборов
A7608SA-H	LTE Cat.4	до 150 Мбит/с	до 50 Мбит/с	расширенная телеметрия, архивы, диагностика, удалённое обслуживание

Для практического перехода на LTE/4G требуется переработка нескольких узлов комплекса. Во-первых, необходимо обеспечить стабильное питание модуля связи с учётом импульсных токов и требований производителя. Во-вторых, следует предусмотреть развязку питания радиомодуля и измерительной части, поскольку помехи в момент передачи способны ухудшать работу GPS, SD-карты и цифровых шин. В-третьих, потребуется адаптация программной части: обработка AT-команд, повторные попытки соединения, контроль регистрации в сети, тайм-ауты, формирование очереди отправки и хранение статуса последней успешной передачи.

Для серверной части переход на LTE/4G открывает возможность применения более удобной схемы обмена. Вместо простого HTTP POST-запроса может использоваться MQTT-брокер, REST API с авторизацией, защищённая передача по HTTPS, пакетная отправка архивов и автоматическое подтверждение приёма. Такая схема особенно полезна при работе нескольких комплексов: сервер получает данные от каждого узла, проверяет полноту записей, фиксирует время поступления и формирует общий архив наблюдений.

В перспективной версии комплекс может сохранять независимость от одного канала связи. Локальная SD-карта остаётся основным резервом, Wi-Fi может использоваться при нахождении рядом с известной сетью, LTE/4G обеспечивает удалённую передачу в полевых условиях. Такое сочетание каналов

повышает устойчивость системы и снижает вероятность потери данных при длительной эксплуатации.

4.3 Развитие домашнего сервера до станции обработки данных

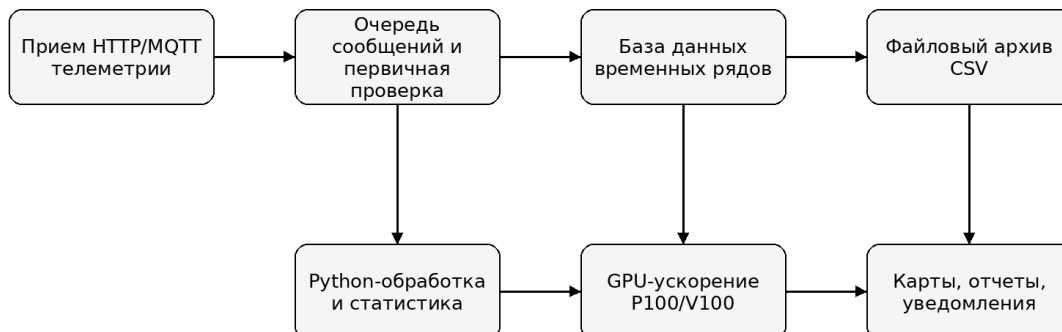
Первоначально домашний сервер использовался как простой узел приёма и хранения данных. Такая схема достаточна для проверки работоспособности удалённой передачи: прибор формирует строку с измерениями, отправляет её на сервер, а сервер сохраняет запись в текстовый файл. При развитии комплекса серверная часть может быть преобразована в полноценную станцию обработки данных, предназначенную для длительного накопления, проверки, визуализации и анализа измерительных рядов.

Станция обработки данных должна решать несколько задач. Первая задача связана с приёмом телеметрии от одного или нескольких приборов. Для этого сервер может принимать HTTP POST-запросы, MQTT-сообщения или файлы с накопленными CSV-записями. Вторая задача связана с хранением данных в структурированном виде. Текстовый файл удобен на начальном этапе, однако база данных лучше подходит для поиска по времени, координатам, номеру прибора и диапазону значений. Третья задача связана с визуализацией: построение графиков, карт, временных рядов и отчетов. Четвёртая задача связана с автоматическим анализом, включая поиск выбросов и выявление неисправностей датчиков.

Серверная часть может быть построена по модульному принципу. Один модуль отвечает за приём данных, второй выполняет первичную валидацию, третий сохраняет результаты в базу, четвертый формирует карты и графики, пятый выполняет статистический анализ. Такой подход упрощает сопровождение системы. При увеличении числа приборов отдельные модули

можно переносить на разные сервисы или контейнеры Docker, сохраняя общую структуру обмена данными.

Развитие серверной части до станции обработки данных



Серверная часть может выполнять хранение, контроль полноты данных, поиск выбросов, построение карт уровня ионизирующего излучения и подготовку материалов для отчетов.

Рисунок 4.2 – Перспективная структура серверной станции обработки данных

Развитие серверной части целесообразно связывать с хранением данных и автоматическим контролем качества. Сервер может проверять наличие пропусков, резкие скачки координат, аномально частые нулевые значения, отсутствие GPS-фиксации, повторные записи, длительные интервалы без связи и нехарактерное поведение метеорологических датчиков. Такая обработка используется как вспомогательная диагностика, помогающая быстрее выявлять технические сбои и отделять неисправность прибора от реального изменения уровня ионизирующего излучения.

Дополнительным направлением является применение моделей машинного обучения. На первом этапе такие модели могут использоваться для обнаружения аномалий во временных рядах. Например, алгоритм может сравнивать текущее значение мощности дозы с типичным диапазоном для данной точки, учитывать скорость изменения показаний, время суток, погодные параметры и состояние прибора. При накоплении данных от нескольких комплексов появляется

возможность обучать модель на собственном архиве и формировать индивидуальные профили для разных мест установки.

