

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

УДК 528.88::504.31

Номер государственной регистрации 122101700045-7



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИКИ РАН
Член-корреспондент РАН

А.А. Петрукович
2023 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Дистанционный мониторинг распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли

по теме:

ЭМИССИЯ

FFWG-2022-0013

(промежуточный, этап 2023/2)

Научный руководитель

зав. лаб., канд. физ-мат. наук

Е.В. Пашинов

Москва

2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,
научный сотрудник, зав. лаб.,
к.ф.-м.н.

 19.12.23

Подпись, дата

Е.В. Пашинов
(главы 1,2,3,5,
введение, заключение)

Ответственный исполнитель,
старший научный сотрудник
к.ф.-м.н.

 19.12.23

Подпись, дата

И.Н. Садовский
(главы 2,3)


Ответственный исполнитель,
старший научный сотрудник
к.т.н.

 19.12.23

Подпись, дата

А.В. Кашницкий
(главы 4,5)

Ответственный исполнитель,
научный сотрудник

 19.12.23

Подпись, дата


А.Ю. Трохимовский
(глава 1)

главный научный
сотрудник, д.н.


19.12.2023
Подпись, дата


О.И. Кораблев
(глава 1)

ведущий научный
сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата


А.В. Кузьмин
(глава 3)

ведущий научный
сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата

А.А. Мазуров
(глава 4)

ведущий научный
сотрудник, к.н.


19.12.23
Подпись, дата


В.В. Тихонов
(глава 5)

ведущий научный
сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата

А.А. Федорова
(глава 1)

старший научный
сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата


Д.А. Беляев
(глава 1)

старший научный
сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата


Ю.С. Крашенинникова
(главы 4)

научный сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата


Д.А. Кобец
(глава 5)

научный сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата

А.М. Константинова
(глава 5)

научный сотрудник, к.н.


19.12.2023
Подпись, дата


М.В. Пацаева
(глава 1)

научный сотрудник, к.н.


19.12.23
Подпись, дата


Д.С. Сазонов
(главы 1,2,3)

младший научный
сотрудник


19.12.23
Подпись, дата


Е.В. Афанасьева
(глава 5)

младший научный
сотрудник


19.12.23
Подпись, дата

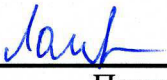
А.А. Бриль
(глава 4)

младший научный
сотрудник









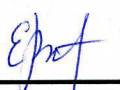
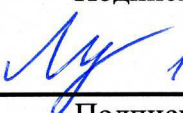

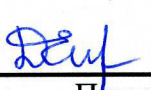




19.12.23
Подпись, дата

П.В. Власов
(глава 1)

младший научный
сотрудник


19.12.23
Подпись, дата

А.А. Ломакин
(глава 1)

младший научный сотрудник	 19.12.23	Ю.В. Соколова (глава 5)
	Подпись, дата	
младший научный сотрудник	 19.12.23	Е.Д. Стариченко (глава 1)
	Подпись, дата	
зав. отделом, д.н.	 19.12.23	Д.М. Ермаков (главы 3,5)
	Подпись, дата	
ведущий программист	 19.12.23	С.А. Втюрин (главы 2,3,5)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	 19.12.23	А.Ю. Баданов (глава 3)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	 19.12.23	А.С. Патракеев (глава 1)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	 19.12.23	А.В. Смирнова (глава 1)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.23	А.А. Антошкин (глава 4)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.23	Е.Е. Волкова (глава 4)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.2023	М.В. Врублевский (глава 4)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.2023	Д.С. Дианова (глава 4)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.23	Д.А. Елизаров (глава 1)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.23	П.Д. Жаданова (глава 3)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.23	М.С. Жарикова (глава 1)
	Подпись, дата	
инженер	 19.12.23	Ю.А. Илларионова (глава 3)
	Подпись, дата	

инженер

 19.12.2023

Д.В. Лозин
(глава 5)

Подпись, дата

инженер

 19.12.23

С.А. Павлов
(глава 5)

Подпись, дата

инженер

 19.12.2023

Б.П. Руткевич
(глава 4)

Подпись, дата

инженер

 19.12.2023

Е.С. Федорова
(глава 1)

Подпись, дата


инженер

 19.12.2023

А.Н. Якушева
(глава 1)

Подпись, дата

нормоконтролер

 19.12.23

Д.М. Ермаков

Подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит 107 страниц, 81 рисунок, 12 таблиц, 9 источников.

НАСТОЯЩИЙ ОТЧЁТ ПОСВЯЩЁН ОПИСАНИЮ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ, ПОЛУЧЕННЫХ В 2023 г. В РАМКАХ ТЕМЫ «ЭМИССИЯ» (№ FFWG-2022-0013), ВЫПОЛНЯЮЩЕЙСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ ИНСТИТУТОМ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК.

Тема «Эмиссия» «Дистанционный мониторинг распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли» сформирована для развития средств и методов получения, а также систем обработки и распространения данных о концентрациях и потоках малых газовых составляющих в атмосфере Земли на основе технологий спутникового мониторинга. Работы по теме начаты в 2022 г. в рамках программы Министерства высшего образования и науки по созданию новых молодёжных лабораторий, на основе задела, созданного в других «профильных» темах государственного задания ИКИ РАН.

В ОТЧЁТЕ ПРИВОДЯТСЯ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ, ЗАПЛАНИРОВАННЫХ НА 2023 г. ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ:

Создание новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по полям малых газовых составляющих (в том числе, позволяющих восстанавливать детализированную пространственно-временную динамику полей, реализующиеся в них потоки).

Разработка новых методов измерения малых газовых составляющих в атмосфере Земли (в том числе с использованием и комбинированием новых частотных каналов и различных методик зондирования).

Создание технологии и системы дистанционного (спутникового) научного мониторинга концентраций и потоков малых газовых составляющих атмосферы, в том числе — парниковых газов (система будет ориентирована на мониторинг всей территории России и пограничных стран).

Развитие методов усвоения данных ДЗЗ и продуктов их обработки в численных моделях атмосферной циркуляции.

Обеспечение возможности оперативной оценки, на основе существующих и перспективных средств постоянного спутникового мониторинга, пространственных распределений концентраций и потоков парниковых газов на территории России.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СПУТНИКОВАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРЫ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ, МАЛЫЕ ГАЗОВЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ, КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОТОКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ, СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ АРХИВЫ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, АНАЛИЗ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ СЕРИЙ НАБЛЮДЕНИЙ И ПРОДУКТОВ ИХ ОБРАБОТКИ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕРВИСЫ, ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, ДОСТУП К АРХИВАМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ, УСВОЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, БАЛАНСОВЫЕ ОЦЕНКИ, ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	10
ГЛАВА 1 НОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ	12
Введение.....	12
1.1 Возможность использования данных действующих спутниковых систем мониторинга МГС для восстановления потоков парниковых газов	12
1.2 Перспективные приборы и методы измерения малых газовых составляющих и парниковых газов в атмосфере	19
1.2.1 Вопросы пространственного покрытия и анализ возможности доработки научной аппаратуры «Дриада»	19
1.2.2 Варианты построения оптической схемы спектрометра ближнего ИК-диапазона	22
1.2.3 Перспективные направления для создания аппаратуры картирования	25
Заключение	28
ГЛАВА 2 НОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ ПО ПОЛЯМ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ	29
Введение.....	29
2.1 Преобразование исходных данных спутниковых наблюдений в требуемые единицы измерения.....	29
2.2 Выбор и реализация алгоритмов оптического потока для восстановления горизонтальных потоков газа	41
2.2.1 Основы алгоритмов оптического потока	41
2.2.2 Метод Лукаса – Канаде.....	42
2.2.3 Оценка применимости метода Лукаса – Канаде	43
2.2.4 Метод Farneback	44
2.2.5 Оценка применимости метода Farneback.....	45
2.2.6 Метод dense inverse search (DIS).....	46
2.2.7 Оценка применимости метода dense inverse search (DIS).....	46
2.3 Заполнение пропусков данных в полях интегрального содержания МГС на примере данных TROPOMI.....	48
2.4 Программа «Просмотр потоков» (Viewflow).....	51
2.4.1 Входные данные	51
2.4.2 Логика работы программы	52
Заключение	55
ГЛАВА 3 РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ ДЗЗ И ПРОДУКТОВ ИХ ОБРАБОТКИ В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ.....	57
Введение.....	57
3.1 Общее описание подхода балансовых оценок	57

