

*На правах рукописи*

**Данилов Александр Сергеевич**



**РАЗРАБОТКА ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И  
ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА  
ТЕРРИТОРИЯХ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ  
АГЛОМЕРАЦИЙ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология  
(в горно-перерабатывающей промышленности)

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор

*Пашкевич Мария Анатольевна*

**Официальные оппоненты:**

*Тронин Андрей Аркадьевич*

доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБУН  
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр  
экологической безопасности Российской академии наук,  
директор

*Антонинова Наталья Юрьевна*

кандидат технических наук, Институт горного дела Уральского  
отделения Российской академии наук, заведующая  
лабораторией экологии горного производства

**Ведущая организация – НПП «Радар ммс» (АО)**

Защита состоится \_\_ сентября 2019 г. в \_\_ ч. на заседании  
диссертационного совета \_\_\_\_\_ при Санкт-Петербургском  
горном университете по адресу:  
199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан \_\_ июля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интенсивное развитие промышленности неразрывно связано с увеличением объемов добычи топливно-энергетического сырья с эквивалентным ростом мощностей утилизирующих предприятий ТЭК, оказывающих негативное техногенное воздействие на окружающую природную среду. На долю предприятий ТЭК приходится до 48 % выбросов вредных веществ в атмосферу и до 23 % сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, до 22 % образования отходов и до 70 % общего объема парниковых газов. При этом на долю предприятий по добыче, обогащению и утилизации угля приходится около 4 % всех выбросов от промышленных источников.

Согласно данным Минэнерго России и сведениям, представленным в Государственном докладе о состоянии окружающей среды, Россия занимает шестое место в мире по добыче угля (около 4,5% мирового производства), при этом в последние годы имеются четкие тенденции к росту объемов добычи, что с учетом снижения степени метаморфизма добываемых углей, приводит к увеличению эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Так, например, на долю угольной промышленности Челябинской области приходится 33-39 % валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух региона. До настоящего времени крупнейшим предприятием по добыче угля в Южно-Уральской горнопромышленной агломерации являлся Коркинский бурогольный разрез – самый глубокий в Европе и второй по глубине в мире.

Динамика загрязнений за 2013-2018 гг. показывает увеличение валовых выбросов в атмосферный воздух г. Челябинск с 140,9 до 157,6 тыс. т/год; в том числе рост выбросов в городе-спутнике Коркино (муниципалитет в составе агломерации Большой Челябинск) с 9,7 до 11,4 тыс. т/год. Среди приоритетных загрязняющих веществ, наибольшие превышения зафиксированы по пыли, оксидам углерода, азота, серы, углеводородам.

Несмотря на высокий уровень техногенной нагрузки, оказываемой на атмосферный воздух рассматриваемого региона, на данной территории расположено лишь 8 постов экологического мониторинга в черте г. Челябинск, что недостаточно для получения объективной картины сложившейся ситуации.

В связи с этим, на территориях горнопромышленных агломераций особое значение приобретает развитие систем оперативного производственного мониторинга и эффективного обеспечения экологической безопасности, в частности с применением беспилотных авиационных систем.

Вопросы применения беспилотных воздушных судов в гражданских целях отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых (Алексеев Н.А., Медведев А.А., Карпенко И.А., Юнкерман В.Ю., Alvarado M., Gonzalez F., Cliff D.). Значительный вклад в совершенствование методики моделирования характеристик загрязнения атмосферного воздуха внесли такие ученые, как Генихович Е.Л., Оникул Р.И., R. Wilson, J. Spengler. Тем не менее, несмотря на актуальность данной проблемы, на сегодняшний день не в полной мере разработаны методы оперативной оценки распространения аэрозолей и прогнозирования состояния атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций с высокой степенью техногенной нарушенности.

В связи с этим **целью работы** является обеспечение экологической безопасности на территориях горнопромышленных агломераций, основанное на повышении степени достоверности результатов измерений и оперативности мобильных систем экологического мониторинга.

**Идея работы:** оценка и прогноз состояния атмосферного воздуха в зоне воздействия производственных объектов горно-перерабатывающих предприятий следует осуществлять путем внедрения в систему экологического мониторинга дистанционных методов с применением беспилотных воздушных судов.

#### **Основные задачи исследований:**

1. Анализ и ранжирование методов и средств дистанционного экологического мониторинга в районах горнопромышленных агломераций (со сложными геоморфологическими условиями);
2. Оценка уровней воздействия объектов горнопромышленных агломераций на состояние атмосферного воздуха;
3. Разработка прогнозных моделей состояния атмосферного воздуха на основе метода конечно-элементного анализа с включением статистических данных дистанционного экологического мониторинга;
4. Оценка экологического риска последствий загрязнения атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций с использованием данных дистанционного мониторинга.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлены закономерности формирования техногенных атмохимических ореолов, отражающие высотное распределение концентраций загрязняющих веществ в зависимости от метеорологических параметров, уровня техногенной нагрузки, типа и миграционной способности загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при развитии эндогенных пожаров;

2. Теоретически обоснована стратегия управления экологической безопасностью территорий горнопромышленных агломераций, базирующаяся на данных дистанционного производственного экологического мониторинга с моделированием экологической обстановки методом конечно-элементного анализа.

**Основные защищаемые положения:**

1. Эндогенные пожары на Коркинском угольном разрезе являются основным фактором формирования техногенных атмосферных ореолов в воздухе населенных мест Коркинского муниципального района с площадью проективного покрытия  $150 \text{ км}^2$ , сопровождающиеся образованием высококонтрастной пылегазовоздушной смеси, в состав которой входят CO ( $35,0 \text{ К}_{\text{ПДКк.в}}$ ), SOx ( $12,9 \text{ К}_{\text{ПДКк.в}}$ ), NOx ( $8,1 \text{ К}_{\text{ПДКк.в}}$ ), аэрозоль ( $4,5 \text{ К}_{\text{ПДКк.в}}$ ).

