

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР  
ИМ. АКАДЕМИКА Н. В. МЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПКОН РАН)

*На правах рукописи*

**СТРЕЛЕЦКИЙ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ  
МАССОПЕРЕНОСА ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА ПРИ ВЕДЕНИИ  
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ**

*Специальность 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная  
аэрогазодинамика и горная теплофизика*

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель  
Доктор технических наук, профессор  
Кубрин Сергей Сергеевич

Москва 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                            | 4  |
| ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРОВ МАССОПЕРЕНОСА ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ..... | 10 |
| 1.1. Пылевая обстановка рабочей зоны угольного разреза и прилегающих территорий .....                                                                                     | 10 |
| 1.2. Влияние мелкодисперсной пыли респирабельных фракций на организм человека .....                                                                                       | 14 |
| 1.3 Анализ результатов исследования морфологических характеристик мелкодисперсных частиц пыли .....                                                                       | 20 |
| 1.4. Методы прогноза образования и массопереноса пылегазового облака .....                                                                                                | 22 |
| 1.5. Технические средства контроля пылегазовой и метеорологической обстановок угольного разреза .....                                                                     | 26 |
| 1.6. Выводы. Постановка задач исследования .....                                                                                                                          | 38 |
| ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ ПЫЛИ И ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА .....                                               | 40 |
| 2.1. Исследование запыленности приземного слоя атмосферы Кемеровской области .....                                                                                        | 40 |
| 2.2. Исследование морфологических характеристик частиц мелкодисперсной пыли .....                                                                                         | 46 |
| 2.2.1 Отбор образцов пыли на угольном разрезе .....                                                                                                                       | 47 |
| 2.2.2 Ситовый анализ отобранных образцов пыли .....                                                                                                                       | 48 |
| 2.2.3 Рентгенофлуоресцентный спектральный анализ образцов пыли .....                                                                                                      | 50 |
| 2.2.4 Исследование частиц пыли методом конфокальной микроскопии .....                                                                                                     | 52 |
| 2.3. Исследование влияния интенсивности вовлечения окружающих воздушных масс на высоту подъема пылегазового облака .....                                                  | 62 |
| 2.4 Построение математической модели прогнозирования высоты подъема пылегазового облака после взрыва .....                                                                | 80 |
| 2.5. Исследование частиц пыли методом электронной сканирующей микроскопии .....                                                                                           | 87 |
| 2.6. Выводы по главе .....                                                                                                                                                | 99 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ<br>МАССОПЕРЕНОСА ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА .....                                              | 100 |
| 3.1. Виртуальный физический эксперимент методом эквивалентных<br>материалов .....                                                      | 100 |
| 3.2. Учет аэродинамических характеристик частиц мелкодисперсной пыли ...                                                               | 103 |
| 3.3. Описание программы Vizualization_GMAP .....                                                                                       | 109 |
| 3.4. Вывод по главе .....                                                                                                              | 114 |
| ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ<br>МАССОПЕРЕНОСА ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИ ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА .....                     | 115 |
| 4.1. Оценка запыленности в границах горного отвода.....                                                                                | 115 |
| 4.2 Априорная и апостериорная оценки запыленности приземного слоя<br>атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области.....           | 122 |
| 4.3. Требования к системе контроля параметров массопереноса пылегазового<br>облака при ведении взрывных работ на угольном разрезе..... | 132 |
| 4.4. Выводы по главе.....                                                                                                              | 136 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                       | 138 |
| СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....                                                                                                                 | 140 |

## ВВЕДЕНИЕ

Проведение взрывных работ на угольных разрезах сопровождается возникновением пылегазового облака, в состав которого входят газы, образованные в результате химических реакций, сопровождающих взрыв, и пыль. Если концентрация газов снижается до безопасных порогов, практически в пределах взрываемого блока, то пыль остается продолжительное время во взвешенном состоянии и, как следствие, спустя некоторое время, пылегазовое облако состоит из твердых частиц, которые загрязняют не только атмосферу разреза, но и, распространяясь, наносят вред экосистеме региона.

Значительный вклад в исследование процессов формирования, распространения и седиментации пыли внесли: Адушкин В. В., Белин В. А., Белодедов А. А., Бересневич П. В., Викторов С. Д., Горлов Ю. В., Ефремов Э. И., Исаевич А. Г., Кобылкин А. С., Кобылкин С. С., Коршунов Г. И., Костеренко В. Н., Кубрин С. С., Кудряшов В. В., Подображин С. Н., Поздняков Г. А., Романченко С. Б., Рыбак В. Л., Семенов В. В., Тимченко А. Н., Тихонова О. В., Трубицин В. П.

Морфологические характеристики твердых частиц минеральной пыли были исследованы: W. Cantrell, P. Ginoux, A. Kostinski, A. Marshak, C. Mazzoleni, S. Otto, T. Trautmann, T. Varnai. M. Wendisch.

Несмотря на большой объем проведенных исследований и достигнутые результаты, на сегодняшний день не существует методов и способов контроля пылевой части пылегазового облака. Поэтому, современные подходы, связанные с планированием и выполнением санитарно-профилактических мероприятий, снижающих риск возникновения у работников угольных разрезов и жителей близлежащих населенных пунктов пневмопатологий вызванных мелкодисперсной пылью таких как: силикоз, пневмокониоз, прогрессирующий массивный фиброз, промышленный бронхит и другие, чаще всего носят общий вид. В основном они затрагивают только муниципальные образования, расположенные вблизи угольных разрезов и не учитывают те, которые в силу господствующей региональной

циркуляции атмосферы, более подвержены воздействию переносимой от взрывов аэрозоли.

Таким образом, обоснование и разработка метода прогноза параметров массопереноса пылегазового облака, при ведении взрывных работ на угольном разрезе является актуальной в научном и практическом планах задач.

**Цель работы:** разработка метода, прогнозирующего направление и расстояние распространения пылегазового облака в атмосфере.

**Основная идея работы** заключается в совместном учете морфологических характеристик мелкодисперсных частиц пыли, метеорологических прогнозов, влияния технологических параметров угольного разреза.

**Основные задачи исследований:**

- анализ современных подходов к определению параметров и направления распространения твердых частиц пылегазового облака, морфологических характеристик мелкодисперсной пыли и оценку пылевой нагрузки при проведении открытых горных работ;
- определение морфологических характеристик частиц пыли (форма, поперечная площадь, объем, фрактальная размерность Минковского), влияющих на массоперенос и седиментацию;
- разработка математической модели расчета высоты подъема пылегазового облака учитывающей нелинейность скорости вовлечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако;
- выявление влияния метеорологических параметров на массоперенос твердых мелкодисперсных частиц пылегазового облака;
- разработка метода прогноза распространения твердых мелкодисперсных частиц пылегазового облака, учитывающего их морфологические характеристики, метеорологический прогноз, параметры массового взрыва, и технологические параметры угольного разреза.

**Методы исследований.** В работе применялись общенаучные методы анализа исследований отечественных и зарубежных ученых в области мониторинга пылегазовых облаков, комплексное использование теоретических, а также

экспериментальных методов в лабораторных и производственных условиях, применение ЭВМ для определения поверхностных характеристик частиц пыли, расчета направления и дальности распространения пылегазового облака, сравнительный анализ результатов исследований с натурными данными. Статистические методы обработки данных наблюдений и экспериментов, методы аппроксимации экспериментальных данных, дифференциальное исчисление, численные методы, решение обыкновенных дифференциальных уравнений.

**Объект исследований** – мелкодисперсная пыль в пылегазовом облаке, образованном в результате проведения взрыва на угольном разрезе.

**Предмет исследований** – массоперенос мелкодисперсной пыли пылегазового облака в приземном слое атмосферы.

**Научные положения, защищаемые автором:**

– На основе экспериментальных данных конфокальной лазерной сканирующей микроскопии фактический объем и масса частиц пыли (в диапазоне размеров до 50 мкм) не превышают 13,5% объема и массы сферы, с вероятностью 99,9 %. Таким образом, фактическая масса отложившейся мелкодисперсной пыли в 7,4 раза меньше, чем при описании ее Стоксовской сферой;

– На основе уравнения Мещерского и I-го начала термодинамики разработана математическая модель расчета высоты подъема твердых частиц пылегазового облака после проведения массового взрыва на угольном разрезе, в отличии от существующих, учитывающая эмпирически выявленную нелинейную зависимость вовлечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако в пределах угольного разреза;

– На основе обработки изображений, полученных методом электронной сканирующей микроскопии получено, что эффективные площади частиц пыли респирабельных фракций (в диапазоне размеров до 50 мкм) не превышают 48,9 % с вероятностью 99,9 % проекционной площади сферы.

**Научная новизна работы** заключается:

– в выявлении морфологических характеристик респирабельных частиц мелкодисперсной пыли полученных на основе данных конфокальной лазерной

сканирующей микроскопии, электронной микроскопии, объясняющих продолжительность их витания в атмосфере;

– в разработке математической модели расчета высоты подъема пылегазового облака после проведения взрыва на угольном разрезе с учетом нелинейности скорости вовлечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается:

– результатами обработки данных (форм фактор частицы, объемные и поверхностные характеристики частиц пыли) полученными в ходе исследования мелкодисперсных частиц пыли методом конфокальной электронной сканирующей микроскопии, позволяющими объективно оценивать мелкодисперсные частицы пыли;

– результатами обработки данных по измерению габаритов пылегазового облака в ходе проведенных исследований процессов его возникновения и формирования;

– сходимостью результатов расчета с результатами эксперимента по контролю направления и дальности распространения твердых частиц пылегазового облака в приземном слое атмосферы.

**Личный вклад автора** заключается:

– в проведении комплекса экспериментальных исследований по определению параметров и направления распространения пылегазового облака в приземном слое атмосферы;

– в выявлении морфологических параметров мелкодисперсных частиц респираторных фракций;

– в разработке алгоритма прогнозирования направления и дальности распространения пылегазового облака в приземном слое атмосферы;

– в разработке математической модели расчета высоты подъема пылегазового облака на основе уравнения Мещерского и I-го начала

термодинамики учитывающую нелинейность скорости вовлечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако.

**Научное значение диссертации** заключается в опытным определении реального форм-фактора частицы пыли и обосновании необходимости его учета для определения массы витающей пыли и дальности распространения твердых частиц пылегазового облака.

**Отличие от ранее выполненных работ** заключается: в экспериментальном обосновании метода прогноза параметров массопереноса пылегазового облака при ведении взрывных работ на угольном разрезе с учетом морфологических параметров мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций, метеорологических параметров, начальных характеристик массового взрыва, технологических параметров угольного разреза.

**Практическая ценность результатов работы** состоит в том, что метод прогноза параметров массопереноса пылегазового облака, при ведении взрывных работ на угольном разрезе, позволяет спрогнозировать область распространения пылегазового облака в приземном слое атмосферы, а также корректировать проект массового взрыва, имея данные о параметрах планируемого взрыва и метеорологический прогноз.

### **Реализация работы**

Положения, разработанные в диссертационной работе, реализованы в работе АО «НЦ ВостНИИ» в области определения прогнозной запыленности и установления токсичности воды, почвы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на международной научно-практической конференции «16-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов» (ИПКОН РАН, 2023 г.), на международной научно-практической конференции «6-я Международная научная школа академика РАН К.Н. Трубецкого» «ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЗЕМНЫХ НЕДР» (ИПКОН РАН, 2024 г.).

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 9 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615783, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618277.

**Объем работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 130 наименований, приложения, изложенных на 154 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 32 таблицы.

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРОВ МАССОПЕРЕНОСА ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Пылевая обстановка рабочей зоны угольного разреза и прилегающих территорий**

Российская Федерация одна из лидирующих стран мира по добыче и экспорту угля. Кемеровская область является крупнейшим угледобывающим регионом России, так как в Кузбассе производится более половины, а именно 50,8% всего угля, добываемого в стране, в частности доля угля коксующихся марок составляет 57,1 % [1].

Однако добыча такого полезного ископаемого как уголь сопровождается рядом негативных факторов влияющих на окружающую среду, а именно:

- нарушением природного ландшафта;
- необходимостью вывода из эксплуатации больших площадей сельскохозяйственных земель;
- наличием в воздухе рабочей зоны угольного разреза, а также в приземном слое атмосферы прилегающих территорий мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций.

Пылевая обстановка, являясь одной из характерных черт предприятий открытой угледобычи, в широком смысле характеризуется мощностью выбросов пыли и последующей запыленностью приземного слоя атмосферы [2]. Пылевое загрязнение атмосферы угольного разреза в границах горного отвода и окрестных муниципальных населенных пунктов обусловлено проведением взрывных работ как одним из эффективных способов разрушения горной массы при добыче угля открытым способом [3].

Мелкодисперсные частицы пылегазового облака, образованного в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе, в большинстве случаев распространяются за границу горного отвода. Пыль респирабельных фракций (к

которым относятся частицы размером 10 мкм и меньше) распространяясь в приземном слое атмосферы и седиментируясь из пылегазового облака негативно воздействует на почву близлежащих территорий, меняя ее химический состав, а также химический состав растительного покрова [4]. Помимо этого, опасность мелкодисперсной пыли заключается в ее способности негативно влиять на срок службы оборудования, зданий и сооружений промышленной инфраструктуры. Выпадение в виде осадков, растворенных в атмосферной воде вредных веществ, вызванное сейсмическим воздействием взрыва, отложением в виде пыли веществ, которые при взаимодействии с водой (атмосферные осадки) образуют активные растворы разрушающие строительные материалы и конструкции [5, 6].

Атмосфера угольного разреза, после проведения взрывных работ помимо содержащегося в ней кислорода, углекислого газа, водяных паров, мелкодисперсной пыли, содержит в себе некоторые ядовитые газы: различные окислы азота, двуокись азота, окись углерода, сероводород, сернистый газ, и альдегиды.

Основной частью атмосферы является азот, небольшое колебание процентного содержания которого не влияет на организм человека, но при высоких температурах азот вступает в реакцию с водородом и кислородом. Наибольшую опасность представляет двуокись азота – это газ бурого цвета, имеющий характерный запах. При легкой степени отравления, наблюдается кашель, а при тяжелой наступает отек легких.

Также в атмосфере разреза содержится окись углерода, не имеющая ни запаха, ни цвета. Большая концентрация которой приводит к кислородному голоданию и в последствии смерти. К хроническим отравлениям приводит концентрация двуокиси углерода 0,01%.

Долю газов, составляющих атмосферу разреза после проведения взрывных работ составляет бесцветный газ-сероводород. Этот газ, действуя на нервную систему человека, раздражая слизистую оболочку глаз и дыхательных путей, является токсичным. При концентрации в атмосфере разреза 0,05% через 1 час

может наступить отравление сероводородом, при концентрации 0,1% наступает смерть.

Таким же по своему негативному воздействию на слизистые оболочки глаз и верхних дыхательных путей характеризуется не имеющий цвета сернистый газ. Удушье, которое наступает при острых отравлениях, а при кратковременном воздействии концентрации 0,05% может наступить смерть.

Таким же не имеющим цвета газом является формальдегид, по своему негативному действию схож с другими ядовитыми газами, он также воздействует на слизистые оболочки и центральную нервную систему вызывая нейродермит. Расстройство пищеварения, головные боли, заболевание верхних дыхательных путей наблюдается при концентрации газа 0,002%.

При разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом в атмосферу разрезов и в последствии в атмосферу за границей горного отвода выделяются газообразные вещества, содержание которых не должно превышать значений, указанных в таблице 1.

Таблица 1 – Предельно допустимая концентрация газообразных веществ

| Газы               | ПДК                    |                   |
|--------------------|------------------------|-------------------|
|                    | % содержания по объему | Мг/м <sup>3</sup> |
| Окислы азота       | 0,0001                 | 5                 |
| Оксид углерода     | 0,0016                 | 20                |
| Сероводород        | 0,00066                | 10                |
| Сернистый ангидрид | 0,00035                | 10                |
| Акролеин           | 0,00008                | 2                 |
| Формальдегид       | 0,00016                | 5                 |

Помимо выделяющихся в атмосферу разреза и за ее пределы вредных газов, при производстве массовых взрывов выделяется мелкодисперсная пыль, воздействие которой на организм человека может вызывать ряд заболеваний: пневмокониоз, силикоз, антропокоз, асбестоз. Наибольшую опасность представляет

соединение свободной двуокиси кремния  $SiO_2$ . Опасность возникновения пневмопатологий, в частности пневмокониоза возрастает с увеличением концентрации силикатной пыли. Предельно допустимые концентрации пыли на рабочих местах в угольных разрезах при разработке твердых полезных ископаемых открытым способом не должны превышать значений, приведенных в таблице 2.

Таблица 2 – ПДК различных типов пыли

| Тип пыли                                                                   | Концентрация в<br>Мг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Пыль, содержащая более 70% $SiO_2$                                         | 1                                   |
| Пыль, содержащая более 10% $SiO_2$                                         | 2                                   |
| Пыль асбестовая или смешанная, более 10% асбеста                           | 2                                   |
| Пыль угольная и угольно-породная, содержащая от 10% до 70% $SiO_2$         | 2                                   |
| Пыль силикатов, содержащая менее 10 % свободной $SiO_2$                    | 4                                   |
| Пыль барита, апатита, фосфорита, содержащая менее 10% свободной $SiO_2$    | 4                                   |
| Пыль угольная, не содержащая свободной $SiO_2$                             | 10                                  |
| Пыль слюды-сырца с примесью свободной $SiO_2$ до 28%                       | 1                                   |
| Пыль цемента, глины, минералов и их смесей не содержащих свободной $SiO_2$ | 6                                   |

Несмотря на то что проведение буровзрывных работ является основным источником пылевых выделений, в работе [7] авторы обращают внимание на то что в рамках проведенных исследований основным источником загрязнения являются отвалы. Отмечается что зона наибольшей экологической нагрузки распространяется в радиусе 2 километров от горнодобывающего предприятия, а растительность находится в состоянии экологического бедствия. Нормальное состояние биоты наблюдается на расстоянии 5,5 километров от основного источника пылевой нагрузки. Основным химическим соединением

присутствующем в частицах пыли является  $\text{SiO}_2$ , формирующим дискомфортные экологические условия.

Вопрос запыленности угольного разреза, а также прилегающих земель рассмотрен в работе [8], в которой авторы предлагают методику расчета параметров выбросов пыли при различных геотехнологических процессах. Также авторами показана необходимость учета ширины рабочей площадки на отвале, длины отвального фронта, и годового объема вскрышных пород, для расчета выбросов пыли при отвалообразовании и определении дефлирующих площадей.

Из этого следует что взрывные работы, являясь основным источником пылевыведения на разрезах, и этапом добычи твердых полезных ископаемых открытым способом, загрязняют атмосферу не только горнодобывающего предприятия, но и приземный слой атмосферы близлежащих населенных пунктов. Пылевая обстановка внутри разреза зависит от технологических, технических, а также природных факторов.

Повышенный уровень запыленности разреза приводит к ухудшению санитарно-гигиенических условий, отражаясь на здоровье не только работников горной промышленности, снижая производительность труда, но и на здоровье жителей близлежащих муниципальных образований.

## **1.2. Влияние мелкодисперсной пыли респираторных фракций на организм человека**

Одним из негативных факторов деятельности горнопромышленных предприятий по добыче полезных ископаемых является техногенное воздействие оказываемое на биосферу [9]. Открытые горные работы, как наиболее распространенный и эффективный способ разработки месторождений твердых полезных ископаемых, сопровождаются экологическими нарушениями природной среды в частности: загрязнением прилегающих территорий, воздушного и водного бассейнов [10]. Эффективность открытого способа разработки месторождений твердых полезных ископаемых тесно связан с возможностью использования

выемочно-погрузочного и горнотранспортного оборудования большой единичной мощности. В этой связи развитие машиностроительной базы, по созданию машин и оборудования для открытой геотехнологии стало реакцией именно на необходимость достижения требуемых показателей высокой интенсивности ведения горных работ. Следует заметить, что существующий и действующий технологический уклад находится именно в парадигме интенсивного развития, повышения производительности горного оборудования. Результаты исследований свидетельствуют о существующей корреляции между интенсивностью добычи твердых полезных ископаемых и техногенным загрязнением приземного слоя атмосферы в близлежащих населенных пунктах и степенью негативного воздействия мелкодисперсной пыли на организм человека [11-15]. Основными источниками техногенного загрязнения окружающей среды пылью, при разработке месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом являются процессы проведения буровзрывных работ и транспортировка горной массы [16] изображенные на рисунках 1,2.



Рисунок 1 – Массовый взрыв на угольном разрезе



Рисунок 2 – Процесс транспортировки горной массы

Выбросы частиц пыли, размеры которых превышают 2,5 мкм, но не превышают 10 мкм чаще всего образуются при движении транспортных средств по разрезу, а также в следствии ветровой эрозии [17]. Более половины частиц, выбрасываемых в атмосферу в результате работы горнопромышленных предприятий, имеют размер менее 5 мкм [18].

Размер частиц мелкодисперсной пыли как основной морфологический параметр позволяет им проникать в дыхательные пути человека, как схематично представлено на рисунке 3.

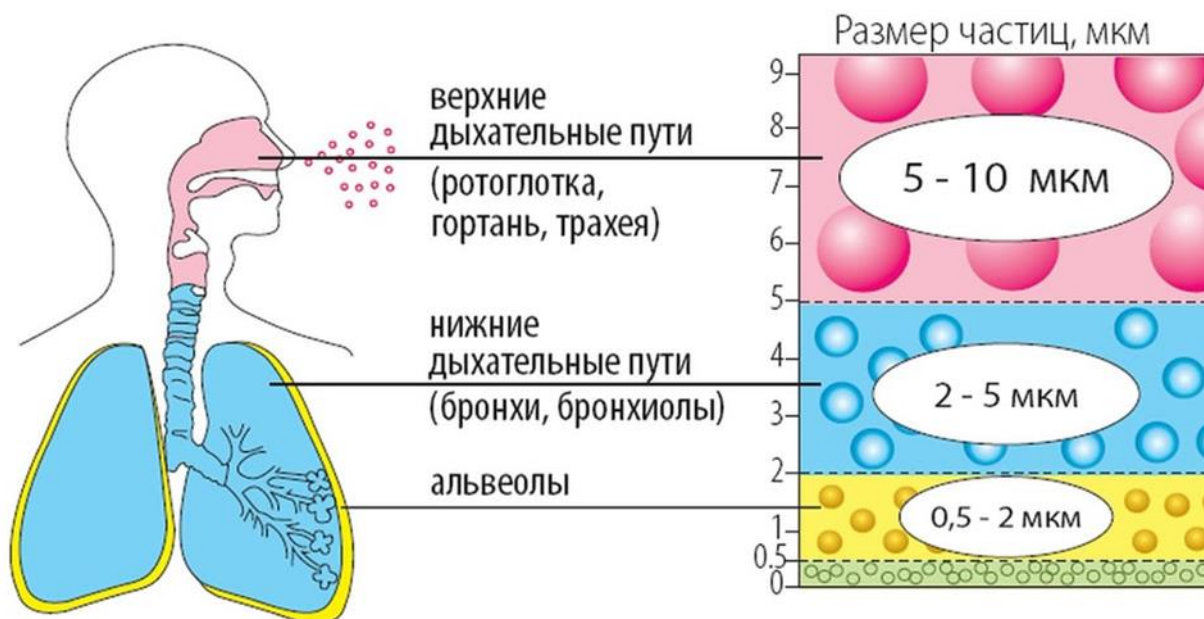


Рисунок 3 – Места проникновения частиц пыли в зависимости от их размера

В случае непродолжительного воздействия респираторных фракций пыли в организме могут усугубиться уже имеющиеся заболевания дыхательных путей, вызывая приступы бронхита и астмы. В то время как воздействие мелкодисперсных частиц в течении нескольких лет, при работе на горнодобывающем предприятии или жизни в близлежащем населенном пункте грозит возникновением хронического бронхита, появлением пневмопатологий, таких как: пневмокониоз, рак легких, рак гортани, силикоз, фиброз. Помимо этого, мелкодисперсная пыль, способствует возникновению болезней верхних дыхательных путей, глаз, заболеваний кожи в частности: дерматита, а иногда и рака кожи. Системное воздействие пыли, а именно всасывание через кожу веществ, образованных в результате растворения частиц пыли потом, приводит к раздражению кожных покровов и слизистых оболочек. Нахождение работников горной промышленности в сильно запыленных местах, влечет за собой раздражение верхних отделов желудочно-кишечного тракта, возникновении ишемической болезни сердца, застойной сердечной недостаточности, атеросклероза, эндотелиальной дисфункции, различного рода аллергических реакций [19-27]. Помимо размера частиц пыли, негативное влияние на организм человека оказывает ее элементный

состав. Преобладающим веществом в респирабельных фракциях пыли, образованных в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе, является соединение  $SiO_2$ , способное вызывать такие болезни как: пневмокониоз с последующим фиброзом, силикоз, силикотуберкулез, прогрессирующий фиброз легких [28]. Токсичным воздействием на живых существ и в частности на организм человека характеризуются такие элементы как  $Cu$ ,  $Zn$ ,  $Zr$ ,  $Rn$ ,  $Sr$ ., также присутствующие в частицах пыли, способные оказывать негативное влияние на генетическом уровне ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) [29].

В Соединенных Штатах Америки уровень смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, пневмопатологий и рака легких, причиной которых является концентрация мелкодисперсных частиц  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  составляет 52000 человек за год. В странах Европейского союза годовая смертность составляет 173000 человек. В Китае за 2010 год, 1,3 миллиона человек преждевременно скончалось из-за воздействия частиц  $PM_{2,5}$  [22].

Из данных Научно-исследовательского института комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний (г. Кемерово) и Института углехимии и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН, описанных в статье [25], следует что риск развития сердечно-сосудистых заболеваний, а также заболеваний дыхательной системы напрямую связан с деятельностью угледобывающих предприятий, а именно выделяемыми ими в атмосферный воздух различными фракциями мелкодисперсных пылевых частиц.

Механизмы массопереноса мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций за пределами горного отвода являются предметом большого числа научных изысканий. Седиментация частиц пыли по траектории распространения пылегазового облака в приземном слое атмосферы, определяется в основном метеорологическими параметрами: скоростью и направлением ветра, температурой и давлением атмосферного воздуха. В зависимости от интенсивности воздействия этих параметров респирабельная пыль распространяется за пределами горного отвода седиментируясь в близлежащих и удаленных населенных пунктах. В работе [27] установлено что частицы пыли  $PM_{10}$ , образованные в результате

проведения массовых взрывов на угольном разрезе перемещаются на расстояние до 140 км.

В различных странах мира существуют государственные стандарты устанавливающие нормативные значения содержания частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в атмосферном воздухе, при этом всемирная организация здравоохранения устанавливает значения экспозиции концентрации частиц PM<sub>2,5</sub>, в размере 10 мкг/м<sup>3</sup> (годовой) и 25 мкг/м<sup>3</sup> (24 часовой). Несмотря на это, в большинстве государств стандарт качества атмосферного воздуха в части содержания взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub> носит добровольный характер, и лишь в 11 государствах обязательный [28].

Санитарными правилами и нормами СанПиН 1.2.3685-21 Российской Федерации установлены следующие предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений для взвешенных частиц PM<sub>10</sub>:

- концентрация, предотвращающая раздражающее действие, рефлекторные реакции, запахи при воздействии до 20–30 минут (максимальная разовая) – 300 мкг/м<sup>3</sup>;

- концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при воздействии не менее 24 часов (среднесуточная) – 60 мкг/м<sup>3</sup>;

- концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при хроническом (не менее 1 года) воздействии (среднегодовая) – 40 мкг/м<sup>3</sup>;

для взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub>:

- концентрация, предотвращающая раздражающее действие, рефлекторные реакции, запахи при воздействии до 20–30 минут (максимальная разовая) – 160 мкг/м<sup>3</sup>;

- концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при воздействии не менее 24 часов (среднесуточная) – 35 мкг/м<sup>3</sup>;

- концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при хроническом (не менее 1 года) воздействии (среднегодовая) – 25 мкг/м<sup>3</sup>.

Следовательно можно сделать вывод, что работа горнодобывающих предприятий, в частности предприятий открытой угледобычи сопровождается выделением мелкодисперсной пыли респирабельных фракций, которая распространяясь внутри угольного разреза, а также за границей горного отвода наносит вред как работникам угольной промышленности, так и жителям близлежащих муниципальных образований, способствуя возникновению у них различных пневмопатологий, сердечно-сосудистых, кожных заболеваний, а также воздействуя на ДНК.

### **1.3 Анализ результатов исследования морфологических характеристик мелкодисперсных частиц пыли**

Мелкодисперсные частицы пыли, представляющие наибольшую опасность, являются одной из составляющих пылегазового облака. Их форма, а также другие морфологические параметры: размер, площадь, объем, важны при описании процессов массопереноса и седиментации. Особо мелкие частицы пыли находясь в атмосфере способны поглощать солнечную радиацию, тем самым оказывая воздействие на радиационный баланс Земли. Во многом степень и характер влияния мелкодисперсных частиц пыли на процессы в атмосфере Земли обусловлены продолжительностью их витания в воздухе. Крупные частицы пыли седиментируются вблизи источника их возникновения, тогда как мелкодисперсная пыль способна длительное время находится в атмосфере, распространяясь на значительное расстояние от места их появления. Существующие подходы не объясняют это ни количественно, ни даже качественно [29]. Несмотря на то что размер частицы является преобладающим фактором, который определяет скорость ее седиментации из пылегазового облака, форма также влияет на время витания частицы в атмосфере. При условии, когда массы равны, асферические частицы имея большую площадь поверхности, а значит и большее аэродинамическое сопротивление, седиментируются из облака с меньшей скоростью находясь в атмосфере более продолжительное время [30]. Таким образом, выявление

морфологических характеристик мелкодисперсных частиц пыли образованных в результате проведения взрывных работ на угольном разрезе актуально для определения времени их витания в атмосфере, а также для вскрытия механизмов массопереноса и седиментации их из пылегазового облака.

На сегодняшний день существуют методы, позволяющие определить лишь некоторые морфологические параметры частиц, например, метод сканирующей электронной микроскопии. Изображения, получаемые этим методом двумерны, а для определения объема частицы делается предположение о связи проекционной площади частицы с ее высотой. Для этого площадь поперечного сечения аппроксимируется как эллипсоид, тогда как его малая полуось является высотой частицы. Недостатком данного метода является то что высота частицы является рассчитанной, а не выявленной в ходе прямого измерения [31].

Определить высоту частицы возможно методом сканирующей атомно-силовой микроскопии [32]. Этот метод позволяет выявить истинный объем, а также более точно описать проекционную площадь поверхности частицы. Существенным недостатком данного метода является невозможность доступа микроскопа ко всем участкам поверхности частицы из-за размеров наконечника зонда, и из-за положения самой частицы. Поэтому площадь, определенная методом атомно-силовой микроскопии в среднем, превышает фактическую на 11% [33].

В работе [34], посвященной исследованию мелкодисперсных частиц минеральной пыли методами электронной сканирующей микроскопии и атомно-силовой микроскопии, авторами, на основе изучения образцов каолинита, на 46,5% состоящего из  $\text{SiO}_2$ , делается вывод о достоинствах и недостатках каждого из двух методов. Примеры изображений, полученных двумя методами показаны на рисунке 4.

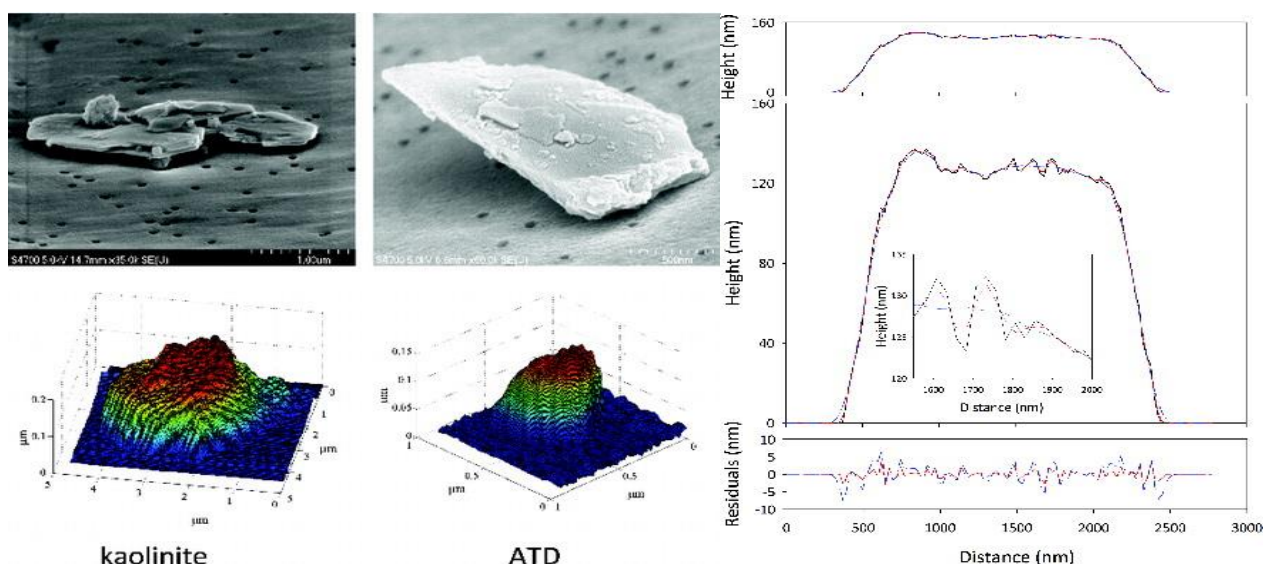


Рисунок 4 – Исследование образцов каолинита

В результате обработки полученных изображений авторы делают вывод о том, что высота частиц мала по сравнению с площадью поперечного сечения, то есть по своей форме частицы следует представлять в виде дисков или сплюснутых сфероидов с отношением большой оси к малой  $\ll 1$ .

На основе проведенного исследования авторами утверждается что плоская форма частиц влияет на многие процессы в атмосфере. Например, асферичность частиц усиливает прямое рассеивание солнечной радиации, тем самым воздействуя на процессы в атмосфере Земли, что также должно учитываться в расчетах и при построении климатических моделей. Помимо этого, плоские частицы оседают со скоростью составляющей 22% от скорости оседания частиц сферической формы такого же объема [35].

#### 1.4. Методы прогноза образования и массопереноса пылегазового облака

Проведение взрывных работ на угольном разрезе сопровождается образованием пылегазового облака, которое распространяясь за границей горного отвода загрязняет пылью приземный слой атмосферы в близлежащих населенных пунктах. Негативное влияние на биоту, оказываемое пылью оседентирующейся из облака, характеризуется способностью мелкодисперсной пыли респираторных

фракций вызывать ряд хронических заболеваний как органов дыхания: силикоз, фиброз, пневмокониоз, так и сердечно-сосудистой системы: ишемическая болезнь сердца, сердечная недостаточность, атеросклероза. Помимо этого, мелкодисперсная пыль наносит вред таким составляющим окружающей среды как объекты водного хозяйства, земли сельскохозяйственного назначения. Физико-химическое взаимодействие пыли с атмосферной водой, и затем седиментация полученных растворов за пределами горного отвода, снижает плодородность земель, увеличивая экологическую нагрузку на регион [37, 38].

В данное время существует отечественная методика, позволяющая рассчитать параметры неорганизованных выбросов газов и пыли в атмосферу при производстве взрывных работ на угольном разрезе [39]. Параметры, рассчитываемые с помощью данной методики приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры и единицы измерения пылегазового облака

| Параметры ПГО                              | Единицы измерения  |
|--------------------------------------------|--------------------|
| Объем пылегазового облака ( $V_0$ )        | $\text{м}^3$       |
| Высота подъема пылегазового облака (Н)     | $\text{м}$         |
| Температура газов в облаке $T_0$           | $^{\circ}\text{C}$ |
| Концентрация загрязняющих веществ $M_{г1}$ | $\text{мг/м}^3$    |
| Масса твердых частиц (пыли), $M_{п}$       | $\text{кг}$        |

Объем пылегазового облака образованного в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе согласно методике, описывается формулой (1).

$$V = 44000 * A^{1,08} \quad (1)$$

где  $A$  – количество взорванного взрывчатого вещества в тоннах.

Высота подъема пылегазового облака над поверхностью рассчитывается по формуле (2).

$$H_0 = b(164 + 0,258A) \quad (2)$$

где  $b$  – безразмерный коэффициент, (при глубине скважины до 15 м равен 1; при более глубоких скважинах 0,8).

Температура газов в облаке рассчитывается по формуле (3)

$$T_0 = T_v + \Delta T \quad (3)$$

где  $T_v$  – температура окружающего воздуха, °С.

Также существует методика расчета параметров промышленных взрывов [40], позволяющая определить не только составляющие пылегазового облака такие как количество образовавшейся пыли и газа, но и траекторию распространения облака в атмосфере. Приводится оценка влияния различных факторов на состав продуктов взрыва [41-46]. Учитывается влияние материала забойки скважины, крепости горных пород, высоты уступа, длины забойки, удельного расхода взрывчатых веществ, объема взрываемого блока на интенсивность пылеобразования. При этом процесс распространения пылегазового облака в атмосфере описывается процессом диффузии и массопереноса [47]. Скорость движения частиц описывается уравнением Стокса для равномерного движения частиц пыли в вязкой жидкости. Приведенные авторами подходы позволяют дать количественные оценки при определении объема пыли и газа при проведении взрывных работ.

В работе [48], посвященной анализу образования пылегазового облака при проведении взрывных работ на Лебединском ГОК дана характеристика карьера, проведено сравнение различных по элементному составу взрывчатых веществ, а также произведен расчет максимальных разовых и периодических выбросов пыли и вредных газов в атмосферу. При этом авторы относят метеорологическую обстановку, крепость пород, и тип используемых взрывчатых веществ к факторам, влияющим на образование пылегазового облака. Расчет вредных выбросов в атмосферу производился по методике [49], описывающей лишь количественные показатели взрыва такие как: валовый выброс вредных газов, максимальный разовый выброс вредных газов, валовый выброс пыли.

В работе [50] процесс распространения пылегазового облака в атмосфере описывается законами двух физических процессов: диффузии и перемещения частиц под действием гравитации и воздушных потоков в атмосфере. С помощью

методического подхода, разработанного в ИПКОН РАН, спрогнозирована траектория перемещения пылегазового облака, места седиментаций твердых и жидких веществ, а также процессы распространения в атмосфере газов и пыли, образующихся при взрыве.

Компьютерная программа «Взрывовыброс» позволяет рассчитать следующие величины:

- время достижения максимальной токсичности;
- максимальная величина показателя токсичности;
- максимальная концентрация токсичного газа,  $\text{мг/м}^3$ ;
- время наступления опасной зоны;
- время окончания опасной зоны;
- продолжительность опасной зоны;
- дисперсный состав пыли в момент максимальной опасности;
- плотность выпавшей пыли,  $\text{мг/м}^2$ ;
- гранулометрический состав выпавшей пыли.

Для расчета параметров выбросов используются масса и тип ВВ; скорость и направление ветра; крепость горной породы.

На рисунке 5 изображен карьер с отметкой места проведения взрыва, а также опасная зона, позволяющая оценить эколого-атмосферные последствия взрывных работ.

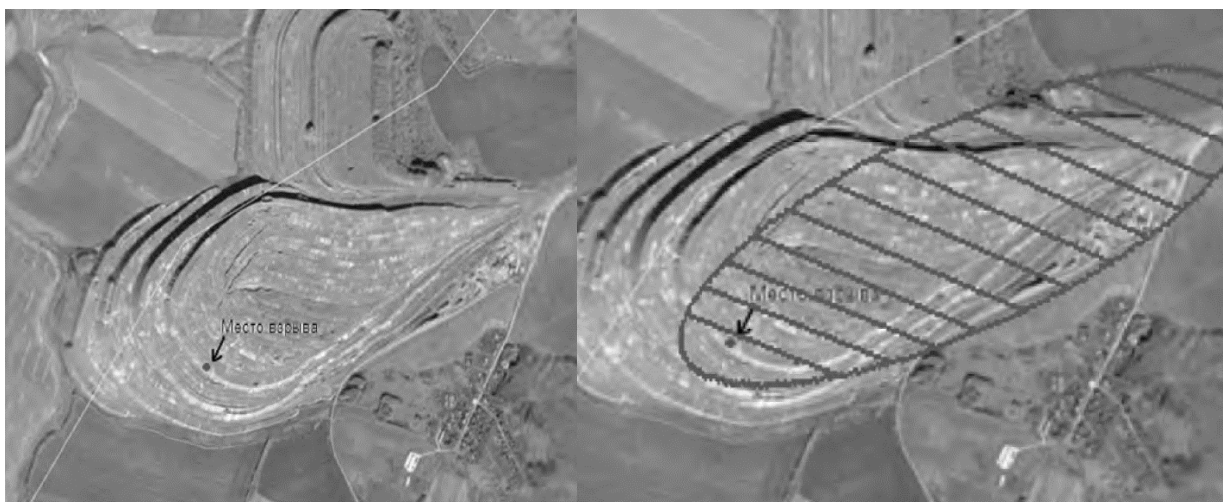


Рисунок 5 – Место взрыва и опасная зона

Анализ данной методики оценки параметров пылегазового облака и траектории его распространения позволяет сделать вывод что, она не учитывает ряд важнейших факторов, влияющих на процесс формирования, распространения и седиментации вредных веществ из пылегазового облака, позволяя лишь визуально оценить его последствия, и не дает ответ о степени отрицательного влияния взрывов, проводимых на угольных разрезах, на здоровье человека и экологическую обстановку в регионе.

К таким факторам необходимо отнести:

- скорость и направления ветра, дифференцированные по высоте;
- форм-фактор частиц пыли;
- влияние технологических параметров предприятия открытой угледобычи на процесс формирования и распространения пылегазового облака;
- влияние конвективного состояния атмосферы на высоту подъема пылегазового облака;
- учет мелкодисперсной фракции частиц пыли, в частности размером менее 1мкм.

### **1.5. Технические средства контроля пылегазовой и метеорологической обстановок угольного разреза**

Одним из приборов для контроля пылевой обстановки является аспиратор ПА-300М-2 представленный на рисунке 6.



Рисунок 6 – Аспиратор ПА-300М-2

Прибор пылевого контроля ПА-300М-2 предназначен для селективного отбора проб воздуха с последующим количественным анализом запыленности атмосферы. Отбор проб производится путем протягивания объема воздуха через комплекс фильтрующих материалов и поглотительных сосудов в течении заданного оператором времени. Объем воздуха, прогоняемого через фильтры по двум каналам, составляет 0,2 л/мин.-100л/мин. В таблице 4 представлены технические характеристики аспиратора ПА-300М-2.