Использование искусственного интеллекта в этой системе должно иметь вспомогательный характер. Модель может выполнять поиск подозрительных участков, группировку измерений, подготовку кратких отчетов, поиск похожих ситуаций в архиве и классификацию технических сбоев. Окончательная интерпретация результатов должна оставаться связанной с физическим смыслом измерений, метрологическими характеристиками прибора и условиями регистрации.

При росте объема данных и усложнении моделей может быть рассмотрена установка вычислительного ускорителя. NVIDIA Tesla P100 PCIe имеет максимальное энергопотребление 250 Вт и пассивное охлаждение [25]. NVIDIA Tesla V100 PCIe также относится к серверным ускорителям, имеет 16 ГБ HBM2, 5120 CUDA-ядер, 640 Tensor-ядер и максимальное энергопотребление 250 Вт для PCIe-версии [25]. Такие карты требуют серверного корпуса с мощным направленным воздушным потоком, качественного блока питания и правильного подключения питания. Для одного дозиметрического комплекса подобный ускоритель избыточен, но для сети приборов, длительного архива и моделей анализа временных рядов такая модернизация может рассматриваться как перспективная.

В практической реализации серверная станция может развиваться постепенно. На первом этапе достаточно базы данных, веб-панели и автоматического построения графиков. На втором этапе добавляется картографический модуль на основе OpenStreetMap или другой GIS-платформы. На третьем этапе сервер получает модуль автоматической проверки данных и уведомлений. На четвертом этапе становится возможным обучение моделей на собственном архиве. Такой путь развития позволяет сохранить уже созданную

систему и последовательно увеличивать её функциональность без полной переработки архитектуры.

4.4 Анализ автономности и энергопотребления

Автономность является одним из ключевых параметров комплекса, поскольку полевые измерения могут выполняться вдали от стационарного питания. На время работы влияют микроконтроллер ESP32-S3, модуль RadSens со счетчиком Гейгера-Мюллера СБМ-20, GPS-приёмник, OLED-дисплей, SD-карта, BME280, модуль мобильной связи и потери в преобразователях питания. Отдельное влияние оказывает SIM800C, так как в момент регистрации в сети и передачи данных модуль создаёт кратковременные импульсные нагрузки по току.

Для инженерной оценки автономности мной использована измеренная мощность порядка 2 Вт для действующего комплекса. Дополнительно введён расчётный режим 2,5 Вт, учитывающий запас на работу радиомодуля, потери преобразователей, нагрев, повышение яркости дисплея и дополнительные служебные операции. Такой подход позволяет оценить практическое время работы в условиях полевого применения.

Расчёт автономности выполнен по формуле:

$$T = (C \cdot U \cdot \eta) / P$$

где T — расчётное время мобильной работы, ч;

C — ёмкость аккумулятора, А·ч;

U — номинальное напряжение аккумулятора, В;

η — коэффициент полезного действия преобразователя питания;

P — средняя потребляемая мощность комплекса, Вт.

Для расчёта принято номинальное напряжение Li-Ion аккумулятора $U = 3,7$ В и КПД повышающего преобразователя $\eta = 0,85$. Количество измерений при заданном периоде регистрации рассчитывается по формуле

$$M = (T \cdot 3600) / \tau$$

где M — количество записей за время мобильной работы;

T — расчётное время мобильной работы, ч;

τ — период регистрации одной записи, с.

В таблице 4.2 приведены результаты расчёта для периода регистрации 10 с. Такой период использовался в экспериментальных работах и обеспечивает высокую временную детализацию данных. Расчётная автономность, приведённая в этой таблице, является оценочной. Экспериментальное измерение энергопотребления требует отдельной стендовой проверки и в рамках данной работы не выполнялось. Поэтому комплекс позиционируется как мобильный, а не автономный в строгом смысле

Таблица 4.2 – Расчёт автономности комплекса при разных ёмкостях аккумулятора

Ёмкость, мА·ч	Автономность при 2,0 Вт, ч	Записей при 10 с	Автономность при 2,5 Вт, ч	Записей при 10 с
2000	3.1	1132	2.5	906
3000	4.7	1698	3.8	1359
5000	7.9	2830	6.3	2264
10000	15.7	5661	12.6	4529
20000	31.4	11322	25.2	9058
30000	47.2	16983	37.7	13586

