На правах рукописи

Зуев Дмитрий Владимирович

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА СЕРЫ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Красноярск 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Кашкин Валентин Борисович**
Официальные оппоненты:	**Черемисин Александр Алексеевич,** доктор физико-математических наук, профессор, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», кафедра общепрофессиональных дисциплин, профессор
	Швецов Евгений Геннадьевич кандидат технических наук, Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатория мониторинга леса, научный сотрудник
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита диссертации состоится 18 апреля 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.26, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26 ауд. УЛК 112

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан ____ марта 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Кайзер Юрий Филиппович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

На сегодняшний день проблеме экологии и загрязнению атмосферного воздуха в Красноярском крае уделяется огромное внимание со стороны органов местного самоуправления и общественности. Прошедший 2017 год, в соответствии с Указом Президента Российской Федерации №7 от 05.01.2016 г. объявлен годом экологии. Основная цель этого документа – привлечь внимание граждан к проблемам, существующих в экологической сфере. Улучшить экологическую безопасность, как регионов, так и страны в целом.

В исполнение указа президента в Красноярском крае реализуется программа, разработанная министерством природных ресурсов и экологии Красноярского края «Снижение негативного воздействия на окружающую среду предприятиями Красноярского края на 2016-2020 годы». Одна из задач программы: снижение выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от стационарных источников предприятиями Норильской промышленной зоны.

В соответствии с Государственным докладом «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году» Красноярский край, по объемам выброса диоксида серы занимает первое место, прежде всего за счет предприятий Норильской промышленной зоны (НПЗ). Самые загрязненные осадки на территории Российской Федерации в 2016 году были выявлены в Норильске при этом влажные выпадения соединений серы превысили предельное значение нагрузки в 4 раза, достигнув, среди загрязненных городов России, максимального значения.

Присутствие в атмосферном воздухе высоких концентраций диоксида серы (SO_2) приводит к деградации и повреждению лесных площадей вокруг промышленных предприятий НПЗ. Высокое значение концентрации SO_2 отрицательно влияет на здоровье людей. Продолжительность жизни населения, проживающего на исследуемой территории меньше на 10 лет, чем в среднем по стране. Все это обуславливает необходимость мониторинга экологической обстановки в НПЗ, в частности, мониторинг выбросов SO_2 - основного загрязнителя данного региона.

Существует несколько методов контроля газового состава атмосферы: наземный, авиационный и спутниковый. В настоящее время контроль выбросов SO_2 на севере Красноярского края основан на наземном методе, данные являются закрытыми и потому нами не использованы. В диссертационной работе применен метод контроля на основе спутниковых данных. Преимуществом спутникового метода контроля является охват обширных территорий земной поверхности, возможность замерять концентрацию загрязняющих веществ на различных высотах, а также способность вести наблюдение за дальнейшим направлением распространения выбросов.

Степень научной проработанности темы. Вопросам разработки и совершенствования спутниковых методов мониторинга выбросов газов в атмосферу посвящены работы как российских, так и зарубежных специалистов, таких как М.Ю. Катаев, В.В. Зуев, Б.Д. Белан, Д.А. Пестунов, Н.А. Кротков, K. Yang, S. Carn, A. Krueger, B. Anderson, R. Martin, Li. Carn и др. Большинство из них освещают техническую сторону метода контроля и его точность. В диссертационной работе данные спутниковых наблюдений используются для оценки экологической обстановки северных территорий Красноярского края.

Научная идея заключается в разработке метода использования спутниковых данных по выбросам диоксида серы для северных территорий Красноярского края.

Цель диссертационной работы – повышение качества системы экологического мониторинга атмосферы северных территорий Красноярского края путем контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных.

Задачи исследования:

1. Разработать метод контроля и критерии использования базы данных спектрометра Ozone Monitoring Instrument (OMI, спутник AURA) и спектрометра Ozone Mapping Profiler Suite (OMPS, спутник SUOMI NPP) для анализа выбросов диоксида серы в атмосфере.
2. Разработать информационное приложение, позволяющее в автоматическом режиме обрабатывать базы данных OMI, OMPS для оценки выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных.
3. Исследовать выбросы диоксида серы для северных территорий Красноярского края за 2005-2017 гг. на основе разработанного метода контроля и построить карты-схемы состояния окружающей среды.
4. Разработать практические рекомендации по применению метода контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с пунктами 1, 4, 6 паспорта специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (технические науки).

Объект исследования – выбросы диоксида серы в атмосферу.

Предмет исследования – методы контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методы компьютерной обработки аэрокосмических изображений, линейной алгебры, методы статистического анализа. Исследование проводилось на основе спутниковой базы данных NASA (США) по выбросам диоксида серы.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором, подтверждается корректным использованием существующих, теоретически обоснованных и проверенных на практике методов предварительной и математической обработки спутниковых данных. Научные положения аргументированы. Выводы подтверждены экспериментальными

исследованиями, сопоставимыми с результатами других авторов и результатами математической обработки с использованием сертифицированных программ.

Научная новизна работы:

1. Впервые использован спутниковый метод контроля выбросов диоксида серы по северным территориям Красноярского края. Выполнен сравнительный анализ данных OMI и OMPS как основных элементов системы спутникового мониторинга.
2. Разработано информационное приложение для автоматизированной обработки спутниковых данных по выбросам диоксида серы.
3. Впервые по спутниковым данным оценены концентрация, масса и площадь распространения выбросов диоксида серы в атмосфере северных территорий Красноярского края за 2005-2017 гг.
4. Впервые построены экологические карты-схемы состояния атмосферного воздуха Норильской промышленной зоны за 2005-2017 гг.

Практическая значимость работы. Предлагаемый метод мониторинга важен как независимый и объективный источник получения информации.

На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации, включающие:

- Технологию контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных для исследуемой территории;
- Технологию обработки массива данных NASA по выбросам диоксида серы в атмосферу;
- Технологию оценки экологического состояния окружающей среды исследуемой территории.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод контроля выбросов диоксида серы в атмосферу на основе спутниковых данных и разработанное информационное приложение, в автоматическом режиме обрабатывающее базы данных спектрометров OMI и OMPS, которые позволили определить массу и площадь загрязнения для северных территорий Красноярского края за 2005-2017 гг.;
2. Результаты сравнительного анализа данных спектрометров OMI и OMPS, которые показали возможность использования OMPS для контроля содержания диоксида серы в атмосфере, после вывода OMI из эксплуатации;
3. Результаты мониторинга выбросов диоксида серы в атмосферу Норильской промышленной зоны на основе разработанного метода контроля, которые показали, что среднегодовое значение концентрации SO_2 за 2005-2017 гг. составляет 0,11 мг/м^3, что превышает предельную норму 0,05 мг/м^3 в 2,2 раза;
4. Результаты контроля выбросов диоксида серы на основе разработанного метода, которые показали, что на территории Норильской промышленной зоны уровень риска повышенный и местами неприемлемый.