Таблица 4 – Технические характеристики аспиратора ПА-300М-2

| Характеристики                                                                                                                            | Значения |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1                                                                                                                                         | 2        |
| Количество каналов с расходом (0,2-1,0) л/мин                                                                                             | 2        |
| Количество каналов с расходом (1-20) л/мин                                                                                                | 2        |
| Количество каналов с расходом (60-100) л/мин                                                                                              | 2        |
| Пределы допускаемой основной приведенной погрешности каналов с ротаметрами ( $\gamma$ ): с расходом (0,2-1,0) и (1-20) л/мин, %, не более | $\pm 5$  |

*Продолжение таблицы 4*

|                                                                                                                                                                             |                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Пределы допускаемой основной относительной погрешности каналов с датчиками расхода ( $\delta$ ): с расходом (60-100) л/мин, %, не более                                     | $\pm 5$                                                                                         |
| Пределы допускаемой относительной погрешности таймера ( $\delta_i$ ):<br>- при задании времени до 2 мин включительно, %, не более<br>- при времени свыше 2 мин, %, не более | $\pm 1,0$<br>$\pm 0,5$                                                                          |
| Пределы допускаемой дополнительной погрешности за счет отклонения температуры окружающего воздуха от нормальной на каждые 10 °С, %, не более                                | 0,5 $\gamma$ (с расходом (0,2-1,0) и (1-20) л/мин),<br>0,5 $\delta$ (с расходом (60-100) л/мин) |
| Дискретность задания времени отбора пробы, мин, более                                                                                                                       | 1                                                                                               |
| Значение перепада давления на поглотителе, кПа, не менее                                                                                                                    | 2,5                                                                                             |
| Напряжение питания, В:<br>- постоянным током<br>- переменным током                                                                                                          | 12<br>220 <sup>+22</sup> <sub>-33</sub>                                                         |
| Потребляемая мощность, В·А, не более                                                                                                                                        | 60                                                                                              |
| Время отбора без подзарядки, при полностью заряженном аккумуляторе, ч, не менее                                                                                             | 2                                                                                               |
| Среднее время восстановления приборов, ч, не менее                                                                                                                          | 8                                                                                               |
| Габаритные размеры, мм, не более                                                                                                                                            | 400×350×160                                                                                     |
| Масса прибора, кг, не более                                                                                                                                                 | 5                                                                                               |
| Масса аккумуляторного блока, кг                                                                                                                                             | 7,5                                                                                             |
| Средняя наработка на отказ, ч, не менее                                                                                                                                     | 10000                                                                                           |
| Средний срок службы, лет, не менее                                                                                                                                          | 6                                                                                               |

**Состав и принцип работы ПА-300М-2.**

Прибор состоит из следующих основных элементов:

- электроventильатора;
- 2-х мембранных насосов;
- контроллера с цифровым индикатором и клавиатурой;
- 2-х каналов отбора проб с датчиками расхода;
- 4-х каналов отбора проб с ротаметрами;
- сетевого источника питания.

Электровентилятор предназначен для прокачивания пробы воздуха через фильтры АФА. Мембранные насосы предназначены для прокачивания пробы воздуха через поглотители.

Принцип действия аспиратора ПА-300М-2 заключается в принудительном отборе объема воздуха через аэрозольные фильтры типа АФА через поглотители.

Также, к приборам пылевого контроля относится измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц АЭРОКОН-П изображенный на рисунке 7.



Рисунок 7 – Измеритель массовой концентрации частиц АЭРОКОН-П

Прибор АЭРОКОН-П непрерывно измеряет мгновенные значения массовой концентрации аэрозольных частиц в атмосферном воздухе, и сигнализирует о

превышении заданных пороговых значений для условий конкретного места. Прибор состоит из соединенных между собой измерительного и аналитического модуля. Предусмотрено два режима измерений и показаний:

- первый режим реализует анализ запыленности воздуха при отборе проб в течении 5 секунд;
- второй режим реализует анализ запыленности воздуха в течении всего периода измерений.

В таблице 5 представлены технические характеристики прибора АЭРОКОН-П.

Таблица 5 – Технические характеристики АЭРОКОН-П

|                                                                     |                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Принцип измерения                                                   | оптический                                                                                                                       |
| Диапазон измерения                                                  | 0 - 100 мг/м <sup>3</sup>                                                                                                        |
| Предел допускаемой основной погрешности измерения, %:               | ± 20 % приведенной в поддиапазоне (0 -1,0) мг/м <sup>3</sup><br>± 20 % относительной в поддиапазоне (1,0 -100) мг/м <sup>3</sup> |
| Размер частиц, мкм                                                  | 0,2 ...10,0                                                                                                                      |
| Разрешающая способность, мг/м <sup>3</sup>                          | 0,01                                                                                                                             |
| Изменение выходного сигнала за 8 ч. непрерывной работы              | не более 0,5 D                                                                                                                   |
| Время установления показаний T(0,90)                                | 60 с для выхода на 90% показаний                                                                                                 |
| Способ индикации                                                    | ЖК индикатор                                                                                                                     |
| Способ сигнализации                                                 | звуковая сигнализация с возможностью изменения уровня                                                                            |
| Способ отбора пробы измерительным модулем                           | активный, путем всасывания с помощью встроенного вентилятора                                                                     |
| Питание                                                             | -встроенный аккумулятор 12 В, 1.2 АЧ<br>- зарядное устройство для зарядки аккумуляторов от сети 220 В 50 Гц                      |
| Потребляемая мощность, ВА:                                          | 2,4                                                                                                                              |
| Срок службы, не менее, лет                                          | 10                                                                                                                               |
| Средняя наработка на отказ, ч                                       | 8000                                                                                                                             |
| Габариты и масса:<br>-измерительный модуль<br>-аналитический модуль | не более 120 x120x140 мм; не более 1,0 кг<br>не более 150 x70x180 мм; не более 0,8 кг                                            |
| Способ калибровки*                                                  | По рабочему эталону и с применением генератора аэрозольных частиц                                                                |

Прибор АЭРОКОН-П реализует оптический метод измерения. Лазерный луч мощностью 1мВт проходит через измерительную камеру в которой находятся взвешенные частицы, рассеивающие свет. Отраженный всеми частицами поток рассеянного света под углом в 45 градусов попадает на светоприемник. Использование угла рассеивания вместе с длиной волны луча лазера (630-680 нм) охватываются только те частицы, которые потенциально попадают в органы дыхания человека: легкие, бронхи, трахея.

### **Контроль аэрогазовой обстановки**

Один из приборов, осуществляющих аэрогазовый контроль является газоанализатор с принудительным пробоотбором Комета М-4, изображенный на рисунке 8.



Рисунок 8 – Комета М-4

Газоанализатор комета М-4 измеряет токсичные, горючие и опасные газы такие как: оксид, диоксид азота, метан, сероводород, диоксид серы, углеводороды, диоксид углеводорода. Контроль концентрации опасных газов реализован за счет амперометрического метода измерений, при котором значение концентрации опасного газа преобразуется в электрический сигнал, сила тока и напряжение

которого прямопропорциональны концентрации газа в атмосфере. В таблице 6 представлены технические характеристики газоанализатора Комета М-4.

Таблица 6 – Технические характеристики Комета 4-М

| Определяемый компонент                          | Диапазон измерений              | Пределы допускаемой основной погрешности, % |               | Время установления показаний Т <sub>0,9</sub> , с, не более |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------|
|                                                 |                                 | Приведенной                                 | Относительной |                                                             |
| Азота диоксид NO <sub>2</sub>                   | от 0,01 до 10 мг/м <sup>3</sup> | ±25                                         | –             | 60                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±25           |                                                             |
|                                                 | от 0,1 до 32 мг/м <sup>3</sup>  | ±15                                         | –             | 50                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
|                                                 | от 1 до 320 мг/м <sup>3</sup>   | ±15                                         | –             | 40                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
| Азота оксид NO                                  | от 0,01 до 5 мг/м <sup>3</sup>  | ±25                                         | –             | 45                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±25           |                                                             |
|                                                 | от 0,1 до 32 мг/м <sup>3</sup>  | ±15                                         | –             | 45                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
|                                                 | от 1 до 4000 мг/м <sup>3</sup>  | ±15                                         | –             | 75                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
| Сероводород H <sub>2</sub> S                    | от 0,1 до 32 мг/м <sup>3</sup>  | ±15                                         | –             | 60                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
|                                                 | от 1 до 200 мг/м <sup>3</sup>   | ±15                                         | –             | 60                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
| Серы диоксид SO <sub>2</sub>                    | от 0,01 до 4 мг/м <sup>3</sup>  | ±25                                         | –             | 60                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±25           |                                                             |
|                                                 | от 0,1 до 32 мг/м <sup>3</sup>  | ±15                                         | –             | 60                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
|                                                 | от 1 до 320 мг/м <sup>3</sup>   | ±15                                         | –             | 60                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±15           |                                                             |
| Углеводороды (C <sub>2</sub> -C <sub>10</sub> ) | от 50 до 3200 мг/м <sup>3</sup> | ±35                                         | –             | 60                                                          |
|                                                 |                                 | –                                           | ±35           |                                                             |

*Продолжение таблицы 6*

|                                     |                               |     |     |    |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----|-----|----|
|                                     | от 0,01 до 2 об. доля,<br>%   | 15  | –   | 45 |
|                                     |                               | –   | ±15 |    |
| Углерода диоксид<br>CO <sub>2</sub> | от 0,01 до 2 г/м <sup>3</sup> | ±25 | –   | 45 |
|                                     |                               | –   | ±25 |    |
|                                     | от 0,01 до 5 об. доля,<br>%   | ±15 | –   | 45 |
|                                     |                               | –   | ±15 |    |
|                                     | от 0,1 до 100 об. доля,<br>%  | ±15 | –   | 45 |
|                                     |                               | –   | ±15 |    |

Аэрогазовый контроль рабочей зоны также осуществляется с помощью переносного газоанализатора ГАНК -4(Р), изображенного на рисунке 9.



Рисунок 9 – Переносной газоанализатор ГАНК-4(Р)

Принцип работы газоанализатора ГАНК-4(Р) основан на следующих методах измерений: электрохимическом, термокаталитическом, полупроводниковом, фотометрический. Контролирует следующие газы:

– Диоксид азота (NO<sub>2</sub>);

- Диоксид серы (SO<sub>2</sub>);
- Диоксид углерода (CO<sub>2</sub>);
- Кислород (O<sub>2</sub>);
- Метан (CH<sub>4</sub>);
- Оксид азота (NO);
- Сероводород (H<sub>2</sub>S);
- Формальдегид (H<sub>2</sub>CO).

В таблице 7 приведены технические характеристики переносного газоанализатора ГАНК-4(Р)

Таблица 7 –Технические характеристики ГАНК-4(Р)

| Наименование характеристики                                                                                                                                                                | Значение                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Диапазоны измерения вредных веществ, мг/м <sup>3</sup> , (% об.)<br>- в атмосферном воздухе (А)<br>- в воздухе рабочей зоны (Р)<br>- расширенный диапазон (АР)                             | от 0,5 ПДКсс до 0,5 ПДКр.з.<br>от 0,5 ПДКр.з. до 20 ПДКр.з.<br>от 0,5 ПДКсс до 0,5 ПДКр.з.;<br>от 0,5 ПДКр.з. до 20 ПДКр.з. |
| Пределы основной относительной погрешности измерений                                                                                                                                       | ±20%                                                                                                                        |
| Пределы допускаемой дополнительной погрешности, обусловленной влиянием температуры и давления, а также содержанием не измеряемых компонентов газовой смеси в долях от основной погрешности | 0,2                                                                                                                         |
| Время прогрева газоанализатора после включения, не более                                                                                                                                   | 15 мин                                                                                                                      |
| Продолжительность отбора пробы с использованием встроенных датчиков, не более                                                                                                              | 20 с                                                                                                                        |
| Продолжительность отбора пробы с использованием сменных химкассет, не более                                                                                                                | 30 с                                                                                                                        |
| Количество разовых измерений концентраций одной химкассетой, не менее                                                                                                                      | 1000                                                                                                                        |
| Потребляемая мощность, не более                                                                                                                                                            | 8 ВА                                                                                                                        |
| Время непрерывной работы газоанализатора от встроенного аккумулятора, не менее                                                                                                             | 4 ч                                                                                                                         |
| Время зарядки аккумулятора, не более                                                                                                                                                       | 5 ч                                                                                                                         |
| Расход анализируемого воздуха на входе газоанализатора                                                                                                                                     | (0,5 ± 0,1) л/мин                                                                                                           |

*Продолжение таблицы 7*

|                                                              |                    |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|
| Объем памяти, не менее                                       | 999 записей        |
| Зарядка аккумулятора от сети переменного тока                | 220 В, 50 Гц       |
| Напряжение питания от встроенного аккумулятора               | 12 В               |
| Подвод анализируемого воздуха                                | встроенный насос   |
| Тип разъема для подключения к ПК                             | mini-USB           |
| Габаритные размеры газоанализатора без сумки-кофра, не более | 250 x 200 x 150 мм |
| Габаритные размеры газоанализатора с сумкой-кофром, не более | 450 x 350 x 250 мм |
| Масса газоанализатора без сумки-кофра, не более              | 3,5 кг             |
| Масса газоанализатора с сумкой-кофром, не более              | 8 кг               |

**Технические средства контроля метеорологической обстановки**

Контроль метеорологических параметров приземного слоя атмосферы таких как: скорость и направления ветра осуществляется прибором анеморумбометром МПВ ФЗ-116 представленным на рисунке 10.



Рисунок 10 – Анеморумбометр МПВ ФЗ-116

Контроль скорости ветра происходит измерением счётчиком скорости вращения ветровых чашек за определенный период времени. Контроль направления ветра осуществляется флюгером, который приводит в действие датчик угловой скорости. Технические характеристики анеморумбометра МПВ ФЗ-116 представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Технические характеристики анеморумбометра МПВ ФЗ-116

| Контролируемые параметры                         | Направление, скорость ветра |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| Диапазон измерения скорости ветра                | 0-30 м/с                    |
| Начальный порог измерения скорости ветра         | <0,5 м/с                    |
| Диапазон непрерывных измерений направления ветра | 0-360°                      |

Контроль температуры атмосферы осуществляется портативным цифровым термометром PORTE3BİK изображенным на рисунке 11.



Рисунок 11 – Портативный цифровой термометр PORTE3BİK

Технические характеристики термометра приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики PORTE3BİK

|                       |                                                                                       |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Диапазон измерений    | -50°C - 200°C                                                                         |
| Погрешность измерений | 0,5% ±1°C (-50°C до 0°C)<br>0,3% ±1°C (0°C до 1000°C)<br>0,3% ±1°C (1000°C до 1300°C) |
| Частота измерений     | 2,5 раза в секунду                                                                    |
| Индикация             | цифровая                                                                              |

Измерения температуры поверхности грунта проводятся с помощью промышленного термометра Dwyer SIT на солнечной батарее изображенного на рисунке 12.



Рисунок 12 – Датчик температуры поверхности грунта Dwyer SIT

Технические характеристики датчика температуры приведены в таблице 10.

Таблица 10 –Технические характеристики Dwyer SIT

|                         |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| Точность показаний      | 1°C                          |
| Диапазон измерений      | -45°C-150°C                  |
| Требования к питанию    | Питание от солнечной батареи |
| Периодичность измерений | 10 секунд                    |
| Дисплей                 | ЖК-дисплей                   |

Таким образом, сегодня существует достаточно развитая техническая база, позволяющая проводить мониторинг как запыленности и загазованности рабочей

зоны угольного разреза и прилегающих территорий, так и контролировать метеорологическое состояние атмосферы в частности такие параметры как: скорость ветра, температура воздуха, температура поверхности грунта. Также существует ряд методик, характеризующих параметры пылегазового облака такие как: высоту его подъема, температуру газов в нем, объем облака, количество вредных веществ и газов в облаке.

### **1.6. Выводы. Постановка задач исследования**

В главе 1 выполнен анализ исследований по вопросам пылегазовой обстановки угольного разреза, влияние мелкодисперсной пыли респирабельных фракций, образованных в результате проведения массовых взрывов на организм человека. Приведены существующие на сегодняшний день методики расчета параметров пылегазового облака связанные с массопереносом пылевой аэрозоли, а также сделан обзор современных технических средств мониторинга пылевой обстановки рабочей зоны угольного разреза и прилегающих территорий, и технических средств мониторинга метеорологических параметров атмосферы.

Несмотря на имеющееся сегодня разнообразие как методической, так и технической базы следует сделать вывод, что современные методики оценки параметров пылегазового облака не учитывают ряд важнейших факторов, влияющих как на формирование пылевой составляющей облака, так и на его дальнейшее распространение в приземном слое атмосферы за границей горного отвода, и седиментацию частиц мелкодисперсной пыли респирабельных фракций из него. К таким факторам относятся:

- учет региональных метеорологических параметров (скорость ветра на высоте подъема пылегазового облака, температура поверхности грунта, температура воздуха, скорость восходящих конвективных потоков воздуха, время года);
- учет технологических параметров угольного разреза (глубина разреза, уровень горизонта взрываемого блока, угол откоса бортов разреза, высота уступа);

- учет морфологических параметров частиц мелкодисперсной пыли респирабельных фракций, образованных в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе (форма, габариты, площадь, объем);

Решением научной задачи прогноза формирования и распространения пылегазового облака за границей горного отвода является разработка метода прогноза параметров массопереноса пылегазового облака при ведении взрывных работ на угольном разрезе. Данный метод позволит уточнить начальные параметры, дальность и траекторию распространения пыли, содержащейся в пылегазовом облаке. Разработка метода, определяющего периодичность и интенсивность загрязнения пылью приземного слоя атмосферы в муниципальных образованиях и в горном отводе угольного разреза, для планирования и выполнения санитарно-профилактических мероприятий, является актуальной задачей. Для решения данной задачи необходимо:

- определить морфологические характеристики частиц пыли (форму, поперечную площадь, объем, фрактальную размерность Минковского), влияющие на массоперенос и седиментацию;
- учесть влияние атмосферной конвекции в рамках угольного разреза на процесс формирования и последующего распространения пылегазового облака;
- выявить влияние метеорологических параметров на массоперенос твердых мелкодисперсных частиц пылегазового облака;
- разработать метод прогноза распространения твердых мелкодисперсных частиц пылегазового облака, учитывающий их морфологические характеристики, метеорологический прогноз, параметры массового взрыва, и технологические параметры угольного разреза.

## **ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ ПЫЛИ И ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА**

### **2.1. Исследование запыленности приземного слоя атмосферы Кемеровской области**

В наши дни единая система нормирования содержания количества мелкодисперсной пыли в рабочей зоне угольного разреза и населенных пунктов отсутствует. Практически в каждой стране мира существуют свои национальные стандарты уровня допустимой концентрации мелкодисперсной пыли респирабельных фракций [51].

Страны Запада предписывают контролировать пылевую нагрузку с учетом не только элементного состава частиц пыли, но и с учетом ее дисперсного состава, ведь именно размер частицы позволяет ей проникать и задерживаться в альвеолах легких. В работе [52] описано влияние мелкодисперсной пыли на организм человека, а также особо акцентировано внимание на твердые частицы, размер которых менее 10 мкм.

Следует заметить, что пыль в пылегазовом облаке, образованном в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе, распространяясь за границей горного отвода, является основным источником загрязнения приземного слоя атмосферы в близлежащих населенных пунктах.

#### **Определение фоновой запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области**

Для исследования механизма распространения пылевой части пылегазового облака, в том числе частиц мелкодисперсной пыли из него, в течении июня 2023 г. в границах Кемеровской области проводилось исследование запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах. Для оценки запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области были проведены замеры количества витающей пыли частиц размеров: 0,3 мкм, 0,5 мкм, 1 мкм, 2,5 мкм, 5 мкм, 10 мкм. Такие замеры производились счётчиком пылевых

частиц СЕМ DT-9880М, технические характеристики которого представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Технические характеристики СЕМ DT-9880М

| Массовая концентрация (DT-9880М/DT-9881М)          |                                              |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Каналы                                             | PM2.5/PM10                                   |
| Диапазон измерения                                 | 0-2000мкг/м <sup>3</sup>                     |
| Единицы измерения                                  | 1мкг/м <sup>3</sup>                          |
| Измеритель содержания взвешенных твердых частиц    |                                              |
| Каналы                                             | 0,3; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10 мкм              |
| Производительность                                 | 0,1 фут <sup>3</sup> (2,83 л/мин)            |
| Точность измерений                                 | 50% при 0,3 мкм; 100 % для частиц > 0,45 мкм |
| Случайная ошибка                                   | 5% при 2000000 частиц на фут <sup>3</sup>    |
| Запись данных                                      | 5000 проб (MicroSD карта)                    |
| Режимы измерения                                   | Суммарный, дифференциальный, концентрация    |
| Детектор содержания формальдегида                  |                                              |
| Диапазон значений                                  | 0,01-5,00 частей на млн. (PPM)               |
| Базовая точность                                   | ±5%                                          |
| Единица измерения                                  | 0,01ppm                                      |
| Детектор угарного газа                             |                                              |
| Диапазон значений                                  | 10-1000PPM                                   |
| Базовая точность                                   | ±5%                                          |
| Единица измерения                                  | 1ppm                                         |
| Психрометр                                         |                                              |
| Диапазон измерения температур окружающего воздуха  | 0°C до 50°C(32°F до 122°F)                   |
| Диапазон значений температуры точки росы           | 0°C до 50°C(32°F до 122°F)                   |
| Диапазон измерения относительной влажности         | 0 до 100%                                    |
| Точность измерения температуры окружающего воздуха | ±0,5°C(0,9°F) 10°C до 40°C                   |
|                                                    | ±1,0°C(1,8°F) при др. температурах           |

Счетчик пылевых частиц реализует электроиндукционный метод регистрации частиц и способен пропускать через себя объем воздуха равный 2,83 литра в минуту. Данный прибор служит для быстрого измерения содержания

взвешенных твердых частиц в воздухе, а также определяет температуру и относительную влажность воздуха.

Замеры производились в трех точках каждого из исследуемых населенных пунктов Кемеровской области, тем самым обеспечивая максимальное перекрытие площади района. Для обеспечения объективности и единства данных, измерения производились в дневное время суток, чтобы исключить влияние атмосферных факторов, вызванных: суточным температурным режимом атмосферы и суточным градиентом скорости ветра. Данные результатов измерений представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Средние значения запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области

|                   | Количество частиц в шт. |         |       |         |       |        |
|-------------------|-------------------------|---------|-------|---------|-------|--------|
| Населенные пункты | 0.3 мкм                 | 0.5 мкм | 1 мкм | 2.5 мкм | 5 мкм | 10 мкм |
| Кемерово          | 84806                   | 21370   | 3581  | 563     | 135   | 76     |
| Октябрьский 31    |                         |         |       |         |       |        |
| Кедровка          | 84908                   | 20098   | 2928  | 366     | 77    | 40     |
| Берёзовский       | 91156                   | 22089   | 3721  | 513     | 114   | 65     |
| Сосновка 2        | 140636                  | 34332   | 5060  | 571     | 113   | 56     |
| Анжеро-Судженск   | 150158                  | 43218   | 9438  | 1430    | 334   | 182    |
| Яя                | 311944                  | 72920   | 9465  | 937     | 336   | 177    |
| Ижморский         | 204558                  | 47897   | 6919  | 884     | 211   | 106    |
| Берикуль          | 189305                  | 43105   | 5582  | 644     | 141   | 82     |
| Мариинск          | 208623                  | 48771   | 6733  | 786     | 147   | 69     |
| Тяжинский         | 159861                  | 41764   | 7972  | 1363    | 408   | 206    |
| Тисуль            | 130842                  | 30796   | 4458  | 561     | 95    | 50     |
| Верх Чебула       | 152176                  | 35089   | 4940  | 628     | 132   | 71     |
| Красный Яр        | 155602                  | 35044   | 4374  | 421     | 68    | 29     |
| Новокузнецк       | 166183                  | 59399   | 15606 | 2530    | 554   | 300    |
| Мыски             | 92173                   | 27349   | 5215  | 787     | 139   | 66     |
| Междуреченск      | 141991                  | 41077   | 8878  | 1469    | 347   | 185    |
| Прокопьевск       | 71547                   | 22231   | 4977  | 775     | 182   | 87     |

*Продолжение таблицы 12*

|                   |        |       |      |      |     |     |
|-------------------|--------|-------|------|------|-----|-----|
| Киселевск         | 80422  | 22921 | 5100 | 814  | 185 | 97  |
| Белово            | 102332 | 31990 | 6780 | 1053 | 223 | 107 |
| Полысаево         | 90764  | 26728 | 5629 | 853  | 203 | 96  |
| Ленинск-Кузнецкий | 129495 | 38354 | 8059 | 1179 | 221 | 112 |

По результатам данных измерений построены диаграммы запыленности приземного слоя атмосферы, представленные на рисунке 13а, б, в, г, д, е.

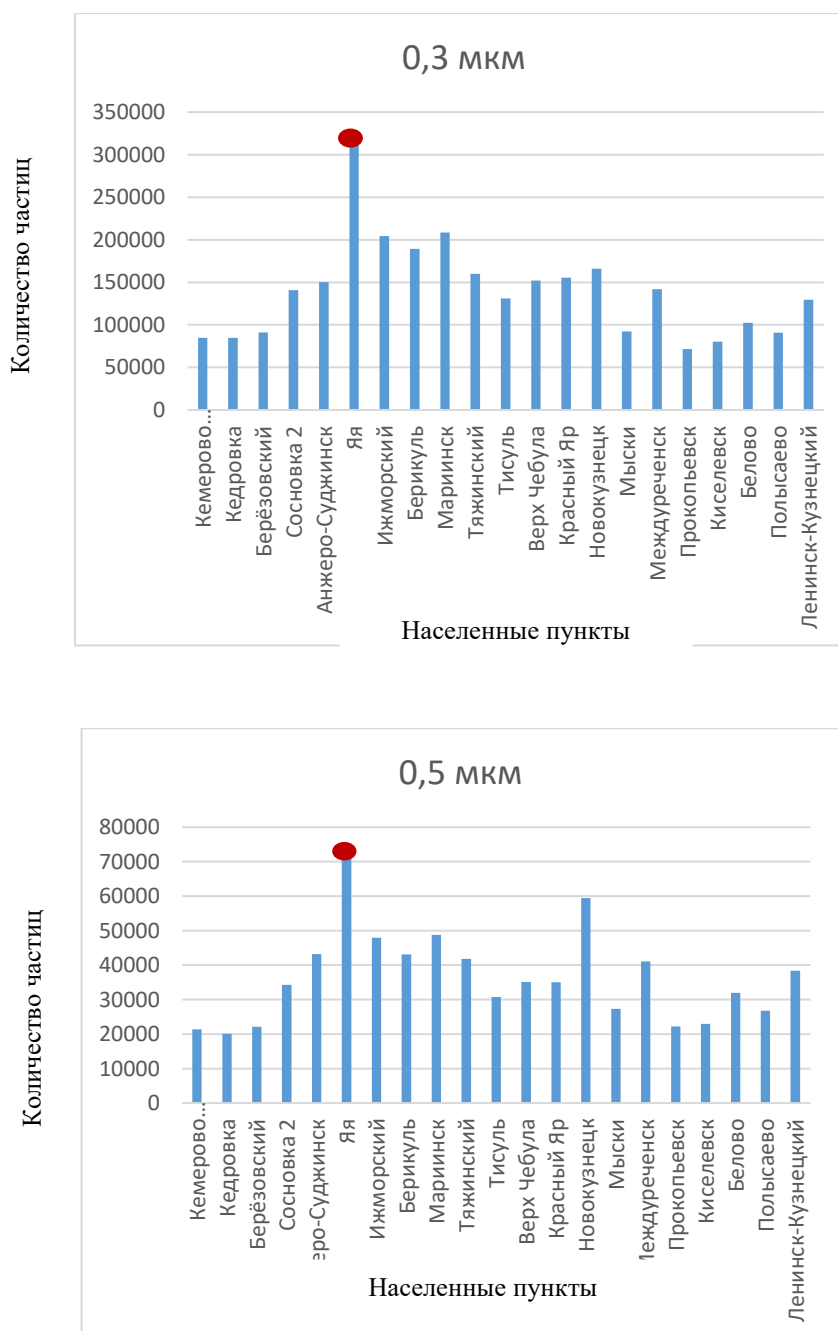


Рисунок 13 – Диаграммы запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области (лист 1 из 3)

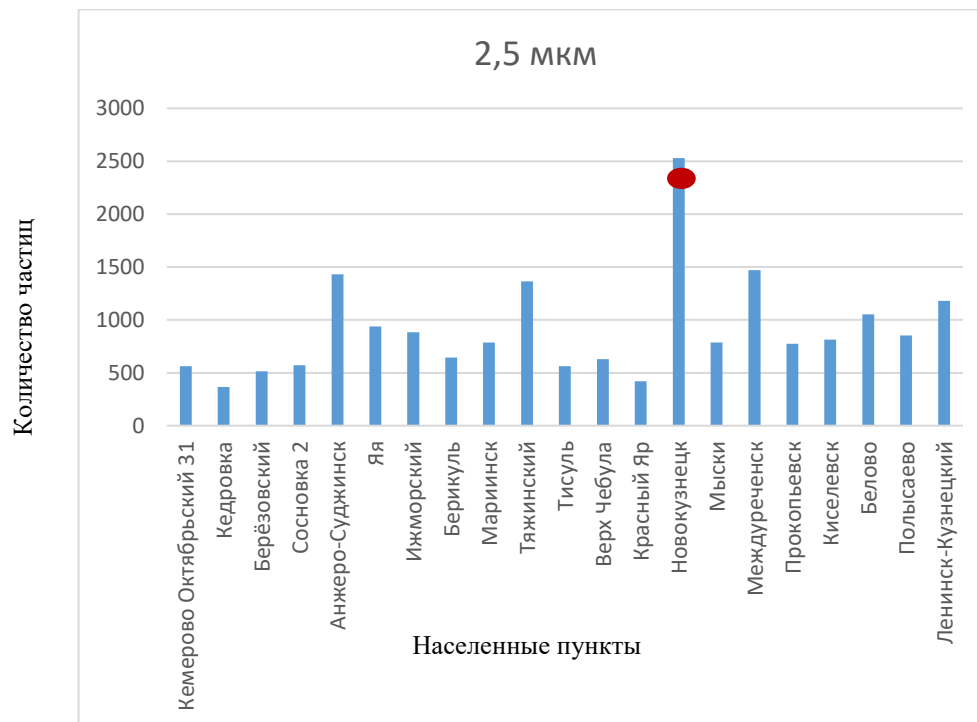
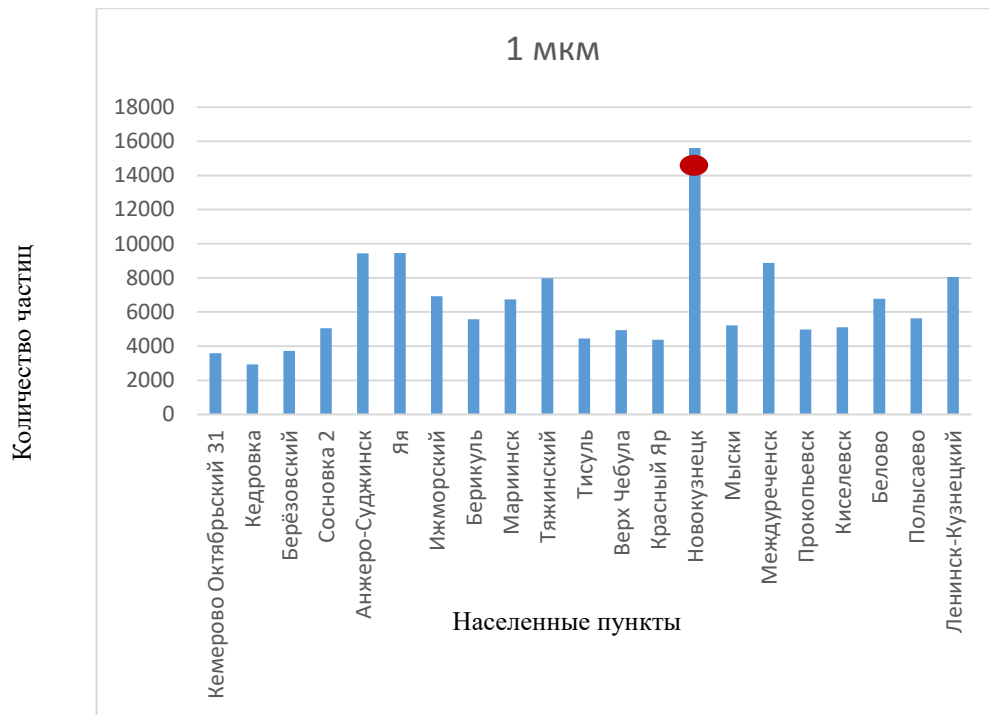


Рисунок 13 (лист 2 из 3)

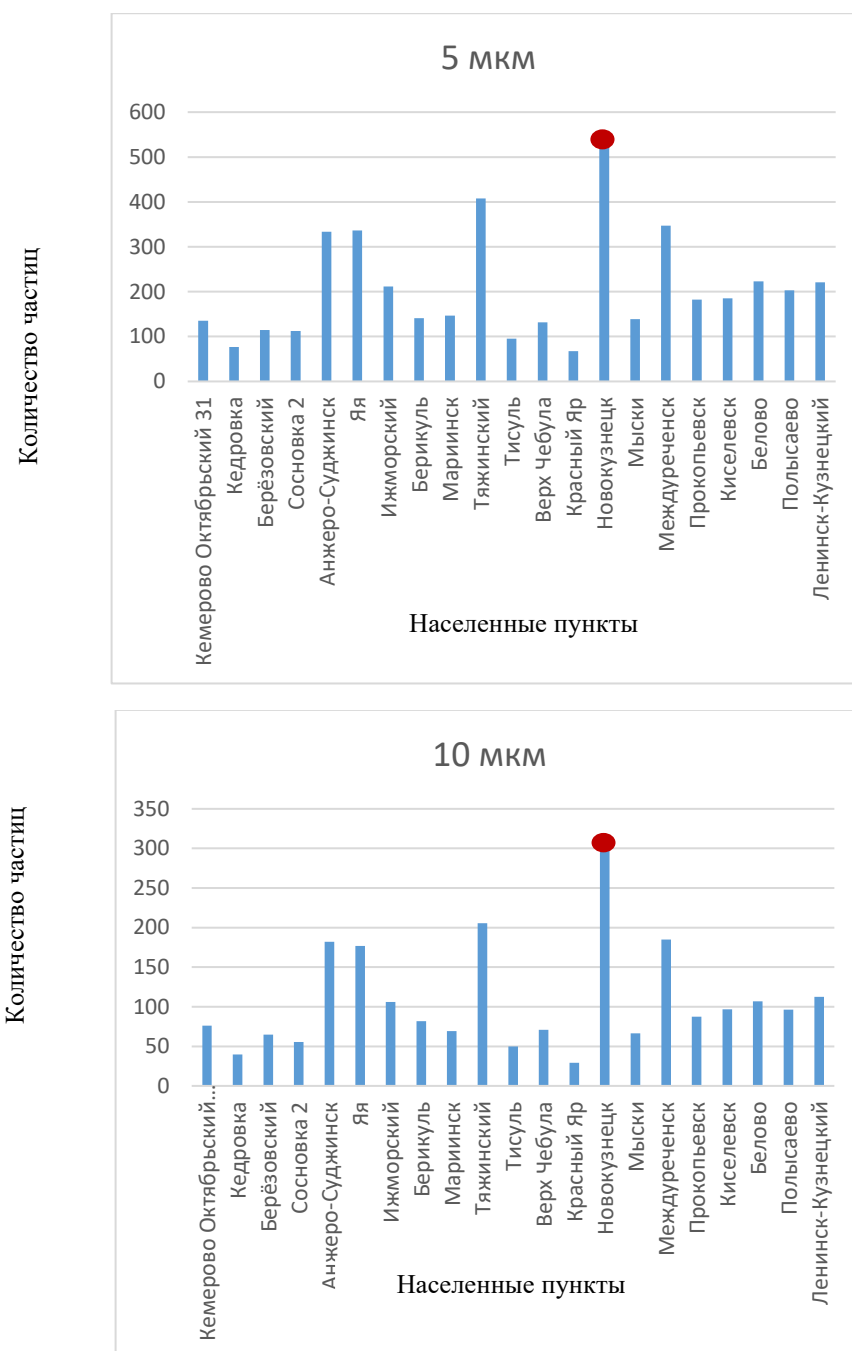


Рисунок 13 (лист 3 из 3)

Исходя из данных замеров, а также из приведенных диаграмм следует, что наибольшая концентрация мелкодисперсных частиц пыли фракций 0,3 мкм, 0,5 мкм зафиксирована в населенном пункте Яя, находящемся в 79 км к Северо-Востоку от Кедровского угольного разреза, что говорит о способности респираторных фракций пыли преодолевать значительные расстояния за границей горного отвода, и влиять на экологическую обстановку региона.

Пики запыленности фракциями 2,5, 5, 10 мкм зафиксированы в населенном пункте Новокузнецк, на Юге Кемеровской области. Учитывая географическое расположение данного населенного пункта, а также количество близлежащих горнодобывающих предприятий, таких как: разрез Бунгурский, разрез Степановский, разрез Кийзасский, разрез Томусинский, разрез Ольжерасский, разрез Тайлепский, разрез Талдинский. Показания, полученные за границей санитарно-защитной зоны, свидетельствуют о способности пыли пылегазового облака распространяться за границей горного отвода к близлежащим населенным пунктам, тем самым подтверждая актуальность прогнозирования массопереноса пылегазового облака после проведения взрывных работ на угольном разрезе.

## **2.2. Исследование морфологических характеристик частиц мелкодисперсной пыли**

Массоперенос пыли пылегазового облака в приземном слое атмосферы, а также седиментация частиц из него определяется процессом циркуляции масс атмосферного воздуха и процессом диффузии твердых веществ [53].

Крупные фракции частиц пыли (более 50 мкм) образованные в результате проведения взрывных работ на угольном разрезе, в своем большинстве оседают вблизи источника их возникновения [54, 55]. Также на количественные характеристики запыленности приземного слоя атмосферы влияет рельеф местности, особенности региональных метеорологических параметров, а также время суток, связанное с ростом солнечной активности [56].

Однако, следует заметить, что большинство исследований в данном направлении посвящены определению концентрации пылевой взвеси, объема образовавшегося облака [57, 58 59], и не учитывают ее дисперсный, элементный составы, а также ряд морфологических характеристик: форма, размер, площадь, объем частиц пыли.

Ведь именно дисперсный состав витающей пыли и ее морфологические характеристики влияют на способность частиц проникать в легкие, что в конечном

счете выражается появлении у рабочих, а также жителей близлежащих населенных пунктов легочных патологий, таких как: силикоз, пневмокониоз, эмфизема легких, атрофическая бронхопатия [60, 61].

### 2.2.1 Отбор образцов пыли на угольном разрезе

Для изучения дисперсного и элементного составов мелкодисперсной пыли, в марте 2023 г. на угольном разрезе Кемеровской области были отобраны образцы пыли, образованной в результате проведения массовых взрывов. Голубыми метками отмечены крайние точки расположения взрываемого блока с их координатами (рисунок 14). Взорванный блок отмечен красным цветом.



Рисунок 14 – Расположение взрываемого блока

Для сбора образцов пыли по периметру блока были расположены 14 мелкозернистых сеток из мельтблауна и спанбонда, с параметрами сторон 175×95 мм. Помимо, рядом со взрываемым блоком были расположены аналитические аэрозольные фильтры АФА-40.

Схема расположения установленных сеток и аэрозольных фильтров показана на рисунке 15.



Рисунок 15 – Расположение пылеулавливающих устройств

Голубыми метками показаны границы блока с координатами. Зелеными показаны установленные по периметру блока мелкозернистые сетки. Желтыми метками показаны установленные аэрозольные фильтры АФА-40. Красной линией изображен периметр взрываемого блока.

Учитывая состояние погоды в день проведения массового взрыва, а именно преимущественно северный ветер, мелкозернистые сетки были сконцентрированы на участке между южными границами блока по вероятнейшему направлению распространения пылегазового облака.

### 2.2.2 Ситовый анализ отобранных образцов пыли

Собранная на подложках пыль была подвергнута ситовому анализу, результаты которого представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты ситового анализа

| Размер ячейки, мм | Масса пыли, г |
|-------------------|---------------|
| 10                | 1,0055        |
| 7                 | 4.3598        |
| 5                 | 3.7350        |

*Продолжение таблицы 13*

|          |          |
|----------|----------|
| 3        | 5,9346   |
| 2,5      | 0,1469   |
| 2        | 5,7389   |
| 1,6      | 0,1340   |
| 1        | 9,1182   |
| 0,8      | 7,9438   |
| 0,63     | 5,1170   |
| 0,5      | 7,3242   |
| 0,4      | 5,8997   |
| 0,315    | 6,5664   |
| 0,2      | 10,3576  |
| 0,1      | 9,9534   |
| 0,05     | 8,7466   |
| <0.05    | 13,6476  |
| $\Sigma$ | 105,7292 |

Из данных ситового анализа следует вывод что мелкодисперсная пыль, включающая в себя частицы РМ 10, РМ 2,5 и более мелкие представлена большой массой (13,64 гр.), что составляет 13%. Исходя из этого становится очевидно, что в результате проведения буровзрывных работ на угольном разрезе из всей образованной пыли, наибольшей массой обладает меньшая по размеру из фракций. Именно в ней содержатся наиболее мелкие и опасные для здоровья человека частицы РМ 2,5. Такие частицы при вдыхании оказывают на организм крайне негативное воздействие, вызывая различные повреждения легочных тканей, а также способствуя возникновению различных респираторных заболеваний и легочных патологий.

Долговременное воздействие на органы дыхания частиц размера РМ 2,5 и меньше, сильно влияет на развитие различных сердечнососудистых и легочных

патологий, что увеличивает риск смертности. Напротив, частицы размером больше чем РМ 10 не так сильно влияют на смертность и заболеваемость, так как остаются в верхней части дыхательных путей человека [62, 63].

### 2.2.3 Рентгенофлуоресцентный спектральный анализ образцов пыли

Образцы отобранной пыли были подвергнуты рентгенофлуоресцентному спектральному анализу (РФА) для определения вещественного состава результаты которого представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Данные спектрального анализа

| Химический элемент\Соединение  | Содержание |
|--------------------------------|------------|
| Na <sub>2</sub> O              | 1,25 %     |
| MgO                            | 2,27 %     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11,88 %    |
| SiO <sub>2</sub>               | 51,76 %    |
| K <sub>2</sub> O               | 1,59 %     |
| CaO                            | 8,74 %     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,72 %     |
| MnO                            | 0,152 %    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6,15 %     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,20 %     |
| SO <sub>3</sub>                | <0,02 %    |
| Cl                             | 0,023 Ppm  |
| Cr                             | 92 Ppm     |
| V                              | 100 Ppm    |
| Ni                             | 47 Ppm     |
| Cu                             | 39 Ppm     |
| Zn                             | 88 Ppm     |
| Rb                             | 55 Ppm     |

Продолжение таблицы 14

|    |         |
|----|---------|
| Sr | 261 Ppm |
| Zr | 198 Ppm |
| Ba | 538 Ppm |
| U  | <3 Ppm  |
| Th | 4 Ppm   |
| Y  | 31 Ppm  |
| Nb | 12 Ppm  |
| Pb | 16 Ppm  |
| As | <5 Ppm  |
| Mo | <3 Ppm  |

Из данных рентгенофлуоресцентного анализа следует, что в твердых выбросах при производстве буровзрывных работ по своему процентному соотношению преобладает вещество  $SiO_2$ . Пыль, содержащая в себе двуокись кремния, относится к третьему классу опасности (высокоопасным веществам), которые в свою очередь характеризуются высокой степенью негативного воздействия на биоту и окружающую среду в целом.

Продолжительное вдыхание мелкодисперсной неорганической пыли, содержащей в себе двуокись кремния может повлечь за собой возникновение у человека патологии в виде силикоза - отдельного вида пневмокониоза, который обусловлен длительным вдыханием пыли. Суммированное вдыхание дифференцированных по своему дисперсному составу наиболее респираторных частиц (размером менее 0,5 мкм) в течении длительного времени влечет за собой увеличение рисков для здоровья, в частности способствует возникновению различных легочных патологий [64].

### 2.2.4 Исследование частиц пыли методом конфокальной микроскопии

Исследование морфологических характеристик частиц пыли проводилось с помощью метода конфокальной лазерной сканирующей микроскопии суть которого заключается в сканировании исследуемого поля по оси OZ, что позволяет затем восстановить объемное изображение сканируемого объекта.

Изучение частиц осуществлялось микроскопом Leica TCS SPE с использованием объектива ACS APO 63x/1.30 OIL CS 0.17/E,0.16. Сканирование образцов проводилось в диапазоне размеров 0-50 мкм с интервалом: 0 мкм-2,5 мкм; 2,5 мкм-5 мкм; 5 мкм-7,5 мкм; 7,5 мкм-10 мкм;  $10 \text{ мкм} \leq X \leq 50 \text{ мкм}$ , по оси Z, с толщиной сканируемого слоя в 100 мкм. Пример полученного изображения показан на рисунке 16.