2. Кинетика формирования атмосферных техногенных ореолов, обусловленная развитием эндогенного пожара в бурогольном месторождении, адекватно описывается пространственной математической моделью распространения загрязняющих веществ, построенной по данным дистанционного экологического мониторинга, учитывающей влияние вариативных факторов внешней среды, уровня природной и техногенной защищенности производственного объекта горнопромышленной агломерации.

3. Управление экологической безопасностью производственных объектов горнопромышленных агломераций в краткосрочном и среднесрочном прогнозе должно базироваться на использовании текущей статистической информации о загрязнении атмосферного воздуха, обеспеченной дистанционной системой аналитического контроля, что позволит снизить эколого-экономические риски.

**Методы исследований.** В качестве основных методов исследований использовались:

- системный анализ источников и факторов техногенного воздействия Коркинского угольного разреза на атмосферный воздух;
- аналитические и экспериментальные работы в лабораторных и полевых условиях с использованием приборной базы Центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием Санкт-Петербургского горного университета, в том числе с применением средств и методов дистанционного экологического мониторинга;
- методы математического моделирования распространения техногенных атмосферных ореолов загрязнения и картографического моделирования территорий, подвергающихся техногенной нагрузке;

**Практическая значимость работы:**

- разработана методика дистанционного мониторинга качества атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций с применением беспилотных авиационных систем;

- выполнена оценка состояния атмосферного воздуха в зоне воздействия Коркинского угольного разреза АО «РМК»;
- рассчитан технический риск развития эндогенных пожаров, выполнена оценка эколого-экономического ущерба, наносимого атмосферному воздуху как объекту охраны окружающей среды, и ущерба здоровью населения, вызванного загрязнением атмосферного воздуха;
- предложена стратегия управления экологической безопасностью Коркинского угольного разреза в период его ликвидации.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** обусловлена проведением комплексного экологического мониторинга атмосферного воздуха рассматриваемого района с применением высокотехнологичного оборудования, современных математических методов и компьютерных технологий обработки информации. Результаты экспериментальных исследований показывают воспроизводимость и удовлетворительную сходимость выявленных закономерностей процессов загрязнения окружающей среды с теоретическими данными и результатами ретроспективных исследований.

**Апробация работы.** Основные и отдельные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе: на Международном симпозиуме им. Академика М.А. Усова студентов и молодых ученых (г. Томск, 2016 г.; 2017 г.), на Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.; 2015 г.; 2017 г.), на Всероссийской молодежной научно-практической школе-конференции «Науки о Земле. Современное состояние» (г. Новосибирск, 2017 г.), на Международном конкурсе докладов молодых ученых Института материалов, минералов и горного дела ИОМЗ (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), на Конкурсе идей научно-исследовательских работ молодых ученых «Дальние горизонты науки» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), на Российско-Британском сырьевом диалоге (г. Лондон, 2018 г.), на Международном молодежном экологическом конгрессе «Северная пальмира» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.).

**Личный вклад автора** заключается в: постановке цели, формулировке задач и разработке методик исследований; проведении комплексного экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне воздействия исследуемого объекта; проведении аналитических работ по моделированию процессов формирования и миграции атмохимических ореолов загрязнения; разработке метода дистанционного экологического мониторинга территорий горнопромышленных агломераций; оценке эколого-экономических рисков в период ликвидации Коркинского угольного разреза.

### **Реализация работы:**

- разработанный метод дистанционного экологического мониторинга качества атмосферного воздуха применяется при проектировании мероприятий производственного экологического мониторинга предприятий горно-перерабатывающей промышленности (АО «РМК»);
- результаты работы могут быть использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета при проведении лабораторных занятий по дисциплинам «Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг» и «Дистанционные и ГИС-технологии в геоэкологических исследованиях».

### **Публикации.**

По теме работы опубликовано 22 печатных труда, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования России, 8 статей в журналах, индексируемых Web of Science и/или Scopus, 1 патент на полезную модель, 2 патента на программу для ЭВМ.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, восьми приложений, заключения и списка литературы. Содержит 192 страницы машинописного текста, 26 рисунков, 27 таблиц, 70 формул и список литературы из 143 наименований.

Автор выражает глубокую признательность профессору, д.т.н. М.А. Пашкевич за научное руководство работой. За всестороннюю помощь в организации работы автор благодарит доцента кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета, к.т.н. Петрову Т.А. За помощь в проведении полевых исследований автор благодарен заведующему кафедрой метрологии и управления качеством Санкт-Петербургского горного университета, д.т.н. Э.А. Кремчееву и исполнительному директору Центра коллективного пользования, к.т.н. В.А. Матвеевой. Искреннюю благодарность автор выражает сотрудникам кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** представлена общая характеристика работы, обуславливающая её актуальность, сформулированы основная цель, идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассматриваются применяемые и перспективные контактные и дистанционные методы экологического мониторинга, существующие в отечественной и мировой практике, предложена классификация дистанционных методов, выявлена

необходимость существенной модернизации существующих средств и методов при исследовании территорий горнопромышленных агломераций.

Во **второй главе** представлены результаты комплексного мониторинга качества атмосферного воздуха, на территории, подверженной воздействию Коркинского угольного разреза, с выделением эндогенного пожара как источника аномально высоких концентраций ряда загрязняющих веществ. Показана необходимость разработки дистанционных методов мониторинга, позволяющих проводить экологические исследования на территориях со сложными геоморфологическими условиями, обеспечивающих требуемую степень оперативности и достоверности получаемых сведений о качестве атмосферного воздуха

В **третьей главе** описан предлагаемый метод дистанционного экологического мониторинга атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций с применением беспилотных авиационных систем, оборудованных специализированными средствами измерений.