Личный вклад автора. Разработан спутниковый метод контроля выбросов диоксида серы для северных территорий Красноярского края. Проведены исследования и их математическая обработка. Опубликованы научные статьи по

теме диссертации. Результаты исследований докладывались на научно-технических конференциях, внедрены в учебный процесс и производственную деятельность промышленных предприятий. Все алгоритмические решения, программная реализация, разработка методик анализа и оценки, обработка спутниковых данных выполнялись лично соискателем.

Основные результаты исследования были получены в работах по следующим проектам: «Методы и алгоритмы распознания космических изображений земной поверхности низкого, среднего и высокого разрешения» (грант Красноярского краевого фонда науки № 01201157162, 2012 г.); «Создание методологии и разработка новых наукоемких информационных технологий мониторинга негативных последствий антропогенного воздействия и природно-климатических факторов на значимые социально-экономические системы Красноярского края» (грант Красноярского краевого фонда науки № 01201363986, 2013-2015 гг.).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на международных форумах, всероссийских семинарах и конференциях:

1. Конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2012 (Июль 2012 г., Иркутск).
2. XI Научно-техническая конференция «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий» (Август 2012 г., Улан-Удэ).
3. III Научно-техническая конференция «Технологии разработки информационных систем» (Сентябрь 2012 г., Геленджик).
4. XVI Симпозиум с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях» (Май 2012 г., Красноярск).
5. Конференция «Моделирование неравновесных систем» (Август 2012 г., Красноярск).
6. Конференция «Безопасность и живучесть технических систем» (Октябрь 2012 г., Красноярск).
7. Научно-практическая конференция «Актуальные вопросы профилактики, диагностики и лечения урологических заболеваний» (Март 2012 г., Красноярск).
8. XIV Всероссийская конференция «Распределенные информационные и вычислительные ресурсы» (Ноябрь 2013г., Новосибирск).
9. IV Научно-техническая конференция «Технологии разработки информационных систем» (Сентябрь 2013 г., Геленджик).
10. V Научно-техническая конференция «Технологии разработки информационных систем» (Сентябрь 2014 г., Геленджик).
11. 22nd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (Сентябрь 2018 г., Белград, Сербия).

12. Международная конференция «Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education» (Сентябрь 2018 г. Усть-Каменогорск, Казахстан).

13. V Всероссийская конференция с международным участием «Полярная механика» (Октябрь 2018 г., Новосибирск).

Публикации. По теме диссертации имеется 19 публикаций (6 – в Российских журналах, рекомендованных по списку ВАК; 2 – в иностранных научных изданиях, реферируемых в БД Web of Science и Scopus; 1 – Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2018619947 «Информационное приложение по обработке спутниковых данных»; 10 – в сборниках научных трудов и тезисов докладов на российских и международных конференциях).

Структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Текст диссертации содержит 147 страниц, изложение текста иллюстрируется 82 рисунками и 44 таблицами. Библиографический список включает 128 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен обзор литературы о методах и приборной базе для контроля выбросов диоксида серы в атмосферу. Определены недостатки существующей наземной системы мониторинга по выбросам SO_2 для техногенных объектов. Отображен результат воздействия SO_2 на экосистему и здоровье населения, проживающего на исследуемой территории.

Определено, что наземная система контроля выбросов SO_2 имеет ряд недостатков. Она способна измерять концентрацию SO_2 только в конкретных географических точках на заданной высоте (в приземном слое), что не позволяет увидеть общую картину загрязнения атмосферы на исследуемой территории. Также невозможно определить дальнейшее распространение выбросов. Все это обуславливает необходимость использования спутникового метода контроля. Он имеет более широкий и сплошной охват наблюдаемой территории, позволяет определять содержание SO_2 на различных высотах. Спутниковый метод контроля позволяет в ежедневном режиме вести мониторинг выбросов SO_2 в НПЗ и в случае возникновения неблагоприятных метеоусловий, аварийных выбросов оперативно реагировать на эти изменения в атмосфере.

Вторая глава посвящена разработке метода контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных для северных территорий Красноярского края. Представлен метод обработки спутниковых данных и метод оценки состояния окружающей среды исследуемой территории. Приведены технические

характеристики спутниковых измерительных приборов OMI и OMPS. Представлено информационное приложение, позволяющее в автоматическом режиме обрабатывать спутниковые данные. Произведена оценка перспектив применения данных инструмента OMPS для контроля выбросов диоксида серы, после завершения функционирования спектрометра OMI.

Для получения оценок загрязнения окружающей среды диоксидом серы используется спутниковый метод контроля. Этот метод основан на обработке данных спутниковых измерительных приборов OMI и OMPS. Базы данных спектрометров OMI и OMPS являются открытыми источниками информации, доступ к которым возможен на официальном сайте NASA. В работе используются четыре базы данных по выбросам SO_2 в атмосферу. Две базы данных OMI и OMPS имеют вид текстовой таблицы, две базы данных графические. При этом все четыре базы данных содержат частично ложные значения и требуют предобработки.

В результате обработки данных наблюдений OMI и OMPS определяется концентрация диоксида серы на четырёх высотах над уровнем моря: 0,9 км, 2,5 км, 7,5 км и 17 км. Для измерения концентрации диоксида серы используется единицы Добсона (е.Д.). Одна е.Д. равна 0,01 мм толщины осажденного слоя диоксида серы при 0° С и атмосферном давлении 1013 ГПа.