3.2 Восстановление горизонтальных потоков CO по данным TROPOMI за лето 2022 и 2023 годов	59
3.3 Восстановление балансов CO по данным TROPOMI в областях крупных лесных пожаров	61
3.4 Выявление корреляционных связей между концентрациями различных МГС и другими физическими параметрами атмосферы	64
Заключение	71
ГЛАВА 4 СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО (СПУТНИКОВОГО) НАУЧНОГО МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИЙ И ПОТОКОВ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ.....	72
Введение.....	72
4.1 Информационные продукты о концентрациях малых газовых составляющих, работа с которыми организована в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»	72
4.2 Построение временных композитов на основе накопленных в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» информационных продуктов о концентрациях МГС.....	74
4.3 Основные возможности работы с временными композитами характеристик МГС, реализованные в системе Vega-Science	77
Заключение	79
ГЛАВА 5 ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСТОЯННОГО ДИСТАНЦИОННОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	80
Введение.....	80
5.1 Возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа пространственных распределений концентраций малых газовых составляющих в районах расположения крупных антропогенных объектов на примере анализа концентраций диоксида азота.....	80
5.1.1 Основа для выполнения работ	81
5.1.2 Некоторые особенности организации анализа и интерпретации получаемых результатов	81
5.1.3 Выделение стационарных источников выбросов диоксида азота	85
5.1.4 Примеры анализа данных для городов-миллионников России	87
5.2 Оперативное построение карт интенсивности горения пожаров для оценок потенциальной гибели лесной растительности и интенсивности выбросов парниковых газов в атмосферу и пространственного распределения их концентраций	90
5.2.1 Используемые в Системе данные	90
5.2.2 Схема анализа данных	91
5.2.3 Построение карт максимального FRPS	92
5.2.4 Построение карт прогнозируемых постпожарных повреждений	93
5.2.5 Получение оценок площадей возможной гибели лесов на различных территориях.....	95
5.3 Связь вариаций концентрации парниковых газов над водно-болотными угодьями с их фенологическими фазами, определяемыми по спутниковым данным	97
5.3.1 Исследуемые водные объекты	98
5.3.2 Данные реанализа.....	99

5.3.3 Спутниковые данные и фенологические фазы водно-болотных угодий	100
5.3.4 Результаты и их обсуждение	101
5.3.5 Трофическая классификация водных объектов.....	103
Заключение	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
ПУБЛИКАЦИИ	106
РИД.....	106

ВВЕДЕНИЕ

В рамках исполнения государственного задания на 2022–2024 гг. Институт космических исследований Российской академии наук проводит научно-исследовательские работы по теме «Дистанционный мониторинг распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли» (шифр «Эмиссия»). Целью НИР является разработка новых методов, подходов и информационной системы дистанционного мониторинга распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли.

Поставленная цель соответствует приоритетным направлениям национального проекта «Наука и университеты» в части климатических исследований, а именно, следующим основным направлениям фундаментальных исследований, перечисленным в Программе фундаментальных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период 2021–2030 гг., утверждённой распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р:

№ п/п	Направление фундаментальных исследований	Номер направления в «Программе»
1	Состав, структура и динамика атмосферы (включая ионосферу и магнитосферу), изучение атмосферных процессов и явлений, в том числе экстремальных	1.5.9.1
2	Химия атмосферы, малые газовые составляющие, аэрозоли, вода в атмосфере	1.5.9.2
3	Создание методов, технологий и аппаратуры атмосферных и ионосферных явлений	1.5.9.5
4	Информационно-вычислительные системы и среды в науке и образовании	1.1.8

Работы по теме «Эмиссия» направлены на решение следующих основных задач:

1. Разработка новых методов измерения малых газовых составляющих в атмосфере Земли (в том числе с использованием и комбинированием новых частотных каналов и различных методик зондирования).
2. Создание новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли по полям малых газовых составляющих (в том числе, позволяющих восстанавливать детализированную пространственно-временную динамику полей, реализующиеся в них потоки).
3. Развитие методов усвоения данных ДЗЗ и продуктов их обработки в численных моделях атмосферной циркуляции.
4. Создание технологии и системы дистанционного (спутникового) научного мониторинга концентраций и потоков малых газовых составляющих атмосферы, в том числе — парниковых газов (система будет ориентирована на мониторинг всей территории России и пограничных стран).
5. Обеспечение возможности оперативной оценки, на основе существующих и перспективных средств постоянного спутникового мониторинга, пространственных распределений концентраций и потоков парниковых газов на территории России.

На основе выполненного на предшествующем этапе работы (2022) обзора возможностей и ограничений функционирующих в настоящее время систем спутникового мониторинга концентраций малых газовых составляющих (МГС) атмосферы в 2023 г. проведён детальный анализ применимости доступной спутниковой информации по МГС атмосферы для решения задачи научного мониторинга концентраций и потоков МГС с помощью развиваемой в рамках темы исследований оригинальной методики расчёта атмосферной динамики и балансовых оценок. Выработаны рекомендации по отбору и

применению информации, наиболее востребованной на этапе обработки и верификации развиваемой методики. Фундаментальные ограничения в объемах и номенклатуре доступных данных о содержании МГС в атмосфере, а также востребованность собственных (полностью отечественных) систем спутникового мониторинга газового состава атмосферы диктует необходимость дальнейшего развития и последовательного технологий многочастотных (прежде всего, ИК-спектрометрических, а также СВЧ-радиометрических) измерений. Текущие результаты по этим направлениям исследований (в рамках указанной выше задачи 1) приведены в Главе 1 настоящего отчёта.

В Главе 2 приведены основные результаты, полученные в рамках работ этапа 2023 г. по указанной выше задаче 2. Они касаются вопросов восстановления атмосферной динамики по последовательно наблюдаемым полям концентраций МГС (содержащим пропуски данных, обусловленные описанными выше ограничениями), а также технических (пересчёта в необходимые для дальнейших расчётов единицы полного массового содержания) и программно-технологических (визуализации и организации обработки потоковых данных больших объёмов для восстановления атмосферной динамики и выполнения балансовых оценок) аспектов.

Глава 3 содержит формулировку принципов (включая основные физические уравнения и алгоритм расчёта требуемых элементов общего баланса МГС в атмосфере Земли) развиваемой в рамках работы над темой методики балансовых оценок потоков (выброса и стока) МГС. Все основные расчётные блоки методики программно реализованы, её работа протестирована на примерах наблюдений выбросов угарного газа (СО) сильными лесными пожарами, наблюдавшимися на азиатской территории России в 2022 и 2023 гг., результаты тестирования по указанным примерам также приведены в Главе 3.

В рамках создания технологии и системы дистанционного (спутникового) научного мониторинга концентраций и потоков малых газовых составляющих атмосферы (указанная выше задача 4) в 2023 г. выполнено расширение функциональных возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг», направленное на организацию работ с информационными продуктами по полям концентраций различных МГС атмосферы, восстанавливаемых по данным спутниковых наблюдений, включая ведение архивов необходимых спутниковых продуктов, построение различных композитов на их основе, внедрение новых процедур обработки получаемых композитов. Результаты этих работ описаны в Главе 4.