**Четвертая глава** посвящена оценке эколого-экономических рисков, связанных с загрязнением атмосферного воздуха, в условиях применения на исследуемой территории разработанного метода дистанционной оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

**1. Эндогенные пожары на Коркинском угольном разрезе приводят к формированию техногенных атмохимических ореолов в воздухе населенных мест Коркинского муниципального района с площадью проективного покрытия 150 км<sup>2</sup>, сопровождающиеся образованием высококонтрастной пылегазовоздушной смеси, в состав которой входят CO (35,0 К<sub>ПДКа.в</sub>), SO<sub>x</sub> (12,9 К<sub>ПДКа.в</sub>), NO<sub>x</sub> (8,1 К<sub>ПДКа.в</sub>).**

Одно из крупнейших месторождений Челябинского угольного бассейна – Коркинское в период его эксплуатации и на стадии ликвидации горнодобывающего предприятия представляет собой источник нарушения и загрязнения всех компонентов окружающей природной среды исследуемого региона, однако, наиболее значительной техногенной нагрузке подвергается атмосферный воздух.

В целях определения действительного уровня антропогенного загрязнения атмосферного воздуха в исследуемом районе были проведены комплексные полевые мониторинговые исследования, включающие оценку качества атмосферного воздуха на



территории Коркинского угольного разреза, селитебной территории ближайших населенных пунктов и на фоновых участках.

Карта-схема проводимых атмохимических исследований составлялась с учетом действующей нормативной документации и обеспечивала оценку уровня техногенной загрязненности приземного слоя атмосферы в самых густонаселенных районах ближайших населенных пунктов и на рекреационных территориях.

Сложные геоморфологические условия расположения разреза, характерные для большинства бурогольных месторождений России, обуславливают повышенные объемы временных затрат и затрат труда при проведении экологического мониторинга.

На основании проведенных исследований выявлены повышенные содержания оксидов азота (до 8 ПДК<sub>а.в.</sub>), диоксида серы (до 13 ПДК<sub>а.в.</sub>), оксида углерода (до 35 ПДК<sub>а.в.</sub>), а также веществ, входящих в группу суммаций в атмосферном воздухе (диоксид серы и сероводород в совместном присутствии – до 3 ПДК<sub>а.в.</sub>). Интерпретация результатов мониторинга качества атмосферного воздуха в приземном слое на территории, подверженной антропогенному воздействию, осуществлялась путем построения атмохимических ореолов загрязнений. Картографическое моделирование выявленных атмохимических ореолов выполнялось на основе расчета рассеивания загрязняющих компонентов в приземном слое атмосферы (рис. 1). В результате проведенных исследований установлены границы и протяженность атмохимического ореола загрязнения на территории Челябинской области, площадь проективного покрытия которого достигает 150 км<sup>2</sup>. Принимая во внимание то, что Коркинский угольный разрез находится на стадии ликвидации, проблема оценки его воздействия на окружающую среду является одной из основных.

Результаты экологического мониторинга вне зоны воздействия Коркинского угольного разреза показали, что на фоновых участках концентрации загрязняющих веществ с учетом суммации негативного воздействия не превышают предельно допустимых и находятся в диапазоне 0,3-0,9 ПДК<sub>а.в.</sub> (рис. 2).

Анализ литературных данных и результатов дополнительно проведенных мониторинговых исследований позволил установить, что основным источником эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух является эндогенный пожар в открытой горной выработке, площадь которого на сегодняшний день составляет порядка 410 м<sup>2</sup>. По предварительным оценкам, при отказе от тушения эндогенных пожаров на Коркинском разрезе в атмосферный воздух будет выбрасываться до 950 т/год загрязняющих веществ.

Таким образом, выявленные техногенные атмохимические аномалии характеризуют значительную нагрузку на атмосферный воздух Южно-Уральской горнопромышленной

агломерации и доказывают необходимость ее снижения путем внедрения стратегии управления экологической безопасностью, основанной на применении дистанционных методов экологического мониторинга, обеспечивающих высокую оперативность и достоверность получаемых данных о состоянии качества компонентов окружающей природной среды.

**2. Кинетика формирования атмохимических техногенных ореолов, обусловленная развитием эндогенного пожара в бурогольном месторождении, адекватно описывается пространственной математической моделью распространения загрязняющих веществ, построенной по данным дистанционного экологического мониторинга, учитывающей влияние вариативных факторов внешней среды, уровня природной и техногенной защищенности производственного объекта горнопромышленной агломерации.**

Исследования, проведенные на территории Южно-Уральской горнопромышленной агломерации, позволили выявить ряд существенных недостатков классического подхода к выполнению мероприятий экологического мониторинга. Очевидным является, что с учетом процесса перехода к использованию наилучших доступных технологий при проведении производственного экологического контроля на предприятиях горно-перерабатывающей промышленности, применение дистанционных методов на производственных объектах, относящихся к I категории по уровню негативного воздействия на окружающую среду, позволит формировать основу для разработки стратегии управления экологической безопасностью при эксплуатации и ликвидации особо опасных и технически сложных производственных объектов.

Анализ данных, опубликованных в литературных источниках, выявил необходимость обобщения информации о применимости различных средств и методов дистанционного экологического мониторинга (таблица 1). Проведенные аналитические исследования позволили выполнить классификацию дистанционных методов экологического мониторинга по ряду параметров: подвижность (мобильность), высотность, тип получаемых данных, уровень организации и др. (рис. 3).

При выборе рационального метода была применена процедура ранжирования и построения рейтинг-листов. Для этого оценивалось консолидированное значение интегрального показателя по всем уровням оценки по предлагаемой формуле:

$$M_{\text{конс}} = \prod_{j=1}^n M_j, \quad (1)$$

где  $M_{\text{конс}}$  – консолидированный интегральный показатель по всем уровням;  $M_j$  – интегральный показатель  $j$ -го уровня.

Однако, при значительном количестве объектов сравнения количество связей между ними растет пропорционально квадрату числа объектов. Поэтому при ранжировании большего числа объектов использовались формализованные процедуры алгоритма экспертного ранжирования. Наиболее подходящими для решения поставленной в диссертационном исследовании задачи является алгоритм Штейнгауза–Форда–Джонсона. Результат экспертно-балльного ранжирования показал, что наиболее перспективным при решении задач экологического мониторинга является применение беспилотных воздушных судов (БВС). По состоянию на 2019 год в коммерческом сегменте рынка БВС России представлено не менее 50 производителей. Выполненные оценки показывают, что наиболее подходящим носителем для средств измерений (СИ), необходимым для оперативного мониторинга качества атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций, является беспилотная авиационная система (БАС) на основе БВС вертолетного типа.