Интегральное (суммарное) распределение диоксида серы в атмосфере характеризуют такие параметры, как общее содержание диоксида серы $X(SO_2)$, концентрация диоксида серы $N(SO_2)$. $X(SO_2)$ – толщина слоя диоксида серы в вертикальном столбе атмосферы. Размерность $[X(SO_2)]$ = см. Концентрация диоксида серы $N(SO_2)$ – число молекул диоксида серы в столбе атмосферы с площадью основания 1 см^2 при тех же условиях, $[N(SO_2)]$ = см$^{-3}$. При указанных условиях число молекул диоксида серы в 1 см^3 определяется числом Лошмидта $N_L = 2{,}6868 \cdot 10^{19}$. Таким образом,

$$N(SO_2) = N_L * X(SO_2), \qquad (1)$$

Из (1) следует, что 1 е.Д. соответствует $2{,}6868 \cdot 10^{16}$ молекулам в вертикальном столбе газа с основанием 1 см^2 при нормальных условиях. Среднесуточная предельно допустимая концентрация ($ПДК_{с.с.}$) диоксида серы соответствует концентрации 0,05мг/м^3. В перерасчете получаем $ПДК_{с.с.}$= 1,56 е.Д. или 1е.Д. соответствует концентрации 0,032 мг/м^3.

В процессе исследования проведен анализ работ, посвященных валидации результатов измерений спектрометра OMI и результатов измерения наземной системы контроля. Так, Е. Спинер, С. Кан, Н. Кротков, К. Янг провели сравнение данных инструмента OMI с данными наземного спектрометра MFDOAS в период извержения вулкана Окмок (Алеутские острова) с 18 по 20 июня 2008 года. Сделан вывод, что прибор может быть успешно использован для измерения выбросов диоксида серы. Максимальная точность достигается в период слабой облачности (коэффициент облачности менее 30%). При этом стандартное отклонение данных инструмента OMI от MFDOAS составляет 0,5 е.Д. (0,016 мг/м^3).

Эксплуатация спектрометра OMI началась с 2004 г., в ближайшее время его функционирование будет завершено, на смену ему приходит инструмент OMPS. Для подтверждения возможности использования OMPS по контролю выбросов диоксида серы в НПЗ проведено сравнение результатов измерений, сделанных этими приборами.

Для сопоставления данных OMI и OMPS по выбросам SO_2 вычисляется два типа корреляции. Во-первых, пространственная корреляция (R) — это корреляция между данными OMI и OMPS по среднегодовым значениям концентрации SO_2 в пределах определенного участка исследуемой территории. Во-вторых, временная корреляция (r) – корреляция между ежедневными массами SO_2 данных OMI и OMPS для исследуемой территории.

Анализ пространственной корреляции выбросов SO_2 для НПЗ за 2013-2017 гг. показал, что данные высоко коррелированы (R=0,83 при размере выборки 205, эта величина с вероятностью 95% попадает в доверительный интервал от 0,76 до 0,87). Средние значения концентрации по данным OMPS выше на ~ 0,79 е.Д., чем по данным OMI.

В качестве примера на рисунке 1 представлено сравнение ежедневных масс выбросов диоксида серы по данным OMI и OMPS на всю исследуемую территорию за некоторые годы. На рисунке также построены линии регрессии, приведены уравнения регрессии и значения коэффициента корреляции r. Коэффициент временной корреляции за весь период 2013-2017 гг. составляет r = 0,79 при размере выборки 1025. Это значение r с вероятностью 95% попадает в доверительный интервал от 0,77 до 0,81. Расхождения между данными двух приборов, являются результатом различного пространственного разрешения и разнице во времени измерения (столб выбросов SO_2 может быстро перемещаться в атмосфере).

Таким образом, данные спектрометров OMI и OMPS достаточно коррелированы, что подтверждает возможность использования прибора OMPS для долгосрочного контроля выбросов диоксида серы в Норильской промышленной зоне.

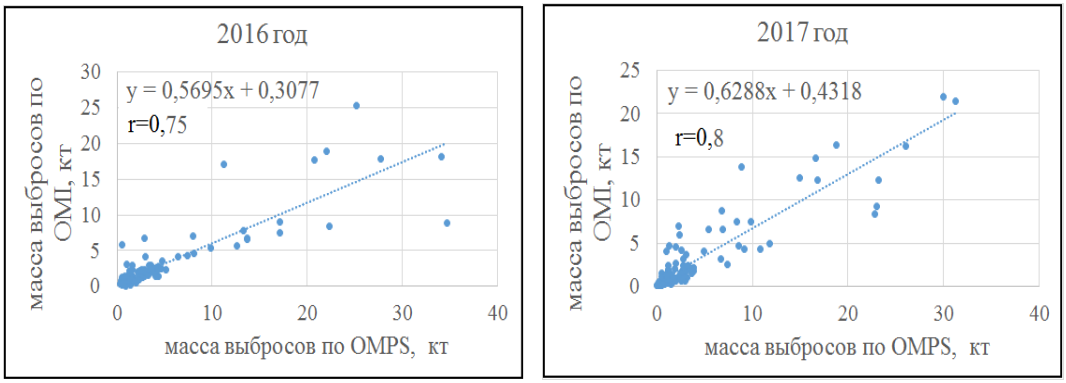


Рисунок 1 –Диаграмма рассеяния данных OMI и OMPS

Метод контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных предусматривает два этапа (рисунок 2).