Результаты, описанные в Главе 5, относятся к работам по решению указанной выше задачи 5 обеспечения возможности оперативной оценки, на основе существующих и перспективных средств постоянного спутникового мониторинга, пространственных распределений концентраций и потоков парниковых газов на территории России. В этих работах рассмотрен ряд типичных (в том числе для территории Сибири и Российской Федерации в целом) антропогенных и природных процессов, вносящих существенный (переменный во времени) вклад в общий баланс МГС в атмосфере. В частности рассмотрены: выбросы, связанные с жизненным циклом городов-миллионников и крупных промышленных объектов (и предложена оригинальная технология выделения, локализации и уточнения интенсивности стационарных в пространстве источников выбросов); вопросы уточнения характеристик лесных пожаров (которые могут быть пересчитаны в выбросы различных МГС на основе полуэмпирических моделей); связь концентраций МГС над водно-болотными угодьями с дистанционно определяемыми фенологическими фазами последних. Создаваемые в рамках работ по этому направлению инструменты и методики анализа спутниковой информации имеют перспективу применения в целях валидации (кроссвалидации) получаемых оценок концентраций и потоков малых газовых компонент атмосферы Земли, а также для комплексного усвоения совокупно получаемой разнотипной информации в развиваемых балансовых моделях на разных пространственно-временных масштабах.

ГЛАВА 1 НОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Введение

В рамках решения задачи разработки новых методов измерения малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере Земли (в том числе с использованием и комбинированием новых частотных каналов и различных методик зондирования), в соответствии с планом на второй этап работы (2023) проведён детальный анализ применимости доступной спутниковой информации по МГС атмосферы для решения задачи научного мониторинга концентраций и потоков МГС с помощью развиваемой в рамках темы исследований оригинальной методики расчёта атмосферной динамики и балансовых оценок; выработаны рекомендации по отбору и применению информации, наиболее востребованной на этапе отработки и верификации развиваемой методики; продолжены работы по созданию отечественных приборов спутникового мониторинга газового состава атмосферы. А именно:

- проанализированы возможности использования данных действующих спутниковых систем мониторинга МГС для восстановления потоков парниковых газов;
- продолжены работы по созданию перспективных приборов и методов измерения малых газовых составляющих и парниковых газов в атмосфере, в том числе путём доработки ранее созданной научной аппаратуры «Дриада» и соответствующих комплексов программной обработки данных.

Полученные результаты, в частности, были представлены в публикации [5].

1.1 Возможность использования данных действующих спутниковых систем мониторинга МГС для восстановления потоков парниковых газов

Одним из основных направлений работ научного коллектива в 2023 г. была разработка подхода, позволяющего выполнять оценки баланса МГС в атмосфере Земли на основе данных спутниковых измерений. В свою очередь, это потребовало не только создания самого метода, но и поиска возможных источников информации для решения поставленной задачи. Для этого, исходя из теоретических основ предлагаемого подхода и пространственно-временных масштабов планируемых к решению на его основе задач, был сформирован перечень требований, предъявляемых к соответствующим входным данным. На основании выдвинутых критериев был проведён анализ готовых продуктов (по содержанию МГС в атмосфере) действующих систем мониторинга. Результаты выполненных в данном направлении работ описаны ниже.

На основе анализа информации, представленной в глобальной базе данных по функционирующим спутниковым миссиям (<https://space.oscar.wmo.int/instruments>), были отобраны несколько систем мониторинга МГС, выполняющих, или имеющих потенциальную возможность выполнять, измерения содержания в атмосфере Земли следующих газовых компонент: CO₂, CH₄, SO₂ и N₂O. Первые два газа являются строго парниковыми и их изучение, с точки зрения влияния на глобальное потепление, является приоритетным. Оставшиеся газы относятся к МГС, имеют, в первую очередь, антропогенное происхождение и традиционно являются маркерами уровня загрязнённости атмосферы в районах мегаполисов и крупных промышленных центров. По указанным признакам были рассмотрены следующие инструменты: ACE-FTS (*англ.* Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer), OCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon Observatory), TANSO-FTS (*англ.* Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations — Fourier Transform Spectrometer), MOIPIT (*англ.* Measurement Of Pollution In The Troposphere), TROPOMI (*англ.* Tropospheric Monitoring Instrument), MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder) и OMPS (*англ.* Ozone Mapping and Profiler Suite).

Прибор ACE-FTS является основной полезной нагрузкой спутника SCISAT (*англ.* Scientific Satellite), запущенного Канадским космическим агентством (*англ.* Agence spatiale canadienne — ASC) в 2003 г. Это фурье-спектрометр с высоким спектральным разрешением ($0,02 \text{ см}^{-1}$), работающий в диапазоне от 2,2 до 13,3 мкм ($750\text{--}4400 \text{ см}^{-1}$). Прибор ориентирован на проведение радиозатменных наблюдений. При этом большое наклонение орбиты и её небольшая высота позволяют охватить тропические, средние широты и полярные регионы. Однако измерения относятся только к верхней тропосфере и стратосфере. Прибор имеет разрешение по высоте от 2 до 6 км и от 5 до 500 км в горизонтальной плоскости (в зависимости от геометрии наблюдений в момент проведения измерений). Заявленный перечень восстанавливаемых параметров включает концентрации 40 МГС, а также вертикальную структуру тонких облаков, аэрозолей и профилей температуры и влажности. При этом основной целью миссии ACE является измерение параметров и анализ химических и динамических процессов, которые влияют на распределение озона в верхней тропосфере и стратосфере.

Спутник OCO-2 (с одноименным прибором на борту) является первым специализированным спутником, запущенным NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) для изучения углекислого газа в атмосфере Земли. Декларируется, что проводимые этим инструментом исследования обеспечивают точность, разрешение и полосу обзора, необходимые для определения характеристик источников и поглотителей этого ключевого парникового газа в региональных масштабах (1000 км и более). Программа стартовала в 2014 г. и в настоящее время продолжает функционировать. OCO-2 представляет собой трёхдиапазонный (758–772, 1594–1619 и 2042–2082 нм) дифракционный спектрометр, работающий в трёх режимах: надирном, в области солнечного блика, а также наблюдения выделенной цели. При этом полоса обзора составляет 10 км и состоит из элементов с размерами $1,29 \times 2,25$ км.

Инструмент TANSO-FTS представляет собой четырёхдиапазонный фурье-спектрометр, работающий в областях 14,28–5,55; 2,08–1,92; 1,72–1,56 и 0,775–0,757 мкм. Потенциально это позволяет решать более 50 задач дистанционного зондирования атмосферы, приоритетными из которых являются: измерение концентраций метана, углекислого газа, водяного пара, кислорода, озона, а также аэрозольных частиц. Прибор является полезной нагрузкой спутника GOSAT (*англ.* Green-house gas Observing Satellite), запущенного в 2009 г. Японским космическим агентством (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA). В приборе реализовано сканирование в направлении, перпендикулярном направлению полёта, с шириной полосы обзора 790 км, при размере элемента разрешения в 10, км.

Сенсор MORITT является корреляционным спектрометром, работающем на восьми частотных каналах в трёх различных диапазонах спектра: четыре канала в области 4,62 мкм, два канала в районе 2,33 мкм и два канала в окрестности 2,26 мкм. Прибор является полезной нагрузкой спутника Terra, запущенного NASA в 1999 г. по программе EOS (*англ.* Earth Observation System). К основным задачам относят восстановление вертикального профиля оксида углерода и интегрального содержания метана. В приборе реализован режим поперечного сканирования с шириной полосы в 640 км и пространственным разрешением порядка 22 км.

Прибор TROPOMI представляет собой космический дифракционный спектрометр, работающий в диапазоне длин волн между ультрафиолетовым и коротковолновым инфракрасным излучением (три частотных окна с длинами волн 270–495, 710–775 и 2305–2385 нм). Данный инструмент, являющийся единственной полезной нагрузкой спутника Sentinel-5P, был запущен в 2017 г. европейским космическим агентством ESA (*англ.* European Space Agency). В приборе реализована функция веерного сканирования с шириной полосы обзора порядка 2600 км на поверхности Земли. Типичный размер пикселя (в районе надира) составляет около 7 км ($7 \times 3,5$; 7×7 и 7×28 км в зависимости от

диапазона). Среди заявленных продуктов присутствуют 32 параметра атмосферы, включая 11 характеристик газовых компонент.