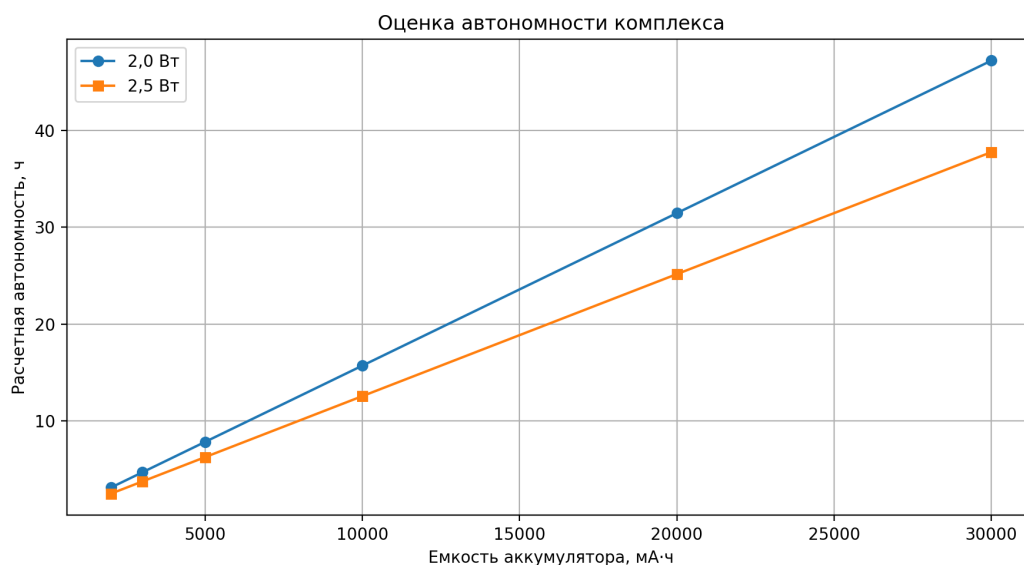


Рисунок 4.3 – Расчётная автономность комплекса при средней мощности 2,0 и 2,5 Вт

Полученные значения показывают, что аккумулятор ёмкостью 10 000 мА·ч обеспечивает ориентировочно 15,7 ч работы при средней мощности 2,0 Вт и 12,6 ч при мощности 2,5 Вт. При периоде записи 10 с это соответствует примерно 5661 и 4529 измерениям соответственно. Аккумулятор ёмкостью 20 000 мА·ч увеличивает время работы до 31,4 ч в базовом режиме и до 25,2 ч в режиме с запасом по мощности. Такие значения достаточны для суточной измерительной кампании при умеренной частоте передачи данных.

Реальная автономность может отличаться от расчётной из-за температуры окружающей среды, состояния аккумулятора, качества DC-DC-преобразователя, длительности сеансов связи, режима работы GPS, яркости OLED-дисплея и частоты записи на SD-карту. В полевых условиях особенно важна стабильность питания радиомодуля. Кратковременные провалы напряжения способны вызывать перезагрузку контроллера, потерю части данных или повреждение текущего файла на SD-карте. Поэтому запас по току источника питания и применение буферных конденсаторов являются элементами автономности и повышения достоверности измерительного архива.

Для повышения автономности могут использоваться несколько инженерных решений. OLED-дисплей может переходить в режим пониженной яркости или отключаться после периода бездействия. GPS-модуль может работать с уменьшенной частотой обновления координат при стационарной установке. Передача данных может выполняться пакетами через заданный интервал вместо отправки каждой отдельной записи. SD-карта остаётся основным резервным носителем, поэтому снижение частоты передачи по мобильной сети позволяет уменьшить среднюю потребляемую мощность без потери данных.

4.5 Расчёт объёма данных и ресурса SD-карты

Локальное хранение данных является одним из основных элементов автономности комплекса. SD-карта обеспечивает сохранение измерений при отсутствии мобильной связи, при временной недоступности сервера и при проведении измерений в местах без устойчивой сети. Для оценки требуемого объёма памяти мной выполнен расчёт количества записей, которое может быть сохранено на картах разной ёмкости.

Одна строка CSV содержит время, координаты, температуру, влажность, давление, мощность дозы ионизирующего излучения и служебные разделители. Для расчёта принят средний размер одной строки $S = 150$ байт. Это значение выбрано с запасом, поскольку фактическая строка может быть меньше, однако запас учитывает дополнительные поля, изменение точности координат, символы окончания строки и возможные диагностические параметры.

Количество записей на SD-карте рассчитывается по формуле:

$$N = V / S$$

где N — количество записей;

V — доступный объём памяти, байт;

S — средний размер одной записи, байт.

Длительность непрерывной записи рассчитывается по формуле:

$$D = (N \cdot \tau) / 86400$$

где D — длительность непрерывной записи, сут;

N — количество записей;

τ — период регистрации, с;

86400 — число секунд в сутках.

При периоде регистрации 10 с за сутки формируется 8640 записей. Такой объём данных является очень небольшим для современной SD-карты. Результаты расчёта приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчёт количества записей на SD-картах разного объёма

Объём SD-карты, ГБ	Количество записей при 150 байт/запись	Длительность при 10 с, сут	Длительность при 30 с, сут	Длительность при 60 с, сут
1	7 158 278	828.5	2485.5	4971.0
2	14 316 557	1657.0	4971.0	9942.1
4	28 633 115	3314.0	9942.1	19884.1
8	57 266 230	6628.0	19884.1	39768.2
16	114 532 461	13256.1	39768.2	79536.4
32	229 064 922	26512.1	79536.4	159072.9
64	458 129 844	53024.3	159072.9	318145.7

Расчёт показывает, что даже карта объёмом 1 ГБ способна хранить более 7 млн записей, что соответствует примерно 828 суткам непрерывной записи при периоде 10 с. Для 32 ГБ расчётная длительность превышает 26 тыс. суток. Главными практическими ограничениями становятся надёжность файловой

системы, качество самой SD-карты, ресурс ячеек памяти, стабильность питания и корректное закрытие файлов при аварийном отключении.