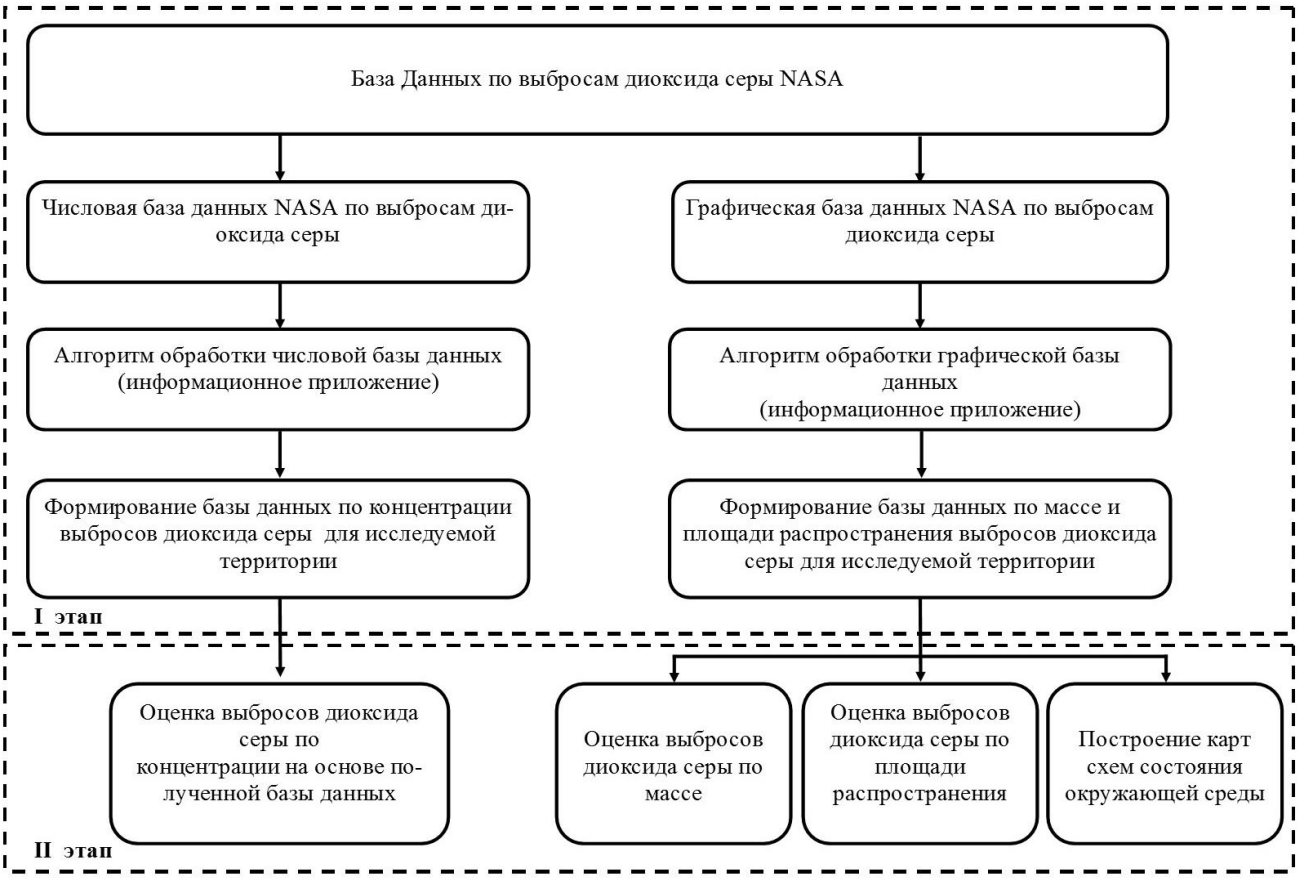


Рисунок 2 – Схема метода контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных для северных территорий

На первом этапе метода осуществляется считывание общего массива спутниковых данных по концентрации диоксида серы с двух источников информации OMI и OMPS (текстовая база данных). Затем осуществляется его обработка по определенному алгоритму. Особенностью данного алгоритма является то, что исключаются данные по концентрации диоксида серы для двух приборов OMI и OMPS, полученные в период повышенной облачности, когда коэффициент облачности превышает 30%. Также исключаются отрицательные значения концентрации выбросов диоксида серы, как не имеющие смысла. Далее формируется база данных по выбросам диоксида серы для исследуемой территории, на основании которой производится непосредственная оценка состояния окружающей среды по концентрации. Данный алгоритм реализован в информационном приложении, позволяющем вести обработку текстовой базы данных в автоматическом режиме.

Для оценки состояния окружающей среды по массе и площади распространения выбросов диоксида серы на первом этапе осуществляется считывание общего массива данных из графической базы OMI и OMPS. Далее

эти данные проходят обработку. Исключаются данные по массе и площади распространения выбросов диоксида серы для двух приборов OMI и OMPS, полученные в период повышенной облачности (выше 30%). Также не используются данные за те дни, когда известны результаты измерений только на одном из измерительных приборов OMI или OMPS. В соответствии с этими параметрами формируется база данных по массе и площади распространения выбросов диоксида серы для исследуемой территории.

На втором этапе метода контроля выбросов диоксида серы проводится оценка состояния окружающей среды по трем параметрам: по концентрации, по массе и площади распространения (рисунок 3).