Спутник Aura был запущен NASA на солнечно-синхронную орбиту в 2004 г. На его борту находится прибор MLS, который проводит лимбовые измерения яркостной температуры атмосферы в спектральном диапазоне от 118 до 2,5 ТГц (36 частотных диапазонов в окрестностях частот 118 ГГц, 190, 240, 640 и 2500 ГГц). Целью проводимых измерений является получение вертикальных профилей температуры, влажности, а также концентраций 12 газовых компонент. Прибор имеет горизонтальное разрешение 300 км, его измерения относятся к высотам от 10 км и более, вертикальное разрешение лежит в пределах 2,6–4 км.

Приборы OMPS в настоящее время установлены на трёх различных спутниках в разной компоновке. На спутнике SNPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership), запущенном в 2011 г. при участии NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) и NASA, функционируют два прибора OMPS: OMPS-limb и OMPS-nadir, проводящие лимбовые и надирные измерения, соответственно. На спутнике NOAA-20, начавшем функционирование в 2017 г. (NOAA и NASA), установлен прибор OMPS-limb. За счёт спутника NOAA-21 (NOAA и NASA), начиная с конца 2022 г., перечень приборов серии OMPS в космосе был расширен путём введения в эксплуатацию ещё одной пары OMPS-limb и OMPS-nadir. Приборы OMPS-limb представляют собой призматические спектрометры, проводящие измерения в диапазоне 290–1200 нм, имеют разрешение по высоте 2,2 км и 300 км по горизонтали. Три перекрывающихся сектора обзора обеспечивают ширину полосы наблюдения в 500 км. Характеристики OMPS-limb позволяют измерять 12 параметров атмосферы, включая содержание восьми газовых компонент. OMPS-nadir представляют собой спектрометры на дифракционной решетке, проводящие измерения в диапазоне 35–400 нм. Они обеспечивают покрытие полосами шириной 2800 км и протяжённостью 50 км (1 раз в 7,6 с) с пространственным разрешением 50 км (SNPP) и 10 км (NOAA-21). Прибор позволяет решать 19 задач дистанционного зондирования атмосферы, включая восстановление концентрации пяти газовых компонент.

Как будет детально рассмотрено ниже (см. разд. 3.1 настоящего отчёта), определить количество выделяемых/поглощаемых парниковых газов для какой-либо территории можно на основании анализа уравнения баланса, имеющего вид:

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} B(t) dt = - \iint_A M(x, y) dx dy \bigg|_{t_{\min}}^{t_{\max}} - \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint F(x, y) dn,$$

где t_{\min} и t_{\max} — начало и конец интервала наблюдений, соответственно; $B(t)$ — «мгновенный» баланс ПГ для заданной территории A , т.е. разность между интенсивностью эмиссии и стока ПГ (в $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$); $M(x, y)$ — массовое содержание ПГ в вертикальном атмосферном столбе единичной площади (в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$); \mathbf{p} — ориентированная замкнутая граница области A (см. далее); \mathbf{n} — ориентированная нормаль к границе \mathbf{p} (положительное направление — внутрь контура); \mathbf{F} — интегральный по высоте атмосферы горизонтальный поток ПГ (в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$).

В настоящий момент не существует прямых методов спутниковых измерений переменных, стоящих в левой части представленного выражения. При этом построение глобальных карт распределения физико-химических параметров атмосферы, включая концентрации газовых компонент, является непосредственной задачей методов дистанционного зондирования. Соответственно, в получаемых картах имеется информация о количестве интересующего газа в пределах столба атмосферы с основанием A , а значит, первый член в правой части уравнения баланса может быть рассчитан. Кроме этого, на основе методов анализа динамических изображений, при наличии последовательности сменяющих друг друга глобальных карт концентрации, имеется возможность оценки и второго члена в правой части уравнения.

Основные требования к спутниковым данным, в рамках сформулированной задачи, логично вытекают из анализа уравнения баланса, приведённого ранее.

Первым требованием, имеющим принципиальное значение, является обеспечение максимальной площади покрытия в пределах фиксированных временных интервалов. Очевидно, что при любых размерах выделенного элемента поверхности A , расчёт интегрального содержания газа в атмосфере над ней возможен лишь при наличии результатов измерений внутри всей области. Наличие пропусков, вызванных особенностями реализации измерений (в ограниченном секторе обзора) или принципиальной невозможностью решения обратной задачи (значительное альbedo поверхности, сильная облачность и т.п.), неизбежно приведёт к ошибкам вычислений и может стать причиной кардинально расходящихся результатов балансовых оценок. Следует отметить, что среди функционирующих на орбите систем мониторинга большинство имеет очень узкие полосы обзора, объясняемые лимбовой геометрией наблюдений, отсутствием механических систем сканирования (в отличие от микроволновых средств дистанционного зондирования Земли) или, например, методической ориентацией на восстановление исключительно вертикальной структуры параметров атмосферы. В свою очередь, это приводит к тому, что получаемые суточные композиты состоят из узких и редких полос, покрытых измерениями, и существенно больших по площади лакун (рисунок 1.1.1). Для всего набора инструментов, вошедших в анализ, был проведён расчёт их относительной (к общей площади поверхности Земли) площади суточного покрытия. Было показано, что наибольшее значение соответствует прибору TROPOMI (вплоть до 83 %), далее следует инструмент OMPS (порядка 17 %). Соответствующие значения для других приборов не превышают 1 % (таблица 1.1.1). Существенная площадь покрытия важна не только при оценке баланса МГС на значительных площадях, но и при решении задачи обнаружения локальных зон повышенной эмиссии, расположение которых заранее неизвестно, в связи с чем они могут просто не попасть в поле зрения прибора.

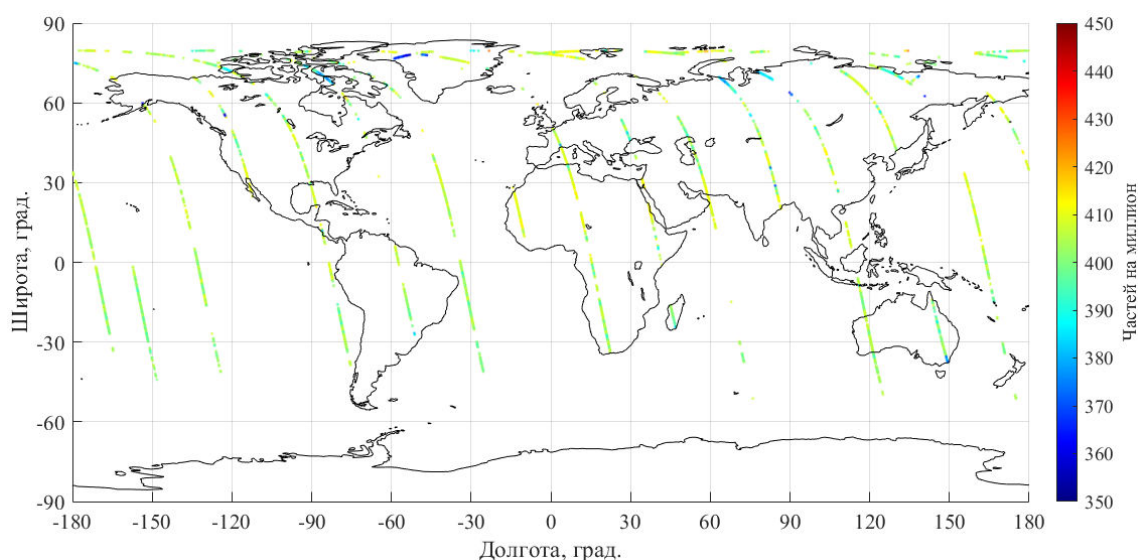


Рисунок 1.1.1 — Пример суточного покрытия данными измерений прибором OCO-2

Следующее требование к спутниковым данным — периодичность наблюдений для выделенного элемента поверхности. Как правило, расположение источников наиболее сильных антропогенных выбросов (крупные промышленные центры, химические предприятия и т.п.) известно априори, а проведение сеансов наблюдения над этими районами может быть спланировано заранее. При этом, однако, если периодичность спутниковых наблюдений окажется существенно ниже частоты выбросов в этих районах, то оценки их величины, в соответствии с представленным уравнением, могут оказаться

существенно заниженными в результате недооценки параметров $M(x, y)$ и $\bar{F}(x, y)$. Аналогичные ошибки возможны и при низкой периодичности наблюдений в областях потенциального возникновения локальных выбросов природного (например, лесные пожары) и антропогенного характера (чрезвычайные ситуации на производствах). В соответствии с предложенной идеологией оценки баланса газовых составляющих, к источниками этих выбросов могут быть ошибочно отнесены территории, являющиеся «транзитными» для газовых шлейфов, но характеризующиеся резкими скачками функций $M(x, y)$ и $\bar{F}(x, y)$.