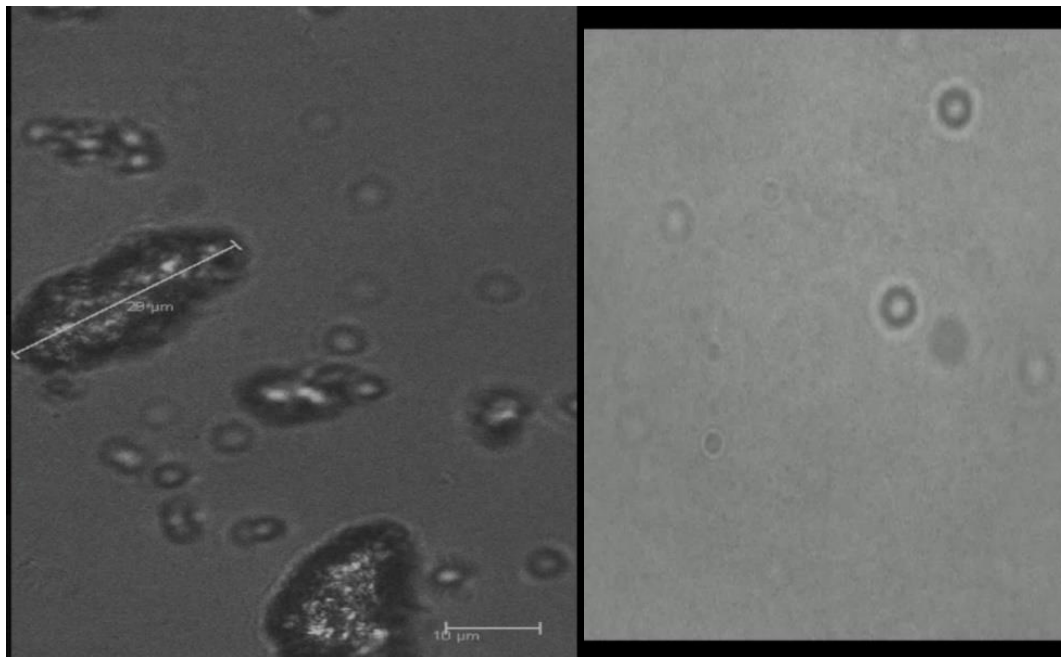


Рисунок 16 – Область сканирования частиц пыли

После получения первичных данных для дальнейшего изучения топологии частиц пыли с помощью программы Fiji imagej, являющейся средством обработки, анализа изображений в частности позволяющей: вычислять площадь, объем объекта, измерять расстояния, углы, восстанавливать объемные модели из изображений, полученных с помощью лазерного конфокального сканирующего

микроскопа, были построены модели частиц в соответствии с приведенными выше интервалами.

Расчет объема частиц пыли, а также построение 3D моделей производится в программе Fiji imagej. На начальном этапе используются данные сканирования поля частиц по оси Z, полученные методом конфокальной микроскопии. Обработка изображения производится с помощью инструмента 3D Viewer, позволяющего объединить сканированные слои в единую модель. Расчет объема моделей мелкодисперсных частиц выполняется путем выделения области сканирования, построения модели конкретной частицы и ее анализа.

Пример полученной модели и рассчитанного объема показан на рисунке 17. В дальнейшем, будет восстановлена трехмерная топология.

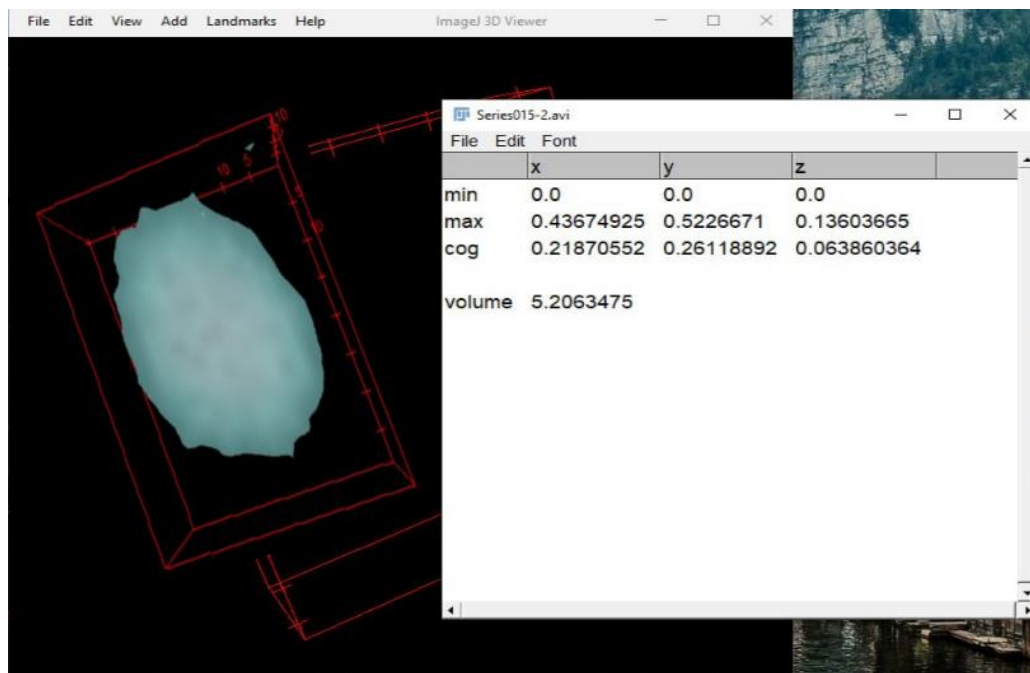


Рисунок 17 – Трехмерная топология частицы, ее габариты и объем

Примеры восстановления поверхностной топологии согласно приведенной классификации, показаны на рисунках 18а, 18б, 18в, 18г, 18д.

На рисунке 18а изображена частица, находящаяся в классе 0-2,5 мкм.

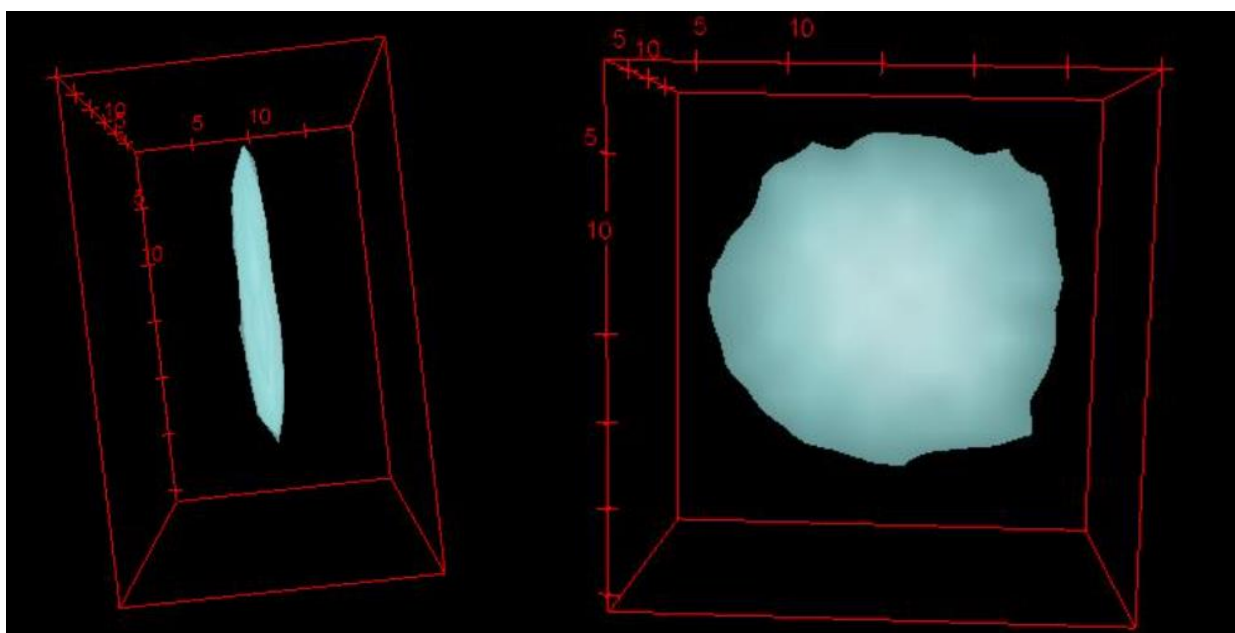


Рисунок 18а – Трехмерная топология частицы класса 0-2,5 мкм.

На рисунке 18б изображена трехмерная топология частицы класса 2,5-5 мкм.

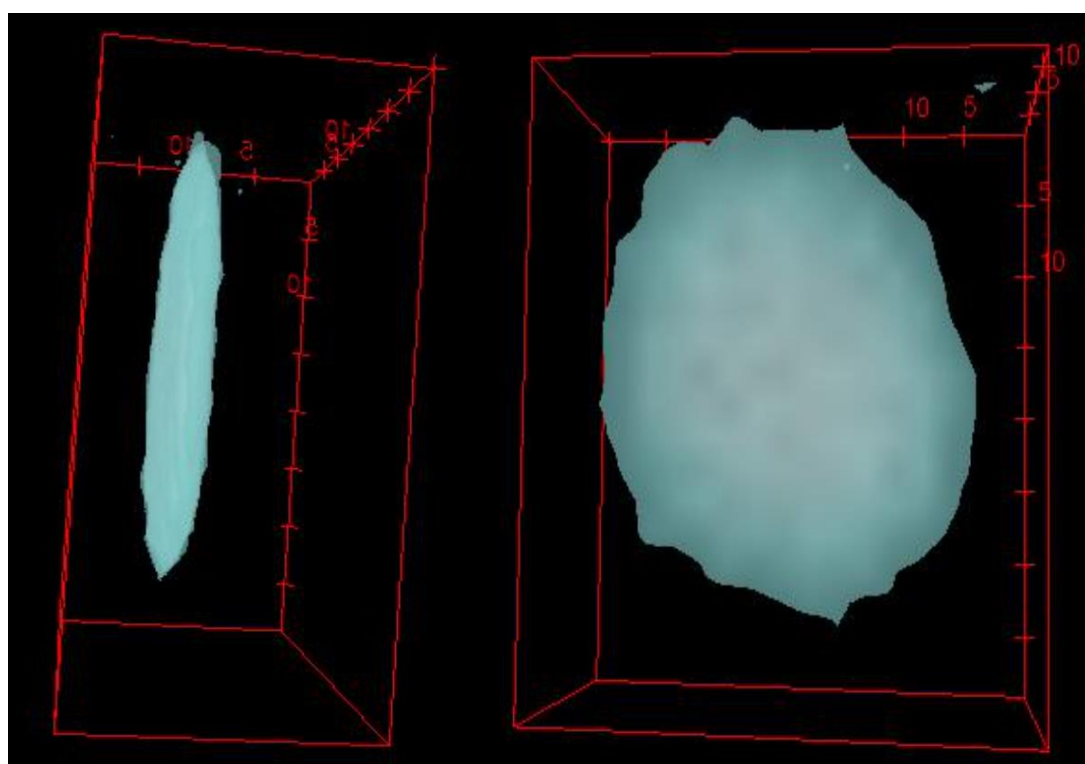


Рисунок 18б – Трехмерная топология частицы класса 2,5-5 мкм.

На рисунке 18в изображена трехмерная топология частицы, находящаяся в классе 5-7,5 мкм.

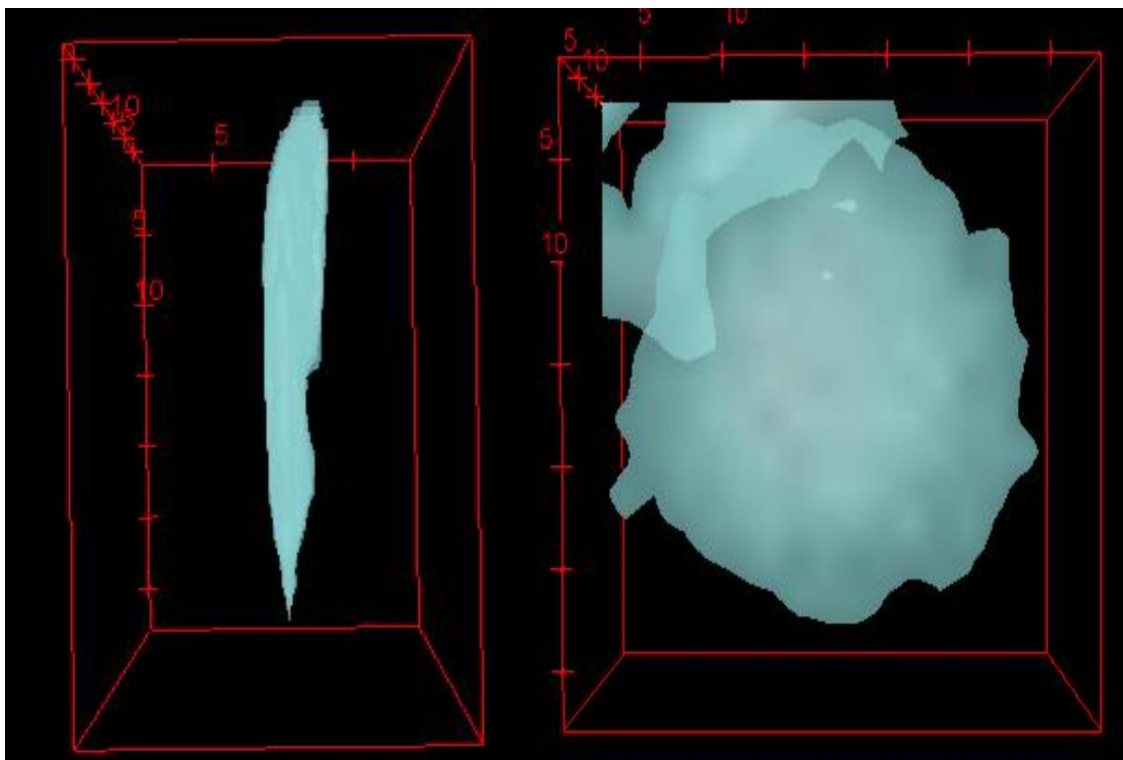


Рисунок 18в – Трехмерная топология частицы класса 5-7,5 мкм.

На рисунке 18г изображена трехмерная топология частицы, находящаяся в классе 7,5-10 мкм.

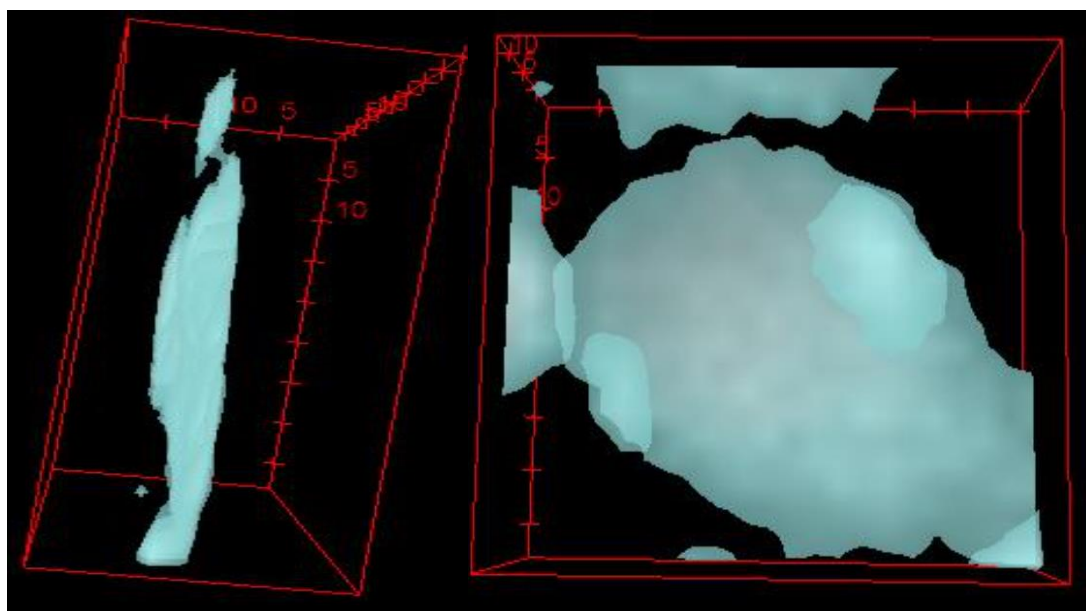


Рисунок 18 г – Трехмерная топология частицы класса 7,5-10 мкм.

На рисунке 18 д изображена трехмерная топология частицы, находящаяся в классе 10-50 мкм.

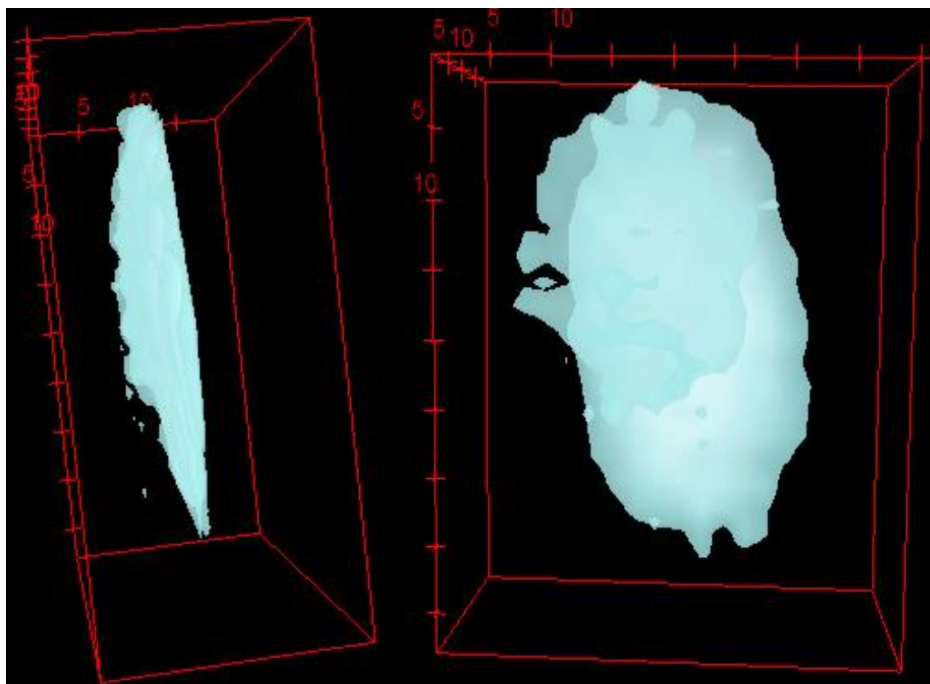


Рисунок 18д – Трехмерная топология частицы класса 10-50 мкм.

Результаты расчета объема частиц в  $\text{мкм}^3$ , и их средние значения приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Результат расчета объема частиц в  $\text{мкм}^3$

| 0мкм-2,5мкм | 2,5мкм-5мкм | 5мкм-7,5мкм | 7,5мкм-10мкм | 10мкм<X<50мкм |
|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|
| 1,771       | 5,206       | 83,221      | 153,163      | 259,062       |
| 1,058       | 4,132       | 42,419      | 99,498       | 215,178       |
| 0,774       | 10,974      | 55,843      | 141,418      | 313,572       |
| 1,464       | 13,015      | 30,979      | 152,777      | 235,978       |
| 0,941       | 4,648       | 41,74       | 149,639      | 204,748       |
| 1,192       | 22,112      | 77,913      | 150,598      | 248,063       |
| 2,563       | 39,235      | 40,147      | 110,45       | 253,786       |
| 0,927       | 27,743      | 66,874      | 132,935      | 204,138       |
| 1,689       | 15,656      | 48,02       | 151,092      | 277,462       |
| 4,19        | 16,057      | 44,273      | 79,221       | 235,833       |
| 2,851       | 48,455      | 61,906      | 163,758      | 228,279       |

## Продолжение таблицы 15

|       |        |        |         |         |
|-------|--------|--------|---------|---------|
| 2,066 | 32,34  | 64,085 | 133,371 | 213,057 |
| 2,56  | 17,433 | 58,217 | 98,104  | 290,419 |
| 1,732 | 18,17  | 49,94  | 120,33  | 227,647 |

Для дальнейшего математического описания формы частиц мелкодисперсной пыли, частица рассматривается как поверхность второго порядка, в общем виде описываемая каноническим уравнением.

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{10}x + 2a_{20}y + 2a_{30}z + a_{00} = 0 \quad (2.3)$$

Любая алгебраическая поверхность второго порядка в системе координат XYZ принимает один из нескольких видов, наиболее эффективно используется эллипсоид, описываемый формулой (2.4).

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2.4)$$

Для получения параметров эллипсоида для частиц, по их габаритам строится прямоугольный параллелепипед.

На рисунке 19 а, б приведены измерения сторон частицы, которые в дальнейшем будут приняты как стороны прямоугольного параллелепипеда.

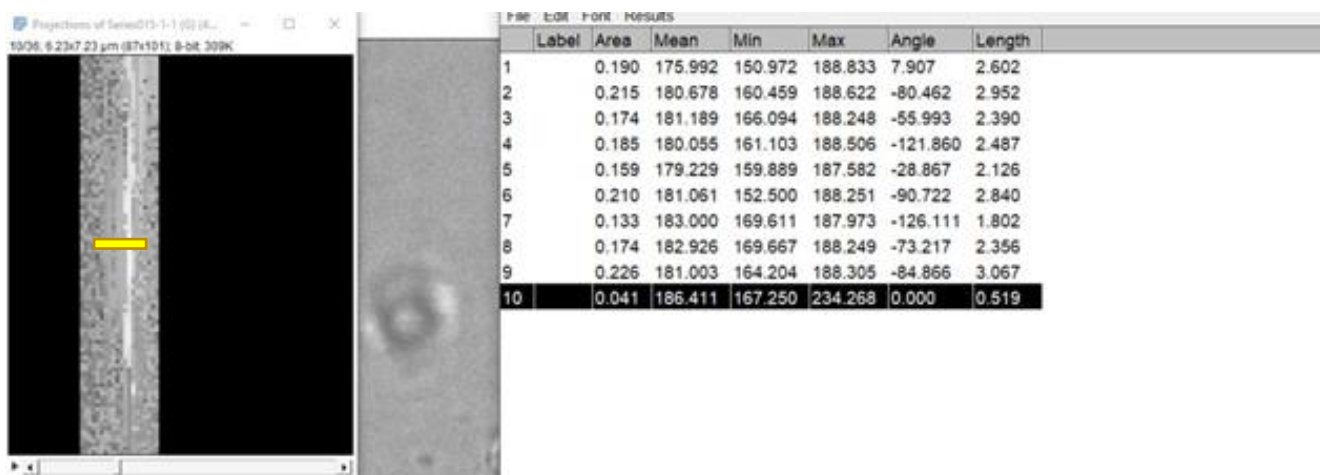


Рисунок 19а

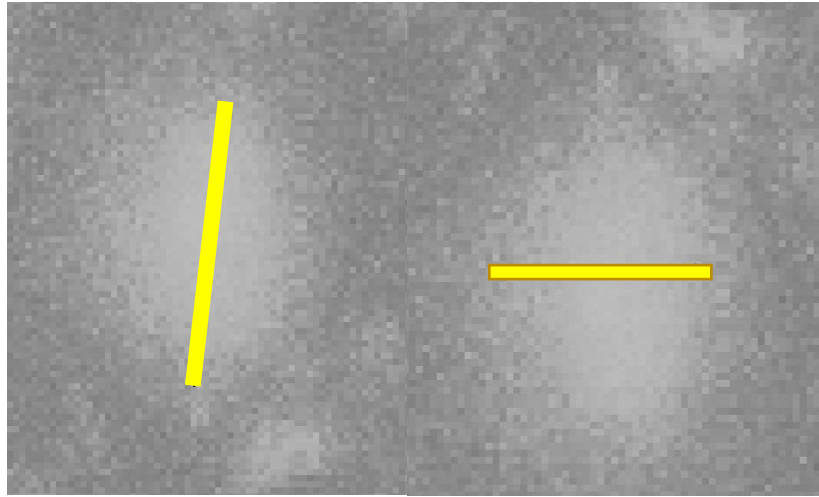


Рисунок 196

Исходя из симметрии данных геометрических фигур, функция объема  $V = xyz$ , исследуется на экстремум, иными словами производится расчет наибольшего объема параллелепипеда расположенного в первом октанте. Зная, что уравнение связи и есть уравнение эллипсоида, составляется функция Лагранжа (2.5).

$$U = xyz + \lambda \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Далее частные производные (2.6 а, б, в)

$$\frac{\partial u}{\partial x} = yz + \lambda \frac{2x}{a^2}; \quad (2.6 \text{ а})$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = xz + \lambda \frac{2y}{b^2}; \quad (2.6 \text{ б})$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = xy + \lambda \frac{2z}{c^2}; \quad (2.6 \text{ в})$$

тогда необходимое условие экстремума будет иметь вид (2.7 а, б, в, г):

$$yz + \lambda \frac{2x}{a^2} = 0; \quad (2.7 \text{ а})$$

$$xz + \lambda \frac{2y}{b^2} = 0; \quad (2.7 \text{ б})$$

$$xy + \lambda \frac{2z}{c^2} = 0; \quad (2.7 \text{ в})$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1; \quad (2.7 \text{ г})$$

Решая данную систему уравнений, получим (2.8 а, б, в):

$$x = \pm a \frac{\sqrt{3}}{3}; \quad (2.8 \text{ а})$$

$$y = \pm b \frac{\sqrt{3}}{3}; \quad (2.8 \text{ б})$$

$$z = \pm c \frac{\sqrt{3}}{3}; \quad (2.8 \text{ в})$$

Так как рассматривается только первый октант, условный экстремум функции будет находится в точке с координатами (2.9 а, б, в):

$$x = a \frac{\sqrt{3}}{3}; \quad (2.9 \text{ а})$$

$$y = b \frac{\sqrt{3}}{3}; \quad (2.9 \text{ б})$$

$$z = c \frac{\sqrt{3}}{3}; \quad (2.9 \text{ в})$$

Отсюда можно сделать вывод, что прямоугольный параллелепипед наибольшего объема имеет измерения (2.10 а, б, в):

$$x = a \frac{2\sqrt{3}}{3}; \quad (2.10 \text{ а})$$

$$y = b \frac{2\sqrt{3}}{3}; \quad (2.10 \text{ б})$$

$$z = c \frac{2\sqrt{3}}{3}; \quad (2.10 \text{ в})$$

Для нахождения объема эллипсоида выразим переменные  $a, b, c$  являющиеся его полуосями (2.11 а, б, в):

$$a = \frac{x}{\frac{2\sqrt{3}}{3}}; \quad (2.11 \text{ а})$$

$$b = \frac{y}{\frac{2\sqrt{3}}{3}}; \quad (2.11 \text{ б})$$

$$c = \frac{z}{\frac{2\sqrt{3}}{3}} \quad (2.11 \text{ в})$$

Подставив результаты измерений частицы, которые и являются сторонами прямоугольного параллелепипеда и получим:  $a = 2,597 \text{ мкм}$ ,  $b = 2,607 \text{ мкм}$ ,  $c = 0,519 \text{ мкм}$ . Расчет объема эллипсоида производится по формуле (2.12).

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \quad (2.12)$$

Объем эллипсоида описанного вокруг частицы и изображенного на рисунке 20, равен  $7,786 \text{ мкм}^3$ . Как было показано ранее на рисунке 15, объем данной

частицы, рассчитанный с помощью программы imagej равен  $5,206 \text{ мкм}^3$ , что в 1,5 раза меньше чем при описании частицы эллипсоидом.

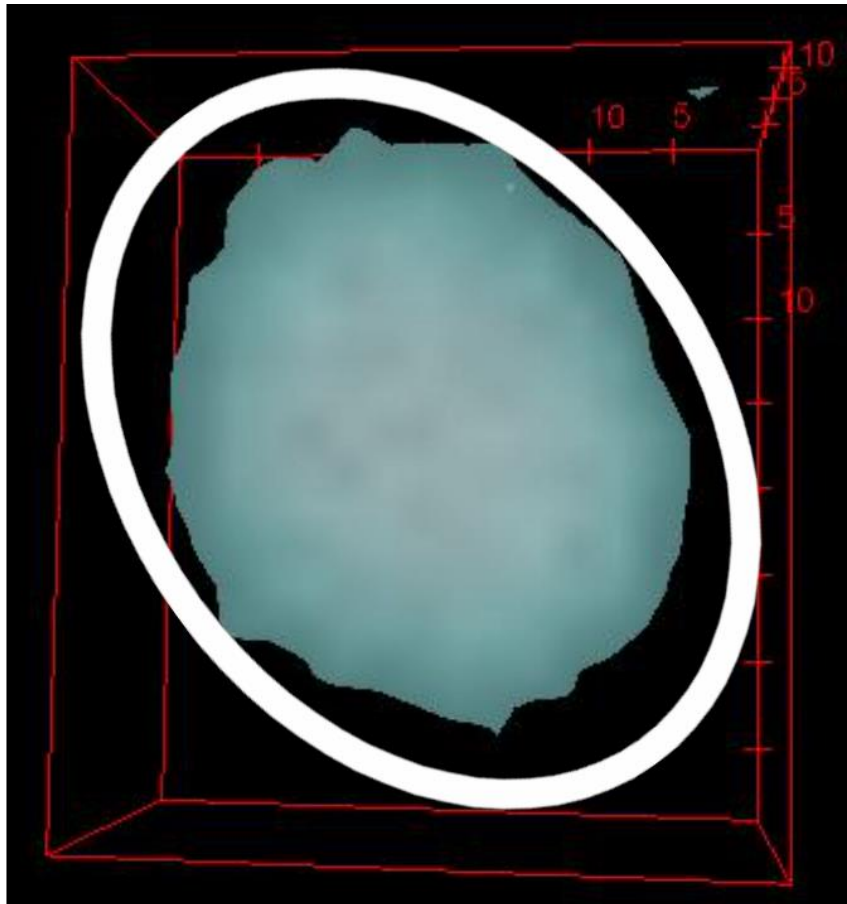


Рисунок 20 – Эллипсоид описанный вокруг частицы

Эмпирическим методом наименьших квадратов была получена аппроксимирующая зависимость восстановленных объемов частиц пыли от габаритного размера:  $V_{ch} = 0,06411 \left(\frac{d}{2}\right)^3$ . Коэффициент детерминации (0,7962) позволяет считать полученную зависимость достаточно хорошей.

Сравнивая полученную эмпирическую зависимость по определению объема частицы с формулой определяющей объем шара  $V_{sf} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3$  (рисунок 21), и с учетом погрешности, обеспечивающей вероятность 99,9 %, фактический объем частиц пыли в диапазоне размеров до 50 мкм не превышает 13,5 % объема Стоксовских сфер.

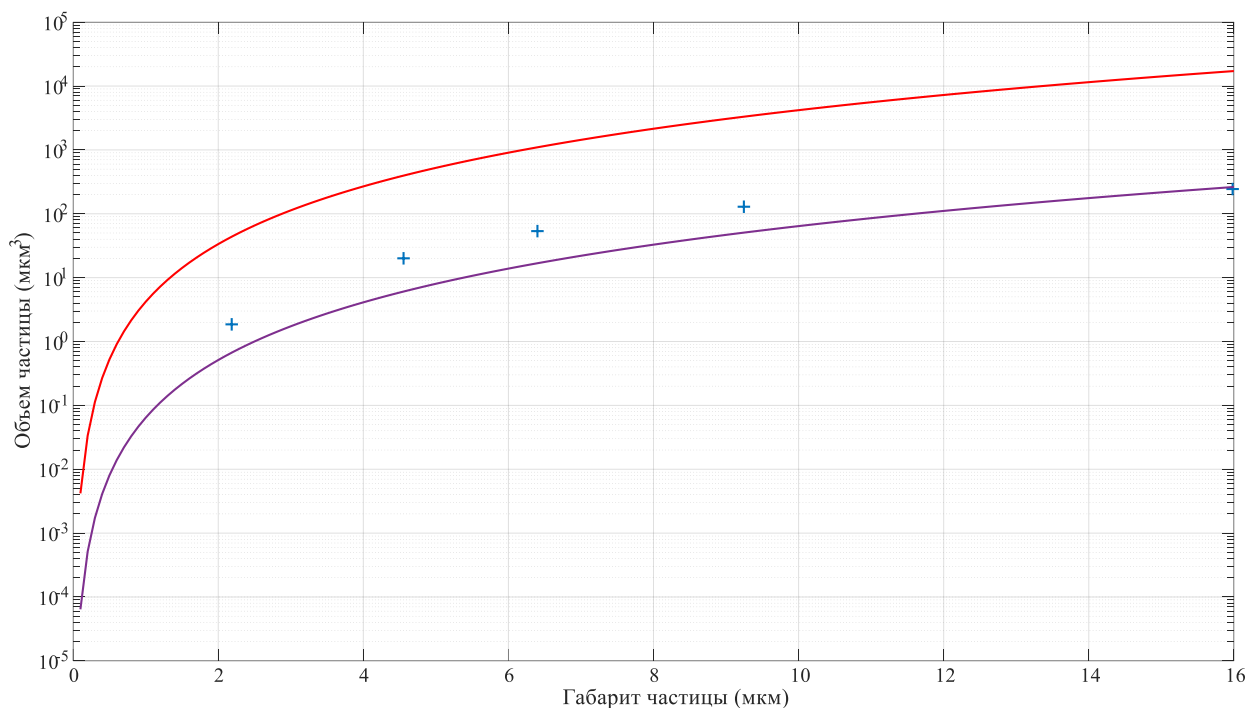


Рисунок 21 – Зависимости изменения объема сферы и фактического объема частицы от ее габаритов (красная линия – аппроксимирующая функция объема сферы, фиолетовая линия – аппроксимирующая функция полученная на основе экспериментальных данных)

По результатам описания частиц поверхностью второго порядка составлена таблица усредненного фактического объема частиц и объема при описании частиц классическим Стоксовским шаром (таблица 16).

Таблица 16 – Усредненный фактический объем частиц и объем Стоксовского шара

| Параметр                  | 0мкм-2,5мкм            | 2,5мкм-5мкм            | 5мкм-7,5мкм             | 7,5мкм-10мкм            | 10мкм<X<50мкм            |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Объем частицы V           | 1,732 мкм <sup>3</sup> | 18,17 мкм <sup>3</sup> | 49,94 мкм <sup>3</sup>  | 120,33 мкм <sup>3</sup> | 227,647 мкм <sup>3</sup> |
| Объем шара V <sub>ш</sub> | 11,648мкм <sup>3</sup> | 77,410мкм <sup>3</sup> | 208,996мкм <sup>3</sup> | 542,078мкм <sup>3</sup> | 5103,292мкм <sup>3</sup> |

Таким образом доказано первое научное положение: *На основе экспериментальных данных конфокальной лазерной сканирующей микроскопии фактический объем и масса частиц пыли (в диапазоне размеров до 50 мкм) не*

*превышают 13,5% объема и массы сферы, с вероятностью 99,9 %. Таким образом, фактическая масса отложившейся мелкодисперсной пыли в 7,4 раза меньше, чем при описании ее Стоксовской сферой.*

Из результатов проведенного исследования следует что, для расчета массы отдельной частицы мелкодисперсной респираторной пыли, используя такие параметры как объем и плотность химических элементов и соединений, входящих в элементный состав частицы, метод построения 3D модели с расчетом объема точнее, чем описание частицы Стоксовской сферой. Следовательно, использование реального форм фактора мелкодисперсных частиц пыли дает более объективную оценку массы пылегазового облака в целом как объекта исследования.

### **2.3. Исследование влияния интенсивности вовлечения окружающих воздушных масс на высоту подъема пылегазового облака**

Одна из важнейших научных задач по контролю аэрогазовой и пылевой обстановок на угольном разрезе и близлежащих территориях после проведения взрывов является прогноз движения пылегазового облака. В основном траектория движения пылегазового облака определяется направлением и силой ветра во время проведения взрыва. Дальность перемещения пылегазового облака определяется многими факторами временем года, облачностью, осадками, временем суток, температурой земной поверхности, температурой окружающего воздуха, давлением и влажностью атмосферы, её состоянием, вертикальным температурным градиентом и т.д [65-72]. Но, существенно на дальность распространения пылегазового облака влияет его первоначальная высота подъема. Для определения высоты подъема конвекционного потока, образовавшего в момент взрыва и имеющего значительный первоначальный импульс используют уравнение движения тела переменной массы  $M = M_0 + m_1 - m_2$  (уравнение Мещерского), где:  $M$  – масса тела в текущий момент времени  $t$ ,  $M_0$  – масса тела в первоначальный момент движения  $t_0$ ,  $m_1$  - присоединённая к телу масса за период времени от  $t_0$  до  $t$ ,  $m_2$  – отделившееся от тела масса за тот же период времени.

Как известно, во внутреннем пространстве угольного карьера из-за техногенного создания локального замкнутого или почти замкнутого пространства в ходе освоения месторождения формируются различные режимы проветривания: конвективный, инверсионный, рециркуляционный, прямоточный, комбинированный [73-80].

Обычно, при отсутствии результатов техногенного вмешательства человека, конвекция атмосферного воздуха способствует циркуляции воздушных масс. Конвекционные потоки оказывают очищающее воздействие. Они поднимают в верхние слои атмосферы и рассеивают аэрозоль, содержащую вредные для живых и растительных организмов вещества. В целом благодаря конвекции происходит образование и развитие облаков. Атмосферные осадки, которые выпадают из них производят очищающее действие на атмосферный воздух, связывая аэрозоль, содержащую вредные вещества. Наиболее изучена конвекция атмосферного воздуха в результате которой происходит образование кучево-дождевых облаков (Cumulonimbus Cb), описание которой в виде моделей представлено в монографии болгарских ученых [81]. Они разработали модели процессов конвекции в атмосфере, учитывающих тепло- и массообмен между восходящим потоком и окружающим его воздухом в не адиабатической постановке задачи. Этим же вопросам посвящены работы [82-88]. Обычно скорость вовлечения окружающего воздуха в поднимающийся теплый конвекционный поток принимается постоянной и приближённо определяется соотношением:  $\alpha(h) \approx \frac{0,6}{R_i(h)}$  (здесь  $h$  - высота подъема,  $R_i(h)$  - горизонтальный размер конвекционного потока на высоте  $h$ ).

Для большинства угольных разрезов характерны внутренние замкнутые, протяженные пространства с отвалами. В таких условиях в основном используются конвекционные схемы проветривания. В целом внутреннее пространство угольного разреза создает свою локальную область атмосферы. Она характеризуется тем, что под действием солнечной энергии дно разреза, почвы и борта уступов прогреваются. Температура их существенно выше температуры окружающего воздуха. От прогретых уступов и дна угольного разреза прогретые

воздушные массы конвективно поднимаются вверх, вызывая приток свежего прохладного воздуха вдоль бортов в чашу разреза. Таким образом, в пространстве разреза образуется некая техногенно созданная область атмосферы со своими законами циркуляции, распределения температуры, давления, влажности и т.д [89-101].

Образование, формирование и подъем пылегазового облака после проведения взрывов на угольном разрезе является сложным процессом, происходящим в атмосфере горного предприятия. Причем, этот процесс существенно отличается от конвекционных процессов, происходящих в нижних слоях атмосферы. Это связано с ограничениями, накладываемыми чашей разреза и, в основном распределением температуры и давления воздушных масс в ней [102-105]. Следует отметить, что процесс подъема пылегазового облака существенно отличается от конвекционных потоков, связанных с образованием дождевых облаков. Во-первых, площадь прогрева на поверхности при естественном конвекционном потоке значительно больше, чем площадь блока, где производятся взрывные работы. Во-вторых, в результате взрыва, образовавшиеся газы и аэрозоль взлетают вверх с большой скоростью, получая большой импульс. В-третьих, температура смеси газов и аэрозоли в пылегазовом облаке в несколько раз выше окружающего воздуха. Следовательно, несмотря на то что процесс подъема пылегазового облака после взрыва на угольном разрезе очень сильно похож на конвекционные процессы, происходящие в атмосфере, но все же отличается. Основным существенным отличием является процесс вовлечения окружающего воздуха в конвекционный поток (в термик). При подъеме пылегазового облака часто наблюдается не вовлечение окружающего воздуха в конвекционный поток, а истечение из пылегазового облака некоторого объема пыли-газо-воздушной смеси. По всей видимости это связано с дополнительным сопротивлением воздушных масс подъему аэрозольной составляющей пылегазового облака. Если естественные конвекционные потоки образуются на большой площади поверхности Земли, то они имеют значительную массу. При постепенном их подъеме происходит вовлечение окружающего поток воздуха внутрь. Скорость такого вовлечения

зависит в основном от перепада температуры конвекционного потока и окружающего воздуха, которая в свою очередь определяется температурной стратификацией атмосферы. Конвекционный поток, образованный вследствие взрывного выброса газов и аэрозоли, имеет существенно меньшие габариты и при его подъеме его температура, хотя первоначальная равна несколько сотен градусов, быстро падает. В тот момент, когда температура пылегазового облака сравняется с температурой окружающего воздуха его подъем останавливается. Зная высоту подъема пылегазового облака и метеорологический прогноз силы и направления ветра можно определить, как далеко и в каком направлении оно, пылегазовое облако, может переместиться. Попытки учета вовлечения воздушных масс в пылегазовое облако, после проведения взрывов на угольном разрезе были сделаны в работах Конорева М.М., Нестеренко Г.Ф. [106-107]. Однако, исследований по определению скорости вовлечения (истечения) воздушных масс в область пылегазового облака в зависимости от высоты его подъема не производилось. Очевидно, что процесс вовлечения (истечения) воздушных масс в пылегазовое облако существенно влияет на высоту его подъема. Поэтому необходимо определить интенсивность вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс угольного разреза в пылегазовое облако, образовавшееся после взрыва. Таким образом, целью исследования видеозаписей взрывов является выявление зависимости изменения скорости (интенсивности) вовлечения (истечения) окружающего воздуха угольного разреза в пылегазовое облако по мере его подъема от горизонта, где произошел взрыв до уровня дневной поверхности. То есть, в границах горного предприятия по вертикали (от места, где произведен взрыв до верхней бровки первого уступа).

Очевидно, что скорость вовлечения (истечения) воздуха в пылегазовое облако при его подъеме влияет на его температуру и, как следствие замедляет подъем. Поэтому, для корректного учета вовлечения (истечения) атмосферного воздуха в пылегазовое облако необходимо эмпирически определить интенсивность такого вовлечения (истечения). В целом, основываясь на физических представлениях о процессах, происходящих при подъеме пылегазового облака,

можно предположить, что исследующая скорость вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако является непрерывной величиной, определенной на всем периоде её наблюдения (на всех высотах подъема). По всей видимости, с учетом того, что градиент температуры воздушных масс в чаше разреза не является линейной зависимостью от высоты, то следует учесть, что скорость вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако может иметь экстремум. Необходимо учесть, что процесс подъема пылегазового облака после взрыва ограничен во времени. То есть, после определенного, когда действие первоначального импульса прекратится и температуры окружающего воздуха и пылегазового облака сравняются, подъем последнего прекратится. По всей видимости экспоненциальная зависимость, когда возрастание скорости вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако пропорционально её значению, функции Гаусса, Вейбулла и аналогичные, описывающих распределение измеренной величины не согласуются с физической интерпретацией процесса вовлечения (истечения) окружающего воздуха при подъеме конвекционного потока. Таким образом для нахождения функции скорости вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако по экспериментальным данным могут подойти тригонометрические функции с малой частотой (с периодом примерно равным удвоенной глубины разреза), полиномиальные и рациональные зависимости.