Для повышения надёжности хранения целесообразно использовать посуточное разделение файлов. Такой подход уже применяется в логике комплекса и уменьшает риск потери большого архива при повреждении одного файла. Дополнительно полезно выполнять периодическую принудительную синхронизацию буфера записи с картой, записывать заголовок CSV в каждый новый файл и предусмотреть проверку свободного места. При длительной стационарной эксплуатации также желательно хранить служебный журнал событий, в котором фиксируются перезагрузки, ошибки записи, потеря GPS-сигнала и результат последней передачи на сервер.

С точки зрения передачи данных наличие большого локального архива даёт возможность использовать пакетную отправку. Прибор может работать без постоянного соединения и передавать накопленные записи через заданный интервал. Это снижает нагрузку на модуль связи, уменьшает среднее энергопотребление и делает систему устойчивее к кратковременным потерям сети.

4.6 Анализ устойчивости программно-аппаратной архитектуры

Достоверность данных мобильного дозиметрического комплекса определяется точностью дозиметрического канала и устойчивостью всей системы. На результат также влияет устойчивость всей программно-аппаратной системы: стабильность питания, корректность записи на SD-карту, отсутствие зависаний, правильная обработка GPS-данных, устойчивость веб-интерфейса и предсказуемое поведение модуля связи. Даже при исправном счетчике Гейгера-Мюллера СБМ-20 потеря записи, сбой времени или перезагрузка во время измерения снижают ценность полученного архива.

Переход на ESP32-S3 стал одним из ключевых решений, повысивших устойчивость архитектуры. Двухъядерный микроконтроллер и поддержка FreeRTOS позволяют разделить задачи сбора данных, обслуживания веб-интерфейса, работы с GPS, записи на SD-карту и передачи телеметрии. В исходной однопоточной архитектуре блокирующая операция могла задерживать весь цикл работы. При многозадачном подходе отдельные операции выполняются независимо, а задержка в одной подсистеме оказывает меньшее влияние на остальные процессы.

Особенно важна организация задач, связанных с записью данных. SD-карта может иметь непостоянное время отклика, зависящее от состояния файловой системы, размера файла, качества карты и внутренней логики контроллера памяти. При синхронной записи в основном цикле длительная операция записи способна задерживать обработку GPS или веб-запросов. Асинхронная запись и очередь данных уменьшают влияние таких задержек. Измерительная часть формирует запись и передаёт её в очередь, а отдельная задача выполняет фактическую запись на карту.

Аналогичный принцип важен для канала связи. SIM800C управляется AT-командами, а сетевые операции могут занимать значительное время. Ожидание регистрации в сети, открытие PDP-контекста, передача HTTP-запроса и получение ответа не должны блокировать измерительный цикл. Поэтому отправка данных должна выполняться отдельной задачей, а веб-интерфейс или локальная кнопка должны только инициировать запрос на передачу. Такой подход позволяет продолжать регистрацию измерений даже во время сетевой операции.

В программной части также важна работа с памятью. Формирование JSON-структур, динамические строки, веб-ответы и буферы передачи могут приводить к фрагментации heap-памяти при длительной работе. Использование статических буферов, ограничение размера JSON-документов и контроль свободной памяти повышают устойчивость прошивки. Для долговременной эксплуатации полезно

выводить диагностические параметры: свободная память, время работы после последней перезагрузки, состояние задач, статус SD-карты и результат последней сетевой операции.

Решающую роль играет питание. GSM/GPRS-модуль имеет импульсный характер потребления, а пиковый ток может достигать порядка 2 А. При недостаточном запасе источника питания возникают просадки напряжения, способные привести к перезагрузке ESP32-S3, сбоем записи на SD-карту или нарушению работы GPS. Для повышения устойчивости используются отдельная линия питания модуля связи, буферные конденсаторы большой ёмкости, короткие силовые проводники, общий контроль земли и развязка чувствительных цифровых шин от радиомодуля.

Тепловой режим также влияет на устойчивость комплекса. Нагрев микроконтроллера, стабилизаторов и радиомодуля способен сказываться на работе электроники и косвенно влиять на датчики окружающей среды. Размещение BME280 отдельно от тепловыделяющих элементов, вентиляционные каналы корпуса и белый PLA-пластик снижают влияние локального нагрева. При стационарной эксплуатации может быть добавлен контроль внутренней температуры корпуса, что позволит отделять реальные изменения температуры окружающей среды от нагрева электроники.

Для программной устойчивости также важна обработка исключительных состояний. К таким состояниям относятся отсутствие GPS-фиксации, недоступность SD-карты, ошибка открытия файла, разрыв мобильного соединения, отсутствие ответа сервера, повреждение строки данных и переполнение очереди отправки. Каждое из этих состояний должно приводить к предсказуемому поведению: запись диагностического сообщения, сохранение данных локально, повторная попытка операции или переход в безопасный режим. Такой подход повышает доверие к архиву, поскольку каждая проблема получает фиксируемый след в данных.