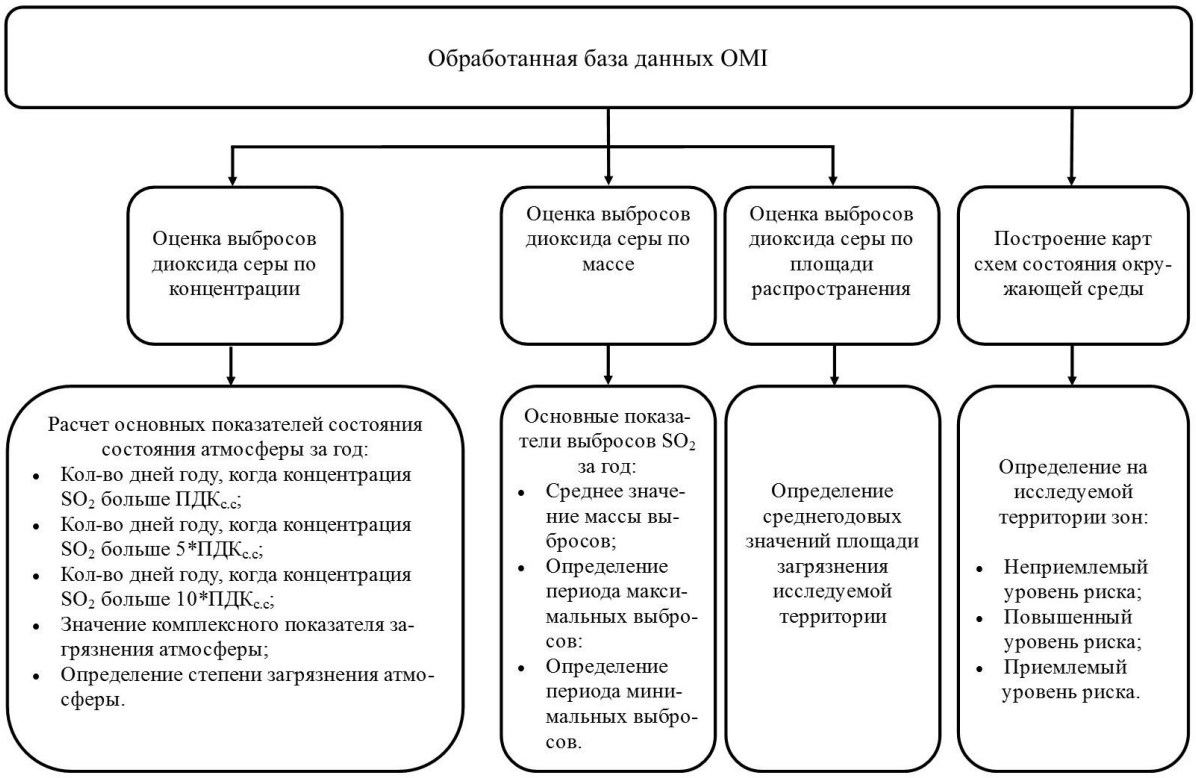


Рисунок 3 – Алгоритм оценки выбросов диоксида серы для исследуемой территории

Рассчитываются среднегодовое значение концентрации диоксида серы, количество дней в году, когда концентрация превышала ПДК$_{с.с.}$, 5*ПДК$_{с.с.}$, 10*ПДК$_{с.с}$ за 2005 – 2017 гг. Для гигиенической оценки степени опасности загрязнения атмосферного воздуха определяется комплексный показатель загрязнения (Р) в соответствии с руководством по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186-89. Показатель Р учитывает кратность превышения ПДК и класс опасности.

$$P = \sqrt{\frac{k \cdot C}{ПДК_{с.с}}}\ , \qquad (2)$$

где k – коэффициент изоэффективности, зависящий от класса опасности вещества: для SO_2 k=1,0; С – фактическая среднесуточная концентрация, мг/м^3; ПДК $_{с.с.}(SO_2)$ = 0,05мг/м^3.

Далее осуществляется построение карт-схем рисков загрязнения атмосферного воздуха исследуемой территории.

В **Третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования выбросов диоксида серы для северных территорий Красноярского края за 2005 – 2017 гг. Произведена оценка выбросов диоксида серы по концентрации. Осуществлена оценка массы выбросов SO_2 и площади загрязнения. Построены карты-схемы состояния атмосферного воздуха северных территорий Красноярского края

Выполнено исследование концентрации выбросов SO_2 за 2005 – 2017 года по дням в приземном слое атмосферы для НПЗ. Все данные, используемые для анализа, прошли обработку в соответствии с алгоритмом, описанном в главе 2. Данные взяты для территории, ограниченной координатами 68,9° - 69,7° северной широты и 87°- 89,5° восточной долготы. В таблице 1 представлены результаты анализа концентрации SO_2 для НПЗ за 2005 – 2017 гг.

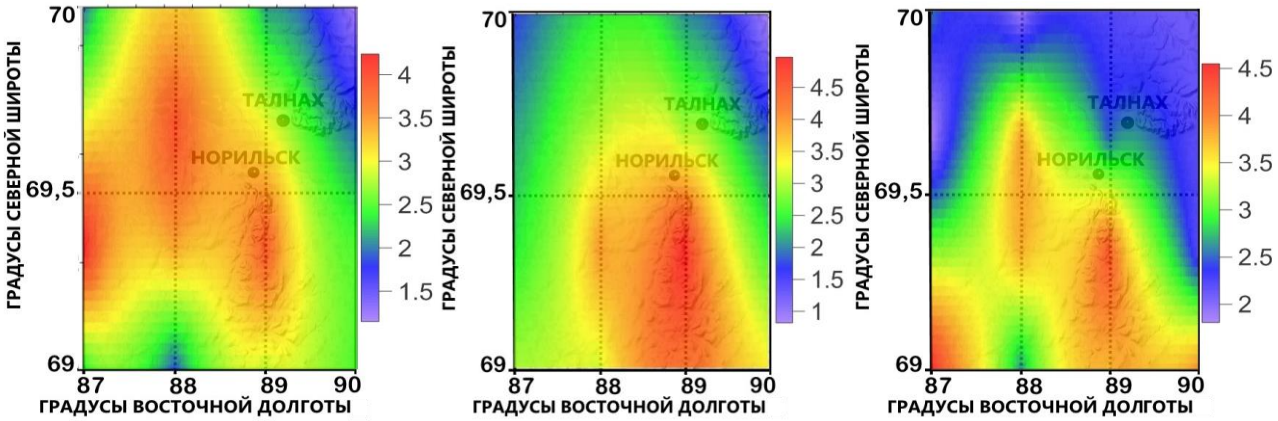
Таблица 1 – Основные показатели анализа концентрации SO_2 для НПЗ за 2005 – 2017 гг.

Год	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
		Среднегодовое значение концентрации SO_2, е.Д.											
	4,4	4,6	3,9	4,1	4,5	3,48	2,29	2,52	2,67	3,28	3,51	3,13	3,46
		Количество дней в году, когда концентрация SO_2 выше ПДК$_{с.с.}$, 5* ПДК$_{с.с.}$, 10* ПДК$_{с.с.}$											
более 1 ПДК$_{с.с.}$	176	173	180	179	170	161	181	157	135	182	161	148	164
более 5 ПДК$_{с.с}$	64	64	71	66	53	52	39	44	35	61	55	41	46
более 10 ПДК$_{с.с.}$	35	43	36	28	33	25	9	17	15	27	28	21	27
Р	5,2	5,4	4,9	5,1	5,3	4,7	3,8	3,9	4,1	4,5	4,7	4,4	4,7
Степень загрязнения атмосферы	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III	III	IV	IV	IV	IV	IV

Среднегодовая концентрация SO_2 превышает ПДК$_{с.г.}$, и это характерно для всего периода наблюдения. Превышение лежит в интервале от 4-х кратного в 2012 году до 7-ми кратного в 2009 году. Количество дней, когда концентрация SO_2 превышает ПДК$_{с.с.}$ ежегодно лежит в интервале от 148 до 182. Пятикратное превышение ПДК$_{с.с.}$ – от 35 до 71 дней в году. Десятикратное превышение ПДК$_{с.с.}$ – от 9 до 43 дней в году.

Фактическое загрязнение атмосферного воздуха населенных мест для северных территорий Красноярского края, в соответствии с величиной показателя Р соответствует пред максимальной IV сильной степени загрязнения, кроме 2011 и 2012 годов – III, умеренная степень загрязнения. Четвертая степень загрязнения атмосферного воздуха характеризуется как максимально повышенное негативное воздействие на здоровье населения.

На рисунке 4 представлено картографирование концентрации SO_2 для 2015 – 2017 гг., которое показывает территориальное распространение выбросов SO_2. Практически по всей территории НПЗ, особенно вблизи г. Норильск повышенное значение концентрации SO_2, только в северной части концентрация снижается.



