

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ПетрГУ)

УДК 004.3; 004.41; 004.94; 614.7

Рег. N НИОКТР

Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научно-  
исследовательской работе  
д-р техн. наук, профессор

\_\_\_\_\_ В.С. Сютёв  
«30» сентября 2024 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫБРОСОВ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ  
С ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ  
(промежуточный)

Руководитель НИР,  
студент

\_\_\_\_\_ А. П. Дьяченко

Петрозаводск 2024

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,

студент \_\_\_\_\_ А. П. Дьяченко

подпись, дата

(введение, подразделы 1.2, 1.3, 1.5,  
заклучение)

Научный руководитель НИР,

старший преподаватель Кафедры

технологии лесного комплекса и

ландшафтной архитектуры

Института лесных, горных и

строительных наук

\_\_\_\_\_ А. В. Кабонен

подпись, дата

(введение, заключение)

Исполнители:

студент \_\_\_\_\_ В. В. Остапчук

подпись, дата

(подразделы 1.1, 1.5)

студент \_\_\_\_\_ А. В. Лямзин

подпись, дата

(подразделы 1.2, 1.5)

студент \_\_\_\_\_ Н. И. Жидов

подпись, дата

(подраздел 1.4)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_ Н. Н. Теплова

подпись, дата

## РЕФЕРАТ

Отчет 44 с., 19 рис., 13 табл., 10 источн., 1 прил.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС, МОНИТОРИНГ, ФАКЕЛ РАСПРОСТРАНЕНИЯ, ВЫБРОСЫ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА, ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА, ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА

Объектом исследования являются выбросы загрязняющих веществ комплекс водоочистных сооружений АО «ПКС - Водоканал».

Цель **этапа 1** работы – **Разработка и тестирование аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.**

В процессе **этапа 1** работы проводились исследования проб грунта и иловых масс с комплекса водоочистных сооружений АО «ПКС-Водоканал» в г. Петрозаводск. Были проанализированы различные математические модели распространения газов в атмосфере. Разрабатывались модули мониторинга и отправки информации от газоанализатора и метеостанций на удалённый сервер. Велась работа по сборке, установке и тестировании прототипа электронного устройства сбора данных о качестве воздуха окружающей среды на площадях комплекса очистных сооружений АО «ПКС - Водоканал».

В результате **этапа 1** исследования было разработано и получено: база данных в виде Excel таблицы, содержащая столбцы «Адрес», «Скорость и направление ветра в м/с», «количество обращений»; реферат с описанием технологического процесса осушения иловых масс, образования загрязняющих газообразных веществ, выпускаемых в атмосферу, и производства почвогрунта; структура ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов; аппаратная часть ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, содержащий модуль непрерывного мониторинга и прогнозирования распространения выбросов и модуль передачи данных на сервер.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1 Разработка и тестирование аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду</b> .....	7
1.1 Изучение характеристик выбросов загрязняющих веществ с промышленных объектов АО «ПКС-Водоканал» .....	7
1.1.1 Технологический процесс производства «Почвогрунта» .....	7
1.1.2 Характеристика сырья и материалов при производстве почвогрунта .....	10
1.2 Разработка структуры ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов .....	14
1.3 Разработка модуля непрерывного мониторинга параметров воздушной среды .....	19
1.4 Разработка модуля передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер .....	23
1.5 Сборка и тестирование аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов .....	28
1.6 Выводы по разделу 1 .....	34
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	36
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	38
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Выполнение показателей проекта</b> .....	39

## ВВЕДЕНИЕ

Из общего объема выбросов в Российской Федерации в атмосферу от стационарных источников (138,7 тыс. т) основная доля приходится на металлургическую и лесную, деревообрабатывающую и целлюлозно-бумажную отрасли. Очистными сооружениями улавливается и обезвреживается 167 тыс. т, или 54% общего количества отходящих загрязняющих веществ, утилизируется 89 тыс. т. Достаточно высокая степень улавливания загрязняющих веществ в деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности - 66%, металлургии - 50%, самая низкая на предприятиях жилищно-коммунального хозяйства - 16%. [1]

Стратегия социально-экономического развития Республики Карелия до 2030 года, утверждённая Правительством Карелии в 2018 году [1], одним из ключевых направлений определяет развитие «зелёной экономики» и устойчивого развития. Мониторинговая система с визуализацией распространения и прогнозирования выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду Республики Карелия позволит производить объективную оценку выбросов, повысить возможности качественной адаптации экосистем, населения и отраслей экономики. Разработка НИР направлена на решение проблемы, возникающей на предприятии АО «ПКС - Водоканал» г. Петрозаводск.

Ситуация с выбросами от очистных сооружений АО «ПКС-Водоканал» г. Петрозаводск с каждым годом только ухудшается. С ростом объёмов отходов и приближением жилых районов города Петрозаводска (Сайналовка, м-н Ключевая, н.п. Ужесельга) к комплексу очистных сооружений (далее КОС), усиливается загрязнение окружающей среды, что оказывает негативное влияние на здоровье населения и сотрудников предприятий. Основным источником выбросов на предприятии является технологический процесс обработки и осушения иловых масс, во время которого в окружающую среду выделяются различные газы, включая сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и другие.

Для решения проблемы с выбросами от очистных сооружений АО «ПКС-Водоканал» г. Петрозаводск будет разработан программно-аппаратный комплекс (далее ПАК), позволяющий детектировать наличие и рассчитывать объёмы выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду на территории Республики Карелия, выступать в качестве экспертной системы для предприятия АО «ПКС-Водоканал» для снижения последствий распространения выбросов и моделировать их дальнейшее распространение на основе прогнозируемых данных.

Цель этапа 1 НИР – Разработка и тестирование аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Задачи, ставившиеся при выполнении этапа 1 НИР:

1. Изучение характеристик выбросов загрязняющих веществ с промышленных объектов АО «ПКС-Водоканал».
2. Разработка структуры ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов.
3. Разработка модуля непрерывного мониторинга параметров воздушной среды.
4. Разработка модуля передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер.
5. Сборка и тестирование аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов.

В результате выполнения НИР: получен архив жалоб граждан, проживающих в близких к территории КОС районов и создана база данных в виде Excel таблицы, содержащая столбцы «Адрес», «Скорость и направление ветра в м/с», «количество обращений». получено несколько анализов химического состава выбросов от промышленных объектов АО «ПКС-Водоканал»; проведён анализ точности измерений, позволивший оптимизировать параметры изначальной математической модели и исследована зависимость уровня и резкости запаха от удалённости до КОС, погодных условий, направления ветра и статуса ворошения; на иловых картах комплекса водоочистных сооружений проведено электричество и подготовлена площадка для установки модуля; разработан и настроен модуль непрерывного мониторинга параметров воздушной среды; реализован протокол отправки данных на удалённый сервер по Wi-Fi и автоматическое перепоключение при потере соединения.

В отчёте представлены следующие результаты НИР: список газов для непрерывного мониторинга и описание технологического процесса осушения иловых масс, образования испускаемых в атмосферу загрязняющих веществ, и производства почвогрунта; описание структуры и функциональные требования к модулям ПАК, а также технологический стек для его реализации; аппаратная часть ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду; эскиз визуального интерфейса, отражающего данные в виде графика с выбором показываемых характеристик и временных интервалов; список проведённых тестирований во время первичной полевой проверки устройства на работоспособность.

В рамках проекта были успешно выполнены следующие заявленные показатели: количество докладов и сообщений на конференциях – 1, в том числе международных – 1.

# 1 Разработка и тестирование аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду

## 1.1 Изучение характеристик выбросов загрязняющих веществ с промышленных объектов АО «ПКС-Водоканал»

### 1.1.1 Технологический процесс производства «Почвогрунта»

Побочным продуктом очистки канализационных вод являются осадки сточных вод, содержащие органические соединения, бактерии, различные тяжёлые металлы и другие соединения [3]. Для безопасной утилизации сточных вод и для получения в дальнейшем органических удобрений и готового почвогрунта на территории КОС ведётся их компостирование.

Всего на территории КОС АО «ПКС - Водоканал» г. Петрозаводск (рисунок 1) расположены 9 иловых карт. Иловые карты представляют собой сооружения с бетонным основанием, оборудованные дренажной системой, и являются идеальным местом для компостирования. Компостирование является естественным биохимическим процессом разложения органического вещества. За счёт деятельности мезофильных и термофильных микроорганизмов происходит разогрев компостной массы, выделение и испарение влаги, трансформация органического вещества и, как следствие, уменьшение исходной массы и объёма.



Рисунок 1 – Территория КОС АО «ПКС - Водоканал» в г. Петрозаводск

Исходное сырье поступает в иловую карту № 9. Побочный продукт (осадок КОС), в соответствии с нормами, установленными в СП 32.13330.2018 [4], перемещаются непосредственно с декантеров, установленных на краю иловой карты № 9, с цеха

механического обезвоживания автосамосвалами. Почвогрунт ВОС везут самосвалами с водопроводных очистных сооружений. Наполнитель (мульча, щепа, опилки) поступает в иловую карту № 9 автотранспортом от поставщика.

В иловой карте № 9 происходит подготовка компостной смеси путём замешивания сырья и наполнителя в соотношении 1:1.5 – 1:2.5, в зависимости от исходной влажности осадка [5]. Данная смесь находится в карте не менее суток до начала выравнивания влажности между сырьём и наполнителем.

Приготовленная смесь (компостная масса) должна обладать влажностью не выше 70-80% и соотношением азота к углероду (N:C) от 1:20 до 1:40, pH 5.5-7.5. Далее смесь перевозится на свободные площади в иловые карты №2-10 для буртования. Бурты формируются шириной до 3,6м и высотой до 1,8м. Длина бурта произвольная и зависит от наличия свободных площадей. Основание под буртами должно быть ровным бетонным и иметь уклон в сторону дренажной системы. Дренажные воды от процесса компостирования отводятся в голову КОС для очистки.

В дальнейшем ворошение происходит периодически, но не реже одного раза в прох. суток. Процесс ворошения обеспечивает выход углекислого газа, насыщение кислородом и гомогенизацию компотной смеси. Накопление углекислого газа ведёт к ингибированию термофильных процессов и замедляет процесс компостирования.