В перспективной версии комплекса целесообразно использовать сторожевой таймер, журнал перезагрузок, контроль времени выполнения задач и автоматическую проверку целостности файлов. Для сети приборов полезен серверный контроль активности каждого узла. Сервер может отслеживать время последнего сообщения, число записей за сутки, частоту ошибок и состояние питания. Такая диагностика превращает автономные приборы в управляемую систему мониторинга.

4.7 Экономическая оценка опытного образца и сравнение с аналогами

Экономическая оценка опытного образца позволяет определить стоимость элементной базы и сопоставить её с ценой доступных дозиметров и дозиметров-радиометров. Такой расчёт не отражает полную стоимость серийного средства измерений, но показывает материальные затраты на сборку разработанного комплекса в лабораторно-опытном исполнении.

Часть элементной базы была приобретена при материальной поддержке научного руководителя Т. Е. Симакиной, что позволило выполнить сборку и экспериментальную проверку опытного образца.

Таблица 4.4 – Стоимость элементной базы опытного образца

Компонент	Цена, Р
ESP32-S3 DevKit	421
Счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-20	1 000
Модуль RadSens	2 500
SIM800C GSM/GPRS	307
OLED 0,96" + кнопки	149
GPS-модуль	439
BME280	262
SD-модуль + карта памяти	73
Питание, конденсаторы, кабели	150
Пластик PLA (корпус)	168

Итого	5 469
-------	-------

Суммарная стоимость элементной базы составила 5469 руб. В эту сумму вошли основные электронные компоненты, корпусный материал и вспомогательные элементы питания и монтажа. Низкая стоимость опытного образца связана с применением доступной элементной базы, самостоятельной сборкой, самостоятельным проектированием корпуса и отсутствием затрат на промышленное производство.

Для ориентировочного сравнения рассмотрены несколько доступных приборов, представленных на российском рынке. Согласно данным интернет-магазина Pro-Спец, RADEX RD1503+ OUTDOOR указан по цене 6900 руб. [26], ДКГ-PM1203М — 15500 руб. [27]. Дозиметр-радиометр МКС-05 «Терра» указан по цене 28200 руб. [28]. В линейке МКС на сайте специализированного магазина приведены цены 34500 руб. для МКС-01СА1Б, 45000 руб. для МКС-01СА1 и 63000 руб. для МКС-01СА1М [24].

Таблица 4.5 – Ориентировочное сравнение стоимости опытного образца с приборами-аналогами

Прибор-аналог	Примерная цена, Р	Отношение к стоимости опытного образца
RADEX RD1503+ OUTDOOR	6 900	1,26
ДКГ-PM1203М	15 500	2,83
МКС-05 «Терра»	28 200	5,16
МКС-01СА1Б	34 500	6,31
МКС-01СА1	45 000	8,23
МКС-01СА1М	63 000	11,52

Сравнение показывает, что стоимость элементной базы опытного образца ниже стоимости большинства рассмотренных приборов. Ближайшим по цене является RADEX RD1503+ OUTDOOR, который дороже опытного образца примерно в 1,26 раза. Профессиональные дозиметры и дозиметры-радиометры имеют существенно более высокую цену, что связано с серийным производством,

корпусным исполнением, метрологическим обеспечением, заводской калибровкой, гарантийной поддержкой и назначением прибора.

Приведённая стоимость отражает только цену элементной базы опытного образца. В расчёт не включены стоимость поверки, сертификации, метрологической аттестации, внесения в государственный реестр средств измерений, промышленного изготовления корпуса, сборки, гарантийного обслуживания и разработки конструкторской документации. Поэтому полученная стоимость не является полной коммерческой ценой серийного средства измерений.

С экономической точки зрения разработанный комплекс целесообразно рассматривать как исследовательский и инженерный опытный образец. Его преимущество состоит в низкой стоимости компонентов и расширяемости: к прибору можно добавлять новые датчики, менять канал связи, изменять алгоритмы записи, развивать серверную часть и адаптировать корпус под конкретные условия применения. Серийный прибор обычно имеет фиксированную архитектуру, а разработанный комплекс сохраняет гибкость для научных и учебно-исследовательских задач.

4.8 Выводы по четвертой главе

В четвертой главе мы рассмотрели практическое применение разработанного мобильного дозиметрического комплекса и направления его дальнейшего развития. На основании выполненной разработки можно сделать вывод, что комплекс имеет потенциал как мобильный дозиметр-радиометр для маршрутных измерений, стационарный пост и основа распределённой сети мониторинга уровня ионизирующего излучения.

Перспективным направлением развития канала связи является переход от GSM/GPRS к LTE/4G-модулям. SIM800C подтвердил работоспособность

удалённой передачи данных, однако развитие в сторону A7670E, A7608SA-H или аналогичных модулей позволит повысить устойчивость связи, сократить время передачи, использовать современные протоколы и подготовить комплекс к работе в составе сети приборов.

Развитие домашнего сервера до станции обработки данных позволит перейти от простого накопления строк телеметрии к полноценной системе хранения, визуализации и анализа. Такая станция может принимать данные от нескольких комплексов, хранить временные ряды в базе данных, строить карты, формировать отчеты, контролировать исправность приборов и применять модели машинного обучения для поиска аномалий и технических сбоев.