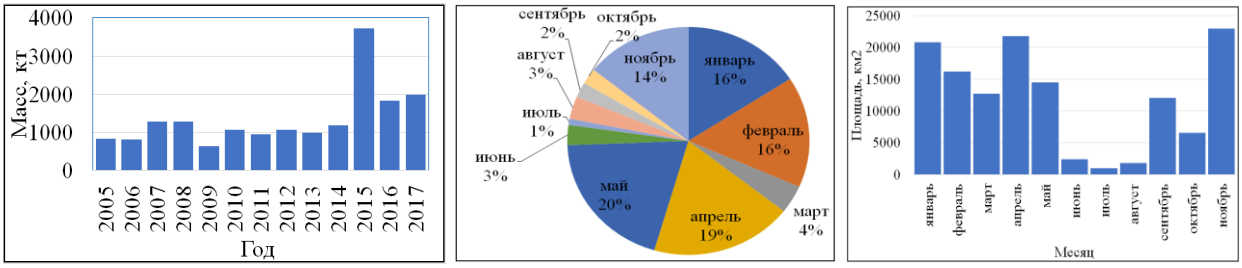
2015 г. 2016 г. 2017 г.

Рисунок 4 – Картографирование концентрации выбросов SO_2 в атмосферу для северных территорий Красноярского края по годам, цветом обозначен уровень концентрации SO_2, е.Д.

Проведено исследование массы и площади распространения выбросов SO_2 за 2005-2017 годы по дням в приземном слое атмосферы для НПЗ. Все данные, используемые для анализа, прошли обработку в соответствии с алгоритмом, описанном в главе 2. Данные взяты для территории, ограниченной координатами 68,9° – 69,7° северной широты и 87°- 89,5° восточной долготы.

За весь период действия программы OMI наибольший объем выбросов был зафиксирован в 2015 году и составил 3698,3 кт/год, площадь загрязнения 9724 км^2 (рисунок 5, а). Как и в предыдущие периоды в феврале-марте, ноябре высокие массы выбросов SO_2 – около 214 кт/месяц. Но и в апреле- мае 2015 г. зафиксировано нетипичное высокое значение массы выбросов SO_2, сопоставимое с годовыми – 1112 кт/месяц (площадь загрязнения 25105 км^2) и 1255,5 кт/месяц (площадь загрязнения 21827 км^2) соответственно. Также увеличена масса выбросов SO_2 в летний период: июнь – 75,2 кт/месяц, июль – 38,8 кт/месяц и август –259 кт/месяц.

Доли вклада в годовой объем выбросов SO_2 за 2005-2017 г. варьируются от 1% в июне до 20% в мае (рисунок 5, б). Наибольший вклад в общегодовой объем SO_2 за 2005-2017 гг. зафиксирован в феврале – мае и ноябре (совокупная доля составляет 89% от общего объема выбросов). Среднее значение площади загрязнения выбросами SO_2 в эти месяцы также максимально и составляет ~ 18000 км^2 (рисунок 5, в).



а) б) в)

Рисунок 5 – Анализ массы выбросов диоксида серы за 2005–2017 гг. для НПЗ

С июня по октябрь наблюдается заметное снижение массы выбросов SO_2 в атмосфере (совокупная доля составляет 11% от общего объема выбросов). Среднее значение площади загрязнения выбросами SO_2 в эти месяцы составляет ~ 5000 км^2, что в 3,6 раза меньше, чем с февраля по май, ноябрь. Это связано, по-видимому, с погодными условиями. Максимальное количество дней с метелями выпадает на январь – май, ноябрь. SO_2 связывается замороженными кристаллами воды (снегом) и долго находится в приземном слое атмосферы. Продолжительность метелей колеблется от нескольких часов до 2–4 суток, а иногда и больше, этим приводя к катастрофическим масштабам распространения загрязнения. Зимний период ветрового режима начинается с момента установления снежного и ледового покровов и продолжается с ноября по май. В эти месяцы циркуляция воздушных масс контролируется мощным сибирским антициклоном.

Проведено сопоставление данных о массе выбросов диоксида серы, полученных с использованием спутникового контроля и отдельных данных наземной системы контроля ПАО «ГМК «Норильский Никель». В таблице 2 сведены доступные результаты измерения массы выбросов диоксида серы наземной системы контроля ПАО «ГМК «Норильский Никель» и результаты измерения на основе разработанного спутникового метода контроля.

Таблица 2 – Масса выбросов диоксида серы за 2008-2017 гг., кт

Год	Спутниковый метод контроля	Наземная система контроля ПАО «ГМК «Норильский Никель»
	Масса выбросов, кт	
2008	1282,9	1917,6
2014	1203,7	1791,5
2016	1830,6	1751,3
2017	1997,9	1860,4
Среднее значение	1578,8	1830,2

Установлено, что за эти годы среднегодовая масса по спутниковым методам составляет 1578,8 кт/год. По данным ПАО «ГМК «Норильский Никель» она

равна 1830,2 кт/год. При сравнении нужно учитывать, что в период полярной ночи (декабрь, январь, февраль) спутниковая информация частично отсутствует.

Анализ карт экологического риска загрязнения атмосферного воздуха выбросами SO_2 для северных территорий Красноярского края показал, что с 2005 по 2017 годы большая часть территории соответствует повышенному уровню экологического риска (рисунок 6). Ни на одной из карт не была определена зона приемлемого уровня риска.