Таблица 1.1.1 — Характеристики пространственного покрытия анализируемых приборов

Параметр	Прибор						
	ACE-FTS	OCO-2	TANSO-FTS	MOPITT	TROPOMI	MLS	OMPS
Покрытие, %	0,03	0,5	0,1	н/д	до 82,5	0,35	17
Период, сут.	–	30	3	5	1	3	4 (лимб.) 12 (надир.)

Обсуждённые параметры анализируемых систем мониторинга газового состава атмосферы по данным WMO Oscar (<https://space.oscar.wmo.int/instruments>) сведены в таблице 1.1.1. Следует оговорить наблюдаемое несоответствие между значениями, приведенными в ней. Например, очевидно соотношение «Покрытие/Период» для инструментов TROPOMI и OMPS. Не вызывает вопросов эта величина и у прибора OCO-2. При этом для приборов TANSO-FTS и MLS, имеющих очень узкие полосы обзора, заявленный период полного покрытия составляет всего трое суток. Здесь стоит указать две возможные причины. Во-первых, использование неоднозначных терминов в описании технических характеристик аппаратуры (полное покрытие/повторяемость наблюдений). Во-вторых, для некоторых приборов указаны значения, которые потенциально могут быть достижимы в специфических режимах их работы. При этом относительную площадь покрытия, в рамках данного отчёта, оценивали на реальных данных, полученных в штатных режимах и доступных для скачивания с официальных ресурсов.

Последний аспект также имеет большое значение при отборе данных спутниковых измерений. Очевидно, что наиболее востребованной является задача оценки баланса для CO₂. При этом в свободном доступе актуальная информация по содержанию CO₂ имеется лишь для приборов ACE-FTS, OCO-2 и TANSO-FTS, использование которых для построения суточных карт распределения оказывается невозможным. Следует отметить, что, хотя в заявленных характеристиках перечисленных инструментов имеется почти полный перечень выделенных газовых компонент, реальное их количество оказалось существенно меньше (таблица 1.1.2). Символы «–» при заполнении таблицы выставляли в случае отсутствия либо самого продукта по выделенному газу (актуальных на момент составления отчёта данных), либо и самого продукта, и любой технической документации, описывающей процесс восстановления по данным конкретного инструмента; «*» соответствуют ситуации, когда рекламации и документация присутствуют, но доступ к самим продуктам ограничен.

Влияние пространственного разрешения используемой системы мониторинга можно сравнить по значимости с периодичностью измерений, где интегрирование по времени заменяется интегрированием измерений по площади в пределах элемента разрешения (возникновение риска невозможности регистрации локализованных источников повышения концентрации интересующей газовой компоненты). Следует отметить, что все современные спутниковые системы, ориентированные на исследования газового состава атмосферы, потенциально имеют достаточно высокое пространственное разрешение за счёт работы в ИК и видимом диапазонах спектра, где (в отличие от микроволнового) достаточно просто обеспечить узкую диаграмму направленности

приемника при фиксированном размере его входной апертуры. При этом, однако, лимбовые и радиозатменные схемы измерений (помимо узкой полосы обзора) приводят к существенному ухудшению пространственного разрешения в горизонтальной плоскости (разрешающая способность анализируемых инструментов была приведена при их описании).

Таблица 1.1.2 — Сводная информация по наличию данных мониторинга МГС, выполняемых действующими спутниковыми миссиями

МГС	Название прибора						
	ACE-FTS	OCO-2	TANSO-FTS	MOPITT	TROPOMI	MLS	OMPS
CO ₂	+	+	+	–	–	–	–
CH ₄	+	–	*	*	+	–	–
SO ₂	–	–	–	–	+	+	+
N ₂ O	+	–	–	–	–	+	–

Анализ данных спутникового мониторинга газовых компонент по уже перечисленным параметрам показал, что наиболее подходящим для дальнейшего решения задачи восстановления баланса МГС является лишь один прибор — TROPOMI, имеющий широкую полосу обзора (2600 км), высокую повторяемость измерений (1 сут), малые значения элемента пространственного разрешения (порядка 7 км). Несмотря на потенциальную возможность измерения концентрации всех четырёх выделенных газовых компонент, декларируемую в техническом описании, в настоящее время на соответствующих сервисах размещены данные лишь по двум из них — CH₄ и SO₂. При этом требуемое пространственное покрытие обеспечивается лишь по диоксиду серы. Оно составляет 82,5 % для всех измерений и 67,54 % для тех из них, где качество восстановления (оцениваемое разработчиками) превышает значение 50 (величина «100» гарантирует высокое качество решения обратной задачи, «0» — найденное решение соответствует неблагоприятным метеорологическим условиям и может существенно отличаться от истинного). Пример суточного композита, сформированного по данным TROPOMI для SO₂, приведён на рисунке 1.1.2.

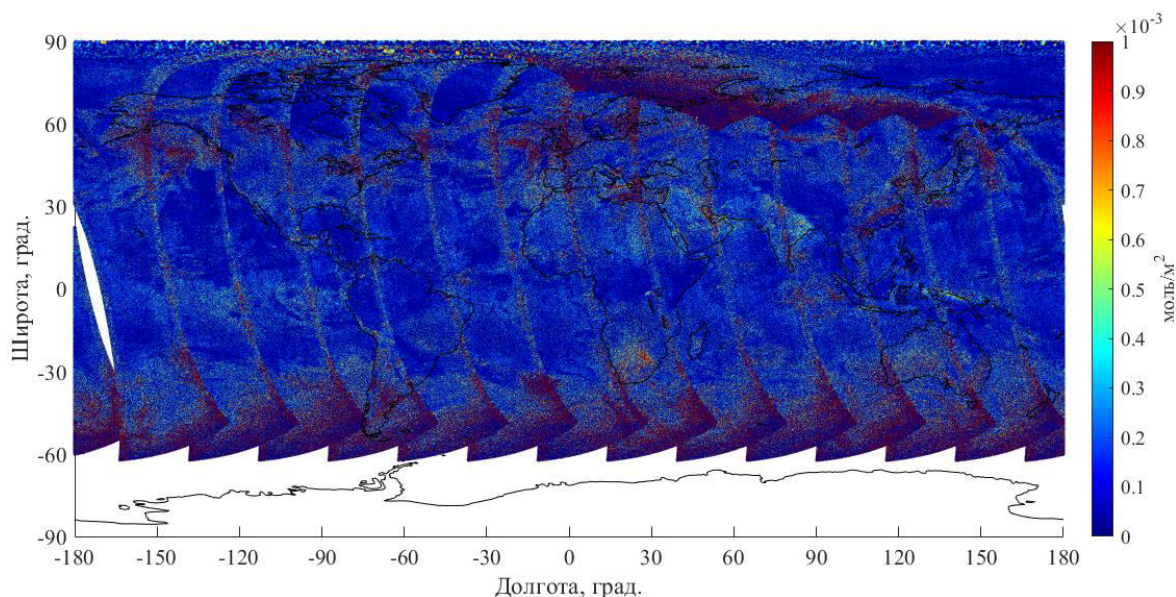


Рисунок 1.1.2 — Пример суточного композита, сформированного по данным TROPOMI, по распределению интегрального количества SO₂ в атмосфере

Оставляя вне рассмотрения причины сильных флуктуаций концентрации SO_2 на получаемых изображениях, можно констатировать, что, несмотря на хорошее пространственное покрытие, данные прибора TROPOMI по указанному газу не позволяют использовать их для отработки технологии расчета баланса МГС. Дело в том, что предполагаемые методы оценки величины $\vec{F}(x, y)$ базируются на поиске характерных (идентифицируемых) областей на последовательностях изображений (см. разд. 2.2). В случае работы с изображениями, подобными приведённому на рисунке 1.1.2, где наблюдаются резкие скачки значений (достигая двукратных изменений) в соседних пикселях и/или в одном элементе разрешения на изображениях за соседние сутки, подобные алгоритмы встречают существенные затруднения.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод, что по выдвинутым критериям наибольший потенциал для решения основной задачи проводимых исследований имеют данные, поступающие с прибора TROPOMI. При этом отсутствие заявленных данных по малым газовым составляющим CO_2 и N_2O , малое покрытие для CH_4 и неоднородность данных по диоксиду серы, не позволяют в настоящее время использовать данные этого инструмента для решения задачи оценки баланса парниковых газов. Дальнейший прогресс здесь может быть обеспечен появлением в ближайшее время новых алгоритмов обработки данных этого инструмента и, соответственно, возможности доступа к интересующим данным достаточного качества.