В процессе разработки методики оценки качества атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций с применением БВС следует учитывать ряд ограничений различного характера. Основные из них заключаются в требованиях законодательства Российской Федерации в области обеспечения единства измерений, в области безопасной эксплуатации БВС гражданского назначения, а также технических требованиях предъявляемых к СИ и методических требований, обусловленных специальными условиями размещения СИ на борту БВС.

Анализ действующей нормативно-правовой базы по организации экологического мониторинга в районах расположения особо опасных и технически сложных объектов горнопромышленных агломераций показал, что единого подхода к обоснованию периодичности проведения наблюдений в настоящее время не существует. В связи с этим при разработке методики периодичность облетов определялась расчетным способом.

Проведенное моделирование распространения загрязняющих веществ от типовых источников выбросов позволило создать набор универсальных карт облета с учетом комбинирования воздействия источников различных типов.

Оценка скорости и характера осаждения загрязнителей атмосферы на рельеф является одной из основных частей работы по моделированию распространения примесей в атмосфере. Построение адекватных моделей обеспечивает возможность корректного описания характера и интенсивности техногенной нагрузки на окружающую среду, вызванной эмиссией загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Локальный атмосферический поток на рельеф местности за счет седиментационного осаждения выражается как произведение концентрации загрязняющего вещества вблизи рассматриваемой точки рельефа местности и скорости осаждения.

В рамках простого диффузионного приближения массовая концентрация  $C$  однородной примеси, представленной монодисперсным загрязняющим веществом, определяется решением уравнения атмосферной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (W_{x_i} - w_g \cdot \delta_{i3}) \cdot \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} D_{t_i} \cdot \frac{\partial C}{\partial x_i} - \alpha C + S, \quad (2)$$

где  $W_{x_i}$  - компонента скорости воздушного потока вдоль оси  $x_i$ , (ось  $x_3$  направлена по нормали к рельефу местности);  $w_g$  - скорость седиментационного осаждения;  $D_{t_i}$  - коэффициент турбулентной диффузии в направлении оси  $x_i$ ;  $S$  - источниковый член;  $\delta_{i3}$  - символ Кронекера;  $\alpha$  - коэффициент, характеризующий захват загрязняющего вещества атмосферными осадками.

Учитывая специфику конкретных задач охраны воздушного бассейна от загрязнений, было принято ограничение, заключающееся в рассмотрении стационарных процессов диффузии в диапазоне от локального до регионального уровня (территории, подверженные воздействию производственных объектов горнопромышленных агломераций). При рассмотрении процессов распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы коэффициенты уравнения атмосферной диффузии определяются на основании теории подобия Монина – Обухова.

В результате была получена формула для вертикального профиля концентрации неоднородной атмосферной примеси:

$$C(h) = \frac{C_1}{\left[1 + V^2 \frac{\overline{w_g}}{v_*} \psi(h)\right]^{1/V^2}}, \quad (3)$$

где  $\overline{w_g}$  - средняя по спектру скорость седиментационного осаждения;  $V$  - коэффициент вариации скорости осаждения.

В случае, если информация о характеристиках термической стратификации приземного слоя атмосферы отсутствует, следует воспользоваться усредненным выражением:

$$\frac{C(h)}{C_1} = \left[1 + A\beta \ln \frac{h}{h_1}\right]^{-1/\beta}, \quad (4)$$

где  $\beta = V^2$ ;  $A = \frac{\overline{w_g}}{kv_* \alpha_T} = 1,85 \frac{\overline{w_g}}{v_*}$ ;  $\alpha_T$  - величина, обратная турбулентному числу Прандтля.

Итоговая задача моделирования выпадения загрязняющего вещества на рельеф местности решалась численно методом конечных разностей, а полученная разностная задача – с применением алгоритма Томаса.

Дополнительный анализ позволил выявить возможности построения аналитических аппроксимаций распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и, как результат, суммарный поток осаждающихся на рельеф местности примесей, что позволило упростить вычислительные алгоритмы инженерных расчетов и соответствует общему подходу построения инженерных моделей расчета загрязнения атмосферы.

При выполнении инструментальных измерений для получения легитимных результатов требуется соответствующее метрологическое обеспечение измерительных комплексов на базе БВС. При выполнении измерений концентрации загрязняющего вещества в атмосферном воздухе относительная погрешность не должна превышать  $\pm 25\%$ . Источники неопределенности для применяемого СИ и выражения для расчета составляющих неопределенности для одного контролируемого компонента представлены в таблице 2. Разброс показаний подчиняется нормальному закону распределения вероятностей и оценивается как неопределенность типа А.

Апробация предложенной методики оценки качества атмосферного воздуха проводилась на территории, подверженной воздействию открытой горной выработки Коркинского угольного разреза в летние полевые сезоны.

Полученные данные дистанционной оценки качества атмосферного воздуха (рис. 4) позволяют по косвенным признакам выделить очаги эндогенных пожаров, координаты которых соответствуют их местонахождению на рельефе местности. Сравнение результатов, полученных с применением комплекса дистанционного экологического мониторинга с данными маршрутных постов показали их высокую достоверность и воспроизводимость.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили возможность применения БАС в целях экологического мониторинга атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций с повышением оперативности проводимых исследований, а результаты, полученные с применением БАС, отвечают требованиям по точности результатов измерений концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

**3. Управление экологической безопасностью производственных объектов горнопромышленных агломераций в краткосрочном и среднесрочном прогнозе должно базироваться на использовании текущей статистической информации о загрязнении атмосферного воздуха, обеспеченной дистанционной системой аналитического контроля, что позволит снизить эколого-экономические риски.**

Для создания стратегии управления экологической безопасностью особо опасных и технически сложных объектов горнопромышленных агломераций в целях обеспечения оперативного управления экологической безопасностью для минимизации техногенного воздействия эксплуатируемых производственных объектов и объектов горной

промышленности, находящихся на стадии ликвидации, необходимо создать программу управления эколого-экономическими рисками (рис. 5). Программа должна основываться на дистанционной системе аналитического контроля качества атмосферного воздуха. Данный подход позволяет создать информационно-управляющую систему, способную решать следующие задачи:

- обеспечение оперативного контроля экологической ситуации на территориях горнопромышленных агломераций, подверженных негативному воздействию Коркинского угольного разреза, включающего контроль эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух с применением БАС;
- осуществление контроля технологических параметров, определяющих технический риск возникновения эндогенных пожаров;
- краткосрочное и среднесрочное прогнозирование развития экологической ситуации на исследуемой территории на основе оперативных данных о состоянии окружающей природной среды и технологических процессов с выявлением причин и взаимосвязей тех или иных изменений;
- обнаружение аварийных ситуаций (эндогенных пожаров) на ранних стадиях и оперативное реагирование на них;
- осуществление информационной поддержки для планирования и внедрения научно обоснованных и экономически эффективных природоохранных мероприятий.