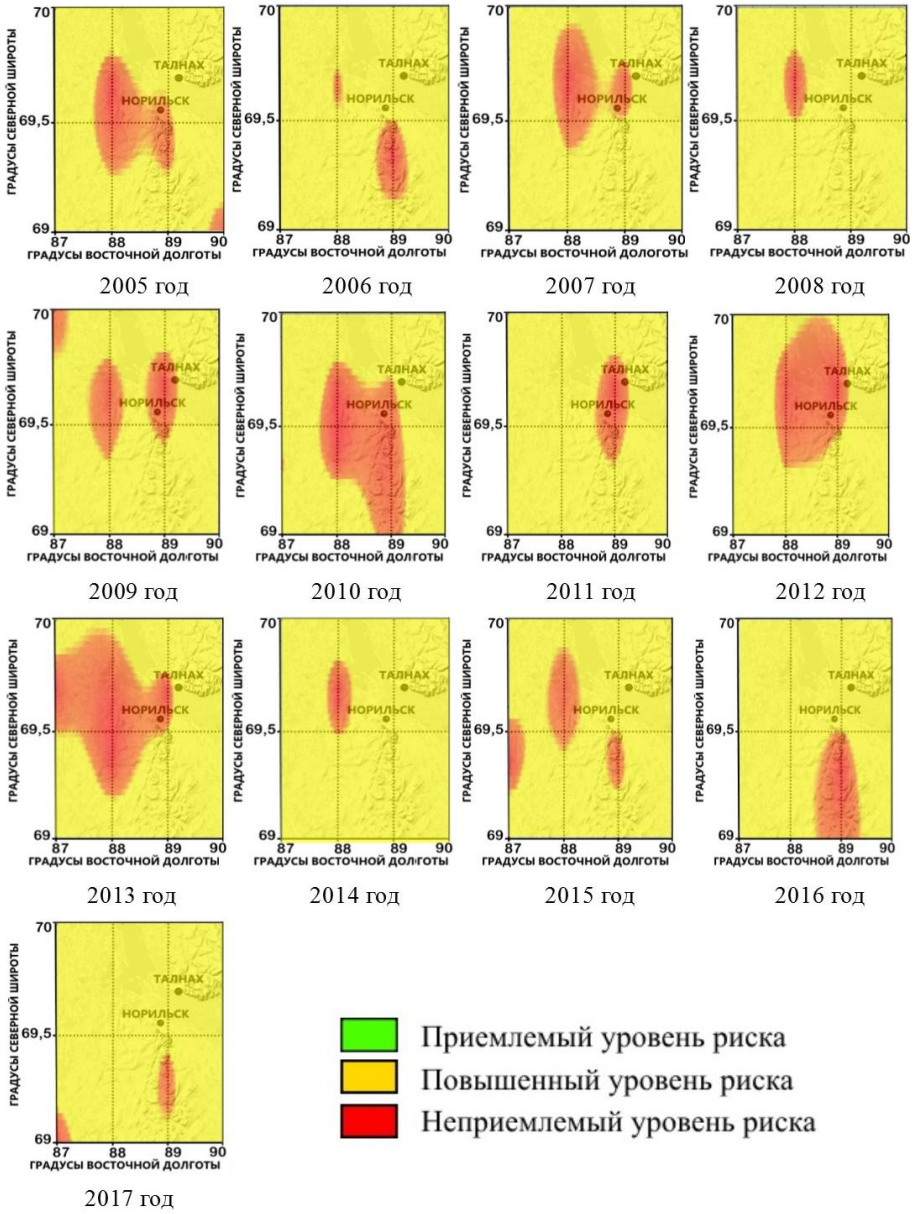


Рисунок 6 – Карты экологического риска для растительности северных территорий Красноярского края за 2005-2017 гг.

Наиболее неблагоприятная экологическая обстановка определена в 2013 г. Зона неприемлемого риска имеет наибольшую площадь за весь период наблюдения и составляет 7811 км^2. Зона повышенного риска – 11573 км^2, при

этом шлейф зоны окружает г. Норильск, г. Талнах и тянется к востоку.

Наименьшее воздействие на окружающую среду зарегистрировано в 2017 г. Площадь зоны неприемлемого риска минимальна – 876 км^2. Площадь зоны повышенного риска составляет 18509 км^2. При этом пятно максимального негативного воздействия смещено южнее г. Норильск.

За весь период наблюдения среднее значение площади зоны повышенного риска составляет около 14564 км^2, а среднее значение площади зоны неприемлемого риска – 3329 км^2. При этом зона неприемлемого риска в основном сосредоточена вблизи городов Норильск и Талнах, где расположены основные производственные мощности ПАО «ГМК «Норильский Никель».

Отметим, что характерный для НПЗ повышенный и неприемлемый уровень риска создает высокую вероятность возникновения различного рода заболеваний.

Четвертая глава посвящена разработке практических рекомендаций по применению метода контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных. Представлены практические рекомендации по обработке массива данных NASA по выбросам диоксида серы. Предложены практические рекомендации оценки состояния атмосферы исследуемой территории. Представлен алгоритм построения карт экологических рисков загрязнения атмосферного воздуха выбросами диоксида серы для северных территорий Красноярского края.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработан и применен спутниковый метод контроля выбросов диоксида серы для техногенных объектов северных территорий Красноярского края. Произведена экологическая оценка состояния атмосферного воздуха Норильской промышленной зоны. Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему.

1. Разработан метод контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых ежедневных данных NASA спектрометров OMI (космический аппарат AURA) и OMPS (космический аппарат SUOMI NPP) за 2005-2017 гг. Метод содержит два этапа. На первом: из общего массива исключаются отрицательные значения, данные, полученные при облачности более 30% и данные, полученные только на одном из двух измерительных приборов OMI или OMPS. Происходит формирование рабочей базы данных. На втором этапе проводится оценка состояния окружающей среды исследуемой территории по трем критериям: по концентрации, по массе и площади распространения выбросов диоксида серы. Осуществляется построение карт-схем состояния атмосферного воздуха.

На основе метода было разработано информационное приложение для обработки спутниковых данных (свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2018619947)

2. Проведено сопоставление данных о массе выбросов диоксида серы, полученных с использованием спутникового мониторинга и наземной системы контроля ПАО «ГМК «Норильский Никель». Установлено, что за 2005-2017 гг. среднегодовая масса по спутниковым методам составляет 1578,8 кт/год. По данным ПАО «ГМК «Норильский Никель» она равна 1830,2 кт/год. При сравнении этих чисел нужно учитывать, что в период полярной ночи (декабрь, январь, февраль) данные спутниковых измерений частично отсутствуют.

Сравнение данных по выбросам диоксида серы спектрометров OMI и OMPS показало, что данные высоко коррелированы (за 2013-2017 гг. пространственная корреляция составляет R=0,83, временная корреляция r = 0,79). Прибор OMPS может использоваться для продолжения долгосрочной регистрации выбросов диоксида серы исследуемой территории, после остановки программы OMI.