По результатам выполненного анализа выработана рекомендация об использовании измерений концентрации CO , осуществляемых прибором TROPOMI, для отработки методики балансовых оценок эмиссии и стока МГС по данным спутниковых наблюдений.

Угарный газ, следуя строгой классификации, не является парниковым газом. При этом, за счёт разноатомной структуры, он является активным в инфракрасном диапазоне и может быть классифицирован как слабый парниковый газ. Оксид углерода относится к классу углеродосодержащих, вступает в химические реакции, приводящие к изменению содержания в атмосфере диоксида углерода и метана (сильных парниковых газов), поэтому не исключена возможность в будущем проводить предварительные оценки концентраций других газов этой группы (CO_2 и CH_4) по наблюдениям за CO и регионально адаптированным регрессионным моделям.

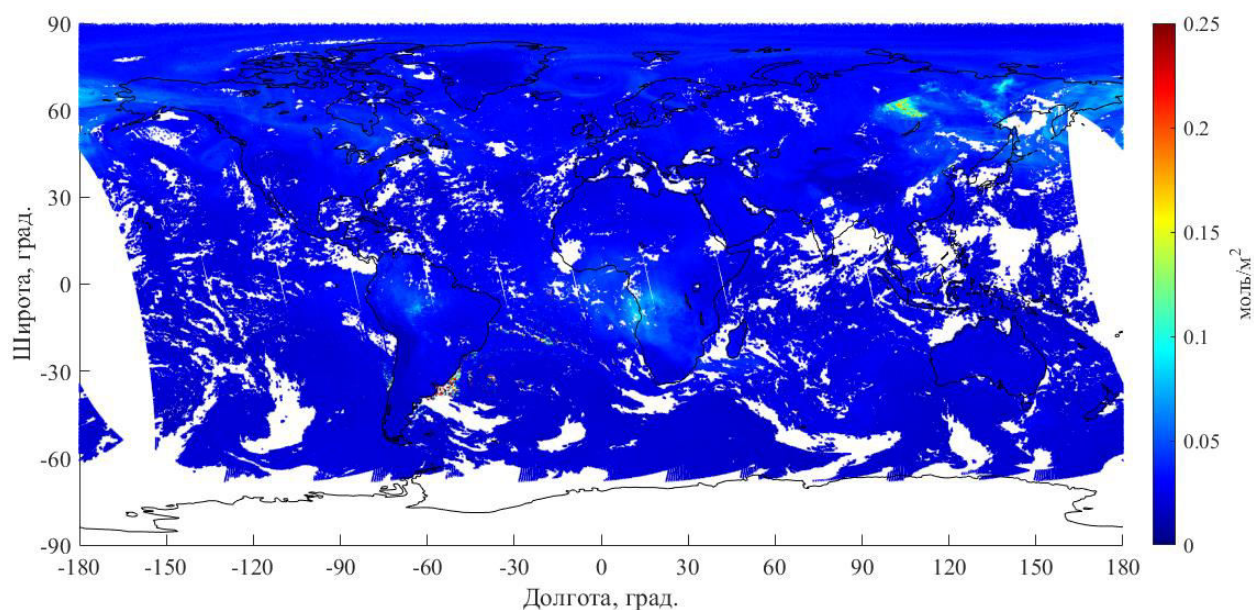


Рисунок 1.1.3 — Суточный композит результатов измерений концентрации CO , полученных прибором TROPOMI. Белые области соответствуют отсутствию данных. Локальное повышение концентрации в области, расположенной севернее оз. Байкал, соответствует участку активного лесного пожара, регистрируемого в данной области на момент проведения измерений

Измерениями концентрации CO в атмосфере с TROPOMI за сутки покрывается от 35 до 50 % (рисунок 1.1.3) поверхности Земли, а поскольку большая часть этих областей приходится на поверхность суши, появляется возможность выделения значительных участков земной поверхности со сплошным покрытием для проведения балансовых оценок.

С точки зрения последующей валидации результатов оценок баланса CO, данный газ имеет две интересные особенности. Во-первых, являясь продуктом неполного сгорания углерода, угарный газ интенсивно выделяется природными пожарами - хорошо локализуемыми в пространстве и времени источниками выбросов. В свою очередь, сопоставление результатов балансовых оценок CO с данными по расположению очагов пожаров и их интенсивности даёт возможность наглядной демонстрации применимости предложенной методики балансовых расчётов. Во-вторых, по данным ряда теоретических оценок, при прочих равных условиях, в результате горения, соотношение масс образуемых диоксида углерода и угарного газа находится в диапазоне от 0,037 до 0,123. Учитывая тот факт, что отношение средних значений концентраций в атмосфере Земли этих газов составляет 0,004, выбросы CO в результате лесных пожаров должны проявляться гораздо заметнее на суточных композитах, что также должно способствовать упрощению процедуры валидации результатов балансовых оценок.

Обобщая результаты работ, выполненных по данному направлению, можно констатировать, что оптимальными с точки зрения отработки технологии оценки баланса малых газовых составляющих на основе данных спутниковых наблюдений являются данные по усреднённой объёмной доле угарного газа (или интегральной массе в столбе атмосферы), поступающие с инструмента TROPOMI.

1.2 Перспективные приборы и методы измерения малых газовых составляющих и парниковых газов в атмосфере

1.2.1 Вопросы пространственного покрытия и анализ возможности доработки научной аппаратуры «Дриада»

Глобальный мониторинг двух основных атмосферных парниковых газов (ПГ), углекислоты (CO₂) и метана (CH₄), является фундаментальной научной задачей, решение которой необходимо для оценок устойчивости современного климата Земли. Кроме того, оценка антропогенных причин роста концентраций ПГ, а также глобальные и непрерывные измерения промышленных выбросов отдельных стран уже стали важнейшими геополитическими вопросами. Таким образом, одной из приоритетных задач дистанционного зондирования становится обладание независимым инструментом для получения объективной количественной информации о распределении парниковых газов в атмосфере. В основе её лежат регулярно обновляемые карты содержания этих газов атмосферном столбе. Эти данные необходимы как для исследования глобального углеродного цикла, так и оценки выделения и поглощения газов над территориями стран и регионов. Важно, чтобы такие измерения проводились известными общепринятыми методами и признавались в качестве аргументов при обсуждении углеродных квот.

Для задачи спутниковой системы мониторинга ПГ определяющий облик целевой аппаратуры можно сформулировать следующим образом:

- получение независимой информации о естественной и обусловленной антропогенными причинами изменчивости основных составляющих энергетического баланса климатической системы Земли для обеспечения исследований экспертным и научным сообществом и формирования базы для принятия решений;
- использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для уточнения и сбора недостающих исходных данных, необходимых для проведения расчётного мониторинга выбросов и поглощений парниковых газов, визуальной идентификации источников и объектов подстилающей поверхности;

- мониторинг пространственного распределения парниковых газов для определения антропогенных и естественных источников и стоков;
- выделение естественной и антропогенной составляющей;
- верификация оценок антропогенных выбросов и поглощения парниковых газов на локальном и региональном уровнях и оценок для национальных кадастров путём сравнения с данными дистанционного зондирования.