Для получения экспериментальной аппроксимирующей зависимости были использованы видеозаписи двенадцати взрывов, в которых зафиксирован подъем пылегазового облака после взрыва на Кедровском угольном разрезе. Основные геометрические данные Кедровского угольного разреза: глубина разреза 320 м, отметка дневной поверхности +240 м, высота уступа 15 м, уголь откоса уступа 16°. характеристика Данные об исследуемых взрывах приведены в табл. 17. Следует отметить, что напрямую измерить скорость вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако не представляется возможным. С помощью видеозаписи можно только определить горизонтальный размер пылегазового облака на некоторых высотах его подъема. Очевидно, что скорость вовлечения

(истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако является производной величиной от измеренных горизонтальных размеров облака  $\alpha(h) = \frac{dR(h)}{dh}$ . Легко видеть, что обе функции (скорость вовлечения/истечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако и горизонтальный размер пылегазового облака от высоты подъема) определены на всем рассматриваемом интервале. Таким образом для определения функции скорости вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако достаточно найти аппроксимирующую функцию изменения горизонтального размера пылегазового облака от высоты его подъема и затем её продифференцировать.

Таблица 17 – Данные об исследуемых взрывах

| Условный № взрыва | Время года/Сезон | Борт разреза | Отметка (м) | Общее время подъема ПГО (с) |
|-------------------|------------------|--------------|-------------|-----------------------------|
| 1                 | Осень            | N            | 140         | 17                          |
| 2                 | Осень            | N            | 132         | 18                          |
| 3                 | Осень            | W            | 135         | 23                          |
| 4                 | Осень            | SE           | 137         | 14                          |
| 5                 | Лето             | S            | 146         | 17                          |
| 6                 | Зима             | N            | 167         | 18                          |
| 7                 | Зима             | N            | 169         | 21                          |
| 8                 | Зима             | NE           | 170         | 25                          |
| 9                 | Зима             | NE           | 177         | 27                          |
| 10                | Весна            | W            | 40          | 15                          |
| 11                | Лето             | N            | 83          | 26                          |
| 12                | Лето             | W            | 76          | 18                          |

Обработка результатов проведенных наблюдений за динамикой развития пылегазового облака после взрыва была разбита на несколько этапов. На первом этапе обработке видеозаписей подъемов пылегазового облака после взрыва по кадрам были измерены на различных высотах подъема конвекционных потоков их горизонтальные габариты на разных высотах. В результате образовался ряд

измерений, приведённый в табл. 18. Нумерация измерений в генеральной последовательности сквозная. Всего в генеральной совокупности 98 измерений. Для корректного учета изменения температуры при подъеме пылегазового облака необходимо высоты, на которых производились измерения привести к одному уровню. Для этого с учетом отметок мест, где производились высоты подъемов пылегазовых облаков были пересчитаны к отметке дна угольного разреза.

Таблица 18 – Результат измерения габаритов облака

| Параметр наблюдений          | Значения        |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Номер взрыва                 | Первый взрыв    |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1               | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |         |
| Высота конвекционного потока | 105.589         | 122.590 | 146.062 | 148.684 | 154.913 | 175.610 | 193.094 |         |
| Радиус конвекционного потока | 189.420         | 189.404 | 199.479 | 197.794 | 191.314 | 188.228 | 175.021 |         |
| Номер взрыва                 | Второй взрыв    |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1               | 2       | 3       | 4       | 5       |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 68.692          | 74.202  | 77.17   | 89.674  | 94.726  |         |         |         |
| Радиус конвекционного потока | 78.39           | 77.817  | 76.8    | 86.607  | 88.186  |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Третий взрыв    |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1               | 2       | 3       | 4       |         |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 147.927         | 155.072 | 160.968 | 172.668 |         |         |         |         |
| Радиус конвекционного потока | 396.68          | 394.929 | 386.717 | 397.249 |         |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Четвертый взрыв |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1               | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| Высота конвекционного потока | 101.121         | 105.356 | 109.634 | 116.116 | 123.806 | 133.038 | 142.647 | 144.957 |
| Радиус конвекционного потока | 239.941         | 239.966 | 240.695 | 241.090 | 241.464 | 239.952 | 247.246 | 239.167 |
| № измерения                  | 9               | 10      | 11      |         |         |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 162.255         | 170.339 | 183.416 |         |         |         |         |         |
| Радиус конвекционного потока | 235.312         | 230.314 | 229.572 |         |         |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Пятый взрыв     |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1               | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| Высота конвекционного потока | 83.193          | 86.015  | 90.144  | 93.316  | 98.556  | 99.889  | 100.673 | 101.997 |
| Радиус конвекционного потока | 84.139          | 84.698  | 83.602  | 85.631  | 88.813  | 90.126  | 90.693  | 92.003  |
|                              | 93.872          |         |         |         |         |         |         |         |

Продолжение таблицы 18

|                              |                       |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| № измерения                  | 910                   |         |         |         |         |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 105.497108.128        |         |         |         |         |         |         |         |
| Радиус конвекционного потока | 93.8993.872           |         |         |         |         |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Шестой взрыв          |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1                     | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| Высота конвекционного потока | 88.669                | 92.339  | 100.722 | 103.669 | 109.005 | 123.007 | 126.668 | 131.349 |
| Радиус конвекционного потока | 235.334               | 239.046 | 238.339 | 233.054 | 234.752 | 233.771 | 232.078 | 232.449 |
| № измерения                  | 91011                 |         |         |         |         |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 136.004149.013156.334 |         |         |         |         |         |         |         |
| Радиус конвекционного потока | 232.061233.362234.335 |         |         |         |         |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Седьмой взрыв         |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1                     | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |         |
| Высота конвекционного потока | 65.96                 | 69.998  | 80.926  | 98.363  | 103.542 | 107.57  | 114.854 |         |
| Радиус конвекционного потока | 139.73                | 142.6   | 143.124 | 130.994 | 137.514 | 137.226 | 140.079 |         |
| Номер взрыва                 | Восьмой взрыв         |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1                     | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| Высота конвекционного потока | 114.818               | 119.382 | 124.367 | 128.742 | 137.078 | 142.073 | 145.862 | 148.778 |
| Радиус конвекционного потока | 222.274               | 222.486 | 221.647 | 223.94  | 219.154 | 211.65  | 215.44  | 199.169 |
| № измерения                  | 9                     |         |         |         |         |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 152.294               |         |         |         |         |         |         |         |
| Радиус конвекционного потока | 191.857               |         |         |         |         |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Девятый взрыв         |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1                     | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |         |
| Высота конвекционного потока | 91.366                | 94.113  | 104.318 | 109.781 | 137.047 | 171.17  | 176.596 |         |
| Радиус конвекционного потока | 404.376               | 404.346 | 405.718 | 407.809 | 405.702 | 380.47  | 386.808 |         |
| Номер взрыва                 | Десятый взрыв         |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1                     | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| Высота конвекционного потока | 50.15                 | 58.586  | 67.722  | 74.266  | 82.025  | 98.574  | 108.059 | 113.554 |
| Радиус конвекционного потока | 123.057               | 132.853 | 136.646 | 134.404 | 132.716 | 136.307 | 137.679 | 144.414 |
| № измерения                  | 910                   |         |         |         |         |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 117.524135.055        |         |         |         |         |         |         |         |

## Продолжение таблицы 18

|                              |                    |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Радиус конвекционного потока | 146.814 145.786    |         |         |         |         |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Одиннадцатый взрыв |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1                  | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| Высота конвекционного потока | 68.381             | 69.808  | 77.308  | 86.546  | 95.245  | 103.856 | 111.718 | 114.953 |
| Радиус конвекционного потока | 240.146            | 240.302 | 235.682 | 234.235 | 222.441 | 201.953 | 196.484 | 183.571 |
| № измерения                  | 9                  |         |         |         |         |         |         |         |
| Высота конвекционного потока | 118.083            |         |         |         |         |         |         |         |
| Радиус конвекционного потока | 172.339            |         |         |         |         |         |         |         |
| Номер взрыва                 | Двенадцатый взрыв  |         |         |         |         |         |         |         |
| № измерения                  | 1                  | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |         |
| Высота конвекционного потока | 125.392            | 128.494 | 134.941 | 145.684 | 147.767 | 156.333 | 163.828 |         |
| Радиус конвекционного потока | 238.647            | 239.981 | 239.781 | 236.153 | 230.733 | 226.234 | 229.999 |         |

При анализе видеозаписей движения пылегазовых облаков после взрывов наглядно видно, что конвекционные потоки, несущие после взрыва газы и аэрозоль, в начале немного расширяются, а затем истощаются (сужаются) рис 22.



Рисунок 22 – Анализ изменения габаритов пылегазового облака

Уменьшение радиуса конвекционного потока на конечной высоте его поднятия объясняется тем, что температуры атмосферы и конвекционного потока сравнялись. Это свидетельствует о завершении вертикального подъема пылегазового облака.

Далее, был проведен анализ влияния горизонтального габарита пылегазового облака на изменения скорости вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в пылегазовое облако. С учетом существующих зависимостей для конвекционных потоков, наблюдаемых в атмосфере, что скорость вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс в подъем конвекционного потока было проанализировано влияние изменения горизонтального габарита пылегазового облака на интенсивность вовлечения (истечения) окружающего воздуха (рис.22). Никакого существенного отличия в интенсивности вовлечения (истечения) окружающего пылегазовое облако воздуха в зависимости от его геометрического габарита не обнаружено. Это подтверждается тем, что поведение графиков 3-го и 9-го взрывов с горизонтальными габаритами около 400 метров, 1-го, 4-го, 6-го, 8-го, 11-го, 12-го взрывов с горизонтальными габаритами от 190 до 240 метров, 9-го, 10-го взрывов с горизонтальными габаритами от 120 до 150 метров и 2-го и 5-го взрывов с горизонтальными габаритами менее 100 метров практически не отличаются. Это объясняется незначительными горизонтальными размерами пылегазового облака по сравнению с горизонтальными размерами конвекционных потоков, ведущих к образованию кучево-дождевых облаков в атмосфере.

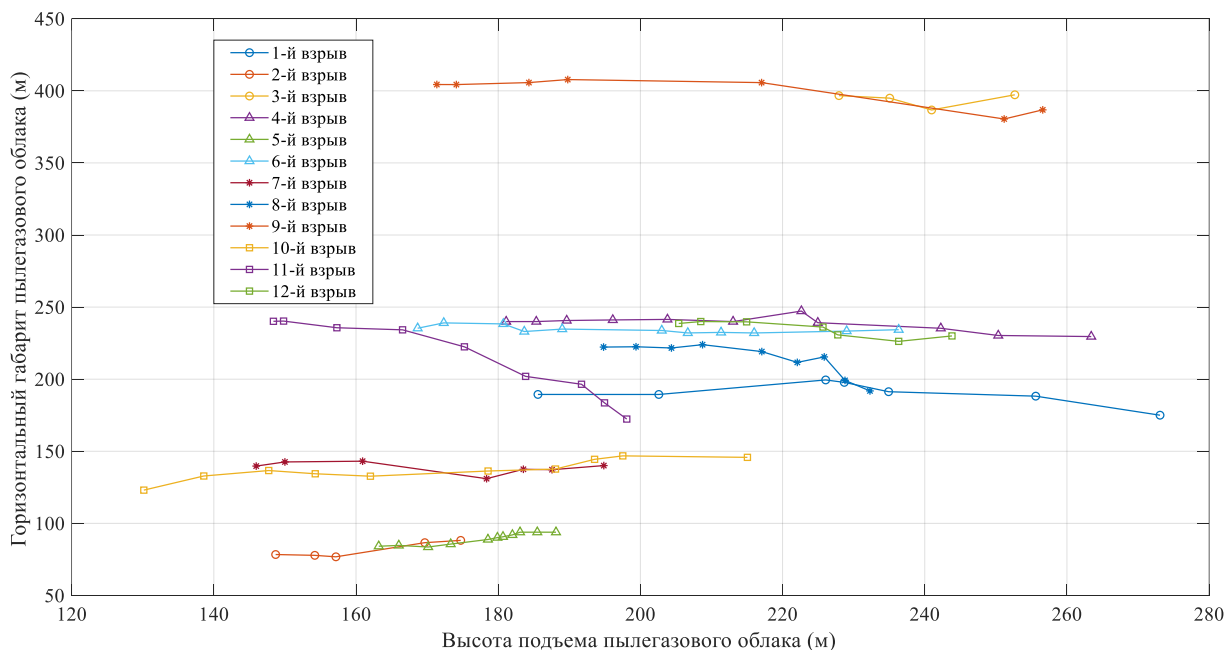


Рисунок 23 – Изменения горизонтальных габаритов пылегазовых облаков при их подъеме

Таким образом, для угольных разрезов размер горизонтальных габаритов пылегазового облака практически не влияет на интенсивность вовлечения (истечения) окружающего воздуха в конвекционный поток. Следовательно, задача по нахождению аппроксимации изменения горизонтальных габаритов пылегазового облака при его подъеме упрощается. Требуется найти зависимость только от одного параметра (высоты подъема), на изменение горизонтального габарита пылегазового облака, с учетом, что влияние его размера на скорость вовлечения (истечения) окружающих воздушных масс ничтожна.

Как уже отмечено, что скорость вовлечения (истечения) окружающего воздуха в конвекционный поток при его поднятии не является величиной постоянной, а зависит от многих факторов, таких как высота подъема, вертикальный температурный градиент атмосферного воздуха, перепад температур атмосферы в угольной карьере и вне его на уровне дневной поверхности, скорости и направления ветра, облачности, осадков, вертикального градиента атмосферного давления и т.д. Таким образом, ставится задача выявить закономерность изменения скорости вовлечения (истечения) в конвекционный поток, атмосферных воздушных масс.

Следовательно, для дальнейшей обработки измерений можно применить нормализацию горизонтальных габаритов пылегазового облака, по первично произведенному измерению. Исходя из этого все измерения (для каждого взрыва отдельно) были нормализованы по первично измеренному радиусу конвекционного потока на минимальной зафиксированной высоте для каждого взрыва. То есть, все измеренные значения горизонтального габарита пылегазового облака, наблюдаемые на высотах подъема, были отнесены к горизонтальному габариту пылегазового облака, который был измерен на минимальной возможной высоте (выполнена следующая операция  $\bar{R}(i) = \frac{R(i)}{R(1)}$ ). Полученные результаты представлены на рис. 24. Визуальный анализ изменения горизонтальных габаритов пылегазового облака при его подъеме (рис. 24) свидетельствует, что пылегазовые облака, образованные после 2-го, 5-го, 10-го и 11-го взрывов (они помечены

пунктирными линиями) выпадают из генеральной совокупности, так как данные взрывы проводились при нестабильном состоянии атмосферы под действием ветра.

Далее, были рассмотрены аппроксимации изменения горизонтального габарита пылегазового облака функциями, представленными в табл. 19. Для них найдены коэффициенты функций аппроксимации и вычислены статистические оценки (сумма квадратов ошибки и среднеквадратическое отклонение).

Поведение аппроксимирующих функций представлено на рис.25, из которого ясно видно, что рациональная функция со знаменателем, содержащем высоту подъема пылегазового облака во второй степени имеет «всплеск» значений в районе отметок 150 м. Такая аппроксимация искажает физическое представление о вовлечении (истечении) в конвекционный поток, окружающих атмосферных воздушных масс. Её следует исключить из рассмотрения.

Кроме этого, значения показательной функции аппроксимации в области высот от дна угольного разреза примерно до 50 – 70 метров (рис. 25) значительно завышены. По сути такого явления, как повышенное увеличение объема конвекционного потока сразу же после проведения взрыва и при незначительном поднятии не наблюдается. По всей видимости показательная функция аппроксимации корректно может быть применена только на небольшом диапазоне высот. Следовательно, она не соответствует физическим процессам, происходящих при подъеме пылегазового облака и должна быть исключена из рассмотрения.

Таким образом, необходимо сравнить аппроксимации, получаемые с помощью функций ряда Фурье ( $a_0 + a_1 \cos(kh) + b_1 \sin(kh)$ ), полинома первой ( $a_0h + a_1$ ) и второй ( $a_0h^2 + a_1h + a_2$ ) степеней, рациональной функцией с первой степенью в знаменателе ( $a_0/(h + a_1)$ ) и функцией синуса ( $a_0 \sin(kh + a_1)$ ) выбрать наилучшую. Такую, у которой небольшая ошибка и поведение которой на всем интервале высот соответствует физическому представлению процесса вовлечения (истечения) окружающих атмосферных воздушных масс в пылегазовое облако.

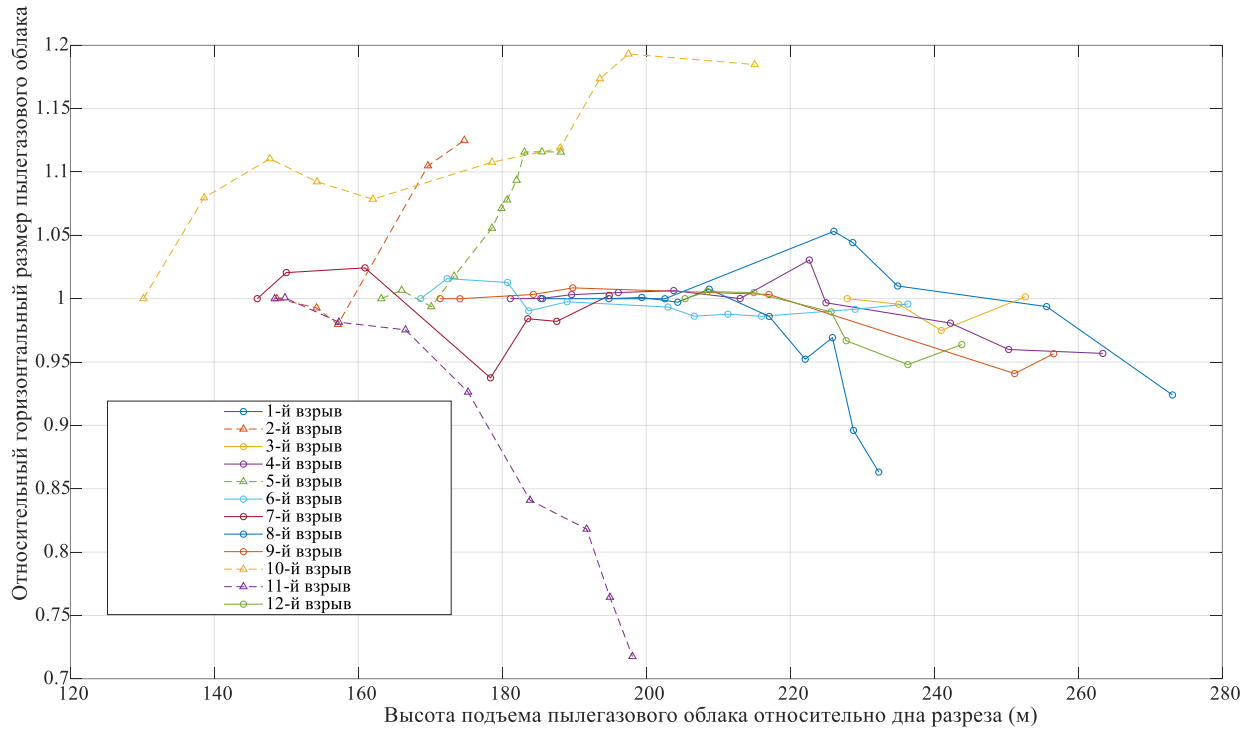


Рисунок 24 – Относительное изменение горизонтальных габаритов пылегазовых облаков при их движении вверх

Таблица 19 – Статистические оценки результатов аппроксимации методом наименьших квадратов изменения горизонтального габарита пылегазового облака при его подъеме (первая итерация)

| № | Вид функции аппроксимации                                     | Сумма квадратов ошибок | СКО     |
|---|---------------------------------------------------------------|------------------------|---------|
| 1 | $a_0 + a_1 \cos(kh) + b_1 \sin(kh)$                           | 0,04731                | 0,02832 |
|   | $a_0 = -4629000, a_1 = -4629001, b_1 = 1143, k = 1,489e - 08$ |                        |         |
| 2 | $a_0 h + a_1$                                                 | 0,02033                | 0,01825 |
|   | $a_0 = 0,0004179, a_1 = 1,08$                                 |                        |         |
| 3 | $a_0 h^2 + a_1 h + a_2$                                       | 0,01845                | 0,01754 |
|   | $a_0 = -5,58e - 06, a_1 = 1,875e - 03, a_2 = 0,8483$          |                        |         |
| 4 | $a_0 / (h + a_1)$                                             | 0,04895                | 0,02833 |
|   | $a_0 = 2200, a_1 = 2014$                                      |                        |         |
| 5 | $a_0 / (h^2 + a_1 h + a_2)$                                   | 24,99                  | 0,65530 |
|   | $a_0 = 71130, a_1 = 2278, a_2 = 320400$                       |                        |         |
| 6 | $a_0 h^b$                                                     | 0,04956                | 0,02850 |
|   | $a_0 = 1,598, b_1 = -0,08979$                                 |                        |         |
| 7 | $a_0 \sin(kh + a_1)$                                          | 0,04732                | 0,02805 |
|   | $a_0 = 1,003, a_1 = 7,321, k = 0,003214$                      |                        |         |

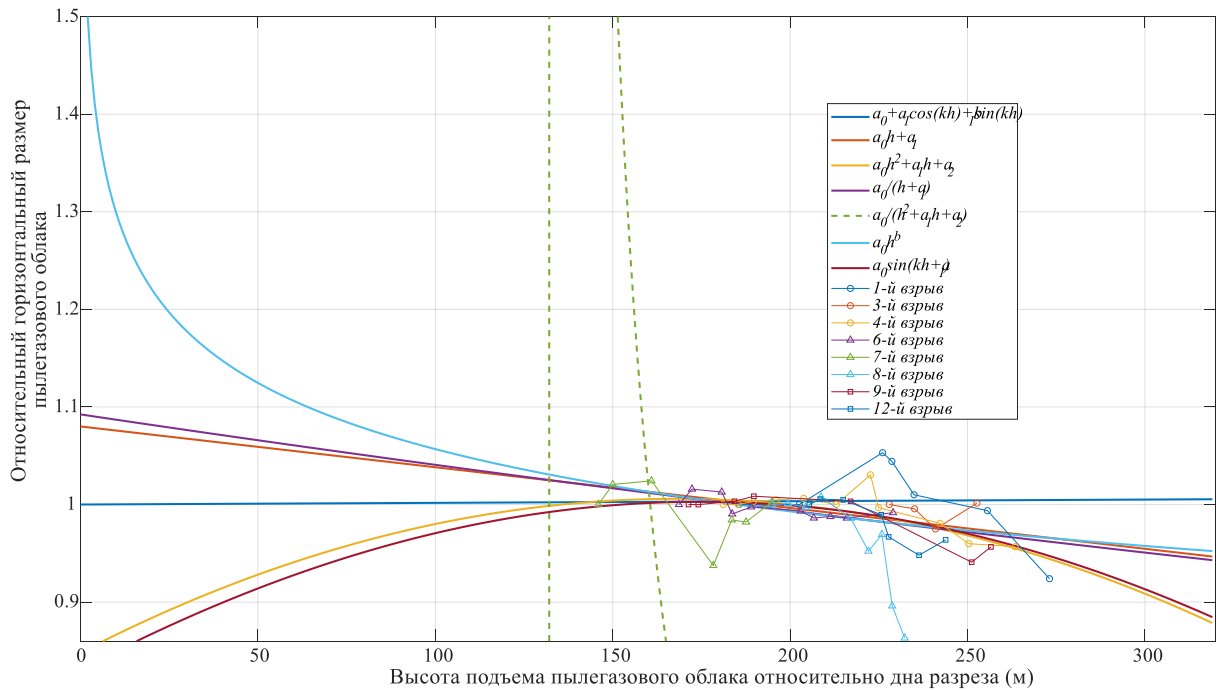


Рисунок 25 – Относительное изменение горизонтальных габаритов пылегазовых облаков при их движении вверх и аппроксимации указанного изменения функциями (по легенде) первыми тремя слагаемыми ряда Фурье ( $a_0 + a_1 \cos(kh) + b_1 \sin(kh)$ ), полиномом первой степени ( $a_0 h + a_1$ ), полиномом второй степени ( $a_0 h^2 + a_1 h + a_2$ ), рациональной функцией с первой степенью в знаменателе ( $a_0/(h + a_1)$ ), рациональной функцией со второй степенью в знаменателе ( $a_0/(h^2 + a_1 h + a_2)$ ), показательной функцией ( $a_0 h^b$ ), функцией синуса ( $a_0 \sin(kh + a_1)$ ).

Далее, была произведена оценка влияния каждого измерения горизонтального размера пылегазового облака, с целью обнаружения явных промахов и выбросов. Для этого из оставшей совокупности измерений, обработанных видеофрагментов 1-го, 3-го, 4-го, 6-го, 7-го, 8-го, 9-го и 12-го взрывов по очереди исключалось одно наблюдение. Влияние исключения наблюдения из генеральной совокупности оценивалось по средней квадратической ошибки, вычисляемой при аппроксимации рассматриваемыми функциями. Результаты расчетов представлены на рисунке 26. Из представленного графика видно, что исключение результатов 49-го измерения горизонтальной составляющей пылегазового облака существенно снижает среднеквадратическую ошибку для всех видов аппроксимации (рядом Фурье, полиномами 1-й и 2-й степени, рациональной функцией со знаменателем 1-й степени и функцией синус).

49-е измерение является замером горизонтального габарита, произведенное в конце наблюдений за 6-м взрывом. Необходимо отметить, что поведение среднеквадратической ошибки аппроксимации при исключении текущего измерения (за исключением аппроксимации первыми членами ряда Фурье), только уменьшается, что свидетельствует, что ошибки носят не случайный характер.

Номер исключаемого измерения представлен на оси абсцисс. Значение по оси ординат, соответствует среднеквадратической ошибки аппроксимации без рассматриваемого измерения. Графики среднеквадратической ошибки для аппроксимаций функциями полиномом второй степени ( $a_0 h^2 + a_1 h + a_2$ ) и синуса ( $a_0 \sin(kh + a_1)$ ) практически совпали, это видно на увеличенном фрагменте графика.

Кроме этого, следует отметить, что в поведение среднеквадратической ошибки для первых членов ряда Фурье наблюдаются «всплески», среднеквадратическая ошибка при исключении наблюдения возрастает. Это характерно для 18-го, 19-го, 34-го, 47-го и 51-го измерения. К тому же среднеквадратическая ошибка аппроксимации первых членов ряда Фурье на всей рассматриваемой генеральной совокупности наибольшая. Следовательно, аппроксимацию первыми членами ряда Фурье необходимо удалить из рассмотрения. практически совпадают.

Для остальных функций аппроксимаций (полиномами 1-й и 2-й степени, рациональной функцией со знаменателем 1-й степени и функцией синус) поведение среднеквадратическая ошибка при последовательном исключении измерений совпали. Однако, наименьшую среднеквадратическую ошибку имеют аппроксимаций полиномом 2-й степени и функцией синус.

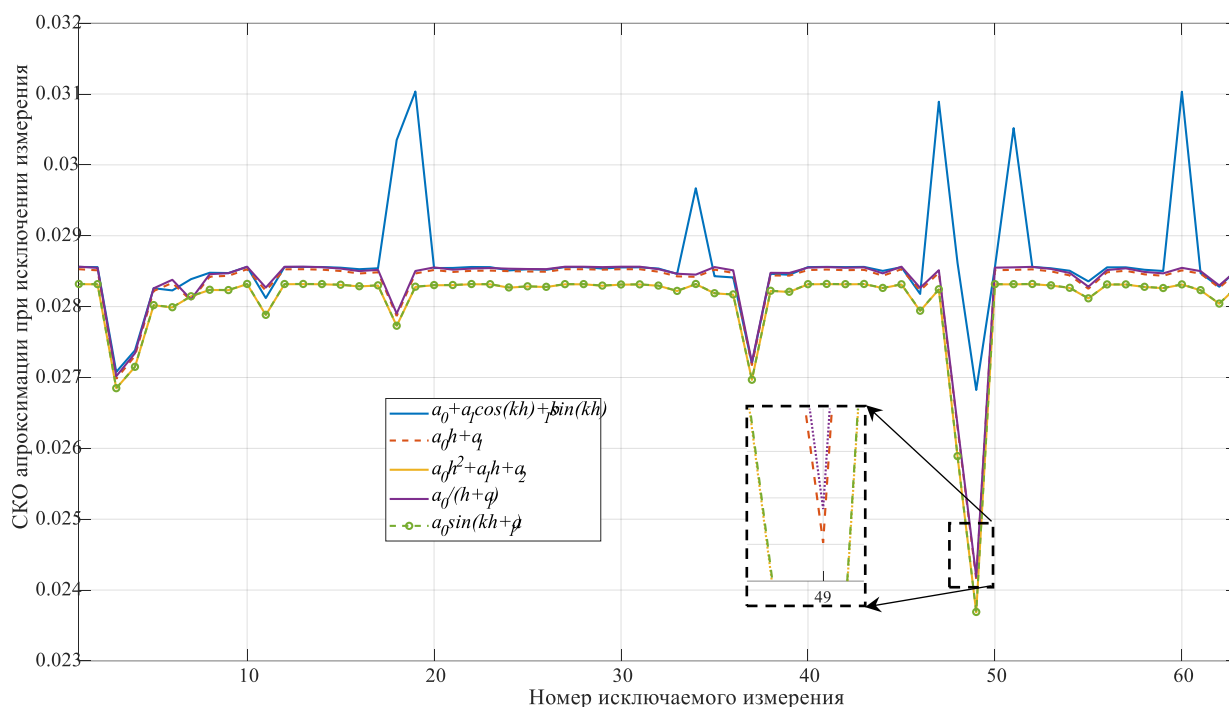


Рисунок 26 – Влияние на среднеквадратическую ошибку аппроксимации заданной функцией последовательного исключения одного измерения (помечены маркерами на аппроксимации функцией синус) горизонтального габарита пылегазового облака, которое производилось по видеоизображению, содержащего помехи

Из графиков среднеквадратических ошибок аппроксимации полиномом 2-й степени и функцией синус явно видно уменьшение среднеквадратической ошибки аппроксимации со значения 0,0283 при исключении: 49-го наблюдения на 16,25% до значения 0,0237, 48-го наблюдения на 8,5% до 0,0259, 3-го или 37-го на 4,6% до 0,027, 4-го на 4,2% до 0,0271. Поведение среднеквадратической ошибки аппроксимации при исключении 49-го и 48-го наблюдений представлен на рис. 27. При этом коэффициент детерминации достигает значений 0,34 и скорректированный коэффициент детерминации 0,32. При исключении из рассмотрения 3-го, 4 и 37-го измерения изменение среднеквадратической ошибки не превышает 7%, рисунок 28. Это косвенно свидетельствует, что оставшиеся ошибки носят случайный характер.

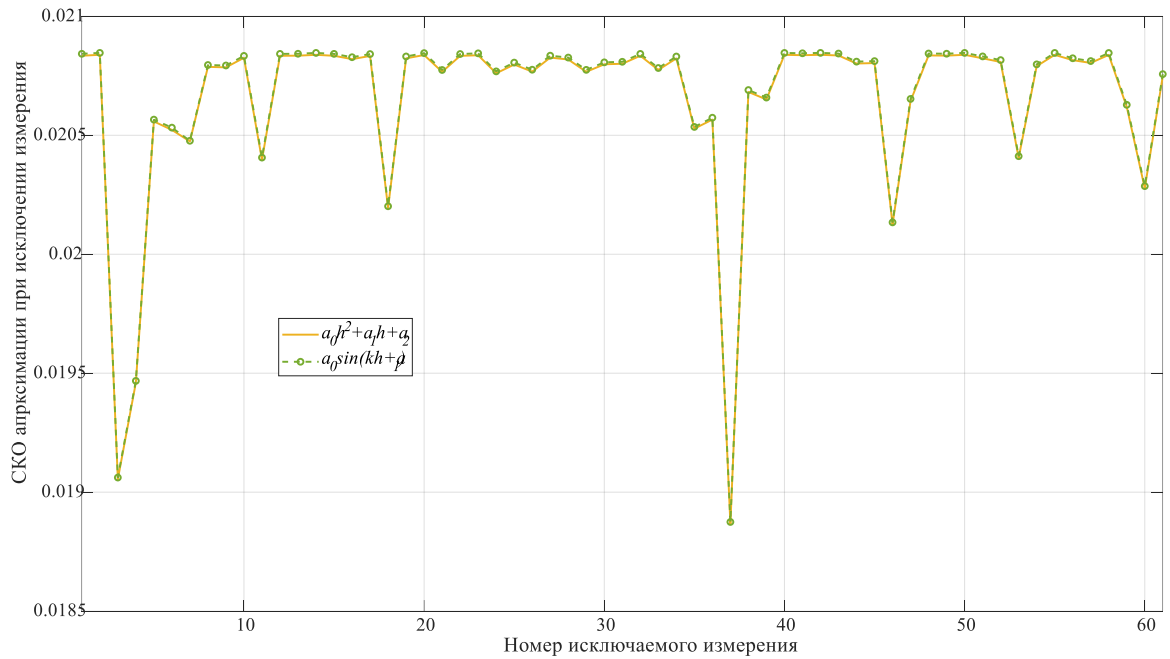


Рисунок 27 – Влияние на среднеквадратическую ошибку аппроксимации заданной функцией последовательного исключения одного измерения (помечены маркерами на аппроксимации функцией синус) горизонтального габарита пылегазового облака. Из генеральной совокупности исключены 48-й и 49-й замеры, которое производилось по двум последним видеоизображениям 8-го взрыва

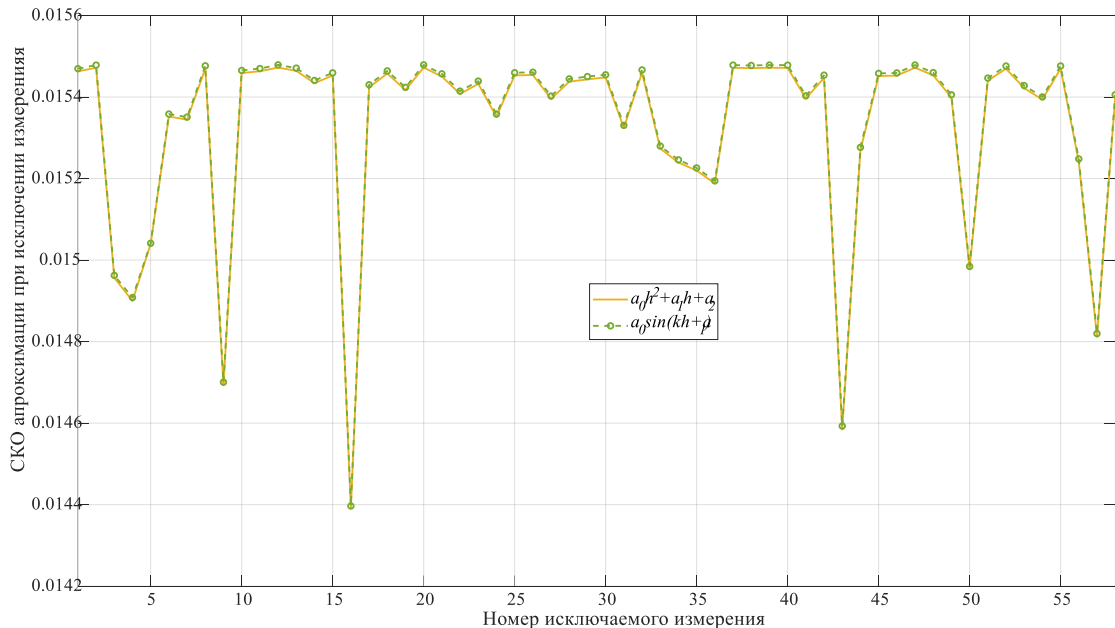


Рисунок 28 – Влияние на среднеквадратическую ошибку аппроксимации заданной функцией последовательного исключения одного измерения (помечены маркерами на аппроксимации функцией синус) горизонтального габарита пылегазового облака. Из генеральной совокупности исключены 3-й, 4-й, 37-й, 48-й и 49- замеры, которое производилось соответственно 3-му, 4-му видеоизображениям 1-го взрыв, 4-му видеоизображению 7-го взрыва и по двум последним видеоизображениям 8-го взрыва.

Окончательно рассчитанные коэффициенты аппроксимирующих функций и статистические оценки представлены в табл. 20. Таким образом получены два вида аппроксимирующих зависимостей, описывающие изменения горизонтального габарита пылегазового облака при его подъеме. По всей видимости необходимо использовать обе зависимости. Судя по статистическим оценкам, аппроксимирующая зависимость, представленная полиномом второй степени лучше, чем аппроксимирующая зависимость, представленная синусом. Но разница незначительная. Поэтому необходимо использовать обе для определения интенсивности вовлечения (истечения) окружающего воздуха в пылегазовое облако.

Таблица 20 – Статистические оценки результатов аппроксимации методом наименьших квадратов изменения горизонтального габарита пылегазового облака при его подъеме (последняя итерация)

| № | Вид функции аппроксимации | Коэффициенты                                               | Сумма квадратов в ошибок | СКО     | Коэффициент детерминации | Скорректированный коэффициент детерминации |
|---|---------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|---------|--------------------------|--------------------------------------------|
| 1 | $a_0 h^2 + a_1 h + a_2$   | $a_0 = -5,938e - 6$<br>$a_1 = 2,01e - 3$<br>$a_2 = 0,8351$ | 0,0118                   | 0,01464 | 0,5159                   | 0,4983                                     |
| 2 | $a_0 \sin(kh + a_1)$      | $a_0 = 1,006$<br>$a_1 = 7,321$<br>$k = 0,003211$           | 0,01294                  | 0,01534 | 0,4689                   | 0,4496                                     |

Следовательно, изменение горизонтального габарита пылегазового облака при его подъеме описывается двумя равнозначными соотношениями:

$$R(h) = R(h_0)[a_0 h^2 + a_1 h + a_2] \quad (2.13)$$

$$R(h) = R(h_0)[a_0 + a_1 \cos(kh) + a_2 \sin(kh)] \quad (2.14)$$

## 2.4 Построение математической модели прогнозирования высоты подъема пылегазового облака после взрыва

Математическая модель процесса подъема пылегазового облака должна позволять рассчитывать прогнозную высоту его подъема. Для этого вполне достаточно использовать дифференциальное уравнение движения с переменной скоростью:

$$\frac{dh}{dt} = V(h) \quad (2.15)$$

здесь:  $V(h)$  – скорость поднятия вверх конвекционного потока,

$h$  – высота поднятия конвекционного потока,

$t$  – время.

Изменение скорости подъема конвекционного потока, полученные на основе уравнений Мещерского и I-го начала термодинамики с учетом эффекта смещения приведены в работах [81, 106, 107], они выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dV^2}{dh} + 2\alpha(h)V^2 - 2g \frac{T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)}{T_{atm}(h)} = 0 \\ \left( \frac{dT_{pgo}}{dh} + \gamma_{atm}(h) \frac{T_{pgo}(h)}{T_{atm}(h)} + \alpha(h) (T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)) + \alpha(h) T_{pgo}(h) \right) = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

где:  $\alpha(h)$  – скорость вовлечения (истечения) окружающего воздуха в пылегазовое облако,

$g$  – ускорение свободного падения,

$T_{pgo}(h)$  - температура пылегазового облака,

$T_{atm}(h)$  - температура окружающего атмосферного воздуха,

$\gamma_{atm}(h)$  - сухоадиабатический градиент температуры в атмосфере.

Кроме этого, необходимо добавить уравнение определяющее изменение температуры окружающего атмосферного воздуха. На основе проведенных множества измерений температуры воздуха в чаше угольного разреза её вертикальный градиент не является постоянной величиной. Условно, можно обозначить три зоны изменения температуры окружающего воздуха. Первая, почвенный слой воздуха (от поверхности почвы до 2 м). Высота указанного слоя

определяется [108-109]. Вторая, слой воздуха от уровня 2 метра над почвой до верхней кромки первого уступа (до уровня дневной поверхности), то есть слой воздуха внутри чаши угольного разреза. В первом приближении изменение температуры окружающего воздуха в чаше угольного разреза можно определить по фактическим замерам, произведенным у дна, на уступах и на уровне дневной поверхности. Такая зависимость по всей видимости определяется некоторой функцией  $\beta(h)$ . Далее, при выходе за вертикальную границу чаши угольного разреза следует использовать замеренные значения температуры по высоте или средний сухоадиабатический градиент температуры в атмосфере. Замеры могут быть выполнены с помощью беспилотного летательного аппарата, метеозонда на привязи или с помощью метеорологического температурного профилера. В последнем случае появляется возможность автоматического измерения температуры атмосферы воздуха через 25 метров до высоты 1000 метров с точностью  $0,2^\circ$  до  $1,2^\circ$ . В принципе, установка профилера возможно внутри чаши угольного разреза. Тогда, в общем, вид функции изменения температуры окружающего воздуха имеет вид:

$$\beta(h) = \begin{cases} \beta(h) = T_{poh} - (T_{atm}^2 - T_{poh})h - \text{посвенный слой атмосферы} \\ \beta_i(h) = T_{atm}^i + \frac{T_{atm}^{i+1} - T_{atm}^i}{h^{i+1} - h^i} (h - h_i) - i - \text{й слой атмосферы} \\ \beta_{out}(h) = T_{atm}^0 + \gamma_{atm}(h)(h - h_i) - \text{за пределами разреза} \end{cases} \quad (2.17)$$

здесь:  $T_{poh}$  - температура почвенного слоя уступа, где производится взрыв,

$T_{atm}^2$  - температура слоя воздуха у почвы (согласно рекомендациям рекомендуется измерять на высоте 2 м от почвы),

$T_{atm}^i$  - температура атмосферного воздуха, замеренная на высоте  $h^i$ ,

$T_{atm}^{i+1}$  - температура атмосферного воздуха, замеренная на высоте  $h^{i+1}$ ,

$\beta_{out}(h)$  - функция изменения температуры атмосферного воздуха вне чаши угольного карьера,

$T_{atm}^0$  - температура атмосферного воздуха на уровне дневной поверхности.