Расчёт автономности показал, что при средней мощности 2,0–2,5 Вт комплекс может работать от аккумулятора 10 000 мА·ч примерно 12,6–15,7 ч, а от аккумулятора 20 000 мА·ч примерно 25,2–31,4 ч. Для текстовой телеметрии объём SD-карты уступает по значимости надёжности питания и файловой системы: даже карта 1 ГБ обеспечивает хранение многолетнего архива при периоде записи 10 с. Основные ограничения связаны с надёжностью питания, качеством SD-карты, устойчивостью файловой системы и режимом мобильной передачи данных.

Анализ устойчивости программно-аппаратной архитектуры показал, что достоверность измерений обеспечивается метрологическими характеристиками измерительного канала и стабильной работой всей системы. Переход на ESP32-S3, применение FreeRTOS, асинхронная запись, локальное резервирование данных, диагностические параметры и контроль питания являются важными элементами повышения надёжности комплекса.

Экономическая оценка показала, что стоимость элементной базы опытного образца составляет 5469 руб. Эта величина ниже стоимости рассмотренных приборов-аналогов, однако она не включает поверку, сертификацию, метрологическую аттестацию, промышленную сборку и внесение в

государственный реестр средств измерений. Поэтому результат экономического расчёта характеризует именно опытный инженерный образец, предназначенный для разработки, исследований и дальнейшего совершенствования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации был разработан мобильный дозиметрический комплекс, предназначенный для регистрации мощности дозы ионизирующего излучения, фиксации координат, времени измерения и сопутствующих параметров окружающей среды. Работа имела инженерно-исследовательский характер и включала разработку аппаратной части, программной архитектуры, корпуса, системы локального хранения данных, удалённой передачи результатов, а также экспериментальную оценку достоверности измерений.

В теоретической части были рассмотрены физические основы ионизирующего излучения, основные дозиметрические величины, принципы газоразрядной регистрации и особенности применения счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20. Было показано, что результат измерения в дозиметрическом канале определяется не только чувствительностью детектора, но и статистической природой счёта, временем накопления импульсов, коэффициентом пересчёта, энергетическим составом излучения, геометрией измерения и устойчивостью электронной части прибора. Поэтому повышение достоверности измерений в работе рассматривалось как совокупность аппаратных, программных и метрологических мер.

В процессе разработки был создан первоначальный прототип на базе ESP8266, который позволил проверить возможность совместной работы дозиметрического модуля RadSens, счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20, датчика BME280, GPS/ГЛОНАСС-модуля, веб-интерфейса и системы записи данных. Практическая эксплуатация раннего варианта выявила ограничения, связанные с однопоточной архитектурой, недостаточным объёмом оперативной памяти, блокирующими операциями, задержками при записи на SD-карту, обработкой GPS-потока и формированием JSON-данных. Эти результаты стали основанием для перехода на микроконтроллер ESP32-S3.

Готовый вариант комплекса был реализован на базе ESP32-S3. В его состав вошли дозиметрический канал RadSens со счетчиком Гейгера-Мюллера СБМ-20, метеорологический канал, GPS/ГЛОНАСС-модуль, microSD-карта, OLED-дисплей с кнопками, веб-интерфейс, корпус с вентиляционными элементами и модуль мобильной связи SIM800C. Переход на ESP32-S3 позволил разделить задачи сбора данных, записи, отображения, обработки GPS и передачи информации, что повысило устойчивость работы прибора и снизило влияние блокирующих операций на измерительный процесс.

Главным результатом разработки стало создание мобильной системы регистрации данных. Комплекс сохраняет результаты измерений в CSV-файлы, что позволяет выполнять последующую обработку в табличных редакторах, Python и геоинформационных системах. Веб-интерфейс обеспечивает отображение текущих значений, карты, графиков и файлов на SD-карте, а OLED-дисплей с кнопками позволяет контролировать работу прибора без подключения к внешнему устройству. Такая организация делает комплекс пригодным для полевых измерений и длительного накопления данных.

Полевые измерения в центральной части Васильевского острова показали практическую применимость разработанного комплекса. В большинстве точек были получены значения мощности дозы ионизирующего излучения порядка 0,10–0,15 мкЗв/ч. На участке набережной было зафиксировано значение 0,26 мкЗв/ч, что отличалось от большинства остальных точек. Дополнительное обследование набережной Большой Невы подтвердило устойчивое повышение значений вблизи гранитных конструкций до 0,22–0,25 мкЗв/ч. В контрольной точке на Благовещенском мосту было получено значение 0,06 мкЗв/ч. Измерения при удалении от гранитной поверхности показали снижение мощности дозы с 0,22 мкЗв/ч непосредственно у поверхности до 0,11 мкЗв/ч на расстоянии 2 м. Эти результаты подтвердили способность комплекса фиксировать локальные пространственные изменения уровня ионизирующего излучения.

Для повышения достоверности дозиметрического канала была проведена экспериментальная проверка с использованием поверенного дозиметра ДБГ-06Т №2024 и контрольного источника ОСГИ ^{137}Cs №2396. Измерения выполнялись в фиксированной геометрии с разметкой рабочей поверхности от 0 до 120 см и повторениями на каждой позиции. Такой подход позволил оценить связь между показаниями разработанного комплекса и поверенного прибора, определить масштабные расхождения и рассчитать статистические показатели: среднюю абсолютную ошибку, среднеквадратичную ошибку, коэффициент корреляции и коэффициент детерминации.