Система управления экологической безопасностью должна строиться на базе технических средств дистанционного контроля, включающих БАС, оборудованные СИ; специализированного программного обеспечения и информационных ресурсов и иметь двухуровневую систему. На первом (измерительном) уровне с помощью технических средств осуществляется периодическая оценка (контроль) состояния атмосферного воздуха. Полученные мониторинговые данные поступают на уровень обработки данных (второй), в рамках которого осуществляется сбор, обработка, хранение и интерпретация полученной информации. Кроме информации с измерительного уровня, на уровень обработки данных поступают сведения из внешних источников (данные о технологическом процессе, сведения о метеорологических условиях и прочие). На основе анализа и обработки совокупности полученных данных осуществляются следующие управленческие функции:

- краткосрочный и среднесрочный прогноз развития экологической ситуации на основе текущих сведений о состоянии атмосферного воздуха с выявлением динамики ее изменения;
- оперативное выявление опасных факторов, влияющих на развитие эндогенных пожаров и реагирование на изменения экологической обстановки;

- контроль работы технических средств измерений и управление режимами их эксплуатации;
- адаптация к изменяющимся условиям функционирования;
- поддержка принятия управленческих решений.

Схема оценки уровней риска состоит из нескольких этапов: качественная идентификация опасностей; определение границ зоны риска; оценка путей воздействия стрессора; определение характеристики риска с использованием количественных показателей; управление риском, состоящее из четырех элементов: сравнительная оценка и ранжирование рисков; определение уровней приемлемости риска; выбор стратегии снижения и контроля риска; принятие управленческих (регулирующих) решений.

В ходе выполнения диссертационного исследования было выявлено пять условных групп влияния горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности на экологическое состояние региона: первая группа, связанная непосредственно с ведением горных работ; вторая группа, обусловленная эмиссией вредных веществ; третья группа, связанная с человеческими и материальными потерями во время эксплуатации предприятий; четвертая группа, связанная с отчуждением значительных территорий, и пятая группа, связанная с проблемами обращения с отходами.

Анализ структуры формирования экологических рисков на стадии ликвидации Коркинского угольного разреза и проведенные экспедиционные исследования показали, что в условиях отсутствия деятельности по добыче угля, основным источником риска развития неблагоприятной экологической обстановки на территории Южно-Уральской горнопромышленной агломерации является риск развития эндогенных пожаров.

На практике отсутствует методика расчетного определения скорости распространения эндогенных пожаров в угольных разрезах и аналогичных производственных объектах предприятий минерально-сырьевого комплекса. В связи с этим, задачей проводимых исследований являлось экспериментальное определение линейной скорости распространения эндогенных пожаров в Коркинском угольном разрезе на основе интерпретации данных космического тепловизионного мониторинга.

Для оценки скорости распространения эндогенных пожаров были построены пространственно-временные зависимости в системе координат площадь эндогенного пожара – время распространения. Были проанализированы две временные выборки: с 1989 по 1991 гг. и с 2016 по 2018 г. Выбор данных временных периодов связан с необходимостью сравнения процессов развития эндогенных пожаров в период эксплуатации Коркинского угольного разреза и на стадии его ликвидации (первый и второй периоды, соответственно), а также повышения доверительной вероятности результата. С учетом вышеизложенного,

площадь эндогенных пожаров в условиях Коркинского угольного разреза в момент времени  $\tau$  может быть выражена линейной зависимостью:

$$S_{\tau} = 0,0023 \cdot S_0 \cdot \tau, \quad (5)$$

где: 0,0023 - усредненный угловой коэффициент, 1/сут.;  $S_0$  - начальная площадь эндогенного пожара, м<sup>2</sup>;  $\tau$  - время распространения эндогенного пожара, сут.

Степень риска от загрязнения окружающей среды можно оценить в зависимости от относительной частоты его проявления и стоимости возможного ущерба. Матрица этой зависимости представлена на рисунке 6.

Эколого-экономические риски в стоимостном исчислении выражаются ущербом, наносимым атмосферному воздуху как объекту охраны окружающей среды, и ущербом, наносимым здоровью населения.

Выполненные расчетные оценки показывают, что ущерб, связанный с загрязнением атмосферного воздуха, в условиях отсутствия мероприятий по тушению эндогенных пожаров и отказа от использования наилучших доступных технологий при проведении экологического мониторинга может превышать 300 млн руб./год. При этом долговременный эффект, связанный с заболеваемостью населения, исчисляется ущербом более чем 10 млн руб./год.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. На основании комплекса многолетних натуральных наблюдений за состоянием атмосферного воздуха установлены закономерности формирования техногенных атмохимических ореолов в районе воздействия Коркинского угольного разреза, позволяющие определить спектр основных загрязняющих веществ.

2. Предложена структура комплекса технических средств измерений для дистанционного мониторинга окружающей среды, основанная на применении беспилотных авиационных систем, оборудованных газоаналитическим и специальным пробоотборным оборудованием.

3. Создана динамическая картографическая модель распространения атмохимических аномалий на территории Южно-Уральской горнопромышленной агломерации.