Активная фаза компостирования происходит при термофильных процессах при температуре 45-60 °С. В этот период происходит обеззараживание компостной массы, интенсивная бактериальная деятельность при высоком обмене веществ. Снижается влажность, распадаются органические вещества, меняются физико-химические и биохимические показатели в буртах. В готовом компосте содержание фосфора и калия выше, чем в исходной готовой смеси за счёт распада беззольного вещества. Установленная для компостирования осадка сточных вод в г. Петрозаводске продолжительность активной фазы зависит от соотношения азота, углерода, температуры наружного воздуха, интенсивности аэрации и т.д. [6]

Методом ворошения буртов активная фаза компостирования протекает при температурах 50-70 °С. Характерное понижение температуры в буртах ниже 50 °С является признаком окончания активной фазы. В этот период происходит уменьшение объёма компостной массы (от 40% до 60%). При окончании активной фазы такой компост готов к применению для рекультивации нарушенных земель.

Для получения компоста высокого качества бурты перемещают на площадки дозревания и складироваться навалом. В процессе дозревания компоста происходит дообобразование гуминовых кислот и начало формирования глинисто-гумусовых



комплексов. Окончанием стадии дозревания является понижение температуры до 20 °С или температуры окружающей среды. Процесс дозревания компоста длится до 4-х месяцев в летний период (положительные температуры наружного воздуха) и 6-ти месяцев в зимний (отрицательные температуры наружного воздуха).

По окончании стадии дозревания компост готов к применению в качестве полноценного почвогрунта (рисунок 2) для благоустройства и озеленения города. При этом содержание токсичных элементов, пестицидов, радионуклидов не превышает норм, установленных ГОСТ Р 54651-2011 [7]. Технология компостирования методом ворошения в открытых буртах является безотходной технологией и не сопровождается сверхнормативными выбросами вредных веществ в атмосферу.



**Рисунок 2 – Компост высокого качества, используемый в качестве почвогрунта**

При ворошении буртов происходит незначительное выделение  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$  и некоторых других газообразных соединений, что связано с процессом частичной минерализации компонентов компоста, по аналогии с естественными процессами в почвах. Также в производственном процессе возможно выделение влаги вследствие естественных химических процессов разложения органических веществ.

Для защиты грунтовых вод от загрязнения площадка оборудована по периметру перехватывающим водотоком в виде дренажной системы с отводом воды в голову комплекса очистных сооружений. Хранение материала для компостирования происходит на бетонной иловой карте, исключающей попадание загрязнений в грунтовые воды.

Система компостирования организована без образования отходов. Некондиционный компост вновь направляется на компостирование.

### 1.1.2 Характеристика сырья и материалов при производстве почвогрунта

Сырьём для компостирования являются осадки сточных вод канализации. Наружные сети и сооружения. Дополнительным сырьём для компостирования является «Почвогрунт ВОС».

Наполнителем, используемым в смеси с исходным сырьём для получения компоста, является древесная кора хвойных и лиственных пород, щепа, опилки и т.д.

Естественная влажность наполнителя составляет не более 65%. В наполнителе допускается присутствие стружек, щепы, опилок. Допускаются включения до 200 мм. В таблице 1 указаны агрохимические показатели осадков, разрешённых по ГОСТ. В таблице 2 указано допустимое валовое содержание тяжёлых металлов и мышьяка в осадках, также утверждённых по ГОСТ.

Таблица 1 – Агрохимические показатели осадков

Наименование показателя	Норма	Метод определения
Массовая доля органических веществ, % на сухое вещество, не менее	20	ГОСТ 26213
Реакция среды (pH)	5,5 - 8,5	ГОСТ 26483
Массовая доля общего азота (N), % на сухое вещество, не менее	0,6	ГОСТ 26715
Массовая доля общего фосфора (PO), % на сухое вещество, не менее	1,5	ГОСТ 26717

Примечание: \* - Осадки, имеющие значение реакции среды (pH вытяжки) 8,5, могут использоваться на кислых почвах в качестве организованных удобрений.

Таблица 2 – Допустимое валовое содержание тяжёлых металлов и мышьяка в осадках

Наименование металла	Концентрация, мг/кг сухого вещества, не более	
	Осадок группы I	Осадок группы II
Свинец (Pb)	250	500
Кадмий (Cd)	15	30
Никель (Ni)	200	400
Хром (Cr) общий	500	1000
Цинк (Zn)	1750	3500
Медь (Cu)	750	1500
Ртуть (Hg)	7,5	15
Мышьяк (As)	10	20

В процессе компостирования происходит разложение сложных органических веществ до более простых форм и углекислого газа, уменьшается концентрация солей тяжёлых металлов, за счёт саморазогрева массы достигается санитарное обеззараживание. Концентрация основных макроэлементов – азота, фосфора и калия безопасна при использовании в открытом и закрытом грунте в качестве рекультиванта. При внесении питательного грунта в почву в период рекультивации нарушенных земель не происходит сверхнормативного накопления токсичных элементов и веществ.

В ходе проведения НИР также были проанализированы данные двух проб сырого осадка, взятых 22 мая 2024 года и 08 июля 2024 года (таблица 3). Процесс отбора пробы представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Процесс отбора почвогрунта для химического анализа

Основные параметры, такие как влажность, зольность, pH, плотность, химическое потребление кислорода (ХПК), содержание азота, фосфора, а также концентрации металлов (марганец, цинк, железо, медь), позволили выявить важные различия между пробами.

Таблица 3 - Сырой осадок с КОС г. Петрозаводск

Показатель	Ед. изм.	Результат	
		22.05.2024	08.07.2024
Влажность	%	83	96
Зольность	%	22.3	22.0
pH водной вытяжки	ед. pH	6.74	5.40
Плотность	г/см <sup>3</sup>	0.90	1,05
ХПК	мг/г сухого вещества	1373	3068
Азот общий	мг/г сухого вещества	117	98

**Продолжение таблицы 3**

Фосфор общий	мг/г сухого вещества	31	22
Марганец	мг/кг сухого вещества	780	1760
Цинк	мг/кг сухого вещества	290	319
Железо	мг/кг сухого вещества	1650	10533
Медь	мг/кг сухого вещества	190	140

Проба от 08 июля имеет влажность 96%, что значительно выше, чем в майской, где влажность составила 83%. Это говорит о том, что июльская проба содержит больше воды, что может указывать на более свежий осадок или на осадок, подвергшийся минимальной обработке перед анализом. Повышенная влажность может снижать плотность материала и затруднять его обработку.

Зольность в пробах близка по значению: 22.0% (июль) и 22.3% (май). Это говорит о том, что содержание неорганических остатков (зола) в обеих пробах примерно одинаково, несмотря на различия в других параметрах.

Значительное различие наблюдается в уровне кислотности (рН). Проба от 08 июля имеет более кислый рН 5.40, тогда как первая проба более нейтральная - с рН 6.74. Более кислый рН может свидетельствовать о наличии органических кислот или иных кислых соединений в сыром осадке, что может указывать на более активные процессы разложения органики в июльской пробе.

Плотность в июльской пробе составляет 105 г/см<sup>3</sup>, что выше, чем в пробе от 22 мая, где плотность равна 90 г/см<sup>3</sup>. Это различие указывает на то, что осадок в июле мог быть более насыщен плотными частицами или неорганическими компонентами, что отражается на его большей плотности по сравнению с майской пробой. Оба значения говорят о достаточно плотной структуре осадков в обеих пробах, однако июльская проба выглядит более "тяжелой".

Химическое потребление кислорода (ХПК) в пробе от 08 июля значительно выше и составляет 3068 мг/г, тогда как в мае это значение равно 1373 мг/г. Более высокие значения ХПК указывают на наличие большего количества органических веществ, которые могут подвергаться окислению. Это подтверждает гипотезу о том, что июльская проба содержит больше органического материала, требующего большего потребления кислорода для окисления.

В июльской пробе содержание общего азота составляет 98 мг/г, что значительно выше, чем 117 мг/г в мае. Это свидетельствует о том, что в июльском осадке накопилось больше азота, возможно, из-за увеличения количества органических веществ или наличия

аммонийных и нитратных соединений. Повышенное содержание азота может указывать на активные процессы разложения органических веществ или добавление азотсодержащих отходов.

Концентрация фосфора в пробе от 08 июля составляет 22 мг/г, что немного ниже, чем в майской пробе, где этот показатель равен 31 мг/г. Это может указывать на разницу в источниках загрязнения или процессах, которые влияли на накопление фосфора в осадке. Меньшее содержание фосфора в июльской пробе может быть связано с вымыванием или переработкой фосфорсодержащих соединений.

Концентрации всех исследуемых металлов в июльской пробе значительно выше:

- Марганец: 1760 мг/кг (июль) против 780 мг/кг (май),
- Цинк: 319 мг/кг (июль) против 290 мг/кг (май),
- Железо: 10533 мг/кг (июль) против 1650 мг/кг (май),
- Медь: 140 мг/кг (июль) против 190 мг/кг (май).

Повышенные концентрации металлов могут свидетельствовать о поступлении осадка с промышленными выбросами или о накоплении в осадке продуктов коррозии металлических конструкций и других источников металлов. Более высокие концентрации железа и цинка могут свидетельствовать о специфических источниках загрязнения, связанных с очисткой сточных вод.

Таким образом, проба от 08.07.2024 отличается более высокой влажностью, плотностью, а также значительными концентрациями азота, органических веществ (ХПК) и металлов по сравнению с пробой от 22.05.2024. Однако содержание фосфора в мае выше (31 мг/г против 22 мг/г в июле), что может указывать на различия в источниках загрязнения или природных процессах, влияющих на концентрацию фосфора в осадке.

Уровень кислотности (рН) в июльской пробе ниже, что может указывать на более активные процессы разложения, вызывающие выделение кислот. В целом, июльская проба выглядит более загрязнённой по концентрациям азота, ХПК и металлов, но с меньшим содержанием фосфора по сравнению с майской пробой.

На основании полученных анализов от исследований почвогрунта и осадка иловых масс, а также органолептического анализа за время нескольких выездов при обращении горожан окрестных районов на наличие выбросов от КОС (Рисунок 4), было установлено, что наиболее пахучими и концентрированными веществами, находящимися в воздухе, являются:  $\text{H}_2\text{S}$  (сероводород),  $\text{NH}_3$  (аммиак), и TVOC (органические примеси). Однако, стоит обратить внимание и на другие газы, такие как CO (угарный газ),  $\text{CH}_4$  (метан),  $\text{NO}_2$  (оксид азота), так как при повышенном уровне концентрации в окружающей среде они активно наносят вред здоровью, вызывая такие симптомы как удушье, головокружение, боль в груди и др.