Исследование работы счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20 без дополнительной фильтрации показало наличие устойчивой связи между показаниями разработанного комплекса и эталонного дозиметра, однако во всех рассмотренных вариантах коэффициента пересчёта наблюдалась выраженная масштабная ошибка. Наибольшие отклонения проявлялись на малых расстояниях до источника, где возрастал вклад бета-излучения, низкоэнергетической гамма-составляющей, рентгеновского излучения и вторичных процессов взаимодействия излучения с окружающими материалами.

Применение свинцовой фольги позволило существенно улучшить согласование показаний с эталонным прибором. При использовании коэффициента пересчёта $k = 0,006093$ со свинцовой фильтрацией средняя относительная погрешность составила $-6,90\%$, средняя абсолютная относительная погрешность — $22,59\%$, средняя абсолютная ошибка — $0,0421$ мкЗв/ч, среднеквадратичная ошибка — $0,0542$ мкЗв/ч. Эти значения сопоставимы с погрешностью поверенного дозиметра, равной 20% . Полученный результат подтверждает эффективность совместного применения спектральной фильтрации и регрессионного подбора коэффициента пересчёта.

Проверка чувствительности счетчика Гейгера-Мюллера СБМ-20 к различным видам излучения показала отсутствие значимого отклика на альфа-

излучение и ограниченный вклад бета-излучения в выбранной конструкции. Это соответствует особенностям металлического корпуса трубки и подтверждает, что при полевых измерениях окружающей среды основной вклад в показания разработанного дозиметра-радиометра вносит гамма-компонента.

Отдельная часть работы была посвящена калибровке метеорологических датчиков. Сопоставление ВМЕ280 и АНТ30 с эталонными средствами НМР45 и РМТ16А показало различный характер погрешностей. Для температуры датчик АНТ30 оказался ближе к эталонным значениям и практически не требовал коррекции. Для ВМЕ280 по температуре была выявлена систематическая ошибка, которая эффективно компенсировалась введением постоянной поправки. Для относительной влажности лучшие результаты после коррекции показал ВМЕ280, а барометрический канал ВМЕ280 подтвердил высокую стабильность и малое расхождение с РМТ16А. Это позволило определить рациональное распределение измерительных функций внутри комплекса: АНТ30 целесообразно использовать для температуры, ВМЕ280 — для влажности после коррекции и для атмосферного давления.

В ходе работы была реализована передача данных на домашний сервер с использованием модуля SIM800С. Передача по GSM/GPRS подтвердила работоспособность удалённой телеметрии и возможность централизованного хранения результатов. Одновременно были выявлены ограничения SIM800С, связанные с пиковым энергопотреблением, требованиями к питанию, электромагнитными помехами и невысокой скоростью GPRS. Поэтому дальнейшее развитие коммуникационной части обоснованно связано с переходом к LTE/4G-модулям, таким как А7670Е или А7608SA-Н, которые обладают большим запасом по скорости, поддерживают современные сетевые сценарии и лучше подходят для сети автономных дозиметрических постов.

В перспективной части работы была рассмотрена возможность развития домашнего сервера до станции обработки данных. Такая станция может

принимать телеметрию от нескольких комплексов, хранить временные ряды в базе данных, строить карты, формировать отчёты, контролировать состояние приборов и использовать методы машинного обучения для выявления аномалий и технических сбоев. Такой подход позволяет перейти от единичного опытного образца к распределённой системе мониторинга уровня ионизирующего излучения.

Проведён расчёт автономности комплекса. При средней потребляемой мощности 2,0–2,5 Вт аккумулятор ёмкостью 10 000 мА·ч обеспечивает ориентировочно 12,6–15,7 ч работы, а аккумулятор ёмкостью 20 000 мА·ч — примерно 25,2–31,4 ч. Расчёт ресурса SD-карты показал, что даже карта объёмом 1 ГБ способна хранить многолетний архив текстовой телеметрии при периоде записи 10 с. Главными практическими ограничениями при длительной эксплуатации являются не объём памяти, а стабильность питания, качество SD-карты, устойчивость файловой системы и корректная организация записи.

Экономическая оценка показала, что стоимость элементной базы опытного образца составила 5469 руб. Это ниже стоимости большинства рассмотренных дозиметров и дозиметров-радиометров, представленных на рынке. При этом данная величина отражает только стоимость компонентов и не включает поверку, сертификацию, метрологическую аттестацию, внесение в государственный реестр средств измерений, промышленную сборку, разработку конструкторской документации и гарантийное обслуживание. Поэтому разработанный комплекс следует рассматривать как исследовательский опытный образец, предназначенный для инженерной отработки, экспериментальных измерений и дальнейшего совершенствования.

В результате выполнения работы цель магистерской диссертации достигнута. Был разработан мобильный дозиметрический комплекс на базе ESP32-S3, модуля RadSens со счетчиком Гейгера-Мюллера СБМ-20, датчиков метеорологических параметров, GPS/ГЛОНАСС-навигации, локального

хранения и средств передачи данных. Были исследованы факторы, влияющие на достоверность измерений, выполнены экспериментальная проверка дозиметрического канала, подбор коэффициента пересчёта, оценка влияния свинцовой фильтрации и калибровка метеорологических датчиков. Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанного комплекса для полевых измерений мощности дозы ионизирующего излучения, накоплению данных, которые привязаны к координатам и дальнейшего развития в сторону распределённой системы мониторинга.