В настоящее время сохраняется значительная неопределённость суммарных национальных локальных оценок по категориям источников. Так, если неопределённость выбросов от сжигания топливно-энергетических ресурсов (промышленность, строительство, транспорт) составляет 5–20 %, от сельского хозяйства и землепользования — 20–50 %, то для таких категорий как утилизация твёрдых отходов, биологическая переработка и сжигание отходов неопределённость достигает 60 %. Причём так как источниками парниковых газов являются все виды объектов (площадные, линейные и точечные), целесообразно иметь возможность наблюдать как большие площади с низким пространственным разрешением, так и локальные объекты с высоким пространственным разрешением. Таким образом, при разработке приборов мониторинга можно рассматривать как минимум два принципиальных вида аппаратуры: более сложные гиперспектрометры с возможностью картирования за счёт определённого построения оптической схемы и широкого угла обзора и узконаправленные спектрометры для исследования площадных источников и глобального (в масштабах регионов и стран) содержания ПГ.

Кроме этого, научные задачи и параметры аппаратуры должны быть согласованы с параметрами орбиты предполагаемой платформы для установки приборного комплекса. В качестве примера можно рассмотреть орбиту спутников серии «Метеор», для которой из открытых источников были взяты данные о подспутниковой точке. Даже в случае точечных измерений в надир орбита космического аппарата (КА) «Метеор», высота которой 820 км, обеспечивает достаточно густое покрытие поверхности планеты. На рисунке 1.2.1.1 представлена трасса КА «Метеор» за неделю. Отметим, что за этот период орбита четырежды пересекает Московскую обл. Для увеличения частоты измерений должен быть, соответственно, реализован комплекс идентичных КА.

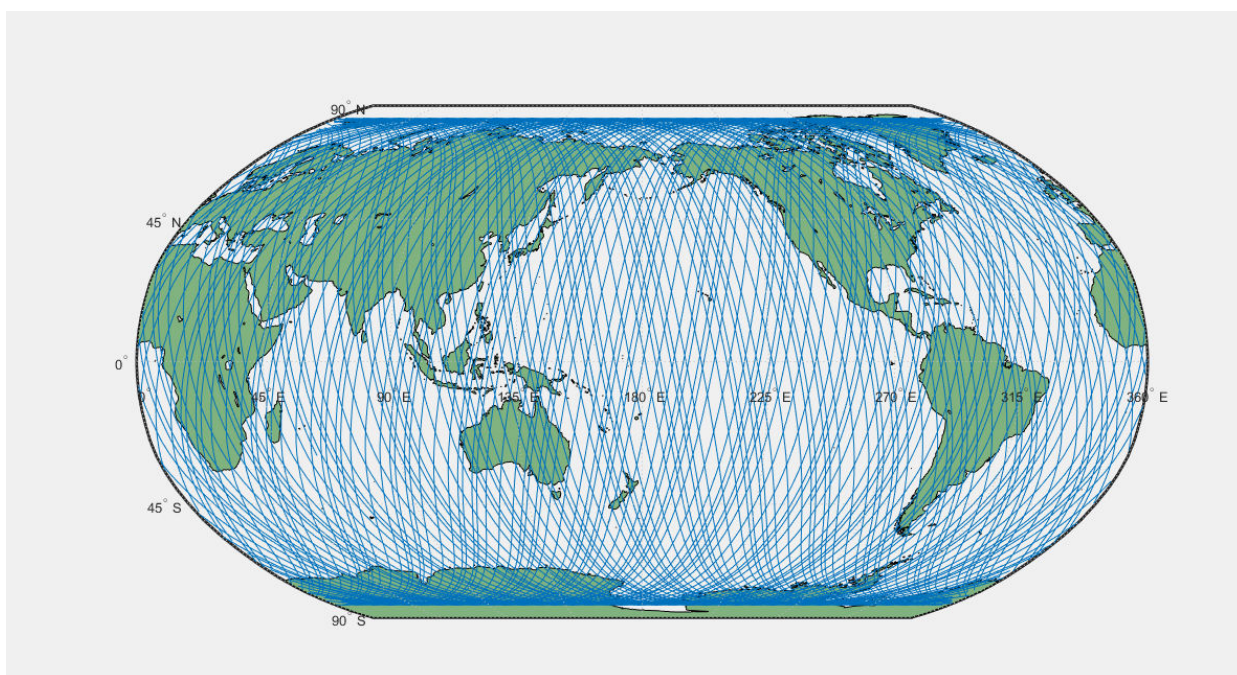


Рисунок 1.2.1.1 — Покрытие КА «Метеор» за неделю

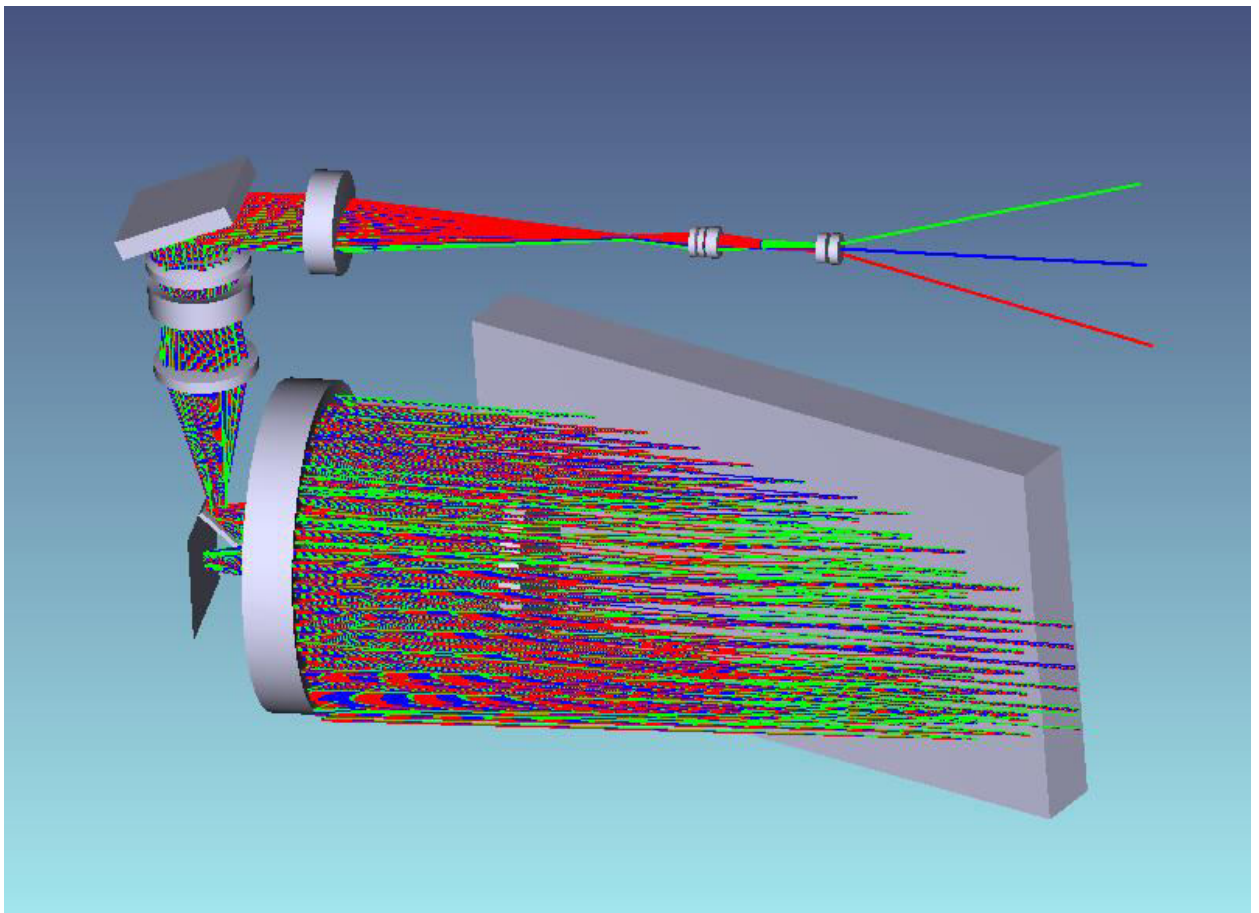


Рисунок 1.2.1.2 — Принципиальная оптическая схема инфракрасного канала с полем зрения 30° . Цветом отмечены лучи краёв и центра поля зрения. Сделана замена входного объектива инфракрасного спектрометра