4. Теоретически обоснована методика проведения дистанционного мониторинга атмосферного воздуха с применением беспилотных авиационных систем (включая



обоснование маршрутов, высот, периодичности облетов) и выполнена оценка метрологических характеристик мониторингового комплекса.

5. Ретроспективная оценка данных дистанционного тепловизионного мониторинга позволила установить кинетику эндогенных пожаров в условиях Коркинского угольного разреза, включая получение линейных эмпирических зависимостей по скорости увеличения площади с угловым коэффициентом 0,0023.

6. Разработана стратегия управления экологической безопасностью Коркинского угольного разреза на стадии его ликвидации, которая базируется на среднесрочном прогнозировании состояния атмосферного воздуха, обеспеченном дистанционной системой аналитического контроля.

7. Эколога-экономическими расчетами определен ежегодный ущерб, наносимый атмосферному воздуху как объекту охраны окружающей среды, составляющий порядка 300 млн руб.; а также ущерб, наносимый здоровью населения в результате загрязнения атмосферного воздуха, составляющий более 10 млн руб.

#### **НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Данилов А.С. Система экологического мониторинга окружающей среды с использованием малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Экология и промышленность России, 2013. №9. С. 4-8.

2. Danilov A.S., Smirnov Ur. D., Pashkevich M.A. The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of UAV // Russian Journal of Ecology, 2015, Vol. 46, No. 1, P. 14–19.

3. Danilov A., Pivovarova I., Krotova S. Geostatistical analysis methods for estimation of environmental data homogeneity // Scientific World Journal Volume 2018, 3 June 2018, No 7424818.

4. Danilov A.S., Pashkevich M.A., Petrova T.A. Environmental integrated monitoring system at reclamation of large open-cast coal mine // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - 11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018, P. 189-194.

5. Кремчеев Э.А., Данилов А.С., Смирнов Ю.Д. Состояние метрологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 96-105.

6. Автоматическое устройство для дистанционного мониторинга окружающей среды // Патент РФ № 173329. Бюллетень полезные модели. №24, 2017 / Данилов А.С. и др.

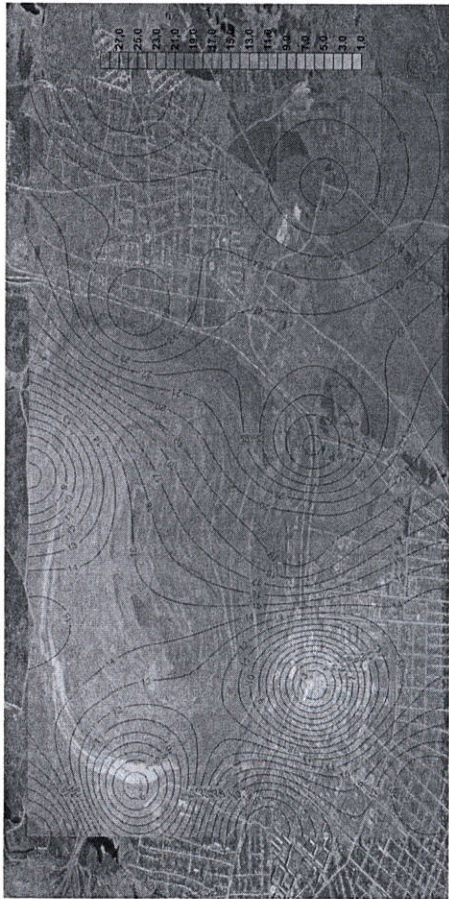


Рисунок 1 – Атмохимический ореол загрязнения приземного слоя атмосферы оксидом углерода (СО) в районе расположения Коркинского угольного разреза.