Рисунок 4 – Архив жалоб на неприятный запах от КОС за Июнь-Июль 2024 года

## 1.2 Разработка структуры ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов

В ходе проведения НИР была разработана структура программно-аппаратного комплекса. Схема структуры представлена на рисунке 5.

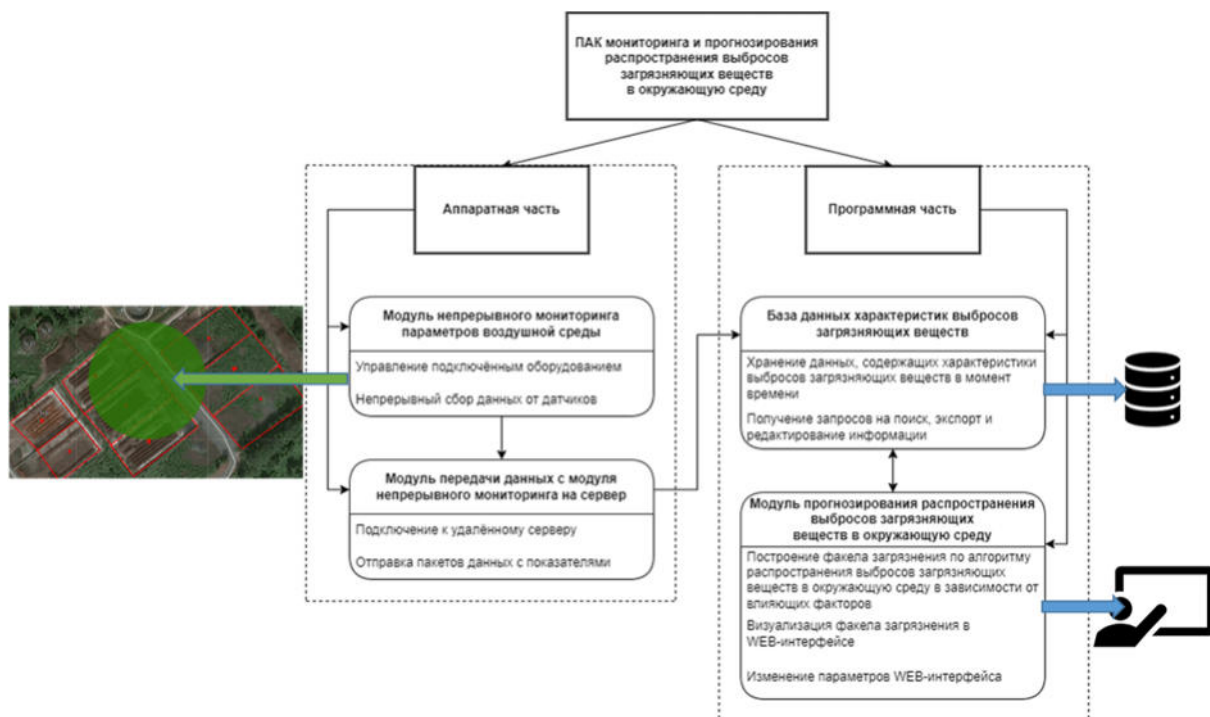


Рисунок 5 – Схема структуры ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов

Аппаратная часть состоит из двух модулей, функционирующих на базе одного или нескольких электронных устройств:

1. Модуль непрерывного мониторинга параметров воздушной среды;
2. Модуль передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер.

Программная часть состоит из:

1. Модуль хранения данных характеристик выбросов загрязняющих веществ;
2. Модуль прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Аппаратная часть ПАК представляет собой электронный блок управления на базе микроконтроллера ESP32, к которому подключены различные полупроводниковые датчики-газоанализаторы для измерения уровня концентрации газов и метеостанция, передающая информацию о скорости и направлении ветра, а также текущую температуру и влажность в окружающей среде. Электронный блок должен выполнять мониторинг и осуществляет отправку данных непрерывно с помощью Wi-Fi подключения, согласно протоколу передачи на удалённый сервер в программный модуль ПАК.

Принцип работы полупроводникового датчика газоанализатора заключается в нагревании газочувствительной полупроводниковой плёнки. При увеличении температуры плёнки, которая, находясь в горячем состоянии, вступает в химические реакции с детектируемыми газами и способна менять своё электрическое сопротивление пропорционально концентрации этих газов в окружающем воздухе. Выходные данные от датчика, передаваемые микроконтроллеру, являются удобным для обработки аналоговым сигналом, градуируемым в заданном интервале.

Требования к аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, должны соответствовать указанным в таблице 4.

Таблица 4 - Требования к аппаратной части ПАК

Требование	Параметры
Блок управления	микроконтроллер
Интерфейс передачи данных	WiFi
Диапазон рабочих температур блока управления	-20 ... +30 °C
Частота передачи данных от аппаратной части на сервер	не менее 1 раз/час



#### Продолжение таблицы 4

Массогабаритные характеристики	Размеры: не более 300x300x300 мм Масса: не более 5 кг
Газы, подлежащие мониторингу	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , TVOC (органические примеси)
Технологический стек	C++, Arduino IDE
Тип газовых датчиков	полупроводниковый газоанализатор

Требования к программной части ПАК были определены и указаны в таблице 5. Программная часть ПАК должна производить математическое вычисление и визуализацию факела распространения выбросов.

Таблица 5 - Требования к программной части ПАК

Требование	Параметры
Архитектура ПО	клиент-сервер
Технологический стек	React, Canvas, Type-Script.
GIS карта	Open Street Map
Архитектура базы	SQL (файловая, реляционная)
Частота передачи данных от аппаратной части на сервер	не менее 1 раз/час
Газы, подлежащие мониторингу	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , органические примеси
Точность определения факела распространения	не менее 1 км
Доступ на сервер	Круглосуточно
Основа математической модели распространения вещества в атмосфере	Стационарная Гауссова модель распределения загрязняющего вещества в атмосфере[8] или аналогичная

Сервер хранит базу данных и предоставляет программный интерфейс (Web-API). Эскиз страницы представлен на рисунке 6. На экране по выбору из меню можно отобразить график изменчивости концентраций газов с заданным интервальным периодом и прогноз распространения загрязняющих веществ в виде плоскостного наложения на GIS-карту.

Требования к базе данных объединены в таблицу 6.





Рисунок 6 - Эскиз WEB-интерфейса системы мониторинга и прогнозирования факела загрязнений в окружающей среде

Таблица 6 - Требования к базе данных характеристик выбросов загрязняющих веществ

Требование	Параметры
Архитектура базы данных	SQL (файловая, реляционная)
Содержание	Дата измерения (ЧЧ/ММ/ГГГГ), время измерения (ЧЧ/ММ/СС), тип газа, концентрация газа (мг/м3), скорость ветра (м/с), температура воздуха (°С), примечание (короткий текст).

Требования к модулю прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду определены в таблице 7.

Таблица 7 - Требования к модулю прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду

Требование	Параметры
Основа математической модели распространения вещества в атмосфере	Нестационарная Гауссова модель распределения загрязняющего вещества в атмосфере
Технологический стек	Python, NumPy, MatLab
GIS карта	Open Street Map
Источник данных	База данных
Время построения факела загрязнения	не менее 1 раз/час

### Продолжение таблицы 7

Входные данные	Скорость ветра, концентрация вещества, Высота источника выбросов, интенсивность выделения вещества в момент времени, направление ветра
Выходные данные	Содержание вещества в точке в пространстве (x, y, z)
Доступ на сервер	Круглосуточно

В ходе работы над проектом была рассмотрена стационарная Гауссова модель распределения концентрации загрязнений и Нелинейная математическая модель для мониторинга и прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере, описанная в материалах выпуска № 264 Международной научной конференции «Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering» [9].

Стационарная Гауссова модель построена в предположении однородности и устойчивости атмосферы, в то время как Нелинейная математическая модель учитывает рельеф и направление ветра в трёх плоскостях. На основании имеющихся данных о составе выбросов и сезонной розы ветров (рисунок 7), а также органолептических анализов, проведённых в ходе выездных проверок актуальности информации жалоб от граждан близлежащих районов города, было получено, что условия окружающей среды являются устойчивыми и достаточны для расчёта прогноза о распространения веществ для худшего случая.

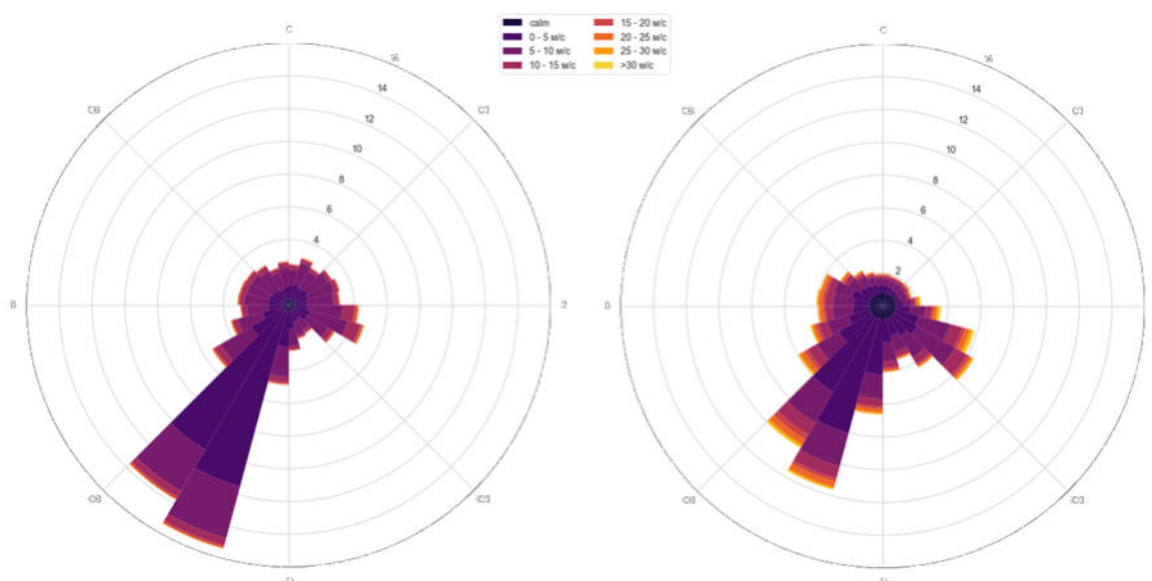


Рисунок 7 – Сезонная роза ветров в летний (слева) и зимний (справа) период, составленная по данным за 2023-2024 г.