В общем виде изменение температуры окружающего атмосферного воздуха можно записать в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{dT_{atm}}{dh} = \frac{d\beta}{dh} \quad (2.18)$$

Таким образом, для построения математической модели, описывающей процесс подъема пылегазового облака после проведения взрыва в угольном разрезе имеется четыре уравнения (2.15), (2.16), (2.17) и (2.18). В уравнениях (2.15), (2.16) и (2.18) независимая переменная – высота подъема пылегазового облака ( $h$ ). В уравнении (2.15) высота подъема пылегазового облака является зависящей переменной, независимой переменной выступает время ( $t$ ). Для того, чтобы привести к одной независимой переменной левые и правые части уравнений (2.17) умножим на скорость подъема пылегазового облака (2.15).

$$\begin{cases} \frac{dV^2}{dh} \frac{dh}{dt} + 2\alpha(h)V^2 \frac{dh}{dt} - 2g \frac{T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)}{T_{atm}(h)} \frac{dh}{dt} = 0 \\ \frac{dT_{pgo}}{dh} \frac{dh}{dt} + \gamma_{atm}(h) \frac{T_{pgo}(h)}{T_{atm}(h)} \frac{dh}{dt} + \alpha(h) (T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)) \frac{dh}{dt} + \alpha(h) T_{pgo}(h) \frac{dh}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Сокращая у первых, слагаемых приращение  $dh$  и записывая у остальных слагаемых в явном виде значение скорости подъема конвекционного потока, получаем уравнения:

$$\begin{cases} \frac{dV^2}{dt} + 2\alpha(h)V^2V - 2g \frac{T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)}{T_{atm}(h)} V = 0 \\ \frac{dT_{pgo}}{dt} + \gamma_{atm}(h) \frac{T_{pgo}(h)}{T_{atm}(h)} V + \alpha(h) (T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)) V = 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

Изменение температуры окружающего воздуха лучше всего представлять в виде функции  $T_{atm} = \beta(h)$ . Тогда, для совместно решения дифференциальных уравнений (2.15) и (2.20) не хватает явного вида функции, описывающей скорость вовлечения (истечения) окружающего воздуха в пылегазовое облако  $\alpha(h)$ . Ранее экспериментальным путем были получены функции, аппроксимирующие изменение габаритов пылегазовых облаков после взрывов:

$$a_0h^2 + a_1h + a_2 \quad (2.21)$$

и

$$a_0 \sin(kh + a_1) \quad (2.22)$$

Степень расширения конвекционного потока определяется производной по приращению высоты его подъема:

$$\frac{dR}{dh} = 2a_0h + a_1 \quad (2.23)$$

и

$$\frac{dR}{dh} = a_0 k \cos(kh + a_1) \quad (2.24)$$

С учетом того, скорость (интенсивность) вовлечения (истечения) окружающего воздуха в конвекционный поток определяется выражением

$$\alpha(h) = \frac{1}{M_i} \frac{dM_i}{dh} \quad (2.25)$$

Где  $M_i$  общая масса конвекционного потока и определяется формулой

$$\alpha(h) = \frac{3}{R_i} \frac{dR_i}{dh} + \frac{1}{P} \frac{dP}{dh} - \frac{1}{T_i} \frac{dT_i}{dh} \quad (2.26)$$

Здесь  $R_i$  радиус конвекционного потока на текущей высоте,  $P$  – давление,  $T_i$  – текущая абсолютная температура конвекционного потока. В результате получаем

$$\alpha(h) = \frac{3}{R_i} \frac{dR_i}{dh} + \frac{1}{P} \frac{dP}{dh} - \frac{1}{T_i} \frac{dT_i}{dh} \quad (2.27)$$

Подставляя степень расширения горизонтального габарита пылегазового облака (2.9), (2.10) в формулу (2.13) получаем:

$$\alpha(h) = -\frac{3}{R_i} [2a_0h + a_1] + \frac{1}{P} \frac{dP}{dh} - \frac{1}{T_i} \frac{dT_i}{dh} \quad (2.28)$$

и

$$\alpha(h) = -\frac{3}{R_i} a_0 k \cos(kh + a_1) + \frac{1}{P} \frac{dP}{dh} - \frac{1}{T_i} \frac{dT_i}{dh} \quad (2.29)$$

Вторые два слагаемых в формулах (2.28) и (2.29) имеют малый порядок ( $10^{-4} \text{ м}^{-1}$ ) и ими можно пренебречь. Следовательно, для интенсивности вовлечения (истечения) окружающего воздуха получаем выражения:

$$\alpha(h) = -\frac{3}{R_i} [2a_0h + a_1] \quad (2.30)$$

и

$$\alpha(h) = -\frac{3}{R_i} a_0 k \cos(kh + a_1) \quad (2.31)$$

Таким образом, математическая модель расчета высоты подъема пылегазового облака включает в себя дифференциальные уравнения, описывающие процесс подъема пылегазового облака, а именно:

уравнение изменения высоты

$$\frac{dh}{dt} = V(h)$$

уравнение изменение скорости подъема пылегазового облака

$$\frac{dV^2}{dt} + 2\alpha(h)V^3 - 2g \frac{T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)}{T_{atm}(h)} V = 0$$

уравнение изменения температуры пылегазового облака

$$\frac{dT_{pgo}}{dt} + \gamma_{atm}(h) \frac{T_{pgo}(h)}{T_{atm}(h)} V + \alpha(h) (T_{pgo}(h) - T_{atm}(h)) V = 0$$

уравнение изменения габарита пылегазового облака

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{3R} V \left( \alpha(h) \frac{T_{atm}(h)}{T_{pgo}(h)} + \frac{\Gamma}{\gamma * T_{atm}(h)} \right)$$

Для верификации разработанной математической модели расчета высоты, изменения габарита, скорости подъема и температуры пылегазового облака был произведен расчет по параметрам 1, 3, 4, 6, 9, 12 взрывов, проводившихся на угольном разрезе и построены графики рисунок 29 а, б, в, г.

Из приведенных графиков (рисунок 29 а) видно, что подъем пылегазового облака для 1, 3, 4, 6, 9, взрывов и его окончательная высота совпадают (красная линия), а кривая, соответствующая подъему 12-го взрыва происходит быстрее и окончательная высота выше. Это объясняется разностью уровней горизонта проведения взрывных работ. Пылегазовое облако, образованное при проведении 12-го взрыва, на горизонте взрываемого блока – 76 метров, поднялось на 170 метров. После взрывов (1-го, 3-го, 4-го, 6-го, 9-го) проведенных на уровнях от 135 до 177м., пылегазовые облака поднялись на 130 м.

Исходя из этого следует, что чем глубже находится взрываемый блок, тем выше высота подъема пылегазового облака под действием внутренних

конвективных потоков воздуха, а чем ближе к уровню дневной поверхности находится взрывааемый блок, тем высота подъема пылегазового облака меньше.

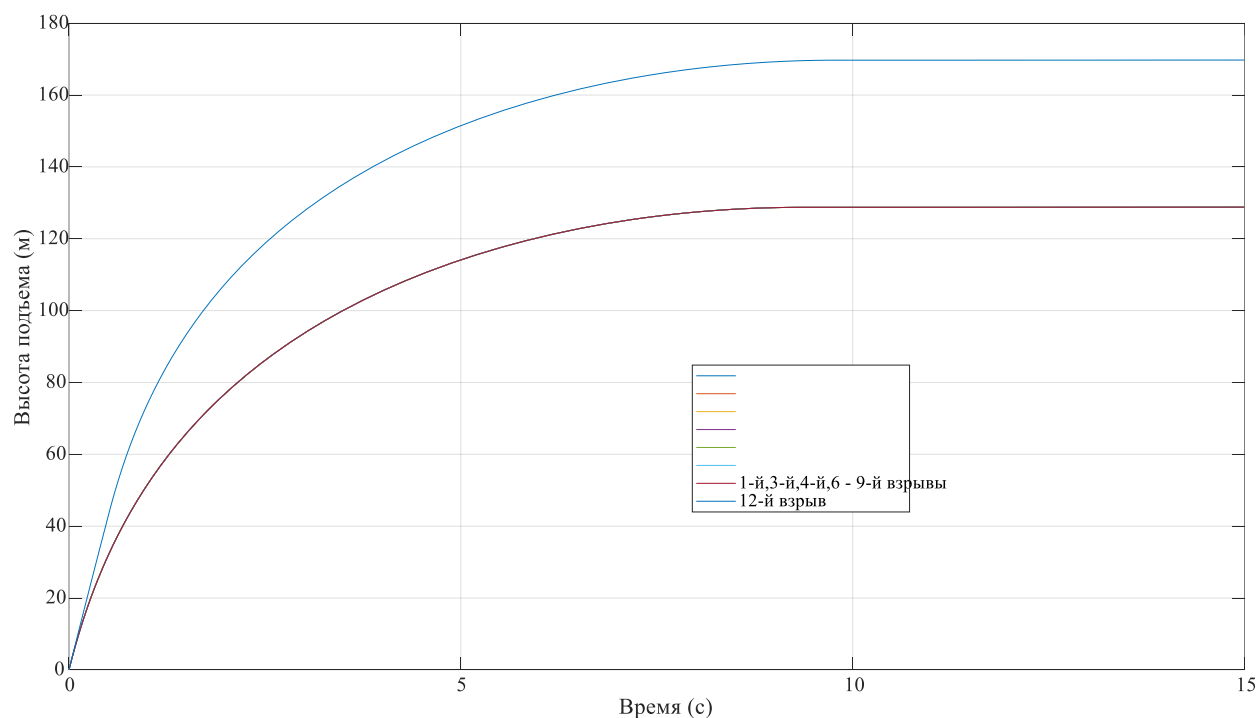


Рисунок 29 а, б, в, г – Графики высоты подъема, скорости подъема, температуры и изменения габарита пылегазового облака

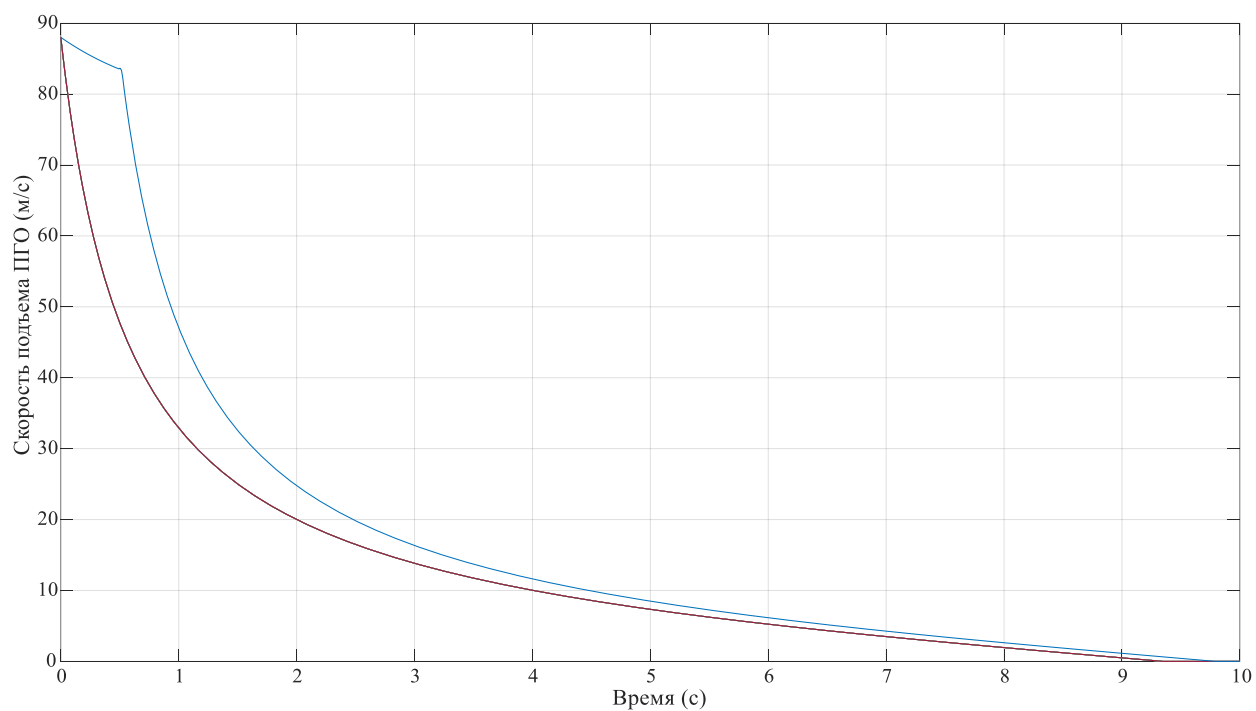


Рисунок 29 б

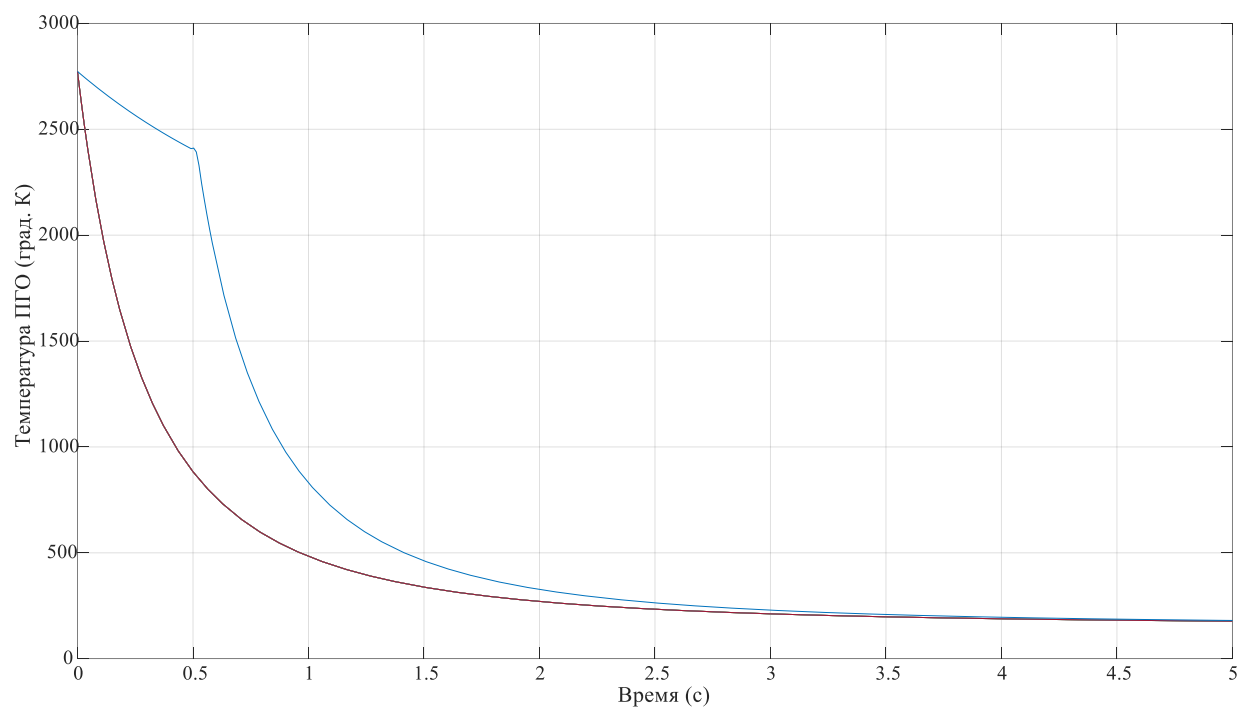


Рисунок 29 в

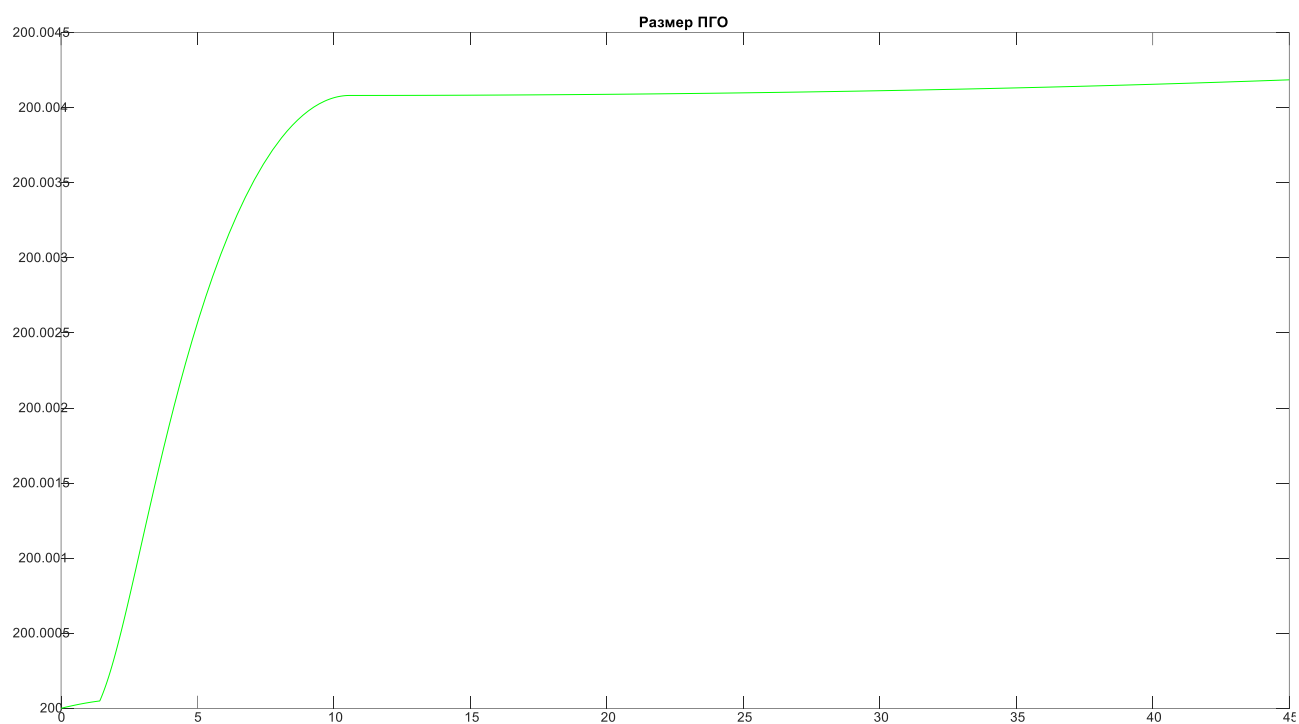


Рисунок 29 г

Таким образом доказано второе научное положение: *На основе уравнения Меццерского и I-го начала термодинамики разработана математическая модель расчета высоты подъема твердых частиц пылегазового облака после проведения массового взрыва на угольном разрезе, в отличии от существующих, учитывающая эмпирически выявленную нелинейную зависимость вовлечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако в пределах угольного разреза.*

## **2.5. Исследование частиц пыли методом электронной сканирующей микроскопии**

Дальнейшее исследование морфологических характеристик частиц мелкодисперсной пыли, а именно: площади, фрактальной размерности Минковского, объема, формы, проводилось двумя методами: методом электронной сканирующей микроскопии и методом лазерной конфокальной сканирующей микроскопии.

Отобранные и подвергнутые ситовому анализу пробы частиц пыли, в частности фракция (менее 0,05мм) были исследованы с помощью электронного микроскопа.

Полученные изображения классифицированы относительно длины измерительной шкалы микроскопа таблица 21.

Таблица 21 – Результаты распределения частиц пыли по наибольшей габарите в шт.

| 1 мкм | 2 мкм | 5 мкм | 10 мкм |
|-------|-------|-------|--------|
| 4     | 44    | 53    | 9      |

Анализ частиц мелкодисперсной пыли по размеру относительно измерительной шкалы, свидетельствует, что частицы размера 2 мкм и 5 мкм представлены в наибольшем количестве.

Для получения изображений с помощью электронного микроскопа образцы мелкодисперсной пыли, отобранные после ситового анализа фракция (менее 0,005 мм), размещаются на двусторонней клейкой электропроводящей углеродной ленте, обеспечивающей фиксацию частиц, необходимую фоновую структуру, и электрический контакт образца с держателем. Далее, двусторонняя клейкая лента с закрепленным на ней образцом размещается на предметном столике, который помещается в специальный паз в рабочей камере. После фиксации предметного столика, рабочая камера микроскопа закрывается и фиксируется. После чего происходит откачка воздуха из рабочей камеры до образования в ней вакуума. После завершения откачки воздуха из рабочей камеры в меню управления предметным столиком выбирается тип держателя, соответствующий использованному при загрузке образца. Далее образец подводится к объективной линзе на необходимое расстояние используя программу управления предметным столиком. Для этого необходимо изменить координату Z столика. После чего, с помощью программы управления микроскопом, устанавливается необходимое ускоряющее напряжение электронного пучка. Далее производится первичная корректировка баланса яркости\контраста, с помощью настройки в программе управления микроскопом. После чего, производится автоматическая фокусировка, или при необходимости подстройка фокуса вручную с помощью программы управления. Затем устанавливается необходимое для данного исследования увеличение и выбирается область исследования на образце. С помощью программы управления или кнопки «Photo», происходит сохранение изображения в пиксельном виде, и сохраняется в папке на рабочем компьютере. На рисунке 30, представлены полученные с помощью электронного микроскопа изображения частиц пыли.

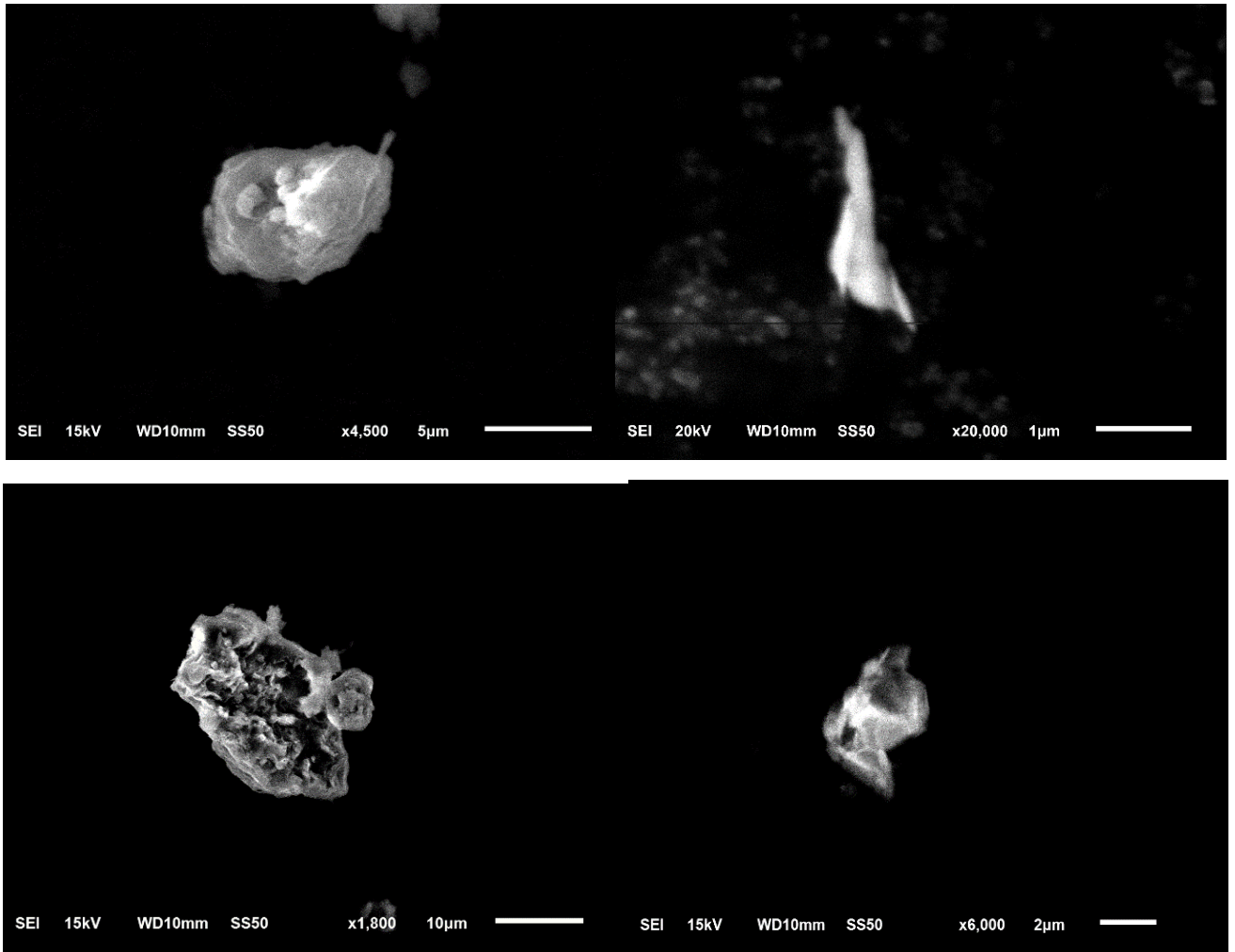


Рисунок 30 – Изображение частиц пыли

Для дальнейшего исследования морфологических параметров частиц мелкодисперсной пыли, в частности вычисления фрактальной размерности Минковского, описывающей параметры геометрически сложных форм, был применен оригинальный компьютерный алгоритм, реализованный на языке Python.

Математически размерность Минковского выражается формулой (2.32)

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{-\log \epsilon} \quad (2.32)$$

где  $N(\epsilon)$  – число множеств, покрывающих объект на изображении,  $\epsilon$ -размер множества, и определяется как отношение числа логарифма множеств (ячеек), покрывающих весь контур изображенного объекта к логарифму величины стороны ячейки.

Алгоритм вычисления фрактальной размерности Минковского состоит в первоначальной обработке изображений, полученных методом электронной сканирующей микроскопии, а именно выделении контура изображенного объекта, покрытии объекта множествами, и вычислении фрактальной размерности по формуле (2.32). В результате обработки изображения путем использования библиотеки OpenCV – являющейся совокупностью алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений, машинного обучения, формируется копия изображенного объекта, площадь которого ограничена черным контуром.

Пример работы алгоритма представлен на рисунке 31.



Рисунок 31 – Выделение контура частиц

Затем выделенный контур покрывается множествами (ячейками) разного размера. Пример покрытия объекта множествами (ячейками) показан на рисунке 32.

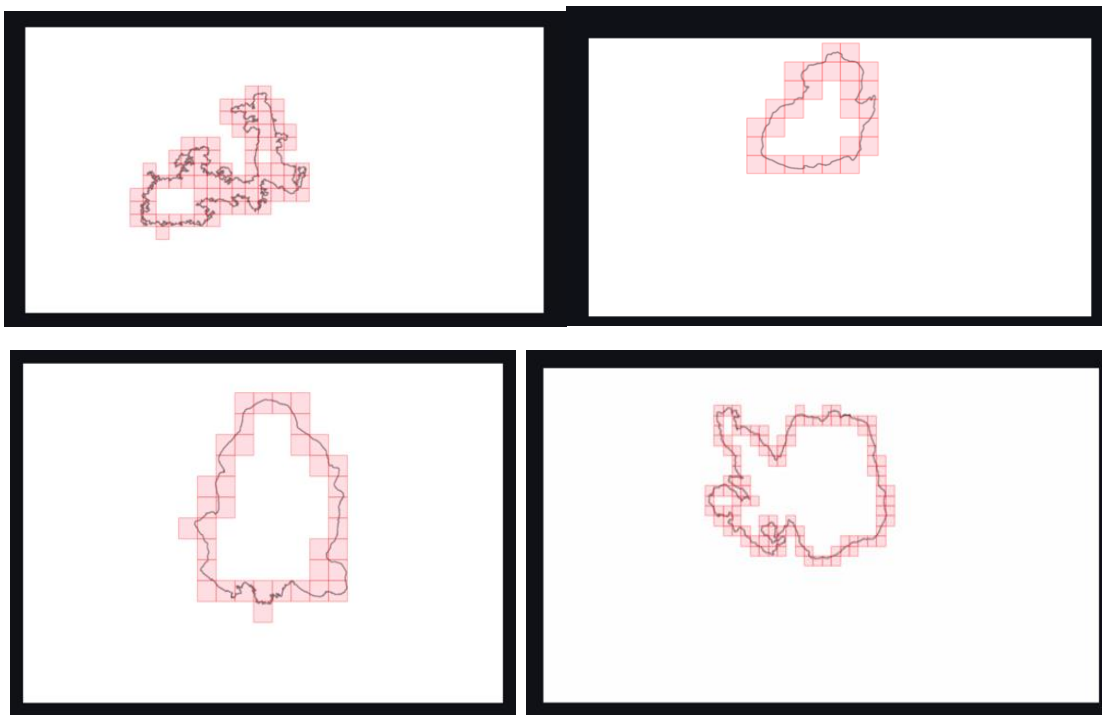


Рисунок 32 – Покрытие контура множествами

На рисунке 33 а, б представлен пример работы алгоритма расчета фрактальной размерности Минковского на примере конкретной частицы с построением линии регрессии, показывающей корреляцию между количеством множеств (ячеек) покрывающих контур объекта и размерами этих множеств (ячеек).



Рисунок 33а

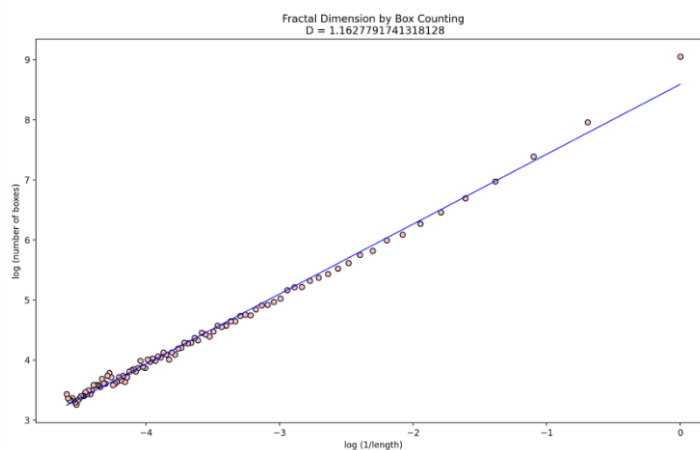


Рисунок 33 б

На рисунке 33 а, представлено покрытие выделенного контура частицы множествами, на рисунке 33 б, представлен график линии регрессии, где по вертикальной оси отложен логарифм множеств  $\log N(\epsilon)$ , а по горизонтальной логарифм отношения единицы к размеру множества  $\log \frac{1}{\epsilon}$ .

Данные вычисления фрактальной размерности для каждой частицы респираторной пыли и их средние значения представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Результаты расчета фрактальной размерности Минковского

| 1 мкм            | 2 мкм            | 5 мкм            | 10 мкм           |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1.31868304307495 | 1.34980739269480 | 1.35574084013513 | 1.17987395164382 |
| 1.28629055499146 | 1.21598596598440 | 1.31912411642859 | 1.17232982228866 |
| 1.26492434652107 | 1.24853444510498 | 1.26953077726383 | 1.17021931786715 |
| 1.27666687056815 | 1.18452889063744 | 1.26179694191454 | 1.28220133420692 |
|                  | 1.16415223977489 | 1.17621697436656 | 1.20805828013783 |
|                  | 1.34156753666739 | 1.17669863580852 | 1.17815815221868 |
|                  | 1.32878642944771 | 1.29406348264228 | 1.17030427482876 |
|                  | 1.17834007608357 | 1.19309225469923 | 1.18011545199992 |
|                  | 1.33302269820733 | 1.35740345488107 | 1.21539778649004 |
|                  | 1.18394736926217 | 1.30626893597439 |                  |
|                  | 1.30224816300007 | 1.28511543546876 |                  |
|                  | 1.23120315394330 | 1.36167625281901 |                  |
|                  | 1.21928258556511 | 1.33536017941035 |                  |
|                  | 1.20534080162839 | 1.17725263475521 |                  |
|                  | 1.20791743460796 | 1.27467845101210 |                  |
|                  | 1.25070463248590 | 1.16496306303885 |                  |
|                  | 1.24338962884984 | 1.17171388781007 |                  |
|                  | 1.31514207860208 | 1.23429177667840 |                  |
|                  | 1.33189889989266 | 1.26114037091690 |                  |
|                  | 1.31368039246535 | 1.21897205482436 |                  |
|                  | 1.23953565358668 | 1.24654623823840 |                  |

*Продолжение таблицы 22*

|  |                  |                  |  |
|--|------------------|------------------|--|
|  | 1.23199895224521 | 1.16467801841041 |  |
|  | 1.25912564163954 | 1.29199628288729 |  |
|  | 1.27043327952080 | 1.18336097686992 |  |
|  | 1.18872853519110 | 1.20771679046682 |  |
|  | 1.39214744381136 | 1.18128086329268 |  |
|  | 1.18607746246875 | 1.30874511329776 |  |
|  | 1.16778953085862 | 1.33609965407809 |  |
|  | 1.20548543664017 | 1.16625392511480 |  |
|  | 1.21800103484003 | 1.18262920116550 |  |
|  | 1.16517049545311 | 1.18209046299842 |  |
|  | 1.23652628322023 | 1.27433453388485 |  |
|  | 1.16993432732998 | 1.19380189154003 |  |
|  | 1.19928314276362 | 1.17116547505209 |  |
|  | 1.28293862164748 | 1.31328038412779 |  |
|  | 1.28539287409156 | 1.22352556075055 |  |
|  | 1.27351020931994 | 1.27320203080300 |  |
|  | 1.17664514493441 | 1.21967746712032 |  |
|  | 1.24693889121912 | 1.26868906088943 |  |
|  | 1.19406701707343 | 1.19131174127066 |  |
|  | 1.41624291033822 | 1.25743812480569 |  |
|  | 1.20900638441206 | 1.20074422565965 |  |
|  | 1.34328390218461 | 1.18545865433911 |  |
|  | 1.17356423194522 | 1.18442510737928 |  |
|  |                  | 1.22868550974005 |  |
|  |                  | 1.22892899083664 |  |
|  |                  | 1.28099373801087 |  |
|  |                  | 1.19374631296147 |  |
|  |                  | 1.21402795426781 |  |
|  |                  | 1.17219655812349 |  |
|  |                  | 1.19169001567320 |  |

Продолжение таблицы 22

|                 |                 |                  |                |
|-----------------|-----------------|------------------|----------------|
|                 |                 | 1.24528363974128 |                |
|                 |                 | 1.28378945875142 |                |
|                 |                 |                  |                |
| 1.2866412037889 | 1.2473024595827 | 1.2385451789320  | 1.195184263520 |

Нахождение площади частиц респираторных фракций пыли осуществлялось с помощью написанных на языке Python алгоритмов, применяющих библиотеки EasyOCR и OpenCV.

Оптическое распознавание символов и извлечение текста из изображения осуществляется с помощью технологии EasyOCR, которая определяет области изображения в которых содержится текст путем обнаружения границ символов и анализа контура найденных символов. После того как области изображения, содержащие в себе текст обнаружены, алгоритм EasyOCR распознает отдельные символы и слова в этих областях. Пример работы алгоритма представлен на рисунке 34.

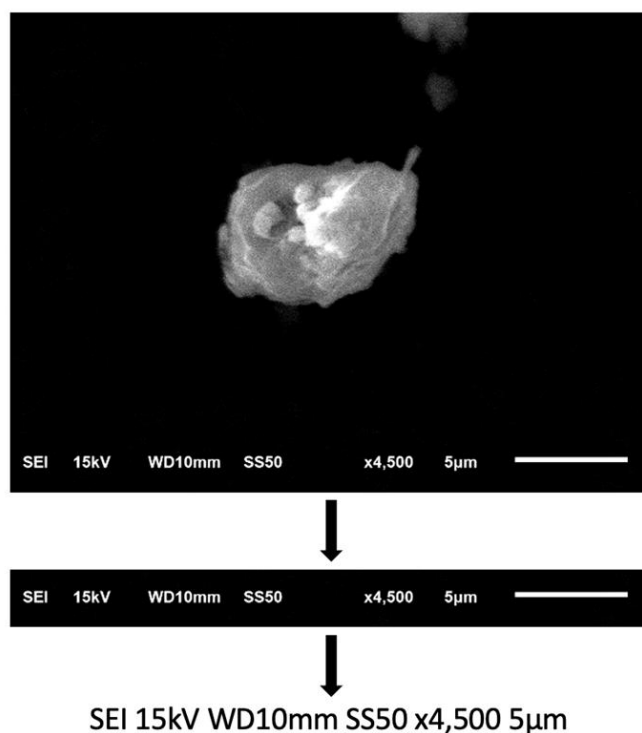


Рисунок 34 – Пример работы алгоритма выделения текста на изображении.

После того, как алгоритм выделил текст на изображении, формируется массив данных, в котором необходимо выделить и распознать значение  $X\mu\text{m}$ , где  $X$  – любое число. Данное значение, представляет из себя масштаб измерительной шкалы электронного микроскопа.

Так, на примере рисунке 35, размер в  $5\mu\text{m}$  распознается как 5, что в дальнейшем будет использоваться для вычисления площади частицы пыли как масштабная единица.

Работа второго алгоритма состоит из двух этапов, представленных на рисунке 35: выделение и определение шкалы размерности микроскопа на изображении, путем захвата области содержащей необходимый объект, обнаружение его границ, и выделения контура объекта, на рисунке 35 показано красным цветом. Второй этап заключается в подсчете количества пикселей, содержащихся в выделенной области, которая содержит объект - измерительную шкалу, на рисунке 35 выделена зеленым цветом.

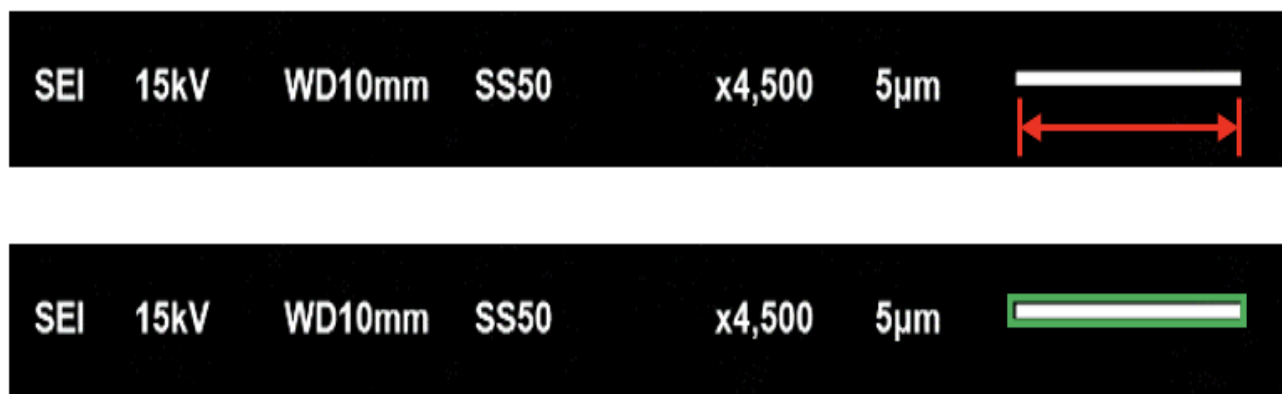


Рисунок 35 – Нахождение и определение шкалы размерности и подсчет количества пикселей в ней.

Первый этап использует метод `findContours` (выделение контура объекта) библиотеки `OpenCV`. С его помощью происходит поиск контуров. После того, как была найдена и определена шкала, используется второй метод той же библиотеки – `boundingRect`. Принцип заключается в нахождении ограничительных рамок контура в пикселях, а именно прямоугольника, его длину и ширину.

Финальным этапом работы алгоритма, является нахождение размера одного пикселя на изображении, относительно измеренных значений размера частицы пыли, путем деления значения измерительной шкалы на число пикселей в ней.

Площадь частицы вычисляется как произведение количества пикселей внутри области ограниченной черным контуром на размер одного пикселя, возведенного в квадрат.

Далее площадь частиц вычислялась согласно международной классификации мелкодисперсной пыли РМ 2,5 и РМ 10 с шагом в 2,5 мкм, так как промежуточные фракции также являются респирабельными. Усредненные данные вычисления площади частиц приведены в таблице 23. Также в данной таблице приведены расчетные данные соответствующие площади шара при Стоксовском представлении частиц.

Расчет среднего значения площади частиц полученного методом электронной сканирующей микроскопии и соответствующей средней площади круга при представлении частиц в виде Стоксовского шара производился по формуле (2.33):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.33)$$

где  $\bar{x}$ - среднее значение площади,  $x_i$ - площадь частицы,  $n$ - количество значений в выборке.

Таблица 23 –Усредненные значения фактической и рассчитанной площади

| Параметр  | 0мкм-2,5<br>мкм       | 2,5мкм-5мкм            | 5мкм-7,5мкм            | 7,5мкм-<br>10мкм       | 10мкм<X<50мкм           |
|-----------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| S частицы | 3,861мкм <sup>2</sup> | 13,013мкм <sup>2</sup> | 24,941мкм <sup>2</sup> | 48,074мкм <sup>2</sup> | 227,772мкм <sup>2</sup> |
| S круга   | 6,055мкм <sup>2</sup> | 20,425мкм <sup>2</sup> | 39,155мкм <sup>2</sup> | 75,464мкм <sup>2</sup> | 357,601мкм <sup>2</sup> |

Для частиц пыли методом наименьших квадратов была получена эмпирическая зависимость площади частицы пыли от её габарита (диаметра)  $S_{ch} =$

$0,5615 \left(\frac{d}{2}\right)^2$ . На графике (рисунок 36) представлены зависимости изменения проекционных площадей сферы и частицы от её габаритов.

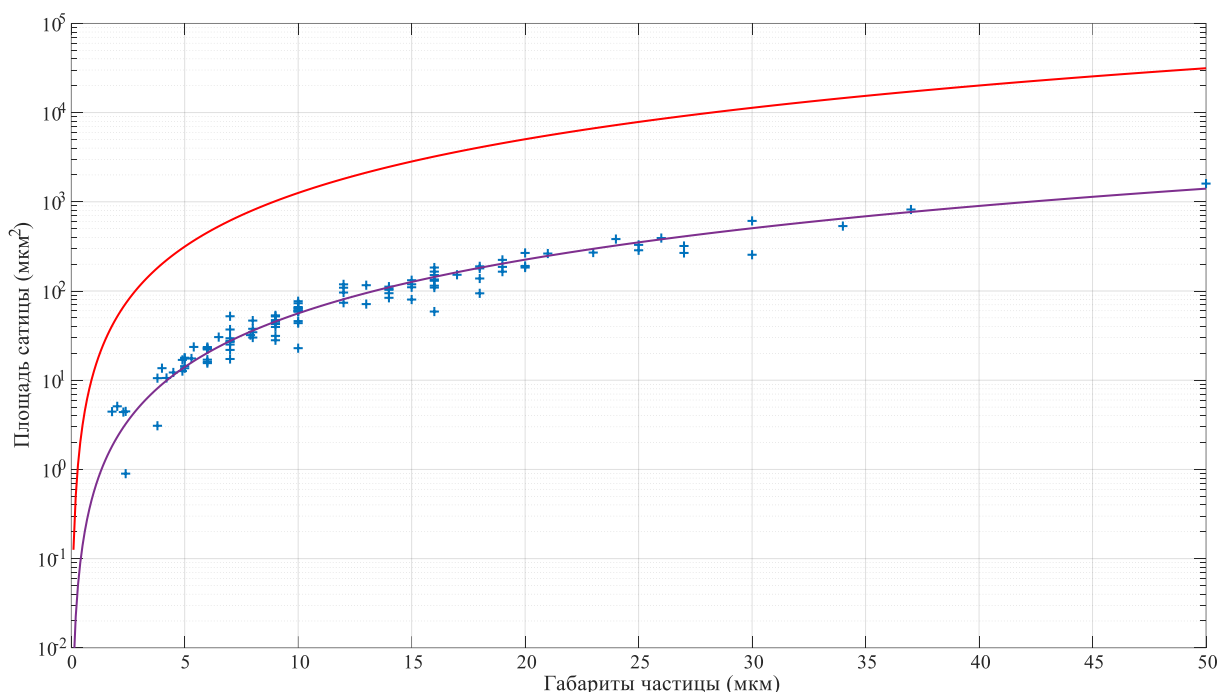


Рисунок 36 – Зависимости изменения площади сферы и фактической площади частицы от её габаритов (красная линия – аппроксимирующая функция проекционной площади сферы, фиолетовая линия – аппроксимирующая функция полученная на основе экспериментальных данных)

**Таким образом доказано третье научное положение:** *На основе обработки изображений, полученных методом электронной сканирующей микроскопии получено, что эффективные площади частиц пыли респираторных фракций (в диапазоне размеров до 50 мкм) не превышают 48,9 % с вероятностью 99,9 % проекционной площади сферы.*

По результатам исследования морфологических характеристик мелкодисперсных частиц пыли респираторных фракций методами электронной сканирующей микроскопии, конфокальной лазерной микроскопии, результатам полученным с помощью алгоритмов обработки изображений методом компьютерного зрения составлена таблица объемных и поверхностных

характеристик частиц пыли (таблица 24), таких как: площадь, фрактальная размерность, объем, а также средний размер как средний габарит, площадь круга и объем шара при представлении частиц в виде Стоксовского шара.