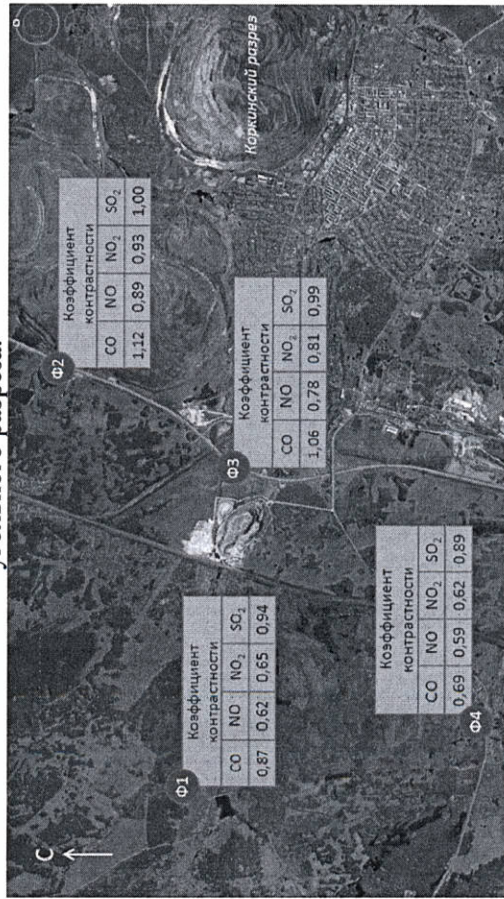


Рисунок 2 – Карта-схема опробования фоновых участков

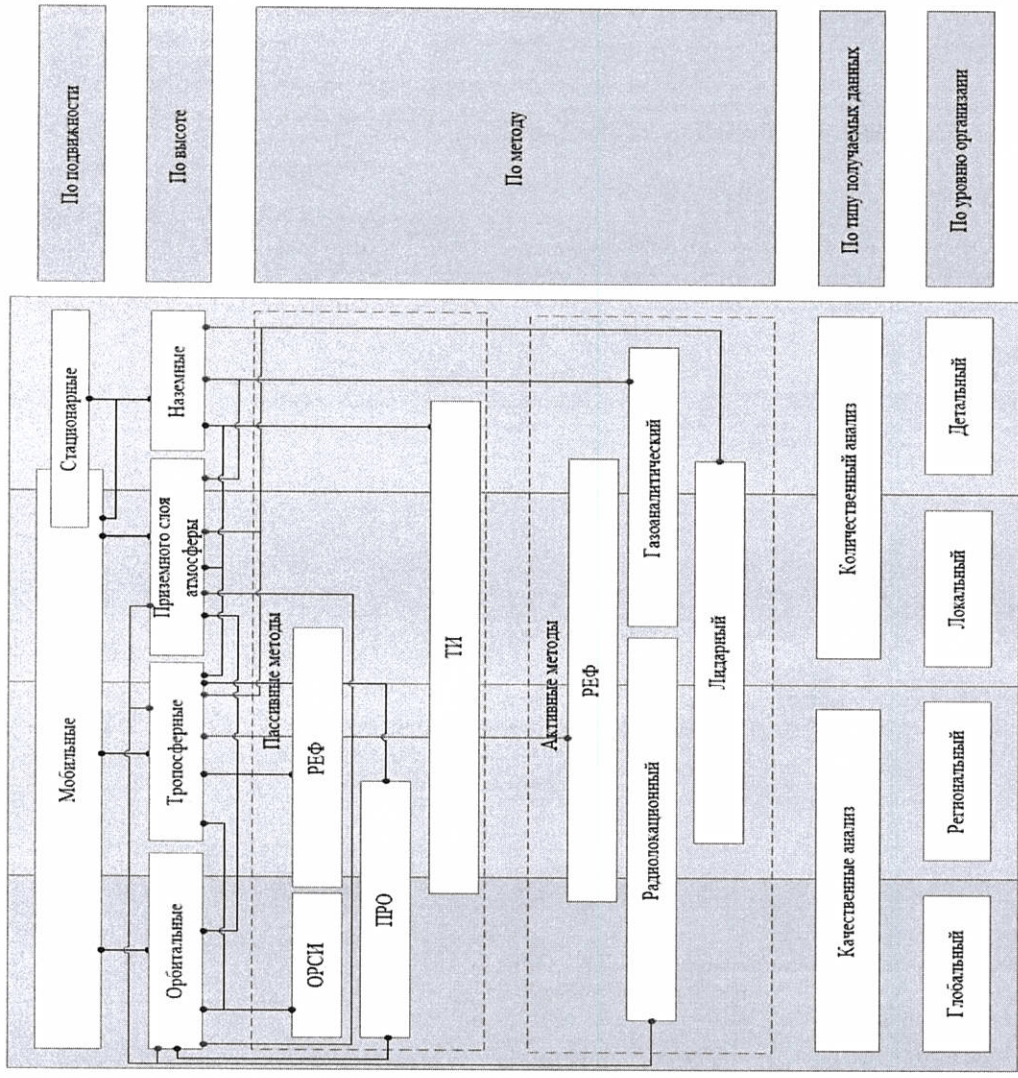


Рисунок 3 – Структура применимости дистанционных методов при экологическом мониторинге (где: ОРСИ – метод отраженного и рассеянного солнечного излучения, РЕФ – метод рефракции, ПРО – метод прозрачности атмосферы, ТИ – метод теплового излучения).



Рисунок 4 – Атмосферический ореол загрязнения приземного слоя атмосферы оксидом углерода (СО) в районе расположения Коркинского угольного разреза, полученный в результате применения комплекса экологического

мониторинга на основе БАС

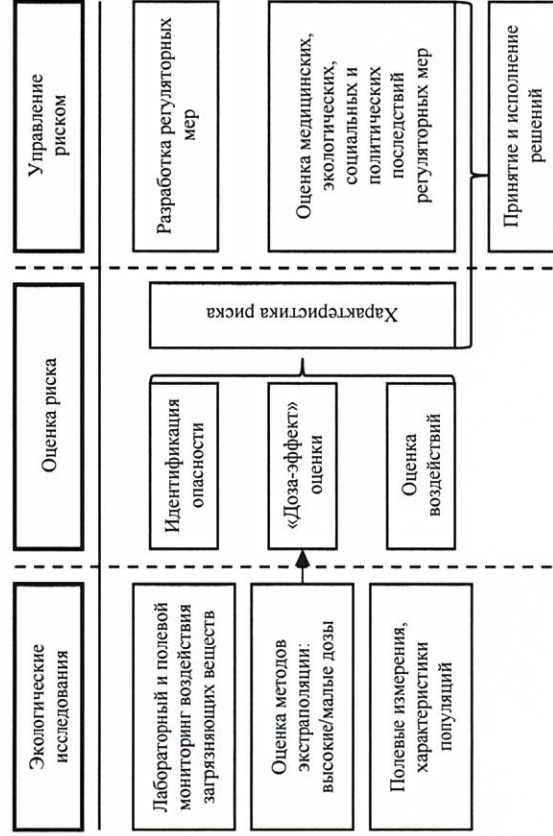


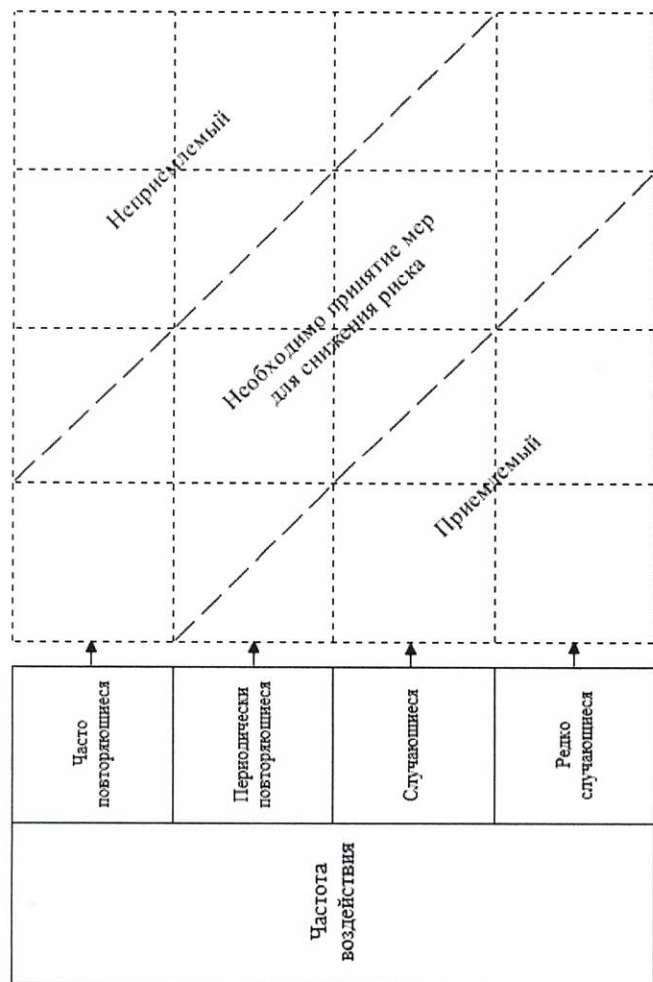
Рисунок 5 – Блок-схема определения уровней эколого-экономических рисков