Для увеличения итоговой точности и оптимизации расчётов требуется провести дополнительный анализ, упрощение формулы и подбор оптимальных параметров с помощью данных от поверенного устройства газоанализатора.

### 1.3 Разработка модуля непрерывного мониторинга параметров воздушной среды

В качестве основных компонентов электронного устройства для модуля непрерывного мониторинга параметров воздушной среды были выделены: печатная плата; микроконтроллер ESP32; датчики непрерывного мониторинга параметров воздушной среды; система вентиляции; блок питания; водонепроницаемый корпус.

Соответствующие требования к разрабатываемому модулю занесены в таблицу 8.

Таблица 8 - Требования к модулю непрерывного мониторинга параметров воздушной среды

Требование	Параметры
Собираемые данные	Скорость ветра (м/с), температура (°C), влажность воздуха (%), концентрация газов (мг/кг)
Частота сбора данных от датчиков	не менее 1 раз/мин
Вещества, подлежащие мониторингу	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , органические примеси (TVOC)
График работы	Круглосуточно
Наличие внешних интерфейсов	Отсутствуют
Максимальное энергопотребление	15 Вт
Уровень влагозащиты	Не менее IP 34

В ходе проведения работ был проведён поиск подходящего под обозначенные требования микроконтроллер. Рассмотрены микроконтроллеры с AVR архитектурой, существующие под разной сложностью задач, скоростью и объёмы вычислений, а также различных по цене и множеству других параметров, был выбран недорогой, но эффективный для модульных проектов ESP32, обладающий всеми необходимыми характеристиками.

ESP32 – микроконтроллер, разработанный компанией Espressif Systems для IoT проектов и встраиваемых систем. Среди основных преимуществ данного устройства можно выделить небольшой размер платы, низкую стоимость и высокую производительность (благодаря встроенному 32-битному процессору Xtensa LX6), а также большой список встроенных с завода аппаратных интерфейсов и датчиков: Wi-Fi,

Bluetooth (в том числе BLE), 4 таймера, 2 многоканальных АЦП разрядности в 12 бит, два ЦАП разрядности в 8 бит, интерфейсы: четыре SPI, два I2C, два I2S, три UART, 22 ШИМ канала, а также контроллеры Ethernet, CAN, SD-карт, ИК-датчиков, аппаратные ускорители алгоритмов шифрования AES, SHA, RSA и ECC, и датчик Холла [10].

Программируется данный микроконтроллер на C++, среди редакторов кода можно выделить Arduino IDE с подключённым пакетом Arduino\_ESP32\_OTA для возможности обновления прошивки OTA и смены регистров.

Для измерения показателей о содержании таких газов как:  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $NO_2$  и  $CO_2$  на рынке комплектующих были найдены и составлены в комплекс датчики, объединённые на рисунке 8. Назначение и измеряемый диапазон каждого из датчиков представлены в таблице 9.

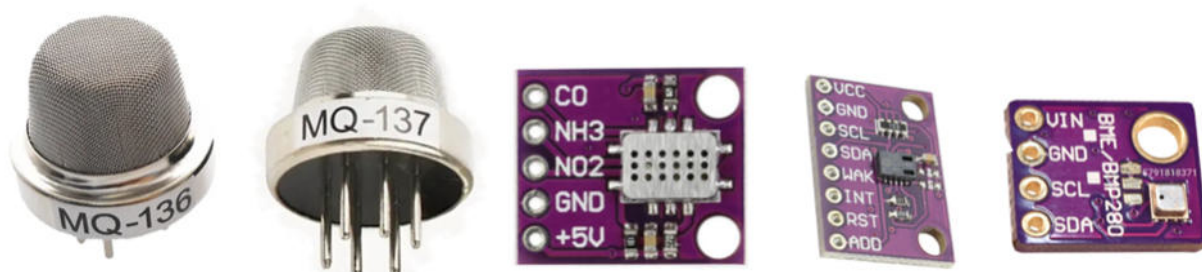


Рисунок 8 – Датчики непрерывного мониторинга параметров воздушной среды  
(Справа-налево: MQ136, MQ137, MICS-6814, CCS811, BME280)

Таблица 9 - Комплекс датчиков непрерывного мониторинга параметров воздушной среды

Наименование компонента	Назначение	Диапазон измерения, прочие характеристики
Газоанализатор MQ136	Измерение концентрации сероводорода ( $H_2S$ ) в окружающей среде	1 - 200 мг/кг
Газоанализатор MQ137	Измерение концентрации аммиака ( $NH_3$ ) в окружающей среде	5 - 500 мг/кг
Газоанализатор MICS-6814	Измерение концентрации угарного газа, метана, оксида азота ( $CO$ , $CH_4$ , $NO_2$ ) в окружающей среде	$CO$ : 1 - 1000 мг/кг $CH_4$ : >1000 мг/кг $NO_2$ : 0,05 – 10 мг/кг
Газоанализатор CCS811	Измерение концентрации углекислого газа ( $CO_2$ ) и органических соединений (TVOC)	$CO_2$ : 400 - 8192 мг/кг TVOC: 0 – 1187 мкг/кг
Метеодатчик BME280	Измерение температуры (t), атмосферного давления (P) и влажности воздуха (φ) в окружающей среде	t: от -40 до +85 °C P: 300 - 1100 кПа φ: 0 - 100 %



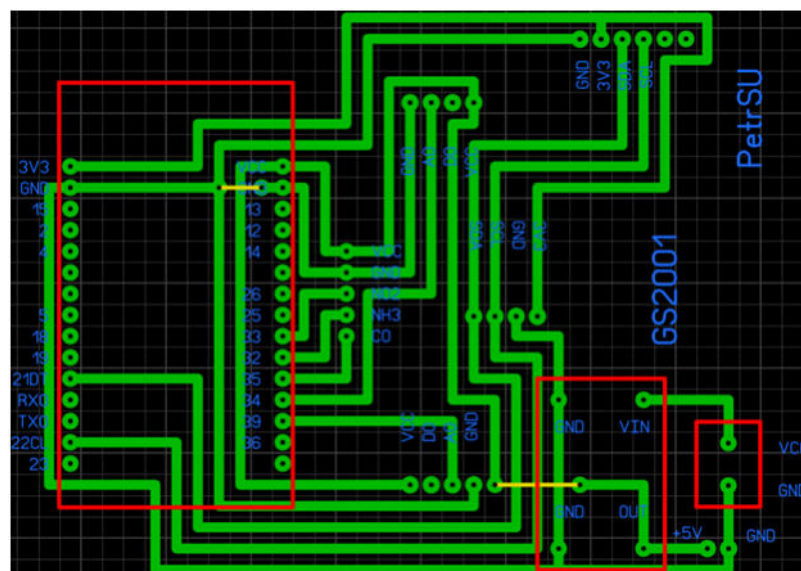


Рисунок 10 – Макетная схема разработанной печатной платы

Печатная плата была изготовлена аддитивным методом. Подготовленная основа платы (текстолит и медная фольга) раскраивается и изготавливается трафарет. На трафарете создают защитный рельеф на пробельных участках с помощью офсетной печати или сеткографии. Затем наносится металлорезист, с последующим удалением защитного рельефа и травлением меди. На полученной плате просверливаются монтажные отверстия с помощью ЧПУ-станка. Далее наносится сеткография и создаются контуры печатной платы. С помощью распайки были установлены все необходимые компоненты (см. рисунок 11).

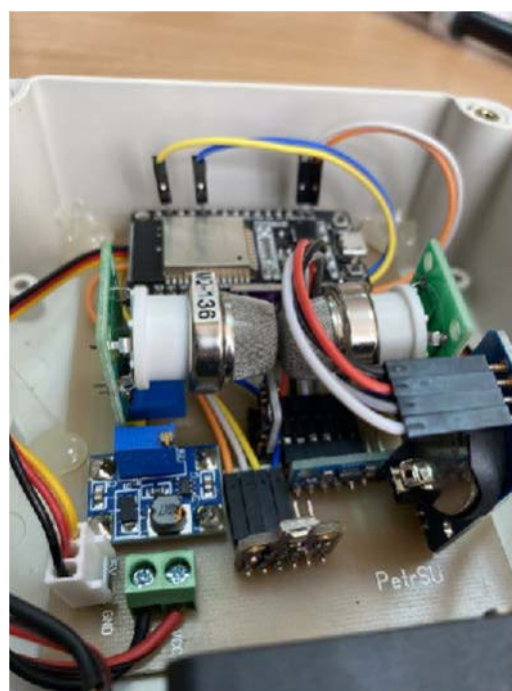


Рисунок 11 - Внешний вид (сбоку) аппаратного модуля непрерывного мониторинга



Для написания кода прошивки были задействованы библиотеки: Wire - работа с I2C портом; Adafruit\_BME280 – работа с датчиком BME280; DS3232RTC - работа с датчиком DS3232; SparkFunCCS811 - работа с датчиком CCS811.

Для хранения показаний датчиков была создана структура SensorData:

```
struct SensorData {
    char UnitName[6];          //Имя устройства
    uint16_t Number;           //Номер пакета
    byte Day; byte Month; byte Year;      //День, месяц, год
    byte Hour; byte Minute; byte Second;  //Час, минута, секунда
    /* Датчик BME280 */
    int16_t BME_T;              //Температура воздуха в сотых (*100) гр. Цельсия
    uint16_t BME_P;             //Атмосферное давление в десятых (*10) мм.рт.ст.
    uint16_t BME_H;             //% Влажности воздуха в сотых (*100)
    // Далее напряжение на выходе датчика в mV
    uint16_t MQ_136[10];        //H2S - сероводород
    uint16_t MQ_137[10];        //NH3 - аммиак
    uint16_t MICS_CO[10];        //CO - угарный газ
    uint16_t MICS_NH3[10];       //NH3 - аммиак
    uint16_t MICS_NO2[10];       //NO2 - диоксид азота
    /* Датчик CCS811 */
    uint16_t CCS811_CO2[10];     //CO2 в ppm
    uint16_t CCS811_TVOC[10];    //Органические примеси в ppm
    uint16_t CCS811_BsLn[10];    //BaseLine, безразмерная величина
};
```

## **1.4 Разработка модуля передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер**

После выбора компонентов и изготовления печатной платы модуля непрерывного мониторинга параметров воздушной среды, следует приступить к разработке модуля передачи данных на удалённый сервер. Для этого требуется прошить микроконтроллер, прописав соответствующий функционал с помощью программного кода.