Таблица 24 – Объемные и поверхностные характеристики частиц пыли

| Параметр                       | 0мкм-<br>2,5мкм        | 2,5мкм-<br>5мкм        | 5мкм-7,5мкм             | 7,5мкм-<br>10мкм        | 10мкм<X<50мкм            |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Объем частицы<br>$V$           | 1,732мкм <sup>3</sup>  | 18,17мкм <sup>3</sup>  | 49,94мкм <sup>3</sup>   | 120,333мкм <sup>3</sup> | 227,647мкм <sup>3</sup>  |
| Объем шара $V_{ш}$             | 11,648мкм <sup>3</sup> | 77,410мкм <sup>3</sup> | 208,996мкм <sup>3</sup> | 542,078мкм <sup>3</sup> | 5103,292мкм <sup>3</sup> |
| Площадь<br>частицы $S$         | 3,861мкм <sup>2</sup>  | 13,013мкм <sup>2</sup> | 24,941мкм <sup>2</sup>  | 48,074мкм <sup>2</sup>  | 227,722мкм <sup>2</sup>  |
| Площадь круга<br>$S_{кр}$      | 6,055мкм <sup>2</sup>  | 20,425мкм <sup>2</sup> | 39,155мкм <sup>2</sup>  | 75,464мкм <sup>2</sup>  | 357,601мкм <sup>2</sup>  |
| Средний размер                 | 1,25мкм                | 3,75мкм                | 6,25мкм                 | 8,75мкм                 | 30мкм                    |
| Фрактальная<br>размерность $D$ | 1,213                  | 1,205                  | 1,178                   | 1,189                   | 1,193                    |

Исходя из данных представленных в таблице 24 следует что, фактический объем и площадь мелкодисперсных частиц пыли респираторных фракций точнее, чем объем и площадь при представлении частиц в виде Стоксовской сферы, это позволяет уточнить массу частиц пыли в пылегазовом облаке и массу седиментируемой пыли в границах горного отвода и за его пределами в близлежащих населенных пунктах.

Таким образом использование реального форм фактора и поверхностных характеристик мелкодисперсных частиц пыли респираторных фракций, позволяет более объективно оценить пылегазовое облако и степень влияния седиментации частиц из него на экосистему региона.

## 2.6. Выводы по главе

В главе описаны исследования морфологических характеристик мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций, образованных в результате проведения взрыва на угольном разрезе методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии, методом электронной микроскопии, подробно описывается механизм вычисления фактического объема частицы пыли, выявления ее формы, механизм описания топологического пространства частицы поверхностью второго порядка - эллипосидом. С помощью алгоритмов обработки изображений, полученных методом электронной сканирующей микроскопии, выявлена площадь мелкодисперсных частиц пыли, а также фрактальная размерность Минковского. Приводится сравнение усредненной фактической площади частиц и соответствующей площади Стоксовского шара. Описаны объемные и поверхностные характеристики частиц пыли такие как: площадь, объем, средний размер как средняя габарита, фрактальная размерность Минковского. Описанные объемные и поверхностные характеристики частиц мелкодисперсной пыли респирабельных фракций, позволяют уточнить объем и площадь частиц, что дает возможность в совокупности с данными рентгенофлуоресцентного анализа уточнить массу пыли в пылегазовом облаке.

Разработана математическая модель расчета высоты подъема пылегазового облака на основе уравнения Мещерского и I-го начала термодинамики учитывающая нелинейность скорости вовлечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако, что позволяет спрогнозировать область распространения пылегазового облака после проведения массового взрыва на угольном разрезе.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ МАССОПЕРЕНОСА ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА**

#### **3.1. Виртуальный физический эксперимент методом эквивалентных материалов**

На сегодняшний день физическое моделирование в горном деле, как и применение численных методов расчета, играет важную роль, позволяя изучать объект или явление меняя условия эксперимента [110-112]. Физическое моделирование процессов методом эквивалентных материалов обеспечивает прямой доступ изучению и пониманию геотехнических явлений, так как полномасштабный натурный эксперимент является более дорогим и трудоемким, требующим большого числа повторных опытов [113-117].

Для получения механизмов распространения пылегазового облака и седиментации частиц из него моделирование проводилось в программной среде Blender physics simulations, включающей в себя библиотеку физики Bullet Engine. Данная программа позволяет моделировать физические процессы в виртуальной среде трехмерного пространства с определенной степенью аппроксимации. К функциональным возможностям данной библиотеки относятся:

- динамика абсолютно твердого тела;
- динамика деформируемого тела;
- динамика жидкостей;
- динамика газов.

Суть физического эксперимента методом эквивалентных материалов заключается в визуализации процесса седиментации мелкодисперсных частиц пыли, с морфологическими характеристиками в соответствии с таблицей 24, имеющих одинаковую плотность, из пылегазового облака В качестве эквивалентного материала была выбрана порода – алевролит с плотностью 2,2 гр./см<sup>3</sup>.

На рисунке 37 а показаны модели частиц с выявленными морфологическими характеристиками и частиц представляемые в виде стоксовского шара. На рисунке

37 б изображены две модели пылегазового облака состоящего из частиц пыли с выявленными морфологическими характеристиками и частиц представляемых в виде стоксовского шара.

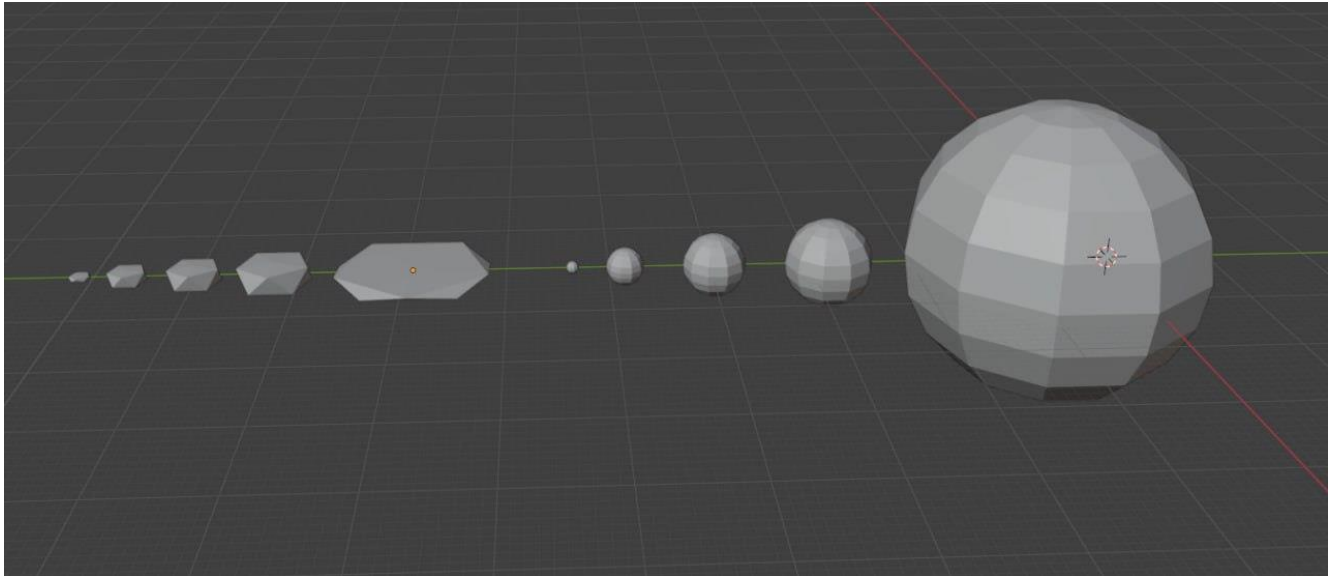


Рисунок 37 а. Модели частиц пыли

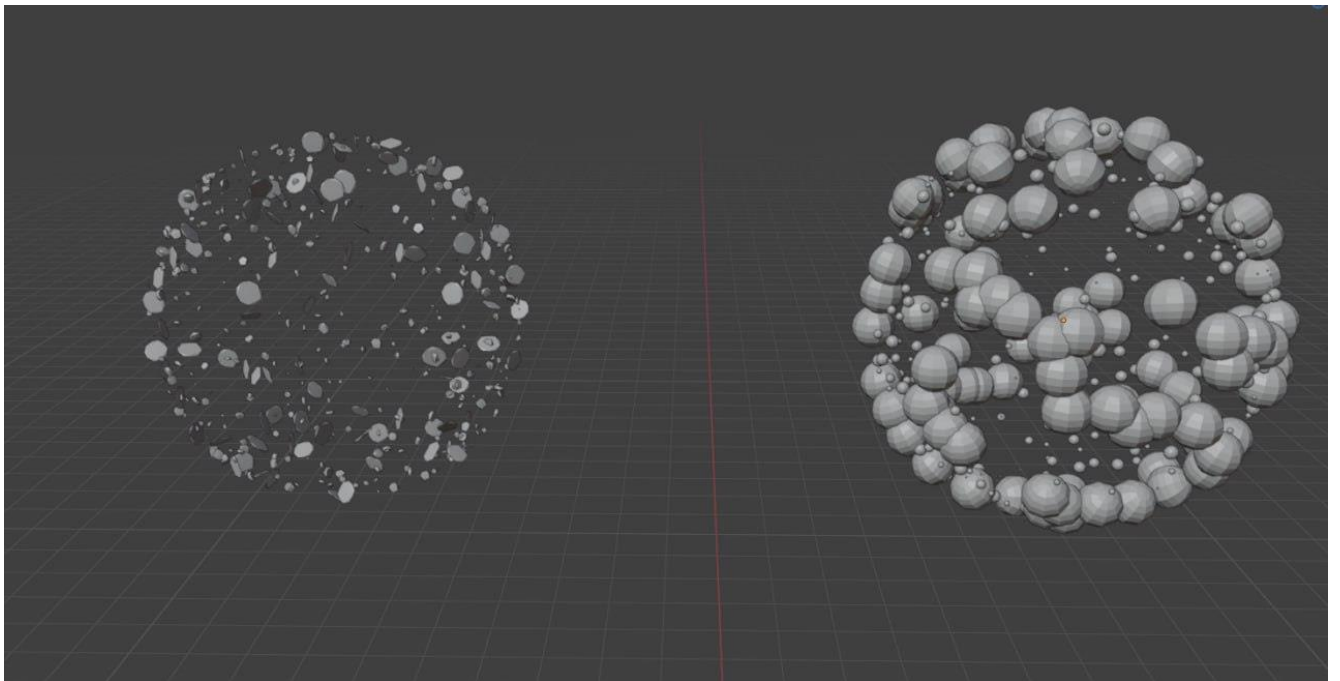


Рисунок 37 б. Модели пылегазового облака

Визуализация процесса седиментации частиц из пылегазового облака показана на рисунке 38.



Рисунок 38 – Седиментация частиц из пылегазового облака

Результаты эксперимента показали что скорость седиментации асферических частиц пыли с морфологическими характеристиками в соответствии с таблицей 24 на 70% ниже чем скорость частиц в виде стоксовского шара. Также при воздействии ветра силой 1 м/с асферические частицы распространяются на большее расстояние так как находятся в воздухе дольше, причем меньшую фракцию пыли следует отнести к витающей, так как она способна находится в воздухе во взвешенном состоянии. Это объясняется действием сопротивления воздуха, значительным по сравнению с весом пылинки. Сопротивление зависит от площади поверхности тела и изменяется пропорционально квадрату его линейных размеров; вес же, обуславливающий падение, зависит от объема тела и изменяется пропорционально кубу его линейных размеров.

### 3.2. Учет аэродинамических характеристик частиц мелкодисперсной пыли

Кемеровская область Российской Федерации обладает развитой сырьевой базой твердых полезных ископаемых, что позволяет поддерживать экономический потенциал не только региона, но и всей страны [118-122]. Освоение месторождений угля с благоприятными горно-геологическими условиями посредством проведения открытых горных работ, рассматривается как комплекс мероприятий, являющийся источником повышенной экологической нагрузки на окружающую среду региона, и в первую очередь на его атмосферу [123-126].

Развитие открытых горных работ на угольных разрезах должно проводиться с учетом комплекса одновременно действующих факторов таких как: метеорологические, технологические. Особого внимания требует процесс массопереноса пылевой составляющей пылегазового облака образованной в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе, так как траектория ее распространения в большинстве случаев лежит за пределами горного отвода. Современные методы прогнозирования техногенного воздействия взрывных работ на приземный слой атмосферы, а также расчета параметров пылевой составляющей пылегазового облака, требуют более глубокого понимания процессов, как формирования пылевой части пылегазового облака, так и ее распространения за границей горного отвода, с учетом влияния метеорологических параметров и технологических параметров разреза.

Для изучения механизмов распространения и седиментации частиц пыли из пылегазового облака, мелкодисперсные частицы пыли следует представлять в виде аэродинамического профиля крыла, так как форма частиц пыли выявленная методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии является плоской.

Аэродинамический профиль крыла определяется как форма поперечного сечения аэродинамической конструкции. Тело в форме профиля крыла, двигаясь в потоке газа, создаёт подъёмную силу, перпендикулярную направлению движения потока. Пример аэродинамического профиля крыла, а также сил и равнодействующей этих сил изображен на рисунке 39.

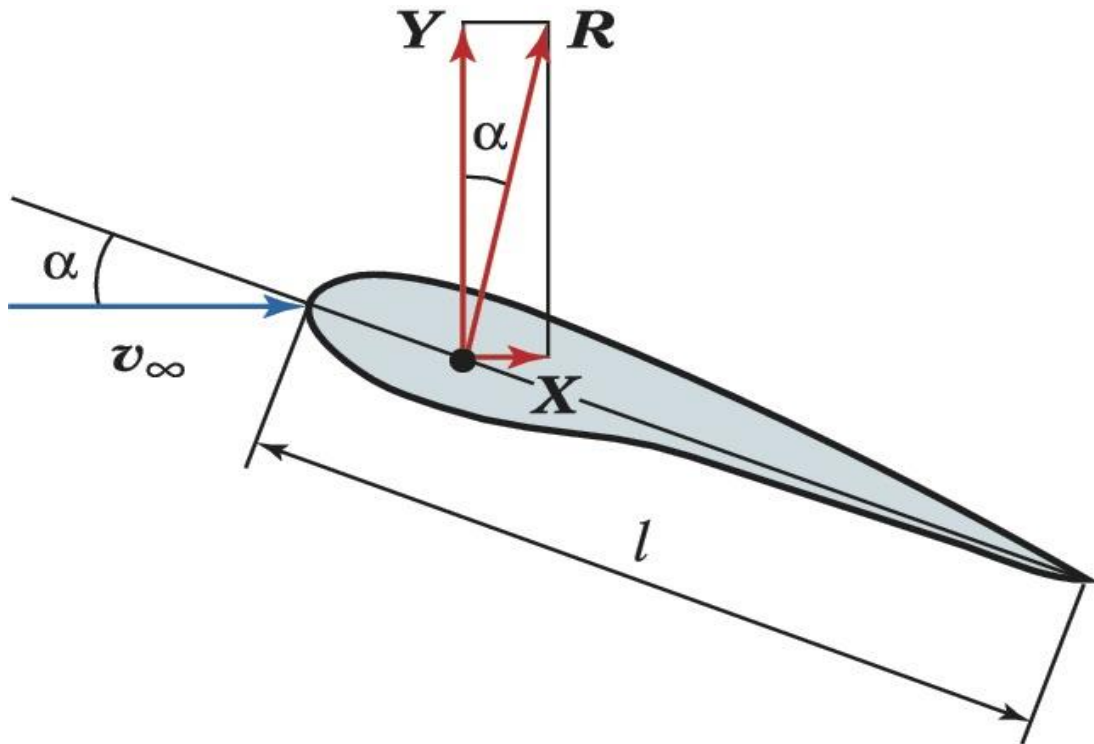


Рисунок 39 – Аэродинамический профиль крыла

На рисунке 39 вектор  $X$  - сила лобового сопротивления определяющаяся как сила возникающая вследствие движения крыла в среде, тормозящая его движение и направленная в сторону противоположную движению, формула:

$$Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S_y \quad (3.1)$$

где  $C_y$  – коэффициент подъемной силы, зависящий от угла атаки;

$\frac{\rho V^2}{2} S_y$  – скоростной напор действующий на площадь крыла в горизонтальной проекции.

Вектор  $Y$  изображенный на рисунке 39 - подъемная сила возникающая вследствие обтекания крыла потоками воздуха и образования разности давлений под крылом и над крылом, и направленная перпендикулярно движению крыла:

$$X = C_x \frac{\rho V^2}{2} S_x \quad (3.2)$$

где  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления, зависящий от угла атаки,

$\frac{\rho V^2}{2} S_x$  – скоростной напор действующий на площадь крыла в вертикальной проекции.

Вектор  $R$ , изображенный на рисунке 39 - есть равнодействующая подъемной силы и силы лобового сопротивления крыла, называемая полной аэродинамической силой крыла и рассчитываемая по формуле:

$$R = C_r \frac{\rho V^2}{2} S \quad (3.3)$$

где  $C_r$  – безразмерный коэффициент полной аэродинамической силы;

$\frac{\rho V^2}{2}$  – скоростной напор;

$S$  – площадь обтекаемого тела.

На рисунке 40 изображены профили частиц мелкодисперсной пыли, которые рассматриваются как аэродинамический профиль крыла.

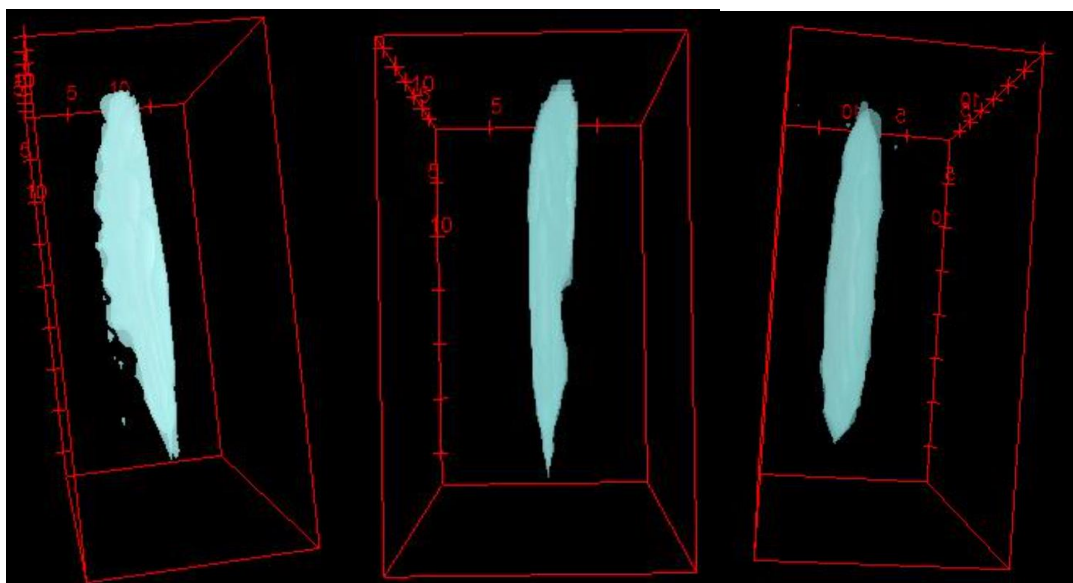


Рисунок 40 – Профиль частиц пыли

Последующее распространение в атмосфере мелкодисперсных частиц пыли респираторных фракций, образованных в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе, описывается как свободное планирование аэродинамического профиля крыла [127]:

$$L = K \Delta H = \frac{C_y}{C_x} \Delta H \quad (3.4)$$

где  $L$  – дальность планирования;

$\Delta H$  – разность высот;

$K$  – аэродинамическое качество крыла, определяемое как отношение коэффициентов подъемной силы  $C_y$  к коэффициенту лобового сопротивления  $C_x$ ;

$C_y$  – коэффициент подъемной силы действующей на площадь частицы в горизонтальной проекции;

$C_x$  – коэффициент лобового сопротивления, действующий на площадь частицы в вертикальной проекции.

Коэффициенты  $C_y$  и  $C_x$  определяются графиком зависимости данных аэродинамических коэффициентов называемым полярой. Поляра скоростей или полярная диаграмма для аэродинамического профиля строится путем продувки профиля в аэродинамической трубе при различных углах атаки для разных аэродинамических профилей [128] рисунок 41.

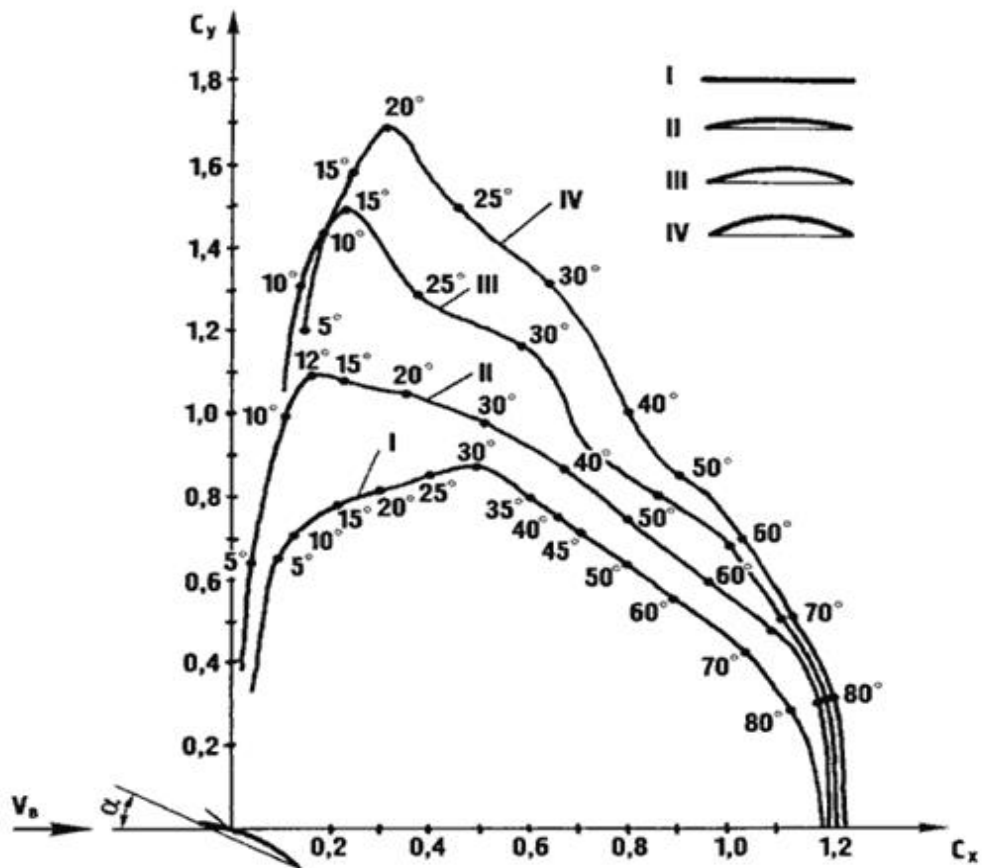


Рисунок 41 – Полярная диаграмма скоростей

По оси ординат показаны значения аэродинамического коэффициента подъемной силы  $C_y$ , при различных углах атаки, по оси абсцисс показаны значения аэродинамического коэффициента лобового сопротивления  $C_x$ . Соотношением этих коэффициентов и характеризуется аэродинамическое качество профиля крыла. Учитывая форму частиц мелкодисперсной пыли, полученную в результате исследования частиц методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии, строится аппроксимируемая форма частицы к форме профиля плоской пластины. Для наибольшего угла атаки - 30 градусов аэродинамическое качество  $K$  для плоской пластины наибольшее, и с учетом соотношения аэродинамических коэффициентов  $C_y$  и  $C_x$ , равна 1,8.

Аэродинамическое качество профиля крыла с учетом скоростного напора формула (3.4) имеет вид (3.5)

$$L = \frac{C_y \frac{\rho V^2}{2} S_y}{C_x \frac{\rho V^2}{2} S_x} \Delta H \quad (3.5)$$

Сократив подобные в числителе и в знаменателе получим что дальность свободного планирования аэродинамического профиля определяется формулой:

$$L = \frac{C_y S_y}{C_x S_x} \Delta H \quad (3.6)$$

Учитывая, что площадь, на которую действует лобовое сопротивление мала, формула (3.6) примет вид:

$$L = \frac{C_y S_y}{C_x} \Delta H \quad (3.7)$$

Дальнейшее распространение пылегазового облака в атмосфере происходит со скоростью ветра на высоте его подъема, которая рассчитывается по формуле [129],

$$v_h = v_0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (3.8)$$

где  $v_h$  – скорость ветра на высоте подъема пылегазового облака,  $v_0$  – скорость ветра на высоте 10-15 метров от поверхности грунта,  $h$  – высота подъема пылегазового облака;  $h_0$  – высота произведения замеров 10-15 м,  $\alpha$  – показатель степени, зависящий от времени года.

В таблице 22 приведены усредненные результаты измерения площади частиц пыли респирабельных фракций, на которые действует подъемная сила. Оценка полученных результатов проводилась путем построения 95% доверительных интервалов для генерального среднего площади частиц пыли, формула (3.9).

$$(\bar{x} - t_{kp} * \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{kp} * \frac{s}{\sqrt{n}}) \quad (3.9)$$

$t_{kp}$  определяется по таблице распределения Стьюдента

$$T_{\text{табл}} = 3,495$$

$$t_{kp} * \frac{s}{\sqrt{n}} = 3,495 \frac{1.504}{\sqrt{5}} = 2,351$$

$$(3,861-2,351; 3,861+2,351) = (1,51; 6,21)$$

С вероятностью 95% можно утверждать, что среднее значение площади частиц пыли фракции (0 мкм-2,5 мкм) не выйдет за пределы доверительного интервала (1,51; 6,21).

Доверительные интервалы площади частиц, для генерального среднего фракций пыли (0-2,5 мкм 2,5-5 мкм 5-7,5 мкм 7,5-10 мкм 10-50 мкм) равны соответственно: (1,51; 6,21), (9,48; 16,55), (19,98; 29,9), (41; 55,15), (144,99; 310,45). На рисунке 42 показаны построенные 95% доверительные интервалы для эффективных площадей частиц пыли.

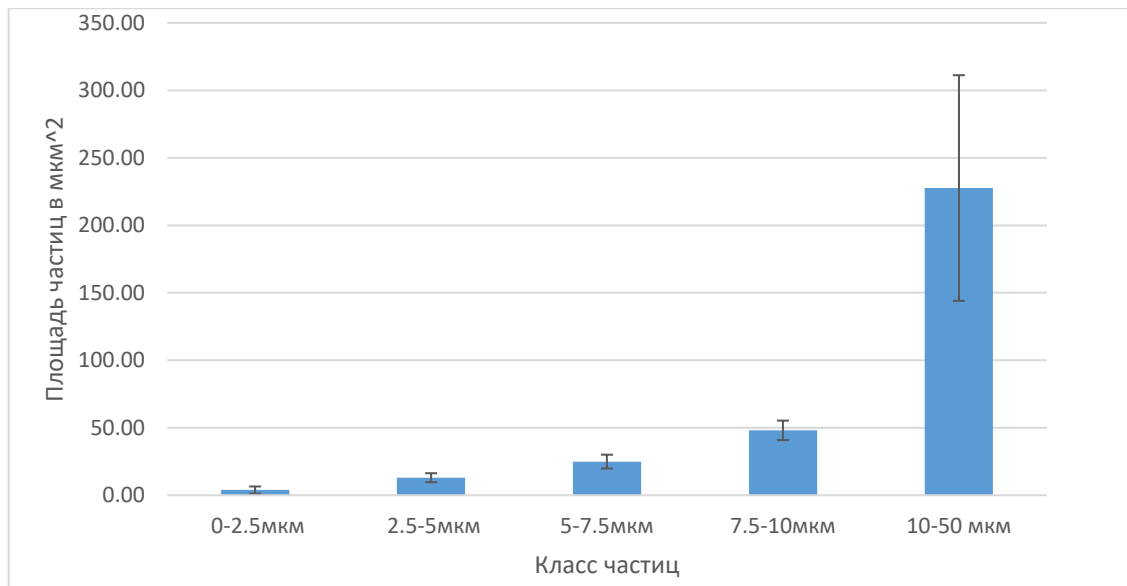


Рисунок 42 – Доверительные интервалы эффективных площадей частиц

### 3.3. Описание программы Vizualization\_GMAP

Для реализации разработанного метода прогноза параметров массопереноса пылегазового облака написана программа Vizualization\_GMAP, рассчитывающая высоту подъема пылегазового облака, дальность его распространения, скорость ветра на высоте его подъема, скорость восходящих конвективных потоков воздуха, траекторию распространения пылегазового облака, а также сектора повышенной запыленности приземного слоя атмосферы.

В таблице 25 приведены основные сведения о Vizualization\_GMAP.

Таблица 25 – Сведения о Vizualization\_GMAP

|                                                                     |                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Программное обеспечение, необходимое для функционирования программы | Windows 8/8.1/10/11                                                                                                                                                                        |
| Функциональные ограничения на применение                            | Необходимо подключение к интернету                                                                                                                                                         |
| Функциональное назначение                                           | Прогноз параметров массопереноса пылегазового облака и секторов повышенной запыленности                                                                                                    |
| Описание логической структуры                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Создание и отображение карты;</li> <li>-Создание и нанесение маркеров городов;</li> <li>-Создание и нанесение маркеров шахт и разрезов;</li> </ul> |

Продолжение таблицы 25

|                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Прогноз параметров массопереноса пылегазового облака по введенным данным;</li> <li>- Отображение на карте секторов повышенной запыленности;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                            |
| Описание функций составных частей программы                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Автоматический старт программы, включающий в себя создание и отображение всех необходимых маркеров;</li> <li>- Переход в режим ожидания ввода данных программы по факту полного завершения автоматического старта программы;</li> <li>- Прогноз параметров массопереноса пылегазового облака и секторов повышенной запыленности;</li> <li>- Открытие окна с подробным описанием формул</li> </ul> |
| Используемые методы                                                                          | <p>RefreshMap – метод перезагрузки карты.</p> <p>DrawCity – метод создания меток городов и всплывающих подсказок к ним.</p> <p>DrawMine – метод создания меток шахт и всплывающих подсказок к ним.</p>                                                                                                                                                                                                                                     |
| Типы электронных вычислительных машин и устройств, которые используются при работе программы | ПК (ПК, ноутбук) с доступом в Интернет                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Устройства периферии                                                                         | Мышь, клавиатура                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Способ вызова программы с соответствующего носителя данных                                   | Запуск программы двойным кликом или другими способами                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Входные данные/ характер входных данных                                                      | Изменяются от запроса к запросу                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Организация входных данных                                                                   | Входные данные указываются в соответствующих полях                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Предварительная подготовка входных данных                                                    | Перевод градусов в радианы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Формат входных данных                                                                        | Целые и десятичные числовые значения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Способ кодирования входных данных                                                            | Кодирование данных не предусмотрено                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Организация выходных данных                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Текстовая информация отображается в полях</li> <li>- Графическая информация отображается на карте</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Формат выходных данных                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Текстовая информация</li> <li>Графическая информация</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

В таблице 26 приведено описание входных данных.

Таблица 26 – Описание входных данных

| Вид входных данных                   | Описание                                                         |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Скорость ветра на высоте 10 метров   | Нахождение скорости ветра на высоте подъема пылегазового облака  |
| Количество взрывчатки в тоннах       | Нахождение высоты подъема пылегазового облака                    |
| Глубину разреза                      | Нахождение высоты подъема пылегазового облака                    |
| Значение горизонта взрываемого блока | Нахождение высоты подъема пылегазового облака                    |
| Температура воздуха                  | Нахождение высоты подъема пылегазового облака                    |
| Температура грунта                   | Нахождение высоты подъема пылегазового облака                    |
| Время года                           | Нахождение скорости ветра на высоте подъема пылегазового облака  |
| Направление ветра                    | Прогноз параметров массопереноса пылегазового облака в атмосфере |

В таблице 27 приведено описание выходных данных.

Таблица 27 – Описание выходных данных.

|                                    |                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вид выходных данных и его описание | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Скорость подъема пылегазового облака</li> <li>- Высота подъема пылегазового облака</li> <li>- Прогноз параметров массопереноса пылегазового облака</li> </ul> |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

На рисунке 42 представлена блок-схема программы Vizualization\_GMAP.

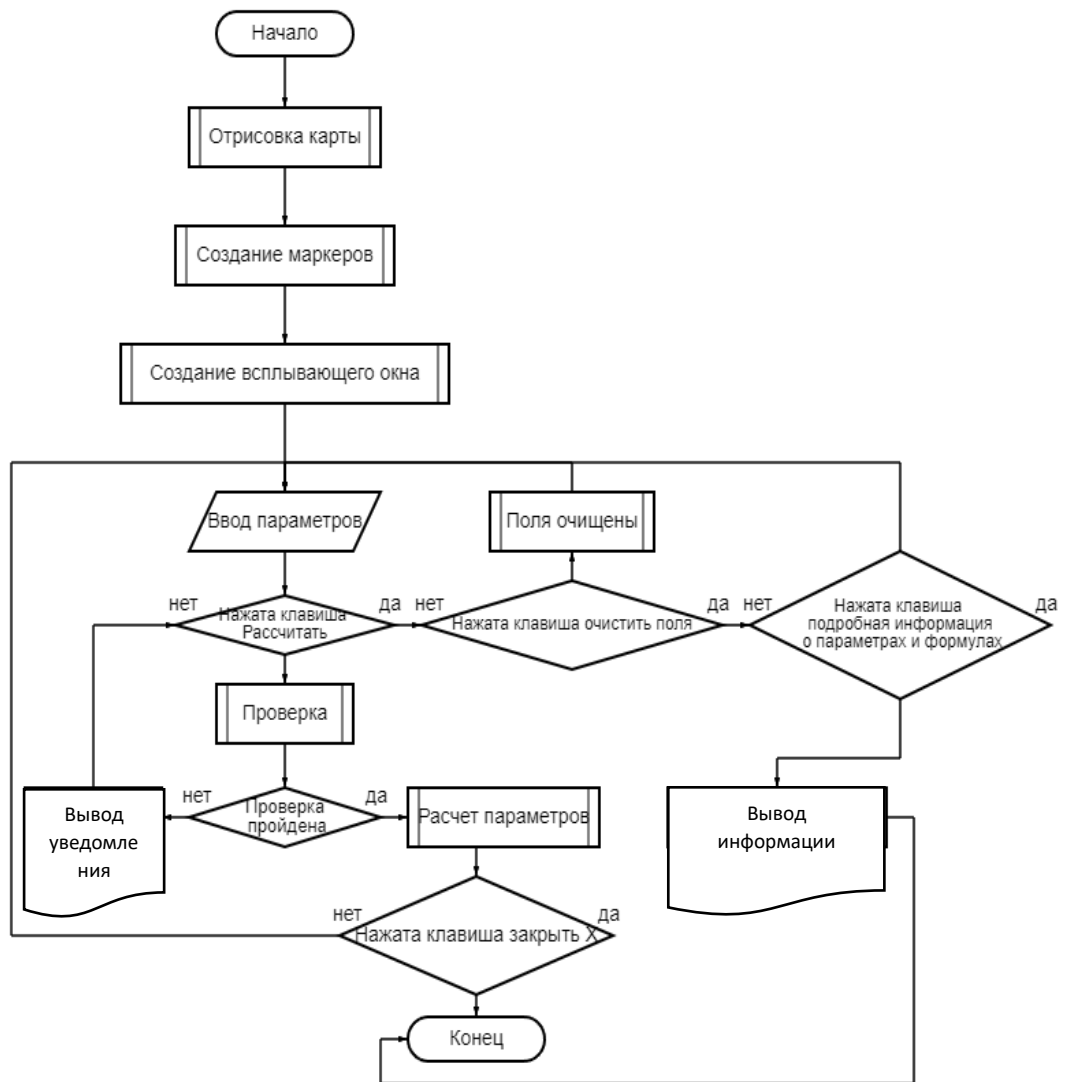


Рисунок 42 – Блок-схема Vizualization\_GMAP

Для расчета параметров массопереноса пылегазового облака, образованного в результате проведения взрывных работ на угольном разрезе, необходимо:

1. Выбрать точку-место взрыва на карте угольного разреза, так как действие атмосферной конвекции ограничивается границей угольного разреза, что влияет на высоту подъема пылегазового облака и дальность его распространения.
2. Ввести данные полученные от метеостанции о направлении и силе действующего на данный момент ветра.
3. Выбрать время года, для выбора соответствующего коэффициента, который позволяет рассчитать скорость ветра на высоте подъема пылегазового облака в границах угольного разреза.

4. Ввести температуру окружающего воздуха для расчета скорости восходящих конвективных потоков.

5. Ввести температуру поверхности грунта на горизонте взрываемого блока для расчета скорости восходящих конвективных потоков

6. Ввести количество взрывчатого вещества для расчета высоты подъема пылегазового облака

7. Ввести уровень горизонта взрываемого блока

8. Ввести глубину угольного разреза

Расчет выходных параметров таких как: высота, скорость подъема пылегазового облака, скорость ветра на высоте подъема облака, дальность распространения пылегазового облака осуществляется по формулам (2.15, 2.16, 3.7, 3.8).

После ввода всех перечисленных параметров, программа, выполнит прогноз параметров массопереноса пылегазового облака. Пример работы программы Vizualization\_GMAP показан на рисунке 43.

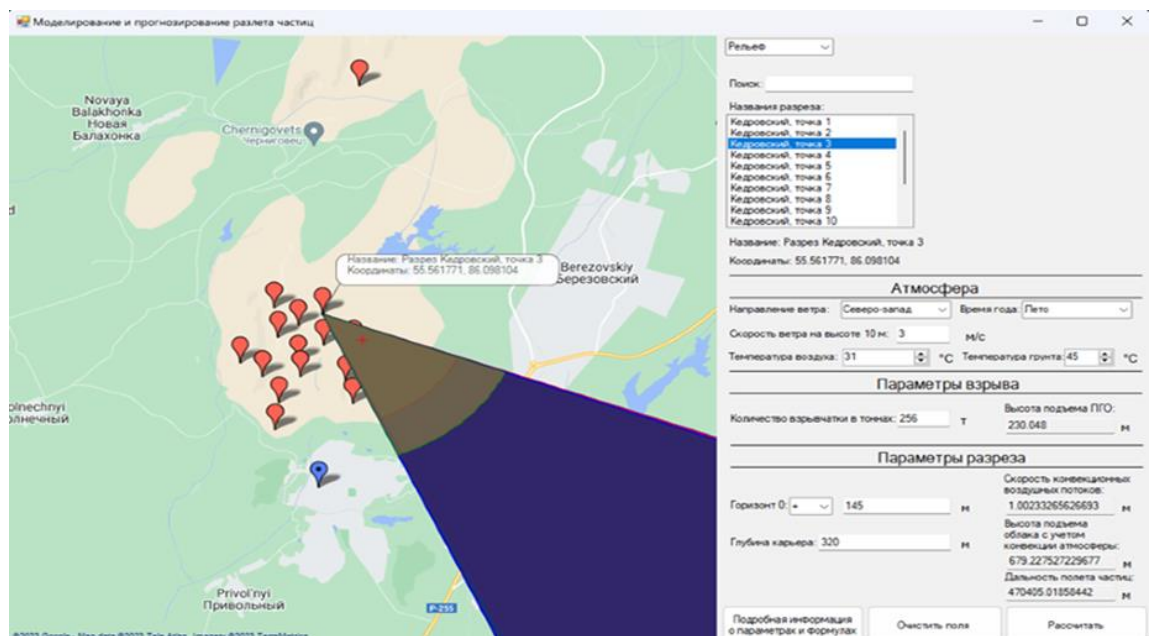


Рисунок 43 – Пример работы программы Vizualization\_GMAP

### 3.4. Вывод по главе

На основе данных полученных методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии, методом 3D моделирования, мелкодисперсные частицы пыли респирабельных фракций представлены в виде аэродинамического профиля крыла. Описаны силы действующие на профиль крыла в потоке воздуха. В соответствии с полярной диаграммой определены соответствующие аэродинамические коэффициенты. Приведена формула расчета дальности распространения пылевой части пылегазового облака в атмосфере. Рассчитаны 95% доверительные интервалы для эффективных площадей частиц пыли. На основе проведенного исследования дано описание программы Vizualization\_GMAP, реализующей метод прогноза параметров массопереноса пылегазового облака, образованного при ведении взрывных работ на угольном разрезе, включающий в себя такие операции как: расчет траектории и дальности распространения пылегазового облака, секторов повышенной запыленности приземного слоя атмосферы, скорости восходящих конвективных потоков воздуха, а также скорости распространения облака в атмосфере. Подробно описан алгоритм работы программы, приведены основные сведения, блок-схема, описание входных и выходных данных.

## ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССОПЕРЕНОСА ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИ ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА

### 4.1. Оценка запыленности в границах горного отвода

Оценка запыленности приземного слоя атмосферы в границах горного отвода проводилась гравиметрическим методом. Перед проведением массового взрыва по периметру взрываемого блока и в границах угольного разреза были разложены предварительно взвешенные пробоотборники, представляющие собой мелкозернистую сетку из мельтблауна и спанбонда, с параметрами сторон 175×95 мм. На рисунке 44 голубыми метками отмечены места установки пробоотборников по периметру взрываемого блока.



Рисунок 44 – Схема установки пробоотборников.

На рисунке 45 показан план схема взрываемого блока №195 состоящего из двух частей.

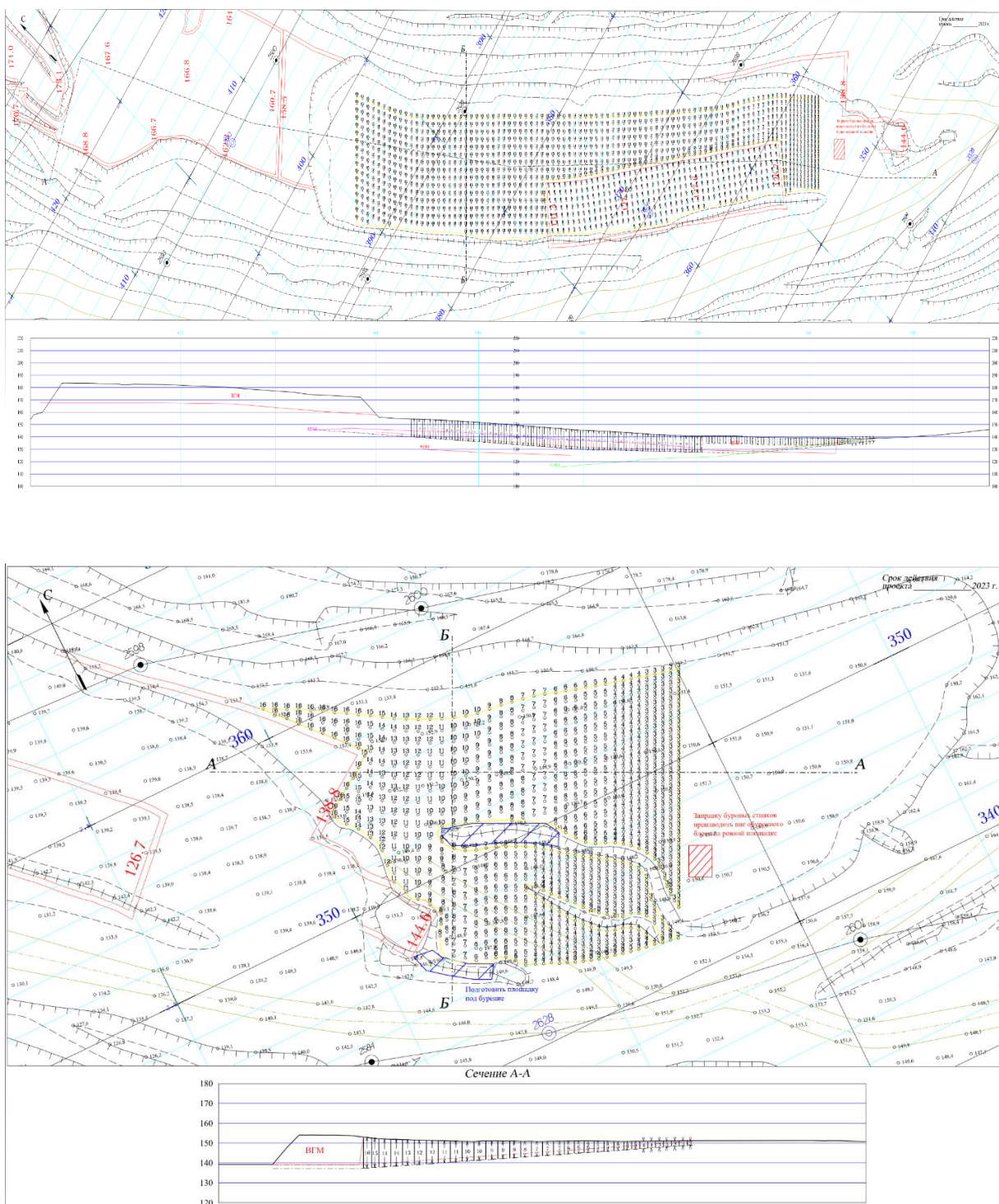


Рисунок 45 – План-схема блока № 195

Перед проведением массового взрыва было изучено состояние атмосферы, в частности: скорость и направление ветра. Данные метеорологические параметры напрямую влияют на траекторию и дальность распространения пылевой части пылегазового облака. В день проведения массового взрыва действовал Северо-Западный ветер. После проведения массового взрыва, пробоотборники были

собраны и взвешены, на электронных весах. Прочерками в таблице обозначены пробоотборники, которые не удалось обнаружить после взрыва. Данные об изменении массы представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Данные гравиметрического анализа

| Наименование точек | Масса до гр. | Масса после гр. |
|--------------------|--------------|-----------------|
| Б-1                | 2.6          | 19.22           |
| Б-2                | 2.45         | -               |
| Б-3                | 2.55         | 37.67           |
| Б-4                | 2.61         | 7.05            |
| Б-5                | 2.52         | 3.16            |
| Б-6                | 2.63         | -               |
| Б-7                | 2.63         | 2.79            |
| Б-8                | 2.84         | 2.84            |
| Б-9                | 2.64         | 2.74            |
| Б-10               | 2.54         | 2.72            |
| Б-11               | 2.56         | 2.78            |
| Б-12               | 2.66         | 2.83            |
| Б-13               | 2.84         | -               |
| Б-14               | 2.69         | -               |
| Б-15               | 2.71         | 2.7             |
| Б-16               | 2.77         | 2.97            |
| Б-17               | 2.82         | 2.9             |
| Б-18               | 2.84         | 2.92            |
| Б-19               | 2.63         | -               |
| Б-20               | 2.77         | -               |

По данным представленным в таблице 28 построена гистограмма прироста масса пробоотборников, расположенных по периметру взрываемого блока (рисунок 46).