Таблица 1 – Сравнительные характеристики дистанционных методов контроля

Спутниковое ДЗЗ	Пилотируемые средства контроля	Беспилотные авиационные системы
Цена возрастает пропорционально увеличению площади	С увеличением площади цена растёт в меньшей степени	С увеличением площади цена растёт в меньшей степени
Данные фиксируются в цифровом виде, требуется расшифровка	Данные фиксируются в цифровом виде, требуется расшифровка	Данные фиксируются в цифровом виде, расшифровки не требуется
Минимальная площадь заказа составляет 64 кв. км	Аэрофотосъёмка нерентабельна для небольших площадей	Использование БВС рентабельно для небольших площадей
В настоящее время самым лучшим считается гражданское пространственное разрешение 50 см	Можно получать изображения с разрешением до нескольких сантиметров в зависимости от высоты полета	Можно получать изображения с разрешением до нескольких сантиметров в зависимости от высоты полета
Одновременно получают изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах	Пленочные камеры обычно получают раздельно цветные и инфракрасные изображения	Можно оперативно устанавливать аппаратуру для получения снимков различных спектральных диапазонов
Средний срок поставки изображения составляет 7 дней. Для некоторых облачных/дождливых районов срок может увеличиваться до месяца.	Срок поставки данных от нескольких секунд до нескольких часов.	Срок поставки данных от нескольких секунд до нескольких часов.
Быстро и удобно обработать цифровых данных в камеральных условиях.	Трудоёмкость при обработке результатов аэрофотосъёмки в камеральных условиях	Быстро и удобно обработать цифровых данных в камеральных условиях.
Невозможность оперативного монтажа оборудования	Средняя скорость монтажа оборудования	Оперативный монтаж оборудования
Высокая сложность обучения операторов	Высокая сложность обучения операторов и необходимость в профессиональном пилоте	Возможность оперативного обучения внешнего пилота

Таблица 2 – Относительные неопределенности входных величин для СИ в составе мониторингового комплекса на базе беспилотной авиационной системы

№ п/п	Расчетное выражение	Расшифровка
1.	$u_{п1} = \tau \cdot \frac{\delta_0}{\sqrt{3}}$	$\delta_0$ - предел допускаемой основной относительной погрешности газоанализатора, % Коэффициент $\sqrt{3}$ выбран из допущения равномерного закона распределения погрешности в интервале $(-\delta_0; +\delta_0)$ в период между корректировками показаний.
2.	$u_{к1} = \tau \cdot \frac{0,3\delta_0}{2\sqrt{3}}$	$0,3\delta_0$ - предел допускаемого изменения показаний в период между корректировками. Относительная стандартная неопределенность вычисляется для середины интервала $(0; +0,3\delta_0)$ .
3.	$u_{с1} = \tau \cdot \frac{0,5\delta_0}{\sqrt{3}}$	$0,5\delta_0$ – предел допускаемой вариации выходного сигнала по измерительным каналам.
4.	$u_{т1} = \tau \cdot \frac{0,5\delta_0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(t_m - 20)}{10}$	$t_m$ – наибольшая температура окружающей среды, при которой могут быть проведены измерения, $0,5\delta_0$ - предел допускаемой дополнительной погрешности от изменения температуры окружающей среды в рабочих условиях. $20^\circ\text{C}$ - температура определения основной погрешности, $10^\circ\text{C}$ – шаг изменения температуры.
5.	$u_{д1} = \tau \cdot \frac{0,2\delta_0}{\sqrt{3}}$	$0,2\delta_0$ – предел допускаемой дополнительной погрешности от влияния изменения атмосферного давления в рабочих условиях.
6.	$u_{в1} = \tau \cdot \frac{\delta_0}{\sqrt{3}}$	$\delta_0$ - предел допускаемой дополнительной погрешности от изменения относительной влажности окружающей среды в рабочих условиях.
7.	$u_{п1} = \tau \cdot \frac{\delta_0}{\sqrt{3}}$	$\delta_0$ - предел допускаемой суммарной дополнительной погрешности от изменения содержания неизмеряемых компонентов анализируемой газовой смеси.
8.	$u_{р1} = \tau \cdot \frac{0,5\delta_0}{\sqrt{3}}$	$0,5\delta_0$ – предел допускаемой дополнительной погрешности расхода анализируемого воздуха, проходящего через газоанализатор.



		Ранжирование последствий и ущерба			
		Незначительное	Значительное	Критическое	Катастрофическое
Здания и сооружения	Степень нарушения	< 1 дня для восстановления	Несколько дней для восстановления	> 1 мес. Для восстановления	Полное разрушение
	Финансовый ущерб, млн руб.	< 6,5	6,5 - 65	65 - 650	> 650
Здоровье и безопасность	Здоровье и безопасность	Потери рабочего времени 1 - 12 мес. от травм и болезней	Потери рабочего времени > 12 мес. от травм и болезней	Смерть нескольких человек	Смерть > 10 человек, тяжёлые увечья > 100 человек
	Воздействие загрязнения на экосистемы	Незначительное, легко восстанавливаемое повреждение	Временные обратимые повреждения на ранних стадиях восстановления	Потери ключевых видов и обширное разрушение среды обитания	Полное, необратимое и неадаптируемое уничтожение биоты

Рисунок 6 – Матрица зависимости степени риска от уровня загрязнения окружающей среды