В ходе разработки модуля передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на удалённый сервер для работы с программным кодом выбранной средой разработки стала интегрированная среда разработки Arduino — это кроссплатформенное приложение

на Java, включающая в себя редактор кода, компилятор и модуль передачи прошивки в плату. Язык программирования используемый для Arduino очень похож на СИ++, дополненный некоторыми библиотеками. Обработка программ осуществляется с помощью препроцессора, компиляция происходит с помощью AVR-GCC.

Общие требования к модулю **непрерывного мониторинга** заданы в таблице 11.

Таблица 11 - Требования к модулю передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер

Требование	Параметры
Протокол передачи	Wi-Fi
Содержание пакета данных	Скорость ветра (м/с), температура (°C), влажность воздуха (%), концентрация газов (мг/кг)
Интервал отправки пакетов на сервер	не менее 1 раз/час
График отправки	Круглосуточно

Для написания кода были задействованы такие программные библиотеки **для Arduino** как:

- WIFI и WiFiUdp (Работа с отправкой пакетов через Wi-Fi),
- FS (Чтение и запись данных на SD-карту)
- WebServer и WebSocketsServer (Для отправки и получения запросов на удалённый сервер)
- SPIFFS (Настройка конфигурации, и некоторый другие функции)
- Time (Контроль и синхронизация времени)

Для подключения к точке Wi-Fi используется информация, заявленная в конфигурации. Для загрузки конфигурации используется LoadConfig(), для изменения настроек используется функция SaveConfig(). Подключение осуществляется с помощью функции WiFiInit().

Веб-сервер использует 80 и 81 порты и хранит подключившихся клиентов по WebSocket81 в переменной bool WS\_Cl[16]; Для отправки данных клиентам WebSocket используется функция SendToClients(String SendStr):

```
void SendToClients(String SendStr) {
    for (int i=0; i < (sizeof(WS_Cl)/sizeof(WS_Cl[0])); i++){
        if (WS_Cl[i]) {
```



```

    long t_millis=millis();          //кол-во секунд спустя запуска программы
    websocket81.sendTXT(i,SendStr);   //Отправка пакета
    if ((millis()-t_millis)>10000) {
        websocket81.sendTXT(i,"You disconnect!");
        websocket81.disconnect(i);    //Если клиент не подтвердил получение
сообщения дольше 10 сек - отключаем его
        websocket81.broadcastTXT("Клиент " + String(i) + " отключился!!!");
    }
}
}
}
}

```

Тело основного блока setup(), выполняемого один раз во время запуска программы:

```

void setup() {
    Serial.begin(115200);              //Устанавливаем тактовую скорость
    Wire.begin(SDA, SCL);              //Включаем I2C линии (21, 22 ports)
    delay(250);
    FS_init();                         //Инициализируем файловую систему
    delay(100);
    LoadConfig();                     //Загружаем конфиг
    WIFInit();                         //Запускаем Wi-Fi
    {...}                             //Синхронизируем время Time_Sync()
    BME_Status = bme.begin(0x76);      //Запуск BME280
    Serial.println(BME_Status ? "BME-280 OK!" : "BME-280 FALSE!");
    CCS811_Status = myCCS811.begin();  //Запуск CCS811
    Serial.println(CCS811_Status ? "CCS811 OK!" : "CCS811 FALSE!");

    HTTP.begin();                     //Запуск WebServer
    HTTP.on("/restart", HTTP_GET, []() {
        String restart = HTTP.arg("device"); // Получаем значение device из запроса
        if (restart == "ok") {           // Если значение равно Ок
            HTTP.send(200, "text / plain", "Reset OK"); // Отправляем ответ «Reset OK»
            ESP.restart();                // перезагружаем модуль
        }
        else {

```

```

    HTTP.send(200, "text / plain", "No Reset");    // Отправляем ответ «No Reset»
  }
});
WebSocket81.begin();          //Запуск WebSocket сервера
WebSocket81.onEvent(WebSocketEvent81);
}

void loop() {
  HTTP.handleClient();        // Работа Web сервера
  WebSocket81.loop();         // Работа WebSocket сервера
  {...}                       //analogRead данных от датчиков
  if ((millis() - lastMillis) > 1000) {
    SendToClients("Unit_Name: " + Unit_Name + ";");
    SendToClients("Date: " + GetDate() + ";");
    SendToClients("Time: " + GetTime() + ";");

    if (BME_Status) {
      BMEtempC = bme.readTemperature();
      BMEhumid = bme.readHumidity();
      BMEpress = bme.readPressure()*0.0075;
    }
    else
      BME_Status = bme.begin(0x76);
    SendToClients("BME_T: " + String(BMEtempC) + ";");
    SendToClients("BME_H: " + String(BMEhumid) + ";");
    SendToClients("BME_P: " + String(BMEpress) + ";");

    if (myCCS811.dataAvailable()) {
      myCCS811.readAlgorithmResults();
      SensData.CCS811_CO2[NumCM] = myCCS811.getCO2();
      SensData.CCS811_TVOC[NumCM] = myCCS811.getTVOC();
    }
    else {...}
    SendToClients("CCS811_CO2: " + String(SensData.CCS811_CO2[NumCM]) + ";");
    SendToClients("CCS811_tVOC: " + String(SensData.CCS811_TVOC[NumCM]) +
";");

```

```

SendToClients("CCS811_BsLn: " + String(SensData.CCS811_BsLn[NumCM]) + ";");

{...}          //Деление показателей датчиков на число измерений в секунду
SensData.MQ_136[NumCM] = (mq_136*3300)/4095 - mq_136_null;
SensData.MQ_137[NumCM] = (mq_137*3300)/4095 - mq_137_null;
SensData.MICS_CO[NumCM] = mics_CO_null - (mics_CO*3300)/4095;
SensData.MICS_NH3[NumCM] = mics_NH3_null - (mics_NH3*3300)/4095;
SensData.MICS_NO2[NumCM] = mics_NO2_null - (mics_NO2*3300)/4095;
SendToClients("MQ136: " + String(SensData.MQ_136[NumCM]) + ";");
SendToClients("MQ137: " + String(SensData.MQ_137[NumCM]) + ";");
SendToClients("MICS_CO: " + String(SensData.MICS_CO[NumCM]) + ";");
SendToClients("MICS_NH3: " + String(SensData.MICS_NH3[NumCM]) + ";");
SendToClients("MICS_NO2: " + String(SensData.MICS_NO2[NumCM]) + ";");
{...}          // Обнуление показателей и счётчика числа измерений

NumCM++;
if (NumCM > 9) {
    NumCM = 0;
    for (int i=0; i<6; i++)    //Распаковка структуры
        SensData.UnitName[i] = Unit_Name[i];
    {...}          //Преобразование типов данных
    Udp.beginPacket(UDP_Serv_IP, UDP_Serv_Port); //UDP requests to server
    Udp.write((byte*)&SensData, sizeof(SensData));
    Udp.endPacket();
    Udp.beginPacket(UDP_Broad_IP, UDP_Broad_Port); //UDP requests to broadcast
    Udp.write((byte*)&SensData, sizeof(SensData));
    Udp.endPacket();
    SensData.Number++;
    if (Temp_Comp && BME_Status) {
        myCCS811.setEnvironmentalData(BMEhumid, BMEtempC);
    }
    if ((hour() - last_hour) != 0) {    //Если время сбито, то перезагружаем Wi-Fi
        last_hour = hour();
        Serial.println("Restart WIFI");
        WIFIinit();
    }
}

```

```

        Serial.println();
        Serial.print("LocalIP: ");
        Serial.println(LocalIP);
    }
}
lastMillis = millis();
}
delay(5);          //Задержка, раз в сколько секунд посылаем данные
}

```

Пример вывода в консоль аппаратного модуля:

Load config

Load config.txt

Start WIFI

LocalIP: 76.146.14.5

Синхронизация времени

Transmit NTP Request

us.pool.ntp.org: 8.8.8.8.

Время синхронизировано

Start BME280

BME-280 OK!

Start CCS811

CCS811 OK!

Start 4-WebServer

Start 5-WebSocket server

## **1.5 Сборка и тестирование аппаратной части ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов**

Для актуализации данных архива жалоб граждан г. Петрозаводск и окрестных поселений на неприятный запах от КОС за **июнь-июль** 2024 года было совершено несколько проверочных выездов по указанным адресам в дни, когда жалобы повторялись. При этом, время и дата выездов утверждались так, чтобы температура воздуха была

высокой, присутствовали умеренные или сильные потоки ветра и была солнечная погода. Именно в таком случае образуются наиболее благоприятнейшие условия для выделения различных веществ в атмосферу при осушении иловых масс и работе КОС в целом.

21 августа 2024 года был проведён первый проверочный выезд на КОС и проулок Кухня, во время которого запах от очистных сооружений чувствовался при отдалённости на 800м. Маршрут выезда показан на **рисунке 12**. Схематично уровень запаха с приближением к КОС показан на **рисунке 13**. Однако, по результатам органолептического анализа жалоба из санатория «Белые ключи» (в отдалении на ~3,3 км от КОС) не была подтверждена достоверно. Посторонних запахов обнаружено не было.

Выезд 28 августа также показал, что в действительности схема распространения запахов соответствует **рисунку 14**. Однако, это означает, что в худшем случае потоками ветра запах с КОС может распространяться на расстояние трёх и более километров. Данный факт будет учтён при подборе коэффициентов в математической модели распространения.