3. На основе разработанного спутникового метода контроля впервые оценены концентрация, масса и площадь распространения выбросов диоксида серы в атмосфере северных территорий Красноярского края за 2005-2017 гг. Установлено, что среднегодовое значение концентрации диоксида серы Норильской промышленной зоны за 2005-2017 гг. на площади 19384 км^2 составляет около 0,11 мг/м^3, что превышает предельную норму в 2,2 раза. Фактическое загрязнение атмосферного воздуха Норильской промышленной зоны, в соответствии с величиной показателя P (руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186-89) характеризуется пред максимальной IV сильной степенью загрязнения, кроме 2011 и 2012 годов – III умеренная степень загрязнения. Наибольший вклад в общегодовой объем выбросов диоксида серы Норильской промышленной зоны за 2005-2017 гг. зафиксирован в феврале – мае и ноябре (совокупная доля составляет 89% от общего объема выбросов). С июня по октябрь наблюдается заметное снижение массы выбросов диоксида серы в атмосферу (совокупная доля составляет 11% от общего объема выбросов). Количество дней в году, когда концентрация диоксида серы превышает ПДК$_{с.с.}$ в пределах Норильской промышленной зоны ежегодно лежит в интервале от 148 до 182 дней за 2005-2017 гг. Построенные карты-схемы состояния атмосферного воздуха по выбросам диоксида серы Норильской промышленной зоны показали, что большая часть территории имеет повышенный уровень риска загрязнения (14564 км^2), а вблизи и в г. Норильск зафиксирован неприемлемый уровень риска (3329 км^2).

4. Разработаны практические рекомендации по применению спутникового метода контроля выбросов диоксида серы на примере Норильской промышленной зоны, включающие: технологию контроля выбросов диоксида серы на основе спутниковых данных для исследуемой территории; технологию обработки массива данных NASA по выбросам диоксида серы; технологию оценки состояния окружающей среды исследуемой территории.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:

а) статьи в издания, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. **Зуев, Д.В.** Анализ данных космического мониторинга атмосферы на кластерной вычислительной установке / В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев** // Инженерная экология, 2012. – № 3. – С. 46–56.

2. **Зуев, Д.В.** Оценка состояния экосистемы на основе данных дистанционного зондирования // Вестник СибГАУ, 2012. – № 6. – С.73–77.

3. **Зуев, Д.В.** Анализ выбросов диоксида серы по данным инструмента OMI (спутник AURA) для Норильской промышленной зоны / В.Б. Кашкин, **Д.В. Зуев** // Оптика атмосферы и океана, 2013. – №9. – С. 793–797.

4. **Зуев, Д.В.** Использование спутниковых методов мониторинга для оценки экологического состояния северных территорий Красноярского края / **Д.В. Зуев,** В.Б. Кашкин, К.В. Симонов // Успехи современного естествознания, 2018. – № 2 – С. 86–92.

5. **Зуев, Д.В.** Оценка экологических рисков территории на основе спутниковых методов мониторинга / А.Г. Зотин, **Д.В. Зуев**, В.Б. Кашкин, М.А. Курако, К.В. Симонов // Совместный выпуск журналов Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева и Вычислительные технологии, 2018. – №1. – С. 205–215.

6. **Зуев, Д.В.** Алгоритмическое и информационное обеспечение системы контроля выбросов диоксида серы техногенных объектов на основе спутникового мониторинга / **Д.В. Зуев**, В.Б. Кашкин, К.В. Симонов // Информатизация и связь, 2018. – №5. – С. 85–92.

б) работы в базах Web of Science и Scopus:

1. **Zuev, D.V.** Environmental risk zones mapping using satellite monitoring data / A.G. Zotin, **D.V. Zuev**, V.B. Kashkin, M.A. Kurako, K.V. Simonov // Procedia Computer Science, 2018. – №126. – С. 1597–1605.

2. **Zuev, D.V.** Satellite monitoring of atmospheric sulphur dioxide pollution in polar latitudes / V.B. Kashkin, **D.V. Zuev**, M.A. Kurako, A.A. Romanov, T.V. Rubleva, K.V. Simonov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. – №193. – С. 1–6.

в) свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:
Свид. 2018619947 Российская Федерация. Информационное приложение по обработке спутниковых данных / **Д.В. Зуев**; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ (RU). – №2018617646; заявл. 18.07.18; опубл. 15.08.18, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

г) участие в конференциях:

1. Ф.П. Капсаргин**,** В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Спутниковые методы мониторинга экологической обстановки крупных промышленных // Материалы I конгресса урологов Сибири «Актуальные вопросы диагностики, лечения и реабилитации урологических больных». – Кемерово, 2012. – С. 29–33.

2. В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Обработка данных по выбросам

диоксида серы в атмосферу // Материалы Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2012. – Иркутск, 2012. – С. 63–65.

3. В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Обработка данных атмосферы на кластерной вычислительной установке // Материалы XI Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий». – Улан–Удэ: ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», 2012. – С. 51–55.

4. В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Информационная поддержка оценки состояния экосистемы на основе данных дистанционного зондирования // Материалы III Международная научно-техническая конференция Технологии разработки информационных систем. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2012. – С.15–18.

5. В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Современные средства экологического мониторинга атмосферы урбанизированной территории // Материалы XVI Всероссийского симпозиума с международным участием сложные системы в экстремальных условиях. – Красноярск: ФГБУН «КНЦ», ФГАОУ ВПО «СФУ», 2012. – С.41–43.

6. В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Контроль выбросов в атмосферу диоксида серы на основе спутниковых методов мониторинга // Материалы 15-го Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем». – Красноярск: СФУ, 2012. – С.22–23.

7. В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Д.В. Оценка риска загрязнения окружающей среды по данным космического мониторинга атмосферы // Материалы IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем». – Красноярск: КНЦ СО РАН, 2012. – С.45–47.

8. В.Б. Кашкин, К.В. Симонов, **Д.В. Зуев.** Анализ риска загрязнения окружающей среды по данным космического мониторинга атмосферы // Материалы научно-практического семинара «Мониторинг прогнозирование и моделирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций». – Железногорск: Санкт-Петербурский университет ГПС МЧС России, 2012. – С. 80–88.

9. В.Б. Кашкин, **Д.В. Зуев.** Информационная поддержка оценки состояния экосистемы на основе данных инструмента OMI // Материалы III Международная научно-техническая конференция Технологии разработки информационных систем. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2013. – С. 29–32.

10. В.Б. Кашкин, **Д.В. Зуев.** Разработка информационного приложения для обработки данных инструмента OMI // Материалы III Международная научно-техническая конференция Технологии разработки информационных систем. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2014. – С. 52–54.