Создан инструмент для косвенной диагностики состояния приземного слоя атмосферы по измерениям гамма-фона, который коррелирует с концентрацией радона — естественного трассера вертикального перемешивания. Все необходимые метеопараметры (Т, RH, P) регистрируются одновременно, а координатная привязка позволяет строить пространственные поля.

Разработанный комплекс может применяться в метеорологических целях: для оценки естественного радиационного фона в разных типах подстилающей поверхности, для накопления данных о переносе радона и для построения пространственных полей мощности дозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления : межгосударственный стандарт. — Москва : Стандартиформ, 2017. — 32 с.
2. ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления : национальный стандарт Российской Федерации. — Москва : Стандартиформ, 2008. — 38 с.
3. ГОСТ Р 7.0.100-2018. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления : национальный стандарт Российской Федерации. — Москва : Стандартиформ, 2018. — 124 с.
4. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений : межгосударственный стандарт. — Москва : Издательство стандартов, 1985.
5. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения : национальный стандарт Российской Федерации. — Москва : Стандартиформ, 2013.
6. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : санитарные правила и нормативы : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47.

7. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40.
8. СанПиН 2.6.4115-25. Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 20.03.2025 № 3.
9. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. — 471 p.
10. Guide to Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8. Volume I: Measurement of Meteorological Variables. — Geneva : World Meteorological Organization, 2021.
11. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. — Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. — 120 p.
12. RadSens: universal dosimeter module : technical description / ClimateGuard. — URL: <https://climateguard.info/radsens/> (дата обращения: 21.05.2026).
13. SBM-20, SBM-20U. Hard beta and gamma GM detectors: parameters and characteristics. — URL: <https://www.gstube.com/data/2398/> (дата обращения: 21.05.2026).
14. ESP32-S3 Series Datasheet. 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth LE SoC / Espressif Systems. — URL: https://documentation.espressif.com/esp32-s3_datasheet_en.pdf (дата обращения: 21.05.2026).

15. NEO-M8. u-blox M8 concurrent GNSS modules: data sheet / u-blox. — URL: https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf (дата обращения: 21.05.2026).
16. BME280 Combined humidity and pressure sensor: data sheet / Bosch Sensortec. — URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> (дата обращения: 21.05.2026).
17. Datasheet AHT30. Temperature and Humidity Sensor / Aosong Electronics. — URL: https://eleparts.co.kr/data/goods_attach/202306/good-pdf-12751003-1.pdf (дата обращения: 21.05.2026).
18. SIM800C GSM/GPRS Module : product description / SIMCom. — URL: <https://www.simcom.com/product/SIM800C.html> (дата обращения: 21.05.2026).
19. SSD1306. Advance Information. 128 × 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller / Solomon Systech. — URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf> (дата обращения: 21.05.2026).
20. TEMT6000X01 Ambient Light Sensor : data sheet / Vishay Semiconductors. — URL: <https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf> (дата обращения: 21.05.2026).
21. OpenMediaVault Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.openmediavault.org/> (дата обращения: 21.05.2026).
22. SIMCom. A7670 Series Hardware Design. LTE Cat 1 data throughput 10 Mbps DL / 5 Mbps UL [Электронный ресурс]. URL: https://nostris.ee/pdf/A7670%20Series%20Hardware%20Design_V1.00.pdf (дата обращения: 21.05.2026).
23. SIMCom. A7608SA-H LTE Cat 4 Module [Электронный ресурс]. URL: <https://en.simcom.com/product/A7608SA-H.html> (дата обращения: 21.05.2026).

24. Дозиметр SHOP. Дозиметры радиометры МКС. URL: <https://dozimetr-shop.ru/mks> (дата обращения: 24.05.2026).
25. NVIDIA. Tesla V100 GPU Accelerator. Data Sheet. URL: <https://www.cadnetwork.de/attachments/article/53/NVIDIA-Tesla-V100-Datasheet.pdf> (дата обращения: 24.05.2026).
26. Pro-Спец. Дозиметр RADEX RD1503+ OUTDOOR. URL: <https://pro-spec.ru/catalog/sredstva-obnaruzheniya-radioaktivnykh-materialov-i-khimicheskikh-veshchestv/dozimetr-radiatsii-radex-rd1503-outdoor> (дата обращения: 24.05.2026).
27. Pro-Спец. Дозиметр микропроцессорный ДКГ-PM1203М. URL: <https://pro-spec.ru/catalog/sredstva-obnaruzheniya-radioaktivnykh-materialov-i-khimicheskikh-veshchestv/dozimetr-mikroprotsessornyj-dkg-rm1203m> (дата обращения: 24.05.2026).
28. Дозиметр SHOP. Дозиметр-радиометр МКС-05 «Терра». URL: <https://dozimetr-shop.ru/dozimetry-radiometry/mks-05-terra> (дата обращения: 24.05.2026).

ПРИЛОЖЕНИЕ