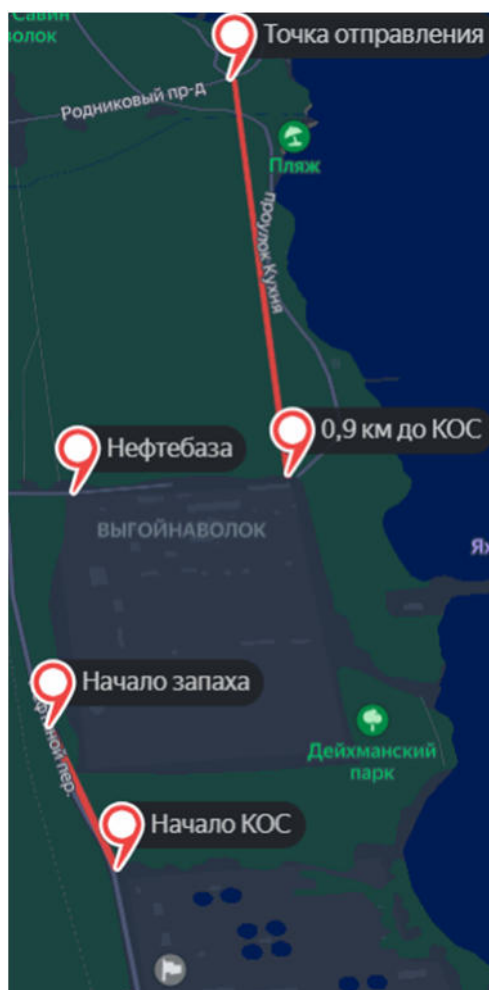


Рисунок 12 – Маршрут выезда, произведённого 21 августа 2024 года для **проведения** органолептического анализа

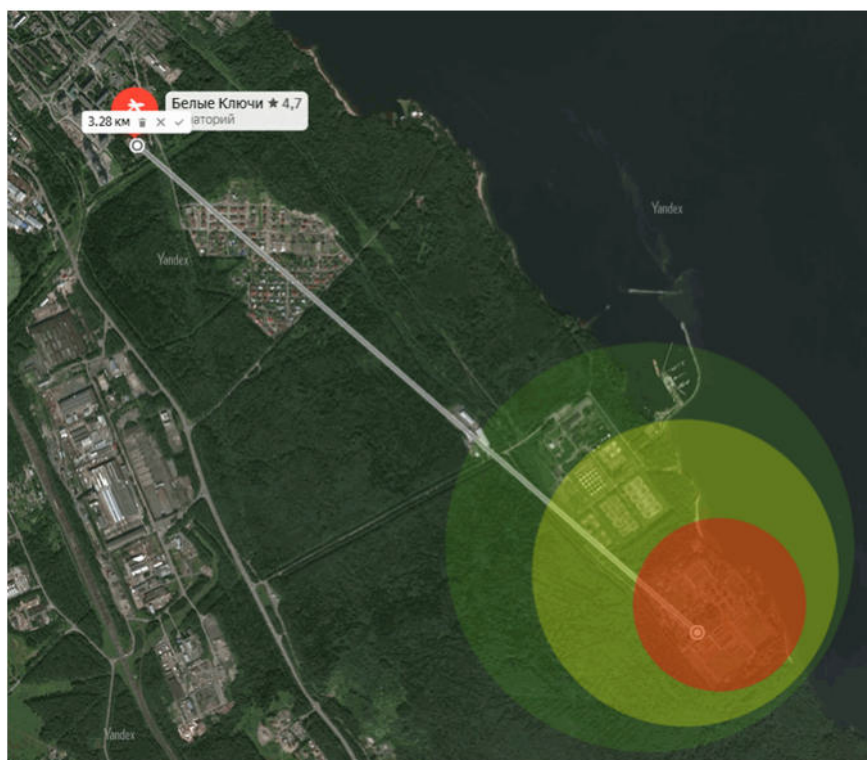


Рисунок 13 – Схематическая карта распространения запахов на местности, согласно данным органолептического анализа 21 августа 2024 года

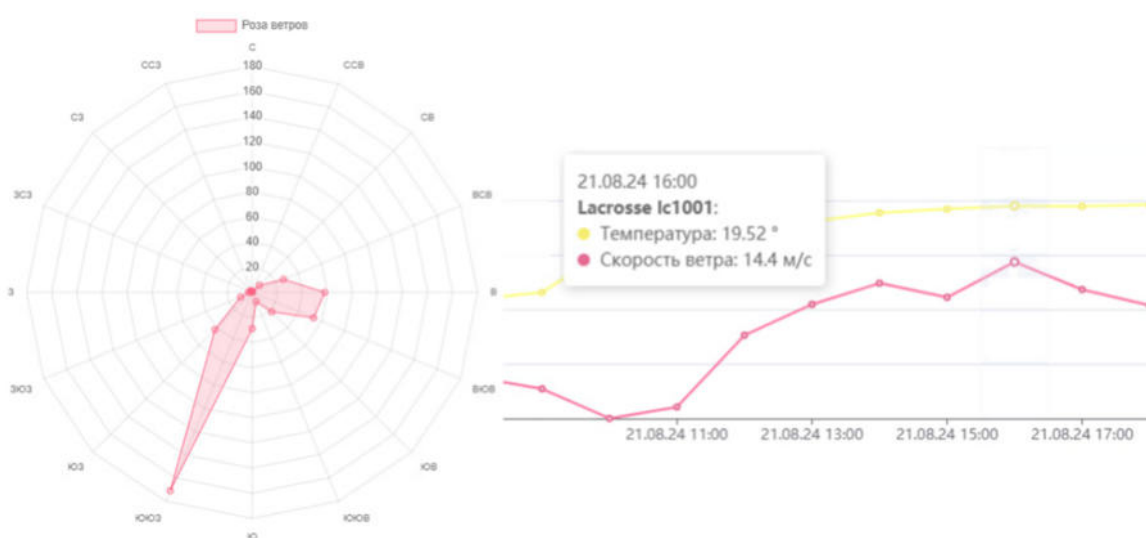


Рисунок 14 – Роза ветров, температура воздуха и скорость ветра, зафиксированная 21 августа 2024 года, актуальная на момент проведения органолептического анализа

После изготовления печатной платы и установки датчиков, устройство было собрано в вентилируемый водонепроницаемый корпус с защитой отверстия под вентилятор (рисунок 15). Также был подключён блок питания. Устройство изнутри показано на рисунке 16.



Рисунок 15 - Внешний вид (сбоку) аппаратного модуля непрерывного мониторинга

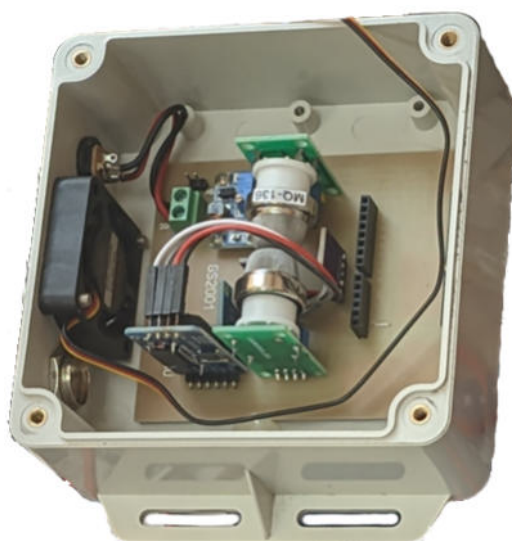


Рисунок 16 - Внешний вид (сверху) аппаратного модуля непрерывного мониторинга (без микроконтроллера)

При подключении питания устройству включается красный светодиод на микроконтроллере и запускается вентиляция. После инициализации прошивки устройство автоматически пытается подключиться к заданному Wi-Fi и осуществляет сбор данных с установленных датчиков.

Для установки устройства на КОС, необходимо было выбрать оптимальное место установки.

Самым эффективным местом для сбора показателей качества воздуха на территории комплекса являются сушильные карты. При этом следует учитывать сезонную розу ветров, так как потоки воздуха напрямую влияют на траекторию перемещения выделяемых веществ как при ворошении, так и в пассивном состоянии осушения иловых масс. Наибольшие показатели устройство будет улавливать если расположить его с подветренной, по отношению к сушильным картам, стороны. Схематически, подходящая область выделена на рисунке 17. Все требования к месту расположения аппаратного устройства сгруппированы в таблицу 12.



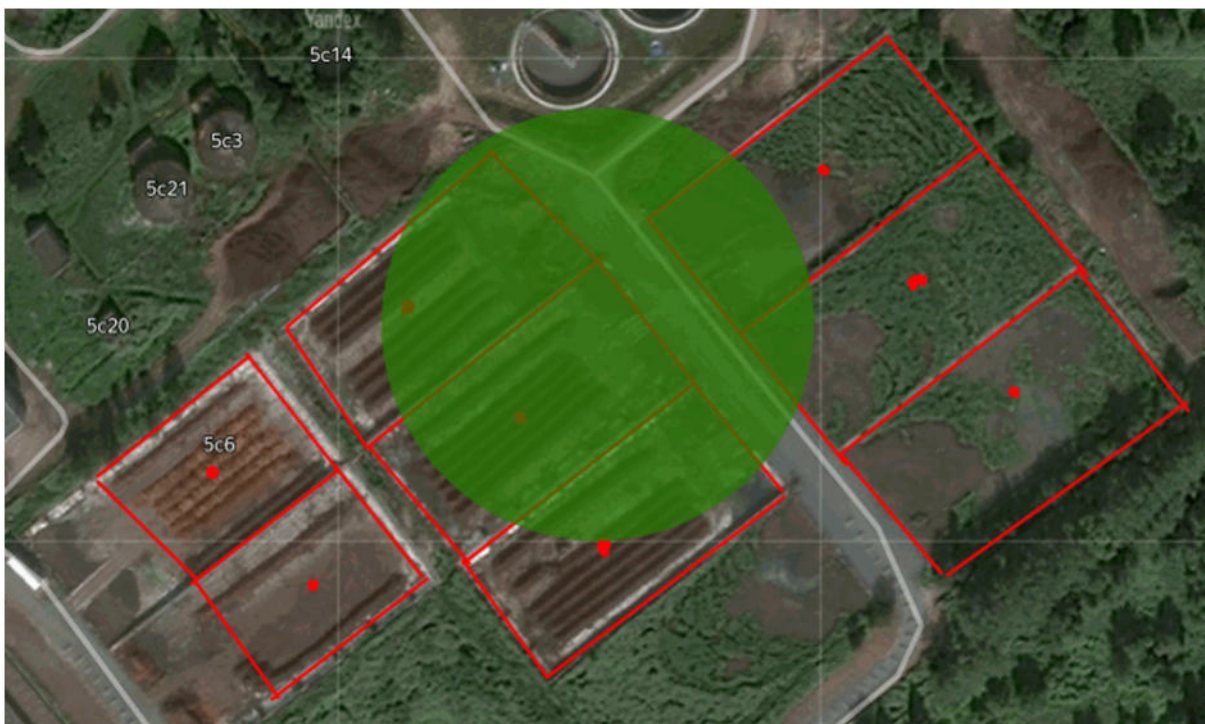


Рисунок 17 - Схематичная зона оптимального расположения аппаратного устройства мониторинга на площадях иловых карт АО «ПКС - Водоканал»

Таблица 12 – Требования к месту расположения аппаратного устройства

Требование	Параметры
Отдалённость от границ буртов	не более 100 метров
Наличие электросети	Да, Europlug (ГОСТ 7396)
Интервал отправки пакетов на сервер	не менее 1 раз/час
График отправки	Круглосуточно
Наличие визуализация данных в WEB-интерфейсе	Да, в виде графиков (усреднённое значение, интервал)

Для питания устройства были проведены монтажные работы по проведению электричество постоянного тока на сушильные карты, в буферную зону между площадок. По окончании работ было осуществлён выезд на территорию КОС для установки аппаратного устройства в выделенную зону (рисунок 18). На рисунке 19 запечатлён момент ввода устройства в эксплуатацию.