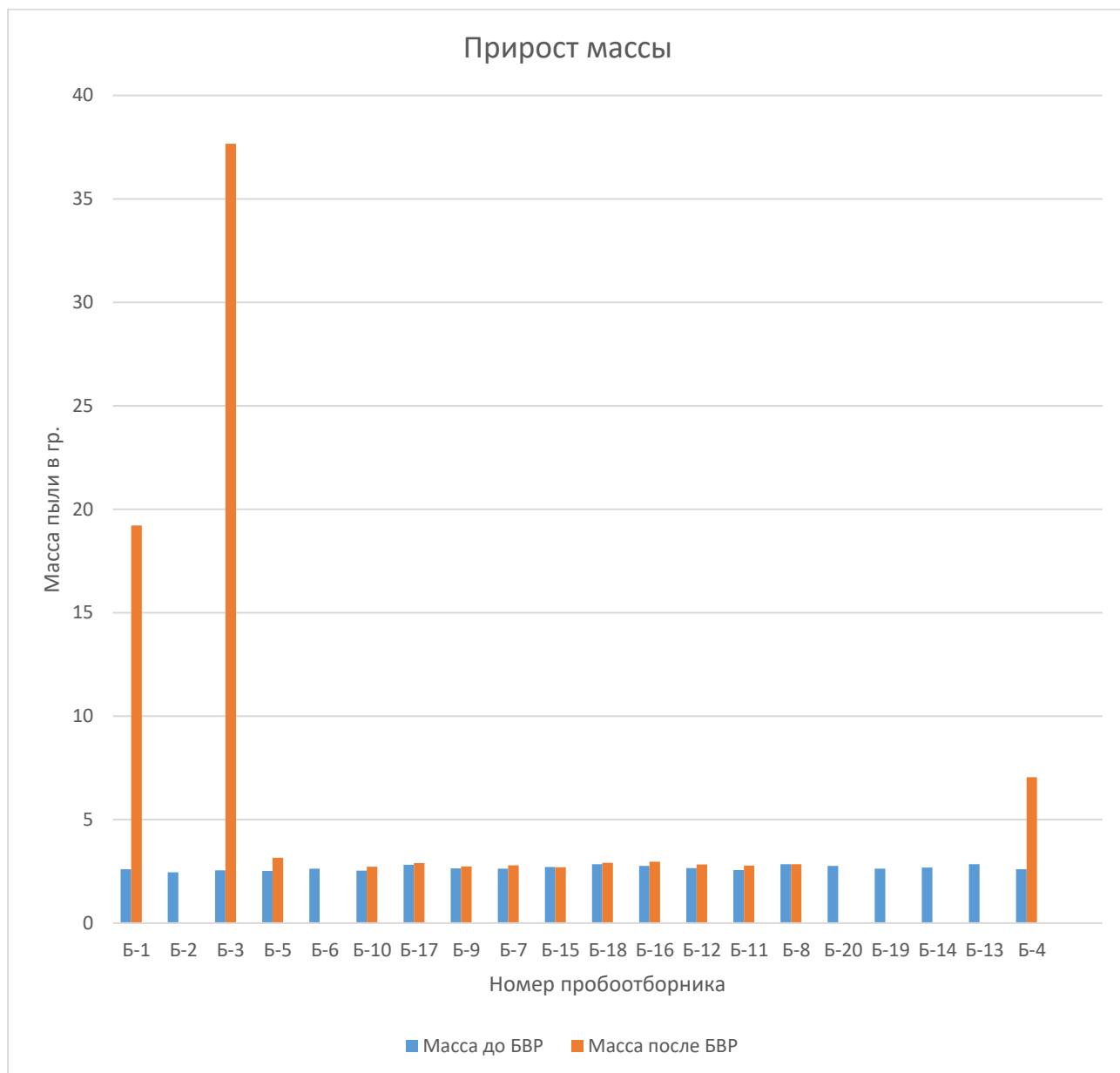


Рисунок 46 – График прироста массы пробоотборников.

Исходя из данных представленных на гистограмме, а также точек расположения пробоотборников следует что значительный привес наблюдается в точках Б-1, Б-3, Б-4, Б-5. Данный факт объясняется метеоусловиями в день проведения массового взрыва, а именно действующим Северо-Западным ветром, в следствии действия которого пылегазовое облако распространялось в Юго-Восточном направлении.

На рисунке 47 представлена схема расположения пробоотборников по периметру угольного разреза в границах горного отвода.



Рисунок 47 – Схема расположения пробоотборников в границах горного отвода

Красными метками обозначены точки раскладки пробоотборников, зеленым – взрывааемый блок, красным контуром – граница горного отвода.

Прочерками в таблице обозначены пробоотборники, которые не удалось обнаружить после проведения массового взрыва. Данные об изменении массы

представлены в таблице 29. Прочерками обозначены пробоотборники, которые не удалось обнаружить после проведения массового взрыва.

Таблица 29 – Данные гравиметрического анализа

| Порядковый<br>номер точки | Номер<br>пробоотборника | Масса до взрыва,<br>гр. | Масса после<br>взрыва, гр. |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1                         | P-1                     | 2,65                    | 2,70                       |
| 2                         | P-2                     | 2,69                    | 3,14                       |
| 3                         | P-3                     | 2,71                    | 2,76                       |
| 4                         | P-4                     | 2,82                    | 2,97                       |
| 5                         | P-5                     | 2,80                    | 2,92                       |
| 6                         | P-6                     | 2,62                    | 2,88                       |
| 7                         | P-7                     | 2,63                    | 2,65                       |
| 8                         | P-8                     | 2,64                    | -                          |
| 9                         | P-9                     | 2,63                    | -                          |
| 10                        | P-10                    | 2,67                    | 2,95                       |
| 11                        | P-11                    | 2,56                    | 3,09                       |
| 12                        | P-12                    | 2,67                    | 2,97                       |
| 13                        | P-13                    | 2,59                    | 2,70                       |
| 14                        | P-14                    | 2,36                    | 3,0                        |
| 15                        | P-15                    | 2,70                    | 2,88                       |
| 16                        | P-16                    | 2,55                    | -                          |
| 17                        | P-17                    | 2,56                    | 2,75                       |
| 18                        | P-18                    | 2,62                    | 3,61                       |
| 19                        | P-19                    | 2,69                    | 3,02                       |
| 20                        | P-20                    | 2,63                    | 2,68                       |
| 21                        | P-21                    | 2,70                    | 3,32                       |
| 22                        | P-22                    | 2,64                    | 2,75                       |
| 23                        | P-23                    | 2,65                    | 2,68                       |
| 24                        | P-24                    | 2,68                    | 2,69                       |

Продолжение таблицы 29

|    |       |      |      |
|----|-------|------|------|
| 25 | P-25  | 2,61 | 2,65 |
| 26 | P-26  | 2,66 | 2,67 |
| 27 | P-27  | 2,73 | 2,88 |
| 28 | P- 28 | 2,64 | 2,72 |
| 29 | P-29  | 2,61 | 2,65 |
| 30 | P-30  | 2,67 | -    |
| 31 | P-31  | 2,66 | -    |
| 32 | P-32  | 2,75 | -    |
| 33 | P-33  | 2,66 | 3,38 |
| 34 | P-34  | 2,66 | 3,72 |
| 35 | P-35  | 2,63 | 3,66 |

По данным таблицы 29 построен график запыленности приземного слоя атмосферы в границах горного отвода представленный на рисунке 48.

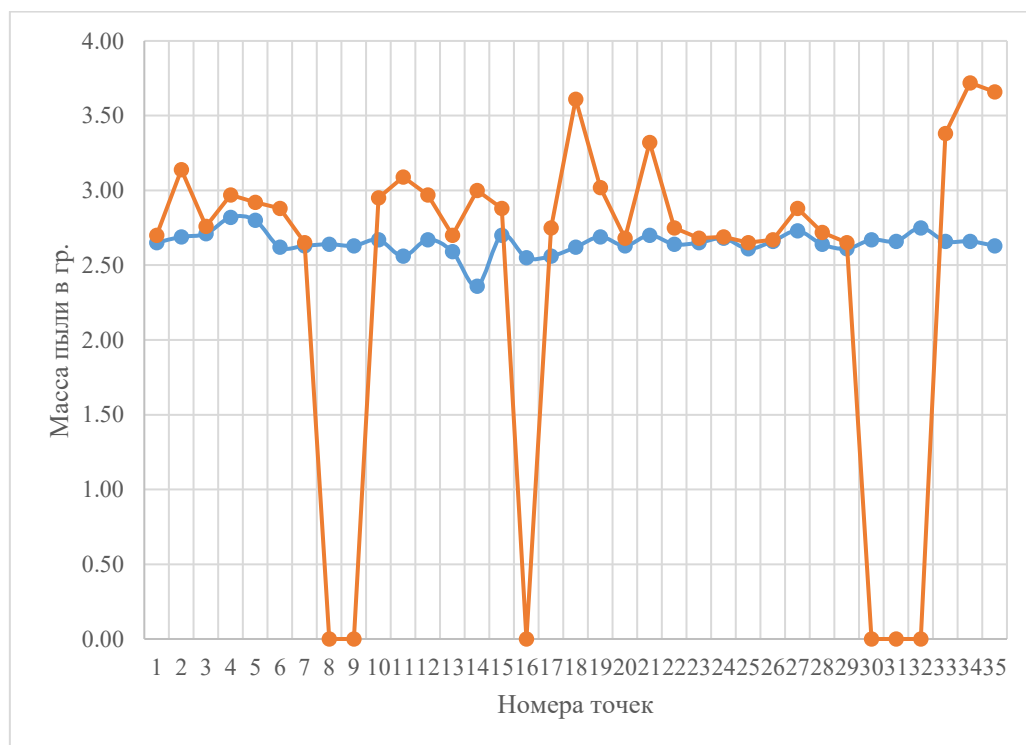


Рисунок 48 – Запыленность приземного слоя атмосферы в границах горного отвода

Из данных полученных на основе гравиметрического метода следует, что наибольший привес пробоотборников наблюдается в точках Р - 34, 35. Из графика следует что пылевая часть пылегазового облака распространялось именно в Юго-Восточном направлении, что соответствует параметру направления ветра в день проведения массового взрыва на угольном разрезе.

#### **4.2 Априорная и апостериорная оценки запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области**

##### **Априорная оценка запыленности**

Для априорной и апостериорной оценок запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах был проведен дисперсный анализ частиц витающей пыли до и после проведения взрывных работ на одном из разрезов региона. Дисперсный анализ производился счётчиком пылевых частиц СЕМ DT-9880М. Данный прибор служит для быстрого измерения содержания взвешенных твердых частиц в воздухе, а также определяет температуру и уровень влажности воздуха.

Замеры производились в трех точках каждого из девяти населенных пунктов, расположенных вблизи угольного разреза, тем самым обеспечивая максимальное перекрытие местности. Для обеспечения объективности и единства данных, измерения производились в дневное время суток.

В таблице 30 представлены средние данные дисперсного анализа частиц в близлежащих населенных пунктах до проведения взрывных работ.

Таблица 30 – Данные дисперсного анализа

| Порядковый номер точки замера | Населенные пункты | Количество частиц в шт. |         |       |         |       |        |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------|---------|-------|---------|-------|--------|
|                               |                   | 0,3 мкм                 | 0,5 мкм | 1 мкм | 2,5 мкм | 5 мкм | 10 мкм |
| 1                             | Кедровка          | 75385                   | 17937   | 2612  | 391     | 86    | 44     |
| 2                             | Кемерово          | 148700                  | 46829   | 10471 | 1650    | 396   | 210    |

Продолжение таблицы 30

|   |             |        |       |      |     |     |    |
|---|-------------|--------|-------|------|-----|-----|----|
| 3 | Звездный    | 118035 | 32119 | 5491 | 677 | 122 | 48 |
| 4 | Разведчик   | 65579  | 15656 | 2419 | 327 | 71  | 36 |
| 5 | Щегловский  | 110459 | 14790 | 1839 | 206 | 39  | 20 |
| 6 | Трасса      | 71529  | 17351 | 2706 | 331 | 71  | 35 |
| 7 | Барановка   | 48438  | 10776 | 1351 | 130 | 23  | 10 |
| 8 | Березовский | 87825  | 22317 | 3757 | 492 | 102 | 53 |
| 9 | Андреевка   | 71774  | 16452 | 2299 | 298 | 60  | 30 |

По результатам измерения априорной оценки запыленности приземного слоя атмосферы представленным в таблице 30, построена гистограмма априорной оценки запыленности, представленная на рисунке 49.

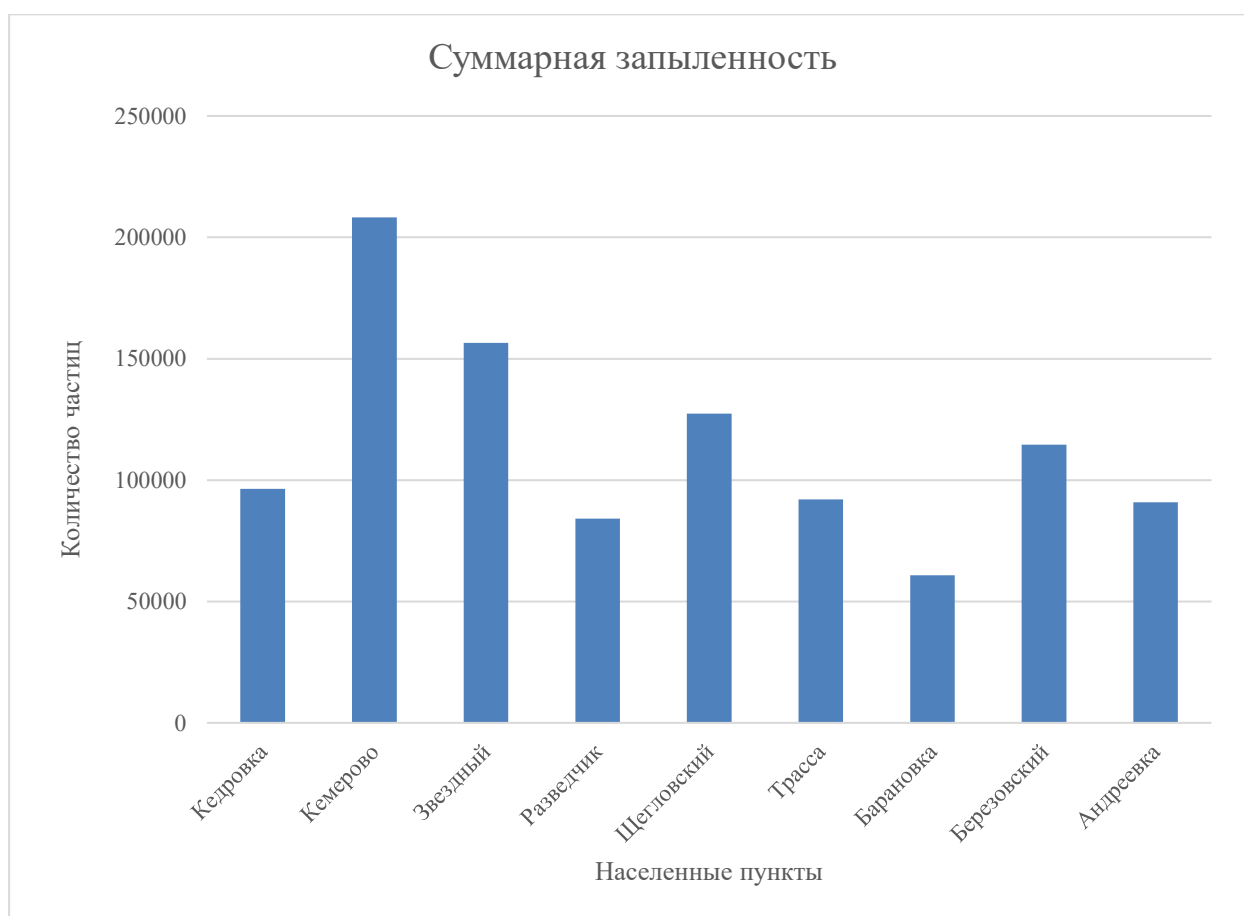


Рисунок 49 – Априорная оценка запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах

Из данных априорного дисперсного анализа в населенных пунктах Кемеровской области, представленных на графике, следует, что в точке 2 наблюдается наибольшая фоновая запыленность атмосферного воздуха. Количество частиц пыли РМ 2,5 и РМ 10 в точке 2, заметно отличается от показателей в остальных населенных пунктах. Данные значения объясняются географическим положением точки 2 относительно угольного разреза, а также региональной розой ветров.

На рисунке 50 показана среднегодовая роза ветров Кемеровской области.

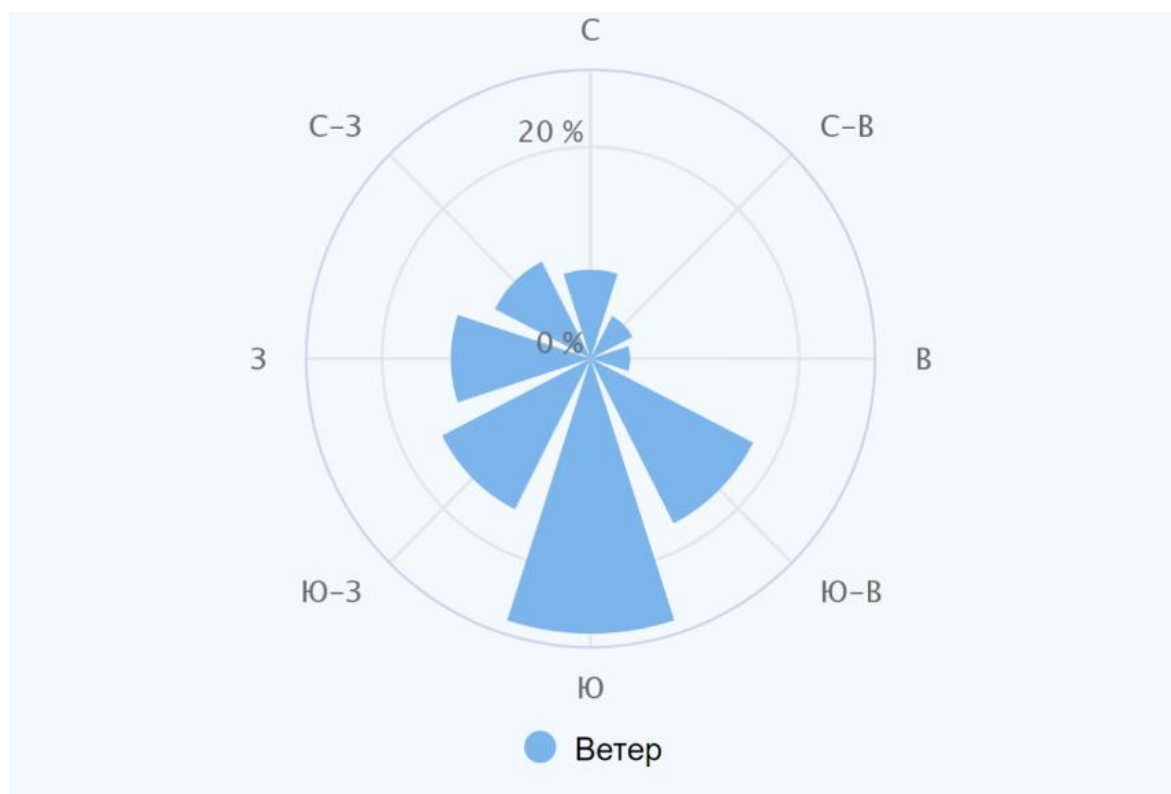


Рисунок 50 – Среднегодовая роза ветров

Населенный пункт в точке 2, находится к югу от угольного разреза, преимущественно действующий северный ветер обеспечивает высокие показатели фоновой запыленности приземного слоя атмосферы.

### Апостериорная оценка

Апостериорная оценка запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области проводилась двумя методами: электроиндукционным с помощью счётчика пылевых частиц СЕМ DT-9880М, и гравиметрическим с помощью сетчатых пробоотборников из мельтблауна и спанбонда. Перед проведением взрывных работ на угольном разрезе в 9 близлежащих к разрезу населенных пунктах Кемеровской области были разложены предварительно взвешенные пробоотборники. На рисунке 51 показана схема расположения пробоотборников в близлежащих населенных пунктах.

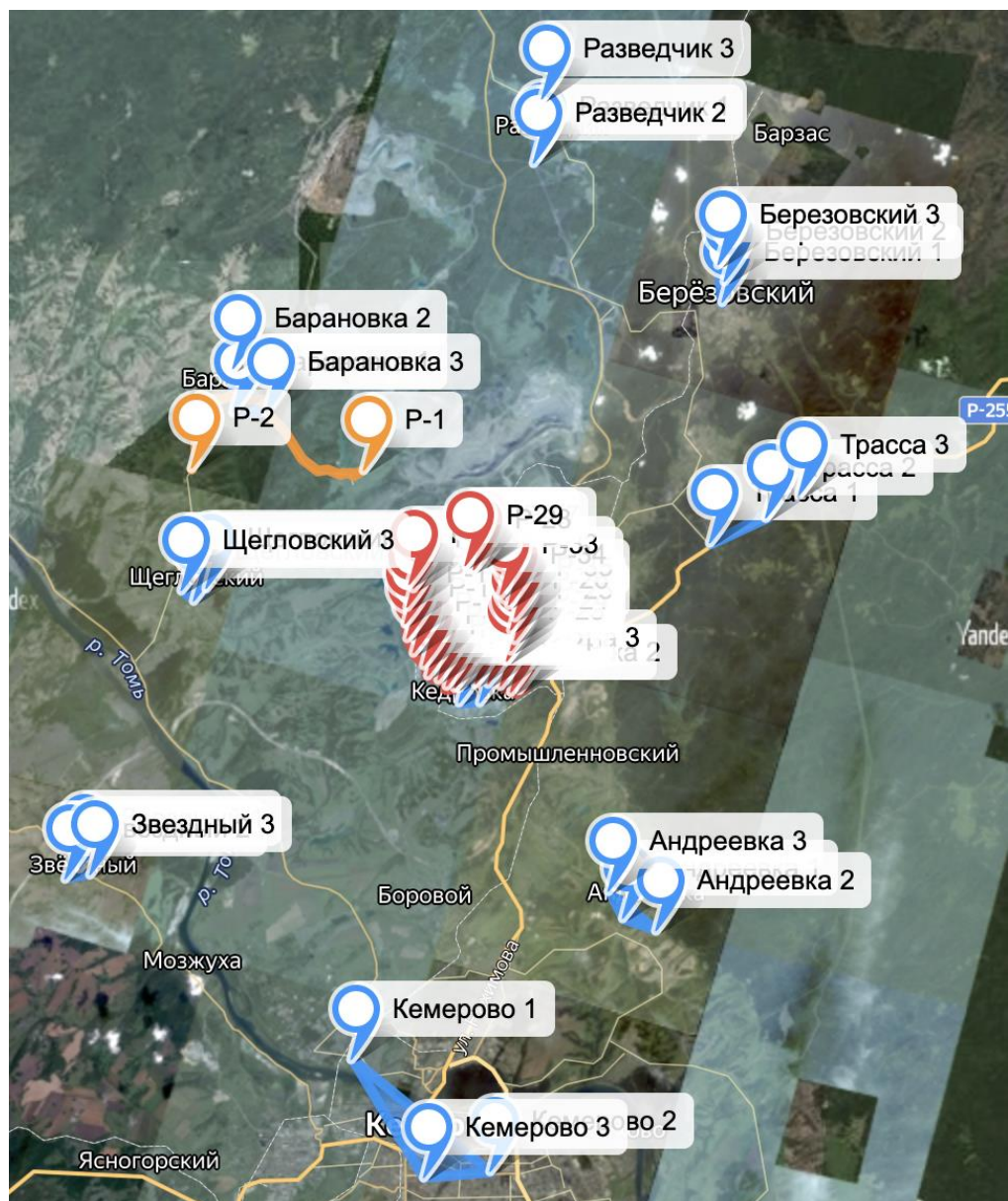


Рисунок 51 – Схема расположения пробоотборников

Голубыми метками обозначены пробоотборники, расположенные в населенных пунктах, красным – расположенные в границах горного отвода, оранжевым – пробоотборники, расположенные на северо-западе от угольного разреза для перекрытия сектора возможного распространения пылегазового облака.

В день проведения массового взрыва действовал Северо-Западный ветер скоростью 4 м/с. Прогноз погоды в день проведения эксперимента представлен на рисунке 52 [130].

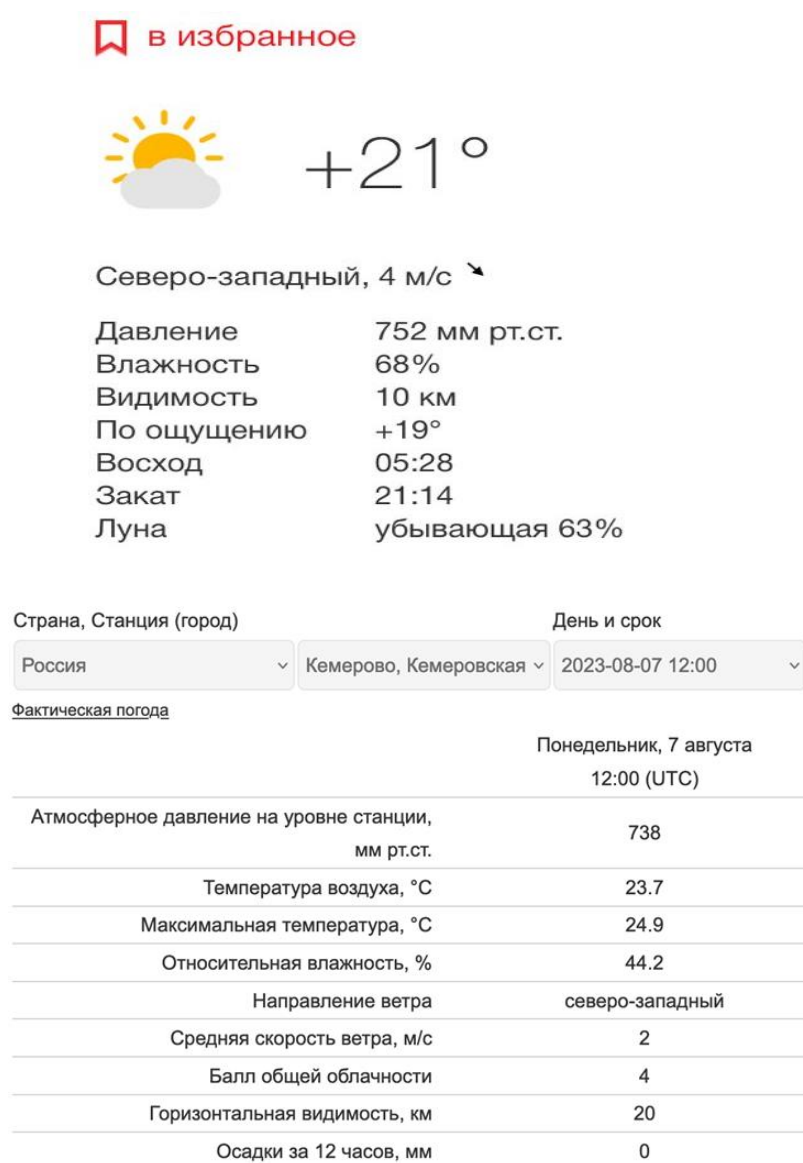


Рисунок 52 –Параметры атмосферы в день проведения эксперимента

На рисунке 53 на общем плане угольного разреза зеленым цветом показано расположение взрываемого блока № 195.

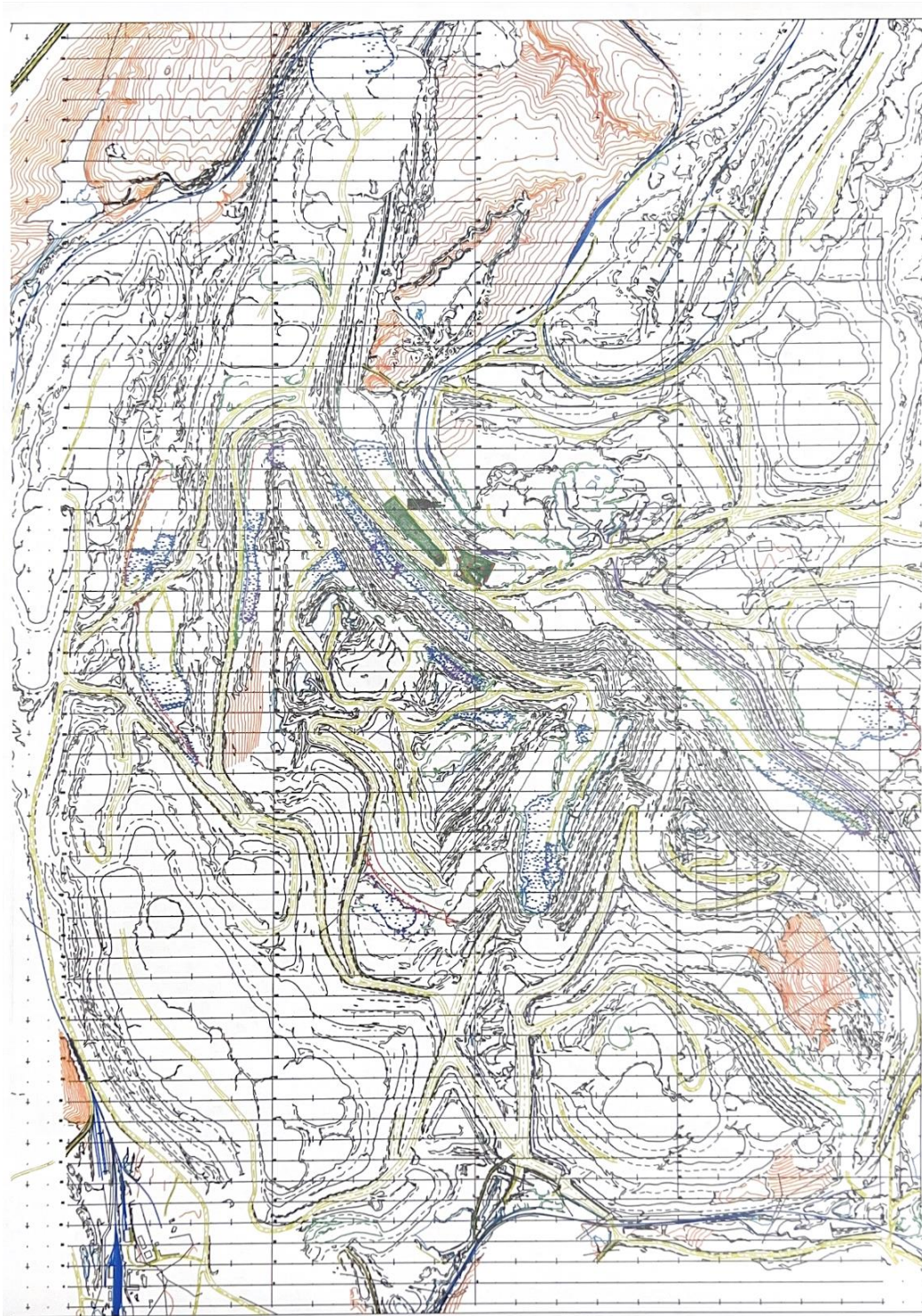


Рисунок 53 – Расположение блока №195 на схеме угольного разреза

Согласно проекту массового взрыва, горизонт взрываемого блока составил +145м, количество ВВ составило 256 т. Температура воздуха составила 31°C, температура поверхности грунта - 45°C, скорость ветра-3м/с.

Параметры взрыва и параметры атмосферы являются входными данными для расчета секторов повышенной запыленности в программе Vizualization\_GMAP. На рисунке 54 представлен расчет траектории распространения пылегазового облака в приземном слое атмосферы реализованный в программе Vizualization\_GMAP.

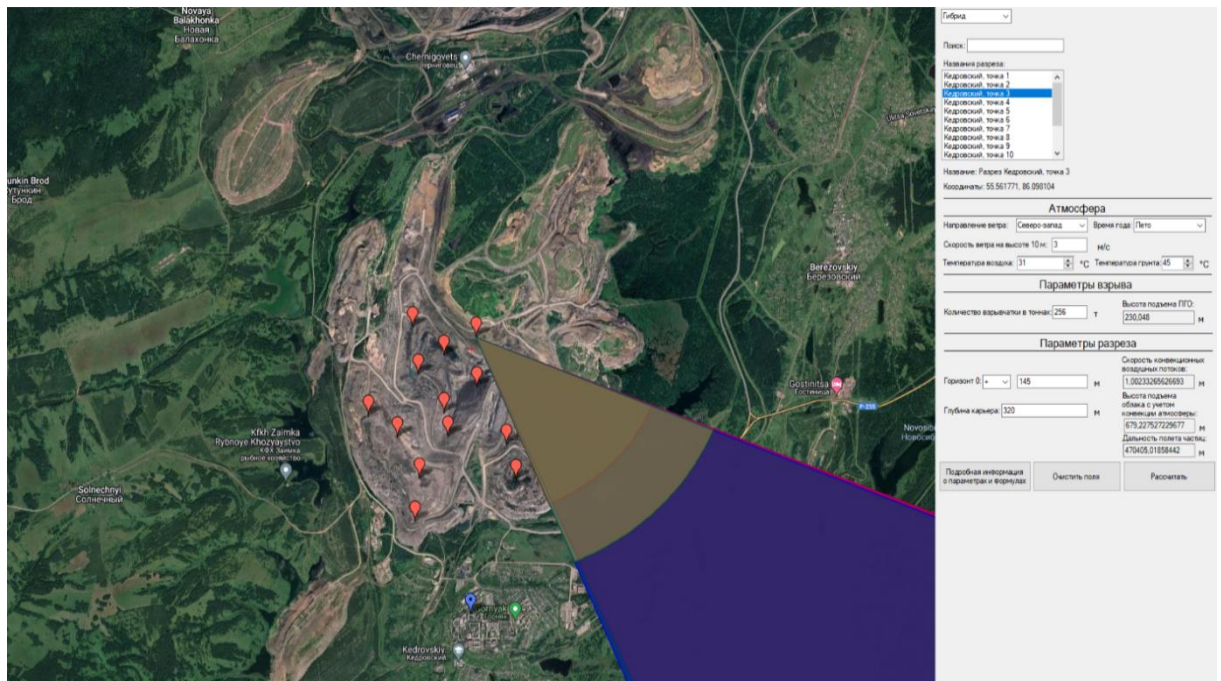


Рисунок 54 – Расчет траектории распространения пылегазового облака

Согласно расчету программы, высота подъема пылевой части пылегазового облака без учета влияния конвективных потоков составляет 230.048м., высота подъема пылевой части пылегазового облака с учетом конвекции – 679.227 м., скорость конвективных потоков воздуха – 1.002 м/с., дальность распространения облака – 470.4 км. в Юго-Восточном направлении.

После проведения массового взрыва была произведена апостериорная оценка запыленности приземного слоя атмосферы в близлежащих населенных пунктах Кемеровской области. Результаты гравиметрического анализа представлены в таблице 31.

Таблица 31 – Данные гравиметрического анализа

| Порядковый<br>номер точки<br>замера | Населенные пункты. | Масса до взрыва<br>гр. | Масса после<br>взрыва гр. |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|
| 1                                   | Кедровка           | 2,34                   | 2,76                      |
|                                     |                    | 2,7                    | 2,7                       |
|                                     |                    | 2,67                   | 2,77                      |
| 2                                   | Кемерово           | 2,73                   | 2,76                      |
|                                     |                    | 2,65                   | 2,81                      |
|                                     |                    | 2,67                   | 2,85                      |
| 3                                   | Звездный           | 2,68                   | 2,62                      |
|                                     |                    | 2,45                   | 2,5                       |
|                                     |                    | 2,68                   | 2,79                      |
| 4                                   | Разведчик          | 2,68                   | 3                         |
|                                     |                    | 2,68                   | 3,21                      |
|                                     |                    | 2,56                   | 2,67                      |
| 5                                   | Щегловский         | 2,66                   | 2,9                       |
|                                     |                    | 2,85                   | 3,1                       |
|                                     |                    | 2,8                    | 2,94                      |
| 6                                   | Трасса             | 2,69                   | 2,47                      |
|                                     |                    | 2,59                   | 2,55                      |
|                                     |                    | 2,65                   | 2,62                      |
| 7                                   | Барановка          | 2,63                   | 2,74                      |
|                                     |                    | 2,8                    | 2,8                       |
|                                     |                    | 2,76                   | 4,14                      |
| 8                                   | Березовский        | 2,32                   | 2,74                      |
|                                     |                    | 2,64                   | 2,68                      |
|                                     |                    | 2,5                    | 2,49                      |
| 9                                   | Андреевка          | 2,65                   | 4,19                      |
|                                     |                    | 2,78                   | 4                         |
|                                     |                    | 2,83                   | 3,22                      |

По данным таблицы 31 построена гистограмма запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области после проведения взрывных работ (рисунок 55).

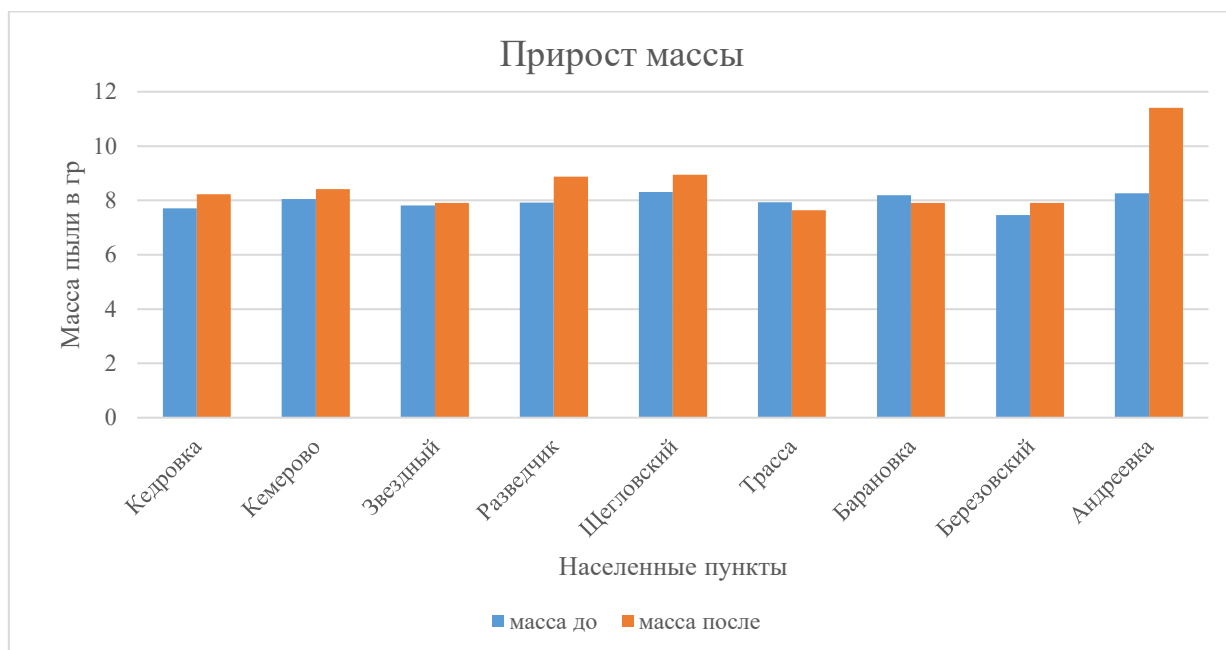


Рисунок 55 – Запыленность в населенных пунктах после проведения взрывных работ

Из данных гравиметрического анализа видно, что наибольший суммарный привес наблюдается в точке 9, расположенной в населенном пункте Андреевка, расположенному к Юго-Востоку от угольного разреза.

В таблице 32 приведены результаты измерения концентрации частиц мелкодисперсной пыли в близлежащих населенных пунктах Кемеровской области после проведения взрывных работ на угольном разрезе.

Таблица 32 – Данные дисперсного анализа

| Порядковый номер точки замера | Населенные пункты | Количество частиц в шт. |         |       |         |       |        |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------|---------|-------|---------|-------|--------|
|                               |                   | 0,3 мкм                 | 0,5 мкм | 1 мкм | 2,5 мкм | 5 мкм | 10 мкм |
| 1                             | Кедровка          | 57066                   | 15926   | 2968  | 398     | 88    | 41     |
| 2                             | Кемерово          | 58489                   | 15253   | 2378  | 311     | 68    | 33     |

Продолжение таблицы 32

|   |             |        |       |       |      |      |     |
|---|-------------|--------|-------|-------|------|------|-----|
| 3 | Звездный    | 116434 | 36382 | 7927  | 1292 | 319  | 125 |
| 4 | Разведчик   | 70207  | 20449 | 3821  | 542  | 106  | 47  |
| 5 | Щегловский  | 135272 | 39827 | 7700  | 1027 | 225  | 102 |
| 6 | Трасса      | 56234  | 15538 | 2766  | 422  | 87   | 48  |
| 7 | Барановка   | 95490  | 31514 | 7844  | 1396 | 380  | 187 |
| 8 | Березовский | 80799  | 25010 | 5243  | 774  | 159  | 76  |
| 9 | Андреевка   | 253776 | 80803 | 18977 | 3944 | 1382 | 792 |

По результатам измерения априорной и апостериорной оценки запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области до и после проведения взрывных работ на угольном разрезе построена гистограмма суммарной запыленности, изображенная на рисунке 56.