Рисунок 18 – Установка аппаратного модуля на площадку КОС



Рисунок 19 - Установленное электронное устройство с встроенными аппаратными модулями на площадку иловых карт

В рамках тестирования было проведено несколько различных проверок устройства мониторинга показателей окружающей среды, приведённых в таблице 13.

Таблица 13 – Список проведённых тестирований

Дата и место тестирования	Сценарий	Статус	Описание
30.07.24	Моросящий дождь	Пройдено	Устройство работает в штатном режиме
01.08.24	Сильный дождь	Пройдено	Устройство работает в штатном режиме
01.08.24	Порывы ветра свыше 15 м/с	Пройдено	Устройство работает в штатном режиме
30.07.24	Потеря соединения с Wi-Fi	Пройдено	Происходит автоматическое переподключение
30.07.24	Отправка первого собранного пакета данных после подключения к Wi-Fi	Пройдено	Устройство работает в штатном режиме
30.07.24	Отправка последнего собранного пакета данных до отключения от Wi-Fi или питания	Пройдено	Устройство работает в штатном режиме
30.07.24	Потеря электропитания, длительность менее 10 мс	Пройдено	Устройство работает в штатном режиме
30.07.24	Потеря электропитания, длительность более 10 мс	Пройдено	Устройство аварийно завершает работу и включается автоматически при появлении питания

## 1.6 Выводы по разделу 1

1. Изучены характеристики выбросов загрязняющих веществ с промышленных объектов АО «ПКС-Водоканал». Изучен технологический процесс обработки и сушки иловых масс и производство почвогрунта, поданы пробы иловых масс на химический анализ и выявлены разницы между их показателями. Для актуализации данных из архива

жалоб граждан города Петрозаводск и окрестностей были осуществлены проверочные выезды. Проведено общее исследование состава газов, выделяющихся от буртов во время их осушения. Выбраны вещества для мониторинга:  $\text{H}_2\text{S}$  (сероводород),  $\text{NH}_3$  (аммиак), и TVOC (органические примеси), CO (угарный газ),  $\text{CH}_4$  (метан),  $\text{NO}_2$  (оксид азота).

2. Разработана структура ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов. Аппаратная часть включает в себя два модуля, функционирующих на базе одного или нескольких электронных устройств. Модуль непрерывного мониторинга параметров воздушной среды осуществляет сбор показателей о качестве воздуха (концентрации газов) и метеоданные. Модуль передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер включает в себя модуль данных характеристик выбросов загрязняющих веществ (базу данных) и модуль прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, на основании математической модели.

3. Разработан модуль непрерывного мониторинга параметров воздушной среды. Модуль включает в себя печатную плату, микроконтроллер ESP32 и датчики непрерывного мониторинга параметров воздушной среды: газоанализаторы MQ136, MQ137, MICS-6814, CCS811, метеодатчик BME280 и датчик-таймер DS3232. Устройство подготовлено для сборки в водонепроницаемый корпус стандарта не менее IP34. Рассчитано максимально возможное потребляемое энергопотребление, которое составило <1850 мА, и подобран блок питания с запасом (2А 5В 10Вт). Разработана и изготовлена печатная плата. Написана прошивка для сбора данных с датчиков.

4. Разработан модуль передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер. Разработан код на C++, выполняющий сбор и отправку данных о параметрах окружающей среды на удалённый сервер с помощью Wi-Fi соединения по сокет-запросам.

5. Собрана и протестирована аппаратная часть ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов. Аппаратная часть ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов собрана в водонепроницаемый вентилируемый корпус, установлена на территории иловых карт, подключена к питанию и работает в штатном режиме. Проведено тестирование невосприимчивости устройства к погодным условиям и пропаже сигнала Wi-Fi.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе этапа 1 НИР получены следующие результаты:

1. Изучены характеристики выбросов загрязняющих веществ с промышленных объектов АО «ПКС-Водоканал». Изучен технологический процесс обработки и сушки иловых масс и производство почвогрунта, поданы пробы иловых масс на химический анализ и выявлены разницы между их показателями. Для актуализации данных из архива жалоб граждан города Петрозаводск и окрестностей были осуществлены проверочные выезды. Проведено общее исследование состава газов, выделяющихся от буртов во время их осушения. Выбраны вещества для мониторинга:  $H_2S$  (сероводород),  $NH_3$  (аммиак), и TVOC (органические примеси), CO (угарный газ),  $CH_4$  (метан),  $NO_2$  (оксид азота).

2. Разработана структура ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов. Аппаратная часть включает в себя два модуля, функционирующих на базе одного или нескольких электронных устройств. Модуль непрерывного мониторинга параметров воздушной среды осуществляет сбор показателей о качестве воздуха (концентрации газов) и метеоданные. Модуль передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер включает в себя модуль данных характеристик выбросов загрязняющих веществ (базу данных) и модуль прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, на основании математической модели.

3. Разработан модуль непрерывного мониторинга параметров воздушной среды. Модуль включает в себя печатную плату, микроконтроллер ESP32 и датчики непрерывного мониторинга параметров воздушной среды: газоанализаторы MQ136, MQ137, MICS-6814, CCS811, метеодатчик BME280 и датчик-таймер DS3232. Устройство подготовлено для сборки в водонепроницаемый корпус стандарта не менее IP34. Рассчитано максимально возможное потребляемое энергопотребление, которое составило <1850 мА, и подобран блок питания с запасом (2А 5В 10Вт). Разработана и изготовлена печатная плата. Написана прошивка для сбора данных с датчиков.

4. Разработан модуль передачи данных с модуля непрерывного мониторинга на сервер. Разработан код на C++, выполняющий сбор и отправку данных о параметрах окружающей среды на удалённый сервер с помощью Wi-Fi соединения по сокет-запросам.

5. Собрана и протестирована аппаратная часть ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов. Аппаратная часть ПАК мониторинга и прогнозирования распространения выбросов собрана в водонепроницаемый вентилируемый корпус, установлена на территории иловых карт, подключена к питанию и работает в штатном режиме. Проведено тестирование невосприимчивости устройства к погодным условиям и пропаже сигнала Wi-Fi.

В рамках проекта были успешно выполнены следующие заявленные показатели:  
количество докладов и сообщений на конференциях – [REDACTED], в том числе международных – [REDACTED].  
Подтверждение выполнения показателей проекта представлено в Приложении А.

Выполненные работы полностью соответствуют техническому заданию и календарному плану НИР КГРК-24/07 от 17.05.2024 г.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Природа России: Республика Карелия / [Электронный ресурс] // Национальный портал "Природа России" : [сайт]. — URL: [https://www.priroda.ru/regions/air/detail.php?FO\\_ID=429&ID=5852](https://www.priroda.ru/regions/air/detail.php?FO_ID=429&ID=5852) (дата обращения: 11.07.2024).
2. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Республики Карелия на период до 2030 года : распоряжение Правительства Республики Карелия от 29 декабря 2018 года № 899р-П
3. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов : дата введения 2020-09-01. — М. : Бюро НДТ, 2019. — 434 с.
4. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 25 декабря 2018 г. № 860/пр / НИИСФ РААСН ; ред. АО «Кодекс» - 84 с.
5. ГОСТ Р 59748-2021. Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования : дата введения 2021-10-13. — М. : Российский институт стандартизации, 2021. — 27 с.
6. Обработка осадков городских сточных вод : учебное пособие / Л.Р. Хисамеева, А.С. Селюгин, Р.Н. Абитов, А.В. Бусарев, Н.С. Урмитова. — Казань : Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2016. — 105 с.
7. ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия : дата введения 2011-12-13. — М. : Стандартиформ, 2012. — 18 с.
8. John M. Stockie The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling / John M. Stockie // Society for Industrial and Applied Mathematics : SIAM review – Philadelphia, 2011. — 24 sheets.
9. Nonlinear mathematical model and numerical algorithm for monitoring and predicting the concentration of harmful substances in the atmosphere : materials of International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO - 2021) April 1-3, 2021, Tashkent / E3S Web of Conferences : Volume 264, June 2, 2021. — 12 sheets.
10. Краткое описание микроконтроллеров ESP32 и модулей на их основе по-русски / [Электронный ресурс] // КМПУ модульное проектирование устройств : [сайт]. — URL: [http://kmpu.ru/other/esp32\\_01\\_introduction/index.html](http://kmpu.ru/other/esp32_01_introduction/index.html) (дата обращения: 24.09.2024).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

### Выполнение показателей проекта

В приложении приведена информация о выполнении показателей проекта. Показатели проекта представлены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Выполнение показателей проекта


№	Показатели	Значение		
		Плано вые	Достиг нутые	% выполне ния
1	Количество публикаций в высокорейтинговых научных изданиях	–	–	–
2	Количество публикаций в российских отраслевых научных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, размещенных в Российском индексе научного цитирования	2	0	0
3	Количество заявок на регистрацию результатов интеллектуальной деятельности (изобретения, полезные модели, промышленные образцы, программы для электронных вычислительных машин, базы данных, секреты производства (ноу-хау)) представленных в Роспатент	1	0	0
4	Количество результатов интеллектуальной деятельности, получивших документы охраны	1	0	0
5	Количество результатов прикладных исследований и разработок студентов и аспирантов, внедренных в экономику и социальную сферу	1	0	0
6	Количество разработанных учебных курсов (лекции, семинары, практические занятия)	1	0	0
7	Количество разработанных стартап-проектов	1	0	0
8	Количество докладов и сообщений на конференциях	3	1	33
8.1	в том числе международных	1	0	0

## Подтверждение показателей (при наличии планового показателя)

### Доклады и сообщения на конференциях

#### 8. Доклады и сообщения на конференциях, в том числе международных

**8.1. Доклад на конференции:** Дьяченко А.П. Система мониторинга и прогнозирования распространения запахов от канализационных очистных сооружений на примере водоканала г. Петрозаводск / Дьяченко А.П. // V Всероссийская научная конференция «Арктика и Север глазами ученых – 2024: результаты экспедиционной деятельности», Гуманитарный иннопарк ГК ПетрГУ (г. Петрозаводск) 19-21 сентября 2024 г. (очное участие 20.09.2024).



**ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»**  
**АНО «Гуманитарное научное сообщество»**  
при поддержке  
**Северо-Европейского открытого научно-образовательного консорциума (СЕОНОК)**  
**ПРОГРАММА**  
**V Всероссийской научной конференции**  
**«Арктика и Север глазами ученых – 2024:**  
**результаты экспедиционной деятельности»**  
**19-21 сентября 2024 г.**  
**20 СЕНТЯБРЯ**  
В течение дня: выставка книг Научной библиотеки ПетрГУ — холл Научной библиотеки  
ПетрГУ (главный корпус ПетрГУ, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33)  
**СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ**  
**Регламент:**  
**выступления 10 мин.**  
**ответы на вопросы 5 мин.**  
**Секция 2. Экспедиционные исследования истории и культуры Арктики и Севера**  
Место проведения — Конференц-зал  
(ауд. 221, главный корпус ПетрГУ, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33)  
Модератор — Ирина Александровна Чернякова, кандидат исторических наук,  
заведующий Исследовательской лабораторией локальной и микроистории Карелии,  
доцент Института истории, политических и социальных наук, Петрозаводский  
государственный университет, г. Петрозаводск  
6. 11.20 — 11.35 Дьяченко Алексей Павлович, студент Института математики и  
информационных технологий, Петрозаводский государственный университет,  
г. Петрозаводск  
Система мониторинга и прогнозирования распространения запахов от канализационных  
очистных сооружений на примере водоканала г. Петрозаводск



## Система мониторинга и прогнозирования распространения запахов от канализационных очистных сооружений на примере водоканала г. Петрозаводск

Докладчик:  
студент 4 курса ПМИ ИМИТ ПетрГУ  
Дьяченко Алексей Павлович

Научный руководитель:  
Ст. преподаватель, доцент кафедры ТОЛК ПетрГУ  
Кабонен Алексей Валерьевич

Петрозаводск, 2024 г.

## Введение

- С ростом объёмов отходов и приближением жилых районов города (Сайналовка, м-н Ключевая, н.п. Ужесельга) к комплексу очистных сооружений (далее КОС), неуклонно растёт количество обращений на неприятный запах.
- Основным источником запаха является совокупность различных газообразных веществ (в т.ч. сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), органические соединения и др.), непрерывно выделяющиеся во время процесса обработки и сушки иловых масс.

2/12

## Цели

Разработать программно-аппаратный комплекс мониторинга выбросов загрязняющих веществ с промышленных предприятий Республики Карелия в окружающую среду в режиме реального времени и прогнозирующего ареал их распространения.

Сгенерировано PlaygroundAI

3/12

## Задачи

1. Разработка электронного устройства для непрерывного мониторинга выбросов с промышленных предприятий.
2. Проведение полевых экспериментов для установления взаимосвязей распространения загрязняющих веществ от влияющих факторов (состав газа, метеорологические условия).
3. Разработка алгоритма прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду на основе математического моделирования.
4. Разработка программного модуля прогнозирования распространения выбросов загрязняющих веществ в окружающей среде.
5. Сборка, тестирование, апробация ПАК мониторинга и прогнозирования на предприятии АО «ПКС – Водоканал»

4/12

## Исследования

Показатель	Ед. изм.	Результат	
		22.05.2024	08.07.2024
Влажность	%	83	96
Зольность	%	22.3	22
pH водной вытяжки	ед. pH	6.74	5.4
Плотность	г/см <sup>3</sup>	0.9	1,05
ХПК	мг/г сухого вещества	1373	3068
Азот общий	мг/г сухого вещества	117	98
Фосфор общий	мг/г сухого вещества	31	22
Марганец	мг/кг сухого вещества	780	1760
Цинк	мг/кг сухого вещества	290	319
Железо	мг/кг сухого вещества	1650	10533
Медь	мг/кг сухого вещества	190	140

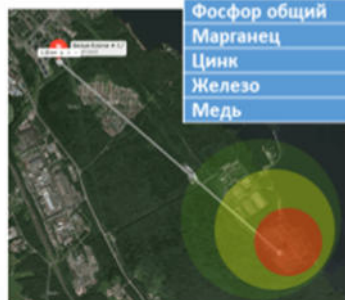
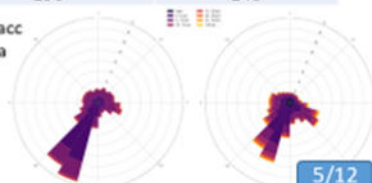
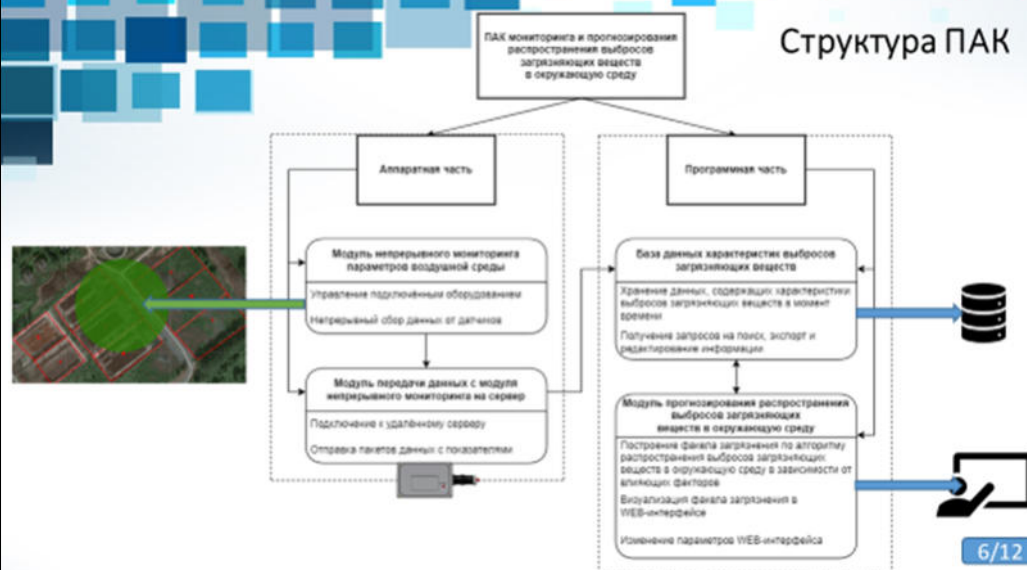


Таблица 1 – анализы проб иловых масс  
Рис. 1 – Уровни концентрации запаха  
Рис. 2 – Сезонная роза ветров



5/12

## Структура ПАК



6/12

## Требования к аппаратной части



Внешний вид прототипа модуля непрерывного мониторинга

### Требования к модулю непрерывного мониторинга

Блока управления	микроконтроллер ESP32
Интерфейс передачи данных	Wi-Fi
Диапазон рабочих температур блока управления	-20 ... +30 °C
Частота передачи данных на сервер	не менее 1 раз/час
Массогабаритные характеристики	Размеры: не более 300x300x300 мм Масса: не более 5 кг
Газы, подлежащие мониторингу	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , органические примеси
Технологический стек	C++, Arduino IDE
Тип газовых датчиков	полупроводниковый газоанализатор

7/12

## Требования к аппаратной части



WEB-интерфейс графиков

### Требования к модулю передачи данных на сервер

Протокол передачи	HTTP
Содержание пакета данных	Скорость ветра (м/с), температура (°C), влажность (%), концентрация (мг/кг)
Интервал отправки пакетов на сервер	не менее 1 раз/час
График отправки	Круглосуточно
Визуализация	в Да, в виде графиков
WEB-интерфейсе	(усредненное значение, интервал)

8/12

## Требования к программной части

### Требования к модулю прогнозирования распространения выбросов в окружающей среде

Мат.модель	Нестационарная Гауссова модель распределения загрязняющего вещества в атмосфере
Технологический стек	Python, NumPy, MatLab
GIS карта	Open Street Map
Источник данных	База данных
Время построения факела загрязнения	не менее 1 раз/час
Выходные данные	Содержание вещества в точке в пространстве (x,y,z)
Доступ на сервер	Круглосуточно



Эскиз WEB-интерфейса

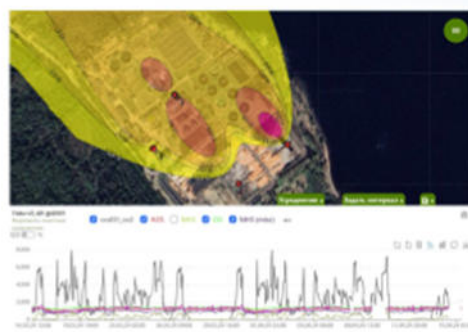
9/12



## Заключение



Разработанный модуль  
непрерывного мониторинга



Разработанный прототип модуля прогнозирования  
распространения выбросов в  
окружающей среде

10/12

## Список источников

1. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.
2. ГОСТ Р 59748-2021. Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования.
3. Обработка осадков городских сточных вод : учебное пособие / Л.Р. Хисамеева, А.С. Селюгина, Р.Н. Абитов, А.В. Бусарев, Н.С. Урмитова. – Казань : Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2016. – 105 с;
4. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.
5. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений.
6. Стратегия социально-экономического развития Республики Карелия на период до 2030 года.
7. ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия.
8. John M. Stockie The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling // Society for Industrial and Applied Mathematics – Philadelphia, 2011.
9. Nonlinear mathematical model and numerical algorithm for monitoring and predicting the concentration of harmful substances in the atmosphere : materials of International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering", 2021, Tashkent / E3S Web of Conferences : Volume 264, 2021.
10. The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modelling : URL: <https://www.sfu.ca/~jstockie/atmos/> (Дата обращения: 22.07.2024).

11/12