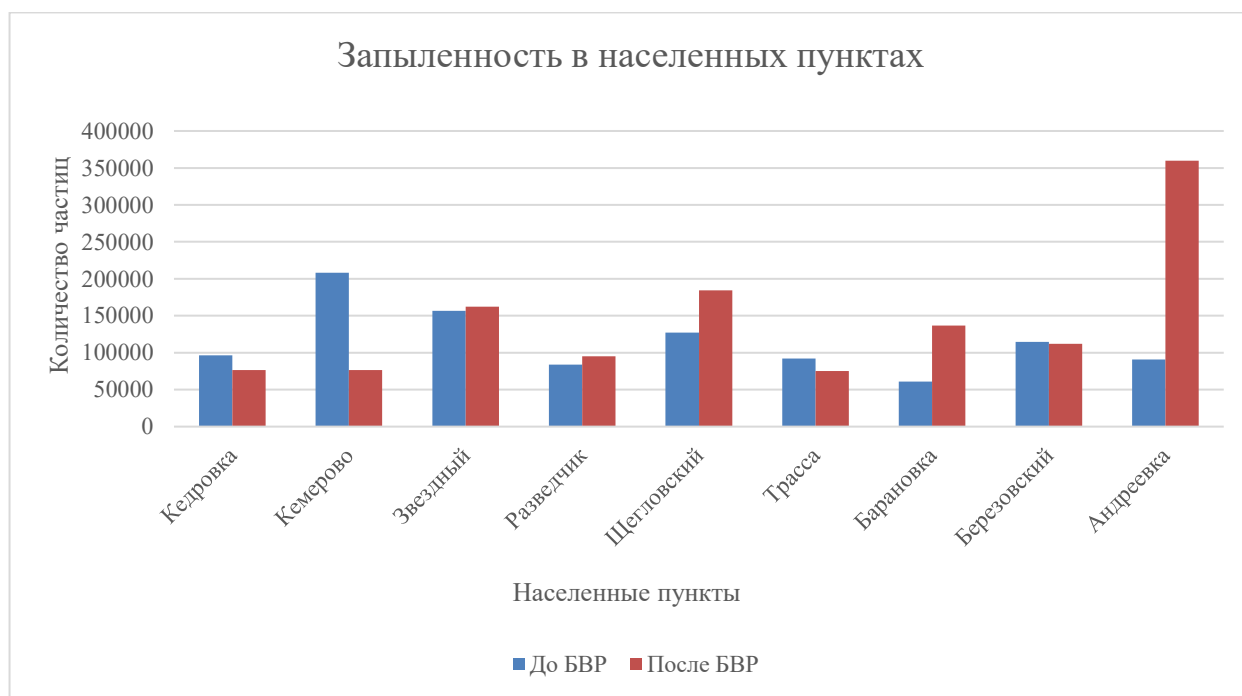


Рисунок 56 – Априорная и апостериорная оценка запыленности в населенных пунктах.

Из данных априорного и апостериорного дисперсного анализа в населенных пунктах Кемеровской области, представленных на рисунке 56, следует что в

населенном пункте Андреевка, расположенному к Юго-Востоку от угольного разреза, после проведения массового взрыва наблюдается наибольшая запыленность приземного слоя атмосферы, в частности частицами РМ 2,5 РМ 10.

Из графика видно, что до проведения массовых взрывов пик запыленности наблюдался в населенном пункте Кемерово, после проведения, в населенном пункте Андреевка.

Данные значения в апостериорной оценке запыленности объясняются направлением ветра в день проведения взрывных работ на угольном разрезе, а именно действующим северо-западным ветром, под действием которого массоперенос пылевой части пылегазового облака осуществлялся в Юго-Восточном направлении.

Результат апостериорной оценки запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области показал, что разработанный метод контроля параметров массопереноса пылевой части пылегазового облака при ведении взрывных работ на угольном разрезе, отличающийся учетом морфологических параметров частиц мелкодисперсной пыли, региональных метеорологических параметров атмосферы, а также влияния технологических параметров угольного разреза достоверно описывает параметры пылевой части пылегазового облака, а также траекторию и дальность ее распространения.

Исходя из результатов расчета секторов повышенной запыленности приземного слоя атмосферы, скорости ветра на высоте подъема ПГО, дальности распространения пылевой части ПГО, а также априорной и апостериорной оценок запыленности в границах горного отвода, и близлежащих населенных пунктах необходимо заключить что прогнозные данные совпали с данными эксперимента.

#### **4.3. Требования к системе контроля параметров массопереноса пылегазового облака при ведении взрывных работ на угольном разрезе**

Система контроля параметров массопереноса пылегазового облака при ведении взрывных работ на угольном разрезе должна быть основана на совместном

учете метеорологических параметров региональной атмосферы, влияния технологических параметров угольного разреза, морфологических характеристик мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций.

Отличительной особенностью данной системы является ее универсальность, обеспечивающая возможность оценки и прогноза распространения пылевой части пылегазового облака в атмосфере, а также седиментации частиц из нее в близлежащих муниципальных образованиях.

В состав выполняемого алгоритма системы контроля массопереноса пылевой части пылегазового облака должны входить методы, предназначенные для установления влияния пылевого воздействия на население и прилегающие территории близлежащих населенных пунктов.

Разработанный метод, обеспечивает его промышленное применение с тем учетом, что горнодобывающие предприятия обеспечены или могут быть оснащены соответствующей аппаратурой для непрерывного применения данного метода.

Система контроля массопереноса пылевой части пылегазового облака должна обеспечивать:

- сбор первичной информации от датчиков мониторинга пылевой части пылегазового облака, метеорологического мониторинга;
- передачу первичной информации в верхний уровень системы;
- обработку и совместную интерпретацию данных получаемую от датчиков контроля нижнего уровня;
- обеспечивать прогноз траектории массопереноса пылевой части пылегазового облака;
- выполнять прогноз уровня седиментации аэрозоли из пылегазового облака;
- рассчитывать фактическую траекторию массопереноса пыли пылегазового облака и оценивать фактические уровни седиментации аэрозоли из пылегазового облака.

Система контроля массопереноса пыли пылегазового облака должна включать в себя три уровня иерархии:

- устройства нижнего уровня, предназначенные для получения информации

о пылевой части пылегазового облака от первичных датчиков контроля;

– устройства среднего уровня, предназначенные для сбора информации от первичных датчиков контроля, предварительной обработки информации, обмена информацией с техническими средствами верхнего уровня, состоящие из контроллеров, и использующие высокоскоростную информационную магистраль, выполненную с резервированием;

– устройства верхнего уровня, предназначенные для визуализации состояния параметров и объектов управления системы с использованием графических образов и анимации, операторского интерфейса, регистрации и хранения данных, документирования и генерации отчетов, автоматической диагностики состояния технических средств всех уровней, протоколирования учетных показателей работы системы, архивирования информации в базах данных, механизма разработки мероприятий, направленных на снижение неблагоприятного экологического влияния на население и прилегающие территории, блока учета, планирования, сервисного обслуживания, обеспечения трудовыми и материально-техническими ресурсами для проведения технического обслуживания, ремонта и оценки технического состояния системы.

Система контроля массопереноса пылевой части пылегазового облака должна включать в себя метеорологические датчики со следующими характеристиками:

– Измерять температуру окружающего воздуха на высоте 10-15м от поверхности земли с точностью 0,5°C.

– Измерять температуру земной поверхности с точностью 0,5°C.

– Измерять атмосферное давление на высоте 10-15 м с точностью 0,5 гПа при 0 - +40 °C, и 1 гПа при -55°C до 0°C и при +45°C до +85 °C

– Измерять скорость воздуха на высоте 10-15 м от земной поверхности в диапазоне 0,3-65 м/с, с погрешностью 0,3м/с (от 0,3м/с до 10м/с), 3м/с (от 10м/с до 35м/с), 5м/с (от 35м/с до 65м/с).

– Измерять направление ветра на высоте 10-15 м от земной поверхности в диапазоне 0-360° с погрешностью 3°.

Для реализации пылевого мониторинга система должна измерять количество мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций – РМ 2,5 и РМ 10.

Для реализации аэрогазового контроля система должна измерять концентрацию таких газов как:

- Азота диоксид (оксид азота) в диапазоне измерений 0,02 - 1,00 мг/м<sup>3</sup>
- Ангидрид сернистый (сера диоксид, оксид серы) в диапазоне измерений 0,025 - 5 мг/м<sup>3</sup>
- Углерод оксид (угарный газ, монооксид углерода) в диапазоне измерений 1,5 - 10 мг/м<sup>3</sup>
- Азота оксид (двуокись азота) в диапазоне измерений 0,03 - 2,5 мг/м<sup>3</sup>.

Датчики должны передавать данные по беспроводной сети.

Так как метод контроля массопереноса пылевой части пылегазового облака для расчета секторов повышенной запыленности приземного слоя атмосферы в качестве входных данных использует прогноз состояния атмосферы в день проведения массового взрыва, одним из которых является параметр направления действия ветра указывающегося с точностью до четвертного румба, мониторинговые посты следует устанавливать на восьми равновероятных направлениях распространения пылегазового облака. На тех из восьми направлениях, на которых нет близлежащих населенных пунктов автоматизированные посты контроля пылевой части пылегазового облака можно не устанавливать. На рисунке 57 показан расчет необходимого количества установки постов мониторинга для условий Кедровского угольного разреза. Красными линиями обозначены четыре из восьми равновероятных направлений распространения пылегазового облака на которых расположены близлежащие населенные пункты.

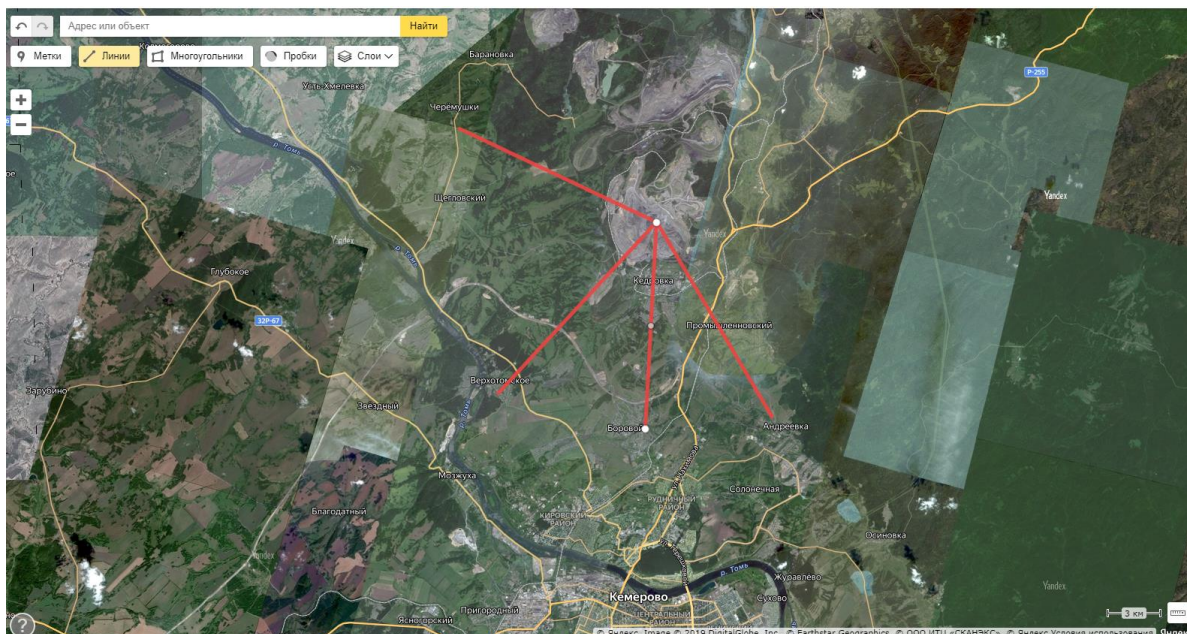


Рисунок 57 – Схема расчета количества постов мониторинга пылегазового облака

Из рисунка 57 следует что, автоматизированные посты мониторинга пылевой части пылегазового облака необходимо устанавливать на четырех равновероятных направлениях распространения облака. Количество автоматизированных постов мониторинга для условий Кедровского угольного разреза – 4 шт.

#### 4.4. Выводы по главе

1. В рамках исследования механизма массопереноса пылевой части пылегазового облака после проведения массового взрыва на угольном разрезе была проведена оценка запыленности приземного слоя атмосферы в рамках взрываемого блока, которая показала значительный прирост массы пробоотборников в прогнозируемом направлении распространения пылегазового облака.

2. Также была произведена оценка запыленности приземного слоя атмосферы в рамках горного отвода угольного разреза гравиметрическим методом, которая показала прирост массы пробоотборников в направлении распространения пылегазового облака.

3. Для изучения фоновой запыленности приземного слоя атмосферы за границей горного отвода была произведена априорная оценка запыленности в

близлежащих населенных пунктах, которая показала, что максимальная концентрация мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций наблюдается в населенном пункте Кемерово, что совпадает со среднегодовой розой ветров для данного региона.

4. Для вскрытия механизмов массопереноса пылевой части пылегазового облака после проведения взрыва на угольном разрезе была произведена апостериорная оценка запыленности приземного слоя атмосферы в близлежащих населенных пунктах, которая показала, что после проведения взрывных работ на угольном разрезе, значительный прирост массы пробоотборников, а также существенное увеличение концентрации мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций зафиксировано в населенном пункте находящемся на Юго-Востоке от угольного разреза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором научных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная задача по обоснованию и разработке метода прогноза параметров массопереноса пылегазового облака при ведении взрывных работ на угольном разрезе, что позволяет спрогнозировать область распространения пылегазового облака в приземном слое атмосферы, а также корректировать проект массового взрыва, имея данные о параметрах планируемого взрыва и данные метеорологического характера.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. В ходе исследования образцов пыли отобранных после проведения взрывных работ на угольном разрезе выявлено что, из всей массы образованной пыли, мелкодисперсная аэрозоль, включающая в себя частицы PM10, PM2,5 и более мелкие представлена в наибольшем объеме по сравнению с прочими фракциями пыли, образующимися в результате взрыва.

2. В ходе измерения уровня фоновой запыленности приземного слоя атмосферы в населенных пунктах Кемеровской области установлено, что наибольшая концентрация мелкодисперсных частиц пыли фракции 0,3 мкм зафиксирована в населенном пункте Яя, фракции 0,5 мкм в населенном пункте Яя, 1 мкм, 2,5 мкм, 5 мкм, 10 мкм в населенном пункте Новокузнецк. Учитывая географическое расположение данного населенного пункта, а также количество близлежащих горнодобывающих предприятий следует, что фракции мелкодисперсной пыли 1 мкм, 2,5 мкм, 5 мкм, 10 мкм, являясь наиболее опасными для человеческого организма сконцентрированы за границей горного отвода предприятий открытой угледобычи в близлежащем крупном населенном пункте.

3. В ходе изучения объемных и поверхностных характеристик мелкодисперсных частиц пыли респирабельных фракций методом конфокальной

лазерной сканирующей микроскопии выявлено, что частицы пыли имеют не шарообразную форму, а плоскую.

4. Установлено, что фактический объем и масса частиц пыли респираторных фракций (в диапазоне размеров до 50 мкм) составляет не более 1,5% от объема сферы, с учетом ошибки 5,0% (тройной ошибки 13,5%). Это позволяет уточнить массу частиц пыли в облаке и массу оседающей пыли в границах горного отвода и за его пределами в близлежащих населенных пунктах;

5. Выявлено, что эффективные площади частиц пыли респираторных фракций (в диапазоне размеров до 50 мкм) составляют не более 9 % от проекционной площади сферы, с учетом ошибки 11.1 % (тройной ошибки 24.43 %).

6. На основе обработки изображений массовых взрывов на угольном разрезе разработана математическая модель расчета высоты подъема пылегазового облака учитывающая нелинейность скорости вовлечения окружающих воздушных масс в пылегазовое облако.

7. Получено, что эффективные площади мелкодисперсных частиц пыли респираторных фракций, используемая в математической модели расчета дальности распространения пылегазового облака находится в 95% доверительном интервале.

8. В ходе проведенного эксперимента установлено, что прирост массы пробоотборников в границах взрывающего блока зафиксирован в прогнозируемом направлении распространения пылегазового облака. Также в границах горного отвода угольного разреза оценка запыленности гравиметрическим методом показала прирост массы пробоотборников в направлении распространения пылегазового облака.

9. Априорная и апостериорная оценка запыленности приземного слоя атмосферы в близлежащих населенных пунктах показала, что после проведения взрывных работ на угольном разрезе, значительный прирост массы пробоотборников, а также существенное увеличение концентрации мелкодисперсных частиц пыли респираторных фракций зафиксировано в населенном пункте Андреевка.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2022 год // Уголь. 2023. № 3. С. 21-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-21-33.
2. Азаров В.Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01, 03.00.16 / Азаров Валерий Николаевич. – Ростов н/Д, 2003. – 334 с.
3. Luong L.T.M., Dang T.N., Thanh Huong N.T., Phung D., Tran L.K., Van Dung D., Thai P.K. Particulate Air Pollution in Ho Chi Minh City and Risk of Hospital Admission for Acute Lower Respiratory Infection (ALRI) among Young Children. Environ. Pollut. 2020. V. 257. 113424. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113424.
4. Мишина В.В. Проблемы открытой добычи угля и пути их решения в г. Нерюнгри [Электронный ресурс]. – URL: <http://econf.rae.ru/article/5727> (дата обращения: 29.01.2019).
5. Mark Brusseau, Ian Pepper & Charles Gerba. Environmental and Pollution Science. 3rd Edition. Academic Press, 2019, 662 p.
6. Zhernov E., Nekhoda E. & Peters D. Nature and economy in the mining region: Holistic approach / E3S Web of Conferences. 4th International Innovative Mining Symposium, 2019, Vol. 105, Article No. 04012.
7. Косинова И. И. Эколого-геологическая оценка пылевой нагрузки при открытой разработке месторождения гранитного сырья / И. И. Косинова, Д. О. Сопин, А. Л. Ююкина // Закономерности трансформации экологических функций геосфер крупных горно-промышленных регионов: Сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Гомель, 10-15 мая 2022 года. – Гомель: Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, 2022. – С. 137-140. – EDN OGDIKO.
8. Горлов, Ю. В. О расчете выбросов пыли на отвалах горных предприятий / Ю. В. Горлов, А. А. Белодедов // Актуальные проблемы недропользования – 2021: Материалы Международной научно-практической

конференции, посвященной 115-летию со дня рождения А.Г. Кобилева, Новочеркасск, 30 ноября 2021 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2021. – С. 41-45. – EDN HFRVYU.

9. Kolesnikova I.a. Environmental condition analysis in the mining regions. *Ugol'*, 2017, (4), pp. 68-69. (In russ.). dOI: 10.18796/0041-5790-2017-4-68-69.

10. Gorlov V.d. recultivation of land in quarries. Moscow, Nedra Publ., 1981 (In russ.).

11. Khazini I., dekhkarghanian M.E. & Vaezihir a. dispersion and modeling discussion of aerosol air pollution caused during mining and processing of open-cast mines. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021 dOI: 10.1007/S13762-021-03225-1.

12. Wilhen huaman-hinostroza, Brian Meneses-Claudio & alexi delgado. Implementation of an air Pollution Measurement System in Mining areas of Cerro de Pasco-Peru. *International journal emerging technology and advanced engineering*, 2022, Vol. 12, (1), pp 99-110.

13. Sridevi, Jena, atahar, Perwez, gurdeep, Singh, ashok & dubey. Investigation of Impacts of Mining and transportation activities on ambient air Quality of dhanbad City. *Current World Environment*, 2015 dOI:10.12944/CWE.10.3.35.

14. Aditya, Kumar, Patra, Sneha, gautam, Prashant & Kumar. Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation. A review. *Environmental Technology and Innovation*, 2016 dOI: 10.1016/J.EtI.2016.04.002.

15. Ratnesh, trivedi, Chakraborty M.K. & tewary B.K. generation and dispersion of total Suspended Particulate Matter due to Mining activities in an Indian Opencast Coal Project, 2011 dOI: 10.5772/20828.

16. Ghose M.K. & Majee S.r. *Environmental Monitoring and assessment*, 2000, 61(2), pp. 257–265.

17. Wark K., Warner C.f. & davis W.t. *air pollution: its origin and control*. 3rd ed. Menlo Park, California, addison Wesley longman, Inc, 1998

18. Korchagina t., Bykov a. & Schastlivcev E. air pollution by coal dust as a factor of ecological compatibility for coal mining enterprises. 2019;134:02001. DOI: 10.1051/E3SCONf/201913402001.
19. Trade union Congress 2001 hazards at work—tuC guide to health and safety, trade union Congress, uK.
20. World health Organization 1999 hazard Prevention and Control in the Work Environment: airborne dust, World health Organization, Switzerland, WhO/SdE/OEh/99.14.
21. Chen J. & hoek g. long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int.*, 2020, 143, 105974 DOI: 10.1016/j. envint.2020.105974.
22. Luong L.T.M., Dang T.N., Thanh Huong N.T., Phung D., Tran L.K., Van Dung D., Thai P.K. Particulate Air Pollution in Ho Chi Minh City and Risk of Hospital Admission for Acute Lower Respiratory Infection (ALRI) among Young Children. *Environ. Pollut.* 2020. V. 257. 113424. DOI: 10.1016/j. envpol.2019.113424.
23. Priyankara S., Senarathna M., Jayaratne R., Morawska L., Abeysundara S., Weerasooriya R., Knibbs L.D., Dharmage S.C., Yasaratne D., Bowatte G. Ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Exposure and Respiratory Disease Hospitalization in Kandy, Sri Lanka. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2021. № 18. P. 9617. DOI: 10.3390/ijerph18189617.
24. Bulejko P., Adamec V., Skeřil R., Schüllerová B., Bencko V. Levels and Health Risk Assessment of PM<sub>10</sub> Aerosol in Brno, Czech Republic. *Cent. Eur. J. Public Health.* 2017. № 25. P. 129–134. DOI: 10.21101/cejph.a4495.
25. Ljungman P.L.S., Andersson N., Stockfelt L., Andersson E.M., Nilsson Sommar J., Eneroth K., Gidhagen L., Johansson C., Lager A., Leander K. et al. Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution, Black Carbon, and Their Source Components in Relation to Ischemic Heart Disease and Stroke. *Environ. Health Perspect.* 2019. № 127. P. 107012. DOI: 10.1289/EHP4757.
26. Roy D., Singh G., Seo Y.-C. Carcinogenic and NonCarcinogenic Risks from PM<sub>10</sub>-and PM<sub>2.5</sub>-Bound Metals in a Critically Polluted Coal Mining Area. *Atmos. Pollut. Res.* 2019. № 10. P. 1964–1975. DOI: 10.1016/j.apr.2019.09.002.

27. Cortes-Ramirez J., Naish S., Sly P., Jagals P. Mortality and Morbidity in Populations in the Vicinity of Coal Mining: A Systematic Review. *BMC Public Health*. 2018. № 18. P. 721. DOI: 10.1186/s12889-018-5505-7.
28. Larionov A., Volobaev V., Zverev A., Vdovina E., Bach S., Schetnikova E., Leshukov T., Legoshchin K., Ereemeeva G. Chemical Composition and Toxicity of PM10 and PM0.1 Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations. *Life* 2022. № 12. P. 1047. DOI: 10.3390/life12071047.
29. Leshukov T., Legoshchin K., Yakovenko O., Bach S., Russakov D., Dimakova D., Vdovina E., Baranova E., Avdeev K., Kolpina E. et al. Fractional Composition and Toxicity Coal–Rock of PM10-PM0.1 Dust near an Opencast Coal Mining Area and Coal-Fired Power Station. *Sustainability*. 2022. № 14. P. 16594. DOI: 10.3390/su142416594.
30. Abouchami, W., Nätthe, K., Kumar, A., Galer, S. J. G., Jochum, K. P., Williams, E., et al. (2013). Geochemical and Isotopic Characterization of the Bodélé Depression Dust Source and Implications for Transatlantic Dust Transport to the Amazon Basin. *Earth Planetary Sci. Lett.*, 380: 112–123.
31. Ginoux, P. (2003). Effects of Nonsphericity on Mineral Dust Modeling. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108( D2):4052, DOI: 10.1029/2002JD002516.
32. Kandler, K., Schtz, L., Deutscher, C., Ebert, M., Hofmann, H., Jckel, S., et al. (2009). Size Distribution, Mass Concentration, Chemical and Mineralogical Composition and Derived Optical Parameters of the Boundary Layer Aerosol at Tinfou, Morocco, During SAMUM 2006. *Tellus B.*, 61(1): 32–50.
33. Barkay, Z., Teller, A., Ganor, E., Levin, Z., and Shapira, Y. (2005). Atomic Force and Scanning Electron Microscopy of Atmospheric Particles. *Microsc. Res. Tech.*, 68(2): 107–114.
34. Veghte, D. P., and Freedman, M. A. (2014). Facile Method for Determining the Aspect Ratios of Mineral Dust Aerosol by Electron Microscopy. *Aerosol Sci. Technol.*, 48(7): 715–724.
35. Woodward, X., Kostinski, A., China, S., Mazzoleni, C., & Cantrell, W. (2015). Characterization of Dust Particles' 3D Shape and Roughness with Nanometer

Resolution. Aerosol Science and Technology, 49(4), 229–238.  
<https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1017550>.

36. Yang, W., Marshak, A., Kostinski, A. B., and Várnai, T. (2013). Shape-Induced Gravitational Sorting of Saharan Dust During Transatlantic Voyage: Evidence from CALIOP Lidar Depolarization Measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 40(12): 3281–3286.

37. Masaev Yu.A. & Panachev I.A. Vozdeystviye ugledobychi naekologicheskuyu obstanovku v Kuznetskom bassejne [Environmental impact of coal mining in the Kuznetsk basin]. The problem of creating environmentally friendly and resource-saving technologies for mining and processing mining waste. Proceedings of the I International Conference. Tula, 1996, pp. 77–78. (In Russ.).

38. Trushina G.S. Vliyanie ugol'noy promyshlennosti Kuzbassa na ekologicheskuyu i prodovolstvennuyu bezopasnost regiona [The influence of the Kuzbass coal industry on the ecological and food security of the region]. *Ugol' – Russian Coal Journal*, 2018, No. 10, pp. 98–101. (In Russ.). DOI:10.18796/0041-5790-2018-10-98-101. Available at: <http://www.ugolinfo.ru/Free/102018.pdf> (accessed 15.04.2020).

39. Методические указания по расчету неорганизованных выбросов пыли и вредных газов в атмосферу при взрывных работах на карьерах горно-химических предприятий, Люберцы, 1987. – С. 7.

40. Викторов С.Д., Бутысин В.С. Методика и программа расчета образования распространения пылегазового облака при массовом взрыве на угольном карьере. // Горный журнал №5. – 1996. – С. 50-52.

41. Баум Ф.А., Обленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М.Наука. 1975. – 704 с.

42. Бересневич П.В., Наливайко В.Г. Снижение выбросов пыли и вредных газов в атмосферу карьеров и окружающую среду при массовых взрывах. – М.: Черметинформация, 1985.

43. Дубнов Л.В., Бохареvич Н.С Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1982. – 327 с.

44. Михайлов В.А., Бересневич П.В. Снижение запыленности и загазованности воздуха на открытых горных работах. – Киев.: Техника. 1975. – 116 с.
45. Михайлов В.А., Бересневич П.В., Лобода А.И., Родионов Н.Ф. Борьба с пылью и ядовитыми газами при буровзрывных работах на карьерах. – М.: Недра. 1971. – 120 с.
46. Перечень рекомендуемых промышленных взрывчатых материалов, приборов взрывания и контроль. – М.: Недра, 1987. – 60 с.
47. Марчук Г.М. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
48. Ястребинская, А. В. Анализ взрывчатых веществ, используемых при проведении буровзрывных работ в карьере АО «Лебединский ГОК» / А. В. Ястребинская, Е. Н. Атанова // Техносферная безопасность. – 2020. – № 3(28). – С. 95-100. – EDN SJELWS.
49. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. СПб, 2012. – 172 с.
50. Викторов С.Д., Казаков Н.Н., Шляпин А.В. Прогнозирование атмосферных выбросов промышленных взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень №3. – М., 2012. – С. 313-316.
51. Рейнхардт М. Пылеизмерительная техника в особых условиях эксплуатации /М. Рейнхардт // Глюкауф, 1994. – №5/6 – С 12-15.
52. Дикарев В.И. Методы и средства защиты человека и окружающей среды/ В.И. Дикарев, В.А. Рогалев, В.А. Денисов и др. // СПб.: МАНЭБ, 1999. – 186 с.
53. Викторов, С. Д. Образование и распространение пылегазового облака при массовом взрыве на карьере / С. Д. Викторов, В. С. Бутысин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1996. – № 6. – С. 119-123. – EDN NBWXSH.
54. Алборов, И.Д. Прогнозирование состояния экосферы горного региона [Текст] / И.Д. Алборов, С.А. Суншев, М.З. Мадаева // Владикавказ: Труды СКГМИ (ГТУ). Терек, 2007.

55. Алборов, И.Д. Исследование качества стоков реки Терек [Текст] / И.Д. Алборов, К.В. Тедеев, М.З. Мадаева // Материалы XI ежегодных научных чтений Международная академия наук экологии и безопасности жизнедеятельности 135 (МАНЭБ) – Новочеркасск, 2007.

56. Тихонова, О. В. (2006). Результаты исследований процесса образования пылегазового облака на карьере ООО «ПГ Фосфорит». Записки Горного института, 167(1), 113. извлечено от <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8080>

57. Тихонова О.В. Оценка воздействия пылегазового облака на окружающую среду при производстве взрывных работ // Записки Горного института. 2003. № 1Том 155. С. 90.

58. Фокин, В. А. Методика оценки количества легкопереносимой породной пыли при производстве массовых взрывов в карьерах / В. А. Фокин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2010. – № 1. – С. 57-61. – EDN ODBDUD.

59. Амосов, П. В. Численное моделирование процесса проветривания карьера при проведении массовых взрывов по пылевому фактору / П. В. Амосов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 6. – С. 125-138. – DOI 10.21440/0536-1028-2022-6-125-138. – EDN ENJATZ.

60. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. Том 6. – М.: Горное дело, 2011. – 255 с.

61. Калякин С.А. Критический анализ и исследование пожаровзрывоопасности угля и отложений угольной пыли [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.blastcraft.net/files/articles/safety7.pdf>

62. Прыткова, Э. В. Сравнительный анализ дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны непромышленных помещений / Э. В. Прыткова, Г. В. Маврин, А. И. Мансурова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 1-2(43). – С. 69-70. – DOI 10.18454/IRJ.2016.43.134. – EDN VJUMIT.

63. Evaluation of the impact of dust suppressant application on ambient PM10 concentrations in London / B. Barratt, D. Carslaw, G. Fuller, D. Green, A. Tremper //

King's College London, Environmental Research Group Prepared for Transport for London under contract to URS Infrastructure & Environment Ltd. November 2012

64. Трескова, Ю. В. Оценка воздействия на здоровье населения и окружающую среду твердых выбросов горно-обогатительного комбината с учетом их дисперсного состава / Ю. В. Трескова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 23 (157). — С. 19-22. — URL: <https://moluch.ru/archive/157/44415/> (дата обращения: 26.05.2023).

65. Амосов, П.В. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования) / П.В. Амосов, Н.В. Новожилова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — спец. вып. №56. — С. 528-534.

66. Амосов, П.В. Влияние пористости многолетнемерзлых горных пород на глубину оттаивания / П.В. Амосов, Н.В. Новожилова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2014. — №2. — С. 59-66.

67. Ахметов, М.С. Результаты аэрометеорологических исследований температурного и ветрового режима в Коркинском карьере / Ахметов М.С., Искварина З.К. // Сборник работ Свердловской ГМО. — 1970. — вып. 10. — С. 102-105.

68. Абдюшев, А.Я. Экспериментальные исследования турбулентных струй, развивающихся вблизи плоской поверхности / Абдюшев А.Я., Бахарев В.А., Фёдорова Л.В. // Труды Казанского инженерно-строительного института. — 1968. — вып. 7. — 174 с.

69. Абрамов, Ф.А. К вопросу о проветривании глубоких карьеров / Абрамов Ф.А. // Материалы межобластной научно-технической конференции по открытой разработке месторождений Украины. — 1957. — С. 20-22.

70. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции / Батурин В.В. — М: Профиздат, 1990. — 448 с.

71. Бересневич, П.В. Аэрология карьеров / П.В. Бересневич, В.А. Михайлов, С.С. Филатов. — М: Недра, 1990. — 280 с.

72. Бахарев, В.А. К теории и расчету свободных турбулентных струй / Бахарев В.А. // Теория и расчет вентиляционных струй. — Ленинград, 1965. — С. 12-26.

73. Буткин, В.Д. Развитие методов и средств проветривания глубоких карьеров / А.С. Морин, В.Д. Буткин, В.В. Кравцов, Д.Б. Нехорошев. – М: МАКС Пресс, 2004. – 135 с.
74. Ворошилов, Я.С. Современные методы измерения концентрации пыли / Ворошилов Я.С., Фомин А.И. // Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». – 2019. – С. 111-112.
75. Демин, Н.В. Отзывы на монографию В.Н. Сытенкова «Управление пылегазовым режимом глубоких карьеров». – М: Геоинформцентр 2003 / Демин Н.В., Рубцов С.К. // Горный журнал. - 2004. - № 10. - С.88-90.
76. Драгунский, О.Н. Комплексный подход при формулировании задач аэрологии карьеров. Экология и безопасность отработки месторождений полезных ископаемых / Драгунский О.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – спец. вып. 12. – 76 с.
77. Драгунский, О.Н. Некоторые вопросы обеспечения комплексного подхода при постановке задач аэрологии карьеров / Драгунский О.Н. // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2018. – спец. вып. 32. – С. 74-79. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6- 32-74-79.
78. Козырев, С.А. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17, № 2, - С. 231-237.
79. Козырев, С.А. Автоматизация проектирования вентиляции подземного рудника / С.А. Козырев, А.В. Осинцева // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 677-682.
80. Драгунский, О.Н. Исследование разрушения инверсий в карьерах / Драгунский О.Н.; Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М: МГИ, 1978. – 18 с.
81. В. Андреев, С Панчев Динамика атмосферных термиков. Гидрометеиздат. 1975 г. Ленинград. 9,5 п.л.

82. Толмачева, Н. И. Исследование условий развития конвекции в атмосфере / Н. И. Толмачева // Географический вестник. – 2012. – № 2(21). – С. 60-67. – EDN PAGJXL.

83. Толмачева, Н. И. Радиолокационное исследование динамики конвективных облаков и осадков / Н. И. Толмачева // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2005. – № 11. – С. 169-174. – EDN HSMCRX.

84. Лхамжавын, Ж. Исследование конвекции с использованием численной модели Кайна - Фритша / Ж. Лхамжавын, Ц. Маналжавын, В. К. Аргучинцев // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 186-194. – EDN OYRJTV.

85. Влияние подоблачной конвекции на развитие облачной конвекции / Н. Е. Данилова, Ю. А. Семенова, Ю. Л. Смерек, Р. Г. Закинян // Наука. Инновации. Технологии. – 2018. – № 4. – С. 131-150. – DOI 10.37495/2308-4758-2018-4-131-150. – EDN POHXZP.

86. Исследование влияния параметров приземного слоя на развитие облачной конвекции / Н. Е. Данилова, Л. М. Кульгина, Ю. А. Семенова, Р. Г. Закинян // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 2. – С. 109-118. – EDN YZIKVB.

87. Мовсесова, Л. В. Моделирование пограничного слоя атмосферы при различных условиях стратификации / Л. В. Мовсесова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 6(114). – С. 625-635. – EDN KJJZER.

88. Смерек, Ю. Л. Прогнозирование тяжелых конвективных бурь / Ю. Л. Смерек, В. А. Шмигельский // Наука. Инновации. Технологии. – 2019. – № 2. – С. 115-124. – DOI 10.37495/2308-4758-2019-2-115-124. – EDN PDNPRR.

89. Далбаева, Е. П. Обоснование эффективных мер борьбы с пылью на карьерах криолитозоны / Далбаева Е. П. // Записки Горного института. – 2014. – № 207. – С. 110-111.

90. Коркин, Ю.М. Опыт искусственного проветривания Саамского карьера / Коркин Ю.М., Тарасов В.Н., Гуцин В.З. и др. // Горный журнал. – 1981. – № 5. – С.59-60.
91. Морин, А.С. Трубопроводная вентиляция на карьерах / Морин А.С. // Горная промышленность. – 2002. – № 3. – С.40-43.
92. Конорев, М.М. Система «Диспетчер-1» телеконтроля параметров атмосферы и управления карьерными вентиляторами / Конорев М.М., Макаров В.Н., Ледерман А.И.; Теоретические и прикладные вопросы воздухообмена в глубоких карьерах: Тез. докл. конф. – Апатиты: КФ АН СССР, 1985. – С. 160-161.
93. Лапшин, А.А. Охлаждение рудничного воздуха с использованием шахтных вод / Лапшин А.А. // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 104-107.
94. Морин, А.С. Исследование динамических схем комбинированного трубопроводного проветривания карьеров / А.С. Морин, Ф.И. Борисов, И.В. Корзухин // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2010. – Т. 41, № 1. – С. 174-179.
95. Никулин, А.Н. Оценка эффективности и результативности системы управления охраной труда и промышленной безопасностью на горнодобывающем предприятии / Никулин А.Н., Должиков И.Н., Климова И.В., Смирнов Ю.Г. // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – Т. 1. – № 2. – С. 66-72.
96. Павлов, А.И. Исследование и разработка средств местного проветривания карьеров: дис. канд. техн. наук. / Павлов А.И.; Свердловск, 1971. – 175 с.
97. Романченко, С.Б. Комплексное обеспыливание / Романченко С.Б., Тимченко А.Н., Костеренко В.Н., Поздняков Г.А., Руденко Ю.Ф., Артемьев В.Б., Копылов К.Н. // Промышленная безопасность. Библиотека горного инженера. – 2016. Т. 6. – 132 с.
98. Попов, Ю.В. Комплексное использование оборудования наклонных подъемных установок для решения проблем водоотлива и вентиляции глубоких карьеров / Ю.В. Попов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1997. – спец. вып. 1. – С. 134-137.

99. Смирнов, Ю.Д. Использование пароконденсационного способа пылеподавления при различных технологических операциях добычи полезных ископаемых / Смирнов Ю.Д., Каменский А.А., Иванов А.В. // Записки Горного института. – 2020. - Т. 186. - С. 82-85.

100. Старостин, И.И. Интенсификация аэрации карьеров с применением направляющих устройств / Старостин И.И., Бондаренко А.В. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. – 2013. – № 6. – С. 63-70. – DOI: 10.7463/0613.0577364.

101. Старостин, И.И. Проветривание карьеров струйными вентиляторами в комплексе с устройством для аэрации / Старостин И.И., Бондаренко А.В. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. н.э. Баумана. – 2015. – № 1. – С. 32-41. – DOI: 10.7463/0115.0755210.

102. Трубицын, А.А. Разработка системы мониторинга интенсивности пылеотложений и методики прогноза запыленности воздуха / Трубицын А.А., Подображин С.Н., Скатов В.В., Ворошилов Я.С., Мусинов С.Н., Трубицына Д.А. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 6-13.

103. Konorev, M.M. The issue of reducing the negative environmental impact of mass explosions in quarries / Konorev M.M., Nesterenko G.F. // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2005. – № 1. – pp. 109-113.

104. Korshunov, G. Dust control methods in open-pit mining / Korshunov G., Kovshov S., Safina A. // Current state of physical and chemical research. Ecology, Environment and Conservation Paper, New Delhi, India. – 2017. – V. 23, № 2. – pp. 883-889.

105. Lin, L. Monitoring and prediction of dust concentration in an open-pit mine using a deep-learning algorithm / Lin L., Ruixin Z., Jiandong S., Qian H., Lingzhen K., Xin L. // Journal of Environmental Health Science and Engineering. – 2021. – pp. 401-414. – DOI: 10.1007/s40201-021- 00613-0.

106. Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф. Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2000. – 312 с.,

107. Конорев, М. М. Теоретические аспекты процессов формирования и подъема пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах / М. М. Конорев, Г. Ф. Нестеренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 9. – С. 88-90. – EDN MURLOZ.

108. Рекомендациями по эксплуатации автоматизированных метеорологических комплексов в наблюдательных подразделениях МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Р 52.04.818 - 2014 Санкт-Петербург. 2014, 46 С.

109. Приказ Минприроды России от 30.07.2020 N 524 "Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением" (Зарегистрировано в Минюсте России 14.12.2020 N 61430).

110. Liu J., Feng X. T., Ding X. L., Zhang J., and Yue D. M. Stability assessment of the Three-Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling — Part I: physical model tests, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, Vol. 40, No. 5. – P. 609-631.

111. Sterpi D. and Cividini A. A physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnels in strain softening media, Rock Mech. and Rock Eng., 2004, Vol. 37, No. 4. – P. 277-298.

112. Manzella I. and Labiouse V. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non-constrained gravel flows, Rock Mech. and Rock Eng., 2008, Vol. 41, No. 1. – P. 133-151.

113. He M. C., Gong W. L., Zhai H. M., et al. Physical modeling of deep ground excavation in geologically horizontal strata based on infrared thermography, Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, Vol. 25, No. 4. – P. 366-376.

114. Dong J. Y., Yang J. H., Yang G. X., et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design, J. of China Coal Society, 2012, Vol. 37, No. 1. – P. 44-79.

115. Huang F., Zhu H. H., Xu Q., et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock massa round tunnel – Scaled model tests and numerical analysis, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, Vol. 35, No. 4. – P. 207-218.
116. Zhang Q. Y., Li S. C., Guo X. H., et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application, *Rock and Soil Mechanics*, 2008, Vol. 29, No. 8. – P. 2126-2130.
117. Ma P. F., Li Z. K. and Luo G. F. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test, *J. of Hydroelectric Eng.*, 2004, Vol. 23, No. 1. – P. 48-52.
118. Пылеулавливание и классификация в центробежно-инерционных аппаратах / К. М. Муратова, Я. В. Чистяков, А. А. Махнин // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. Вып. 4. – 2014. – С. 47-57.
119. Чистяков Я. В., Муратова К. М., Васильев П. В. Повышение эффективности отделение мелкодисперсной пыли в центробежноинерционных аппаратах пылеулавливания // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2019. – Вып. 3. – С. 42-51.
120. Муратова К. М. Защита биосферы и человека от мелкодисперсной пыли // *Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева*. № 1 (36). – 2016. – С. 130-136.
121. Чистяков Я. В., Муратова К. М., Володин Н. И. Основы сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе // *Экология и промышленность в России*. – 2016. – Т. 20. № 8. – С.20-27.
122. Влияние мелкодисперсной пыли на биосферу и человека / С. З. Калаева, К. М. Муратова, Я. В. Чистяков, П. В. Чеботарев // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2016. – Вып. 3. – С. 40-63.
123. Очистка промышленных пылевоздушных потоков в аппаратах центробежно-инерционного типа / К.М. Муратова, А.А. Махнин, Н.И. Володин, Я.В. Чистяков // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2017. № 3. С. 31-34.
124. Treatment of industrial dust-air flows in centrifugal-inertial apparatuses / К.М. Muratova, A.A. Makhnin, N.I. Volodin, and Ya.V. Chistyakov // *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 53, Nos. 3-4, July, 2017. P. 185-189.

125. Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В. Исследование процесса очистки воздушных потоков от мелкодисперсной пыли в центробежноинерционном аппарате пылеулавливания // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – Вып. 3. – С. 45-57.

126. Муратова К. М., Махнин А. А., Чистяков Я. В. Исследование сепарации мелкодисперсных газопылевых промышленных отходов в центробежно-инерционном классификаторе // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. № 3 (42). – 2017. – С. 136-143.

127. Стариков Ю.Н., Коврижных Е.Н. Основы аэродинамики летательного аппарата: Учеб. пособие. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – С. 62.

128. Стариков Ю.Н., Коврижных Е.Н. Основы аэродинамики летательного аппарата: Учеб. пособие. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – С. 36-37.

129. Поддаева О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика: учебное пособие / М.: НИУ МГСУ, 2015г. 88с.

130. URL: <https://pogoda1.ru/kedrovka/07-08/#year-2023>