Был проведён дополнительный анализ возможности доработки аппаратуры «Дриада», создаваемой в ИКИ РАН, с целью увеличения полосы съёмки. Для регистрации спектрального диапазона $1,4\text{--}1,67\text{ мкм}$, содержащего полосы парниковых газов и водяного пара, используется кадр с детектора 640×512 , содержащего 14 дифракционных порядков эшелле, разделённых при помощи скрещённой дисперсии. Каждый порядок дифракции изображается на детекторе в виде полосы высотой 24 пикселя. Технические требования к данному космическому эксперименту определяют поле зрения в 1° , входной телескоп со щелью формирует поле зрения прибора в виде узкой полосы, соответствующее пятно зрения на поверхности Земли с высоты МКС 400 км составляет $7 \times 0,1\text{ км}$. В этом случае целесообразно суммировать строки изображения дифракционных порядков вдоль щели для увеличения отношения «сигнал – шум». В такой конфигурации аппаратура, в соответствии с планом космического эксперимента, обеспечивает последовательные точечные измерения. Было определено, что путём незначительных изменений, а именно заменой входного объектива, аппаратура «Дриада» обеспечивает полосу захвата с 24 разрешимыми элементами. Другие элементы существующей оптической системы без каких-либо модификаций обеспечивают как спектральное, так и пространственное качество изображения. Подобный прибор будет вести измерения в режиме гиперспектральной съёмки атмосферы и картирования парниковых газов. Это может быть обеспечено установкой перед входной щелью короткофокусного широкоугольного объектива с полем зрения 30° . В данном случае строки изображения анализируются индивидуально: с орбиты МКС захват составит 214 км и проекция пикселя на земную поверхность (*англ.* Ground Sample Distance — GSD) — $\sim 6,1\text{ км}$, т. е. 35 элементов на строку. Также возможны любые промежуточные варианты с меньшей полосой съёмки на те же 35 элементов изображения. На рисунке 1.2.1.2 представлена модификация

инфракрасного спектрометра «Дриада» с широким полем зрения. Цветом отмечены лучи краёв и центра поля зрения. Как уже было сказано, в этом случае аппаратура будет представлять собой изображающий гиперспектрометр, где по одной координате детектора откладываются длины волн, а по другой — пространственная координата.

1.2.2 Варианты построения оптической схемы спектрометра ближнего ИК-диапазона

Было проведена разработка альтернативной по отношению к НА «Дриада» версии построения основного канала спектрометра для измерения концентраций ПГ. Для регистрации спектрального диапазона 1,4–1,67 мкм, содержащего полосы парниковых газов и водяного пара, также используется один кадр с 12 дифракционными порядками эшелле, разделёнными при помощи скрещённой дисперсии. Однако в этой версии скрещённая дисперсия осуществляется брэгговской дифрешёткой, встроенной во входную оптику, а собственно спектрометр из диспергирующих элементов содержит только эшелле. Выбрана каталожная пропускающая решётка производства фирмы LightSmyth, с эффективностью по уровню 0,85 в диапазоне 1300–1730 нм, с частотой штрихов 940,07 на миллиметр, габаритами 24×14 мм.

Спектрометр построен по классической автоколлимационной схеме, в ней используется линзовый коллиматор/объектив, образованный линзами BaF₂ (фторид бария) и ZnSe (селенид цинка) с фокусным расстоянием 160 мм. Построенная схема требует стёкол высоких категорий по показателю преломления и дисперсии, поэтому материалы выбраны из кристаллической номенклатуры, так как у них показатели преломления практически не зависят от технологии получения. Относительное отверстие системы 1:3 (рисунок 1.2.2.1). На рисунке 1.2.2.2 показан вход лучей в спектрометр и конструкция приёмника.

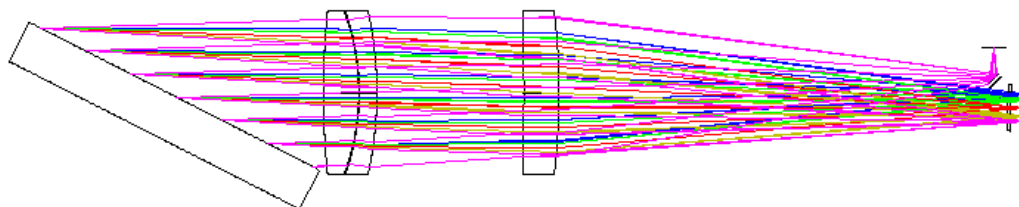


Рисунок 1.2.2.1 —Ход лучей в спектрометре

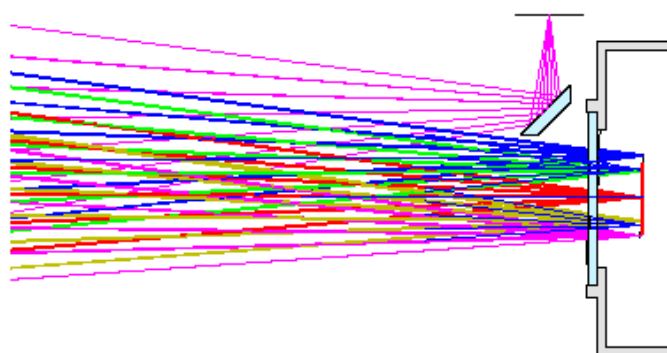


Рисунок 1.2.2.2 — Расположение входной щели, ломающего зеркала и крышки приёмника

На входную щель спектрометра, а затем на ломающее зеркало попадает излучение, уже разделённое на порядки дифрешёткой во входной оптике (рисунок 1.2.2.3).

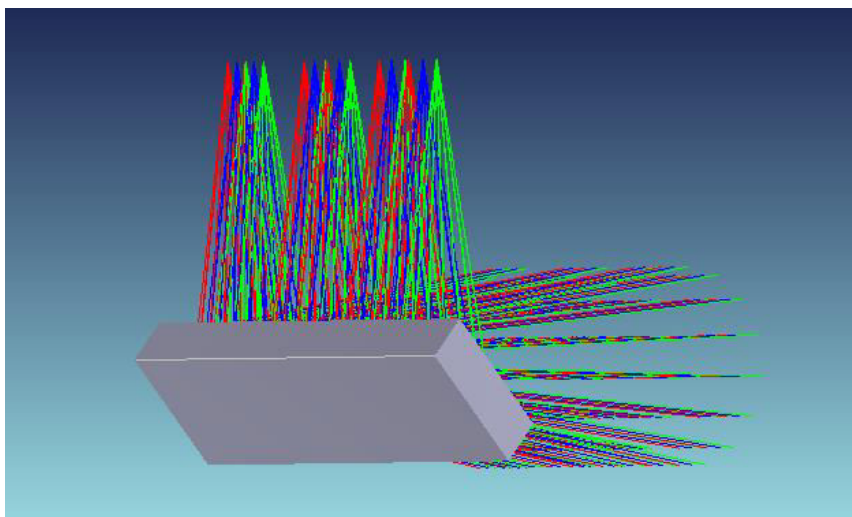


Рисунок 1.2.2.3 — Ход лучей у ломающего зеркала

На рисунках 1.2.2.4–1.2.2.6 показаны результаты расчёта разрешающей способности спектрометра с учётом пиксельной структуры приёмника. Ширина щели 15 мкм, $\Delta\lambda = \pm 0,07$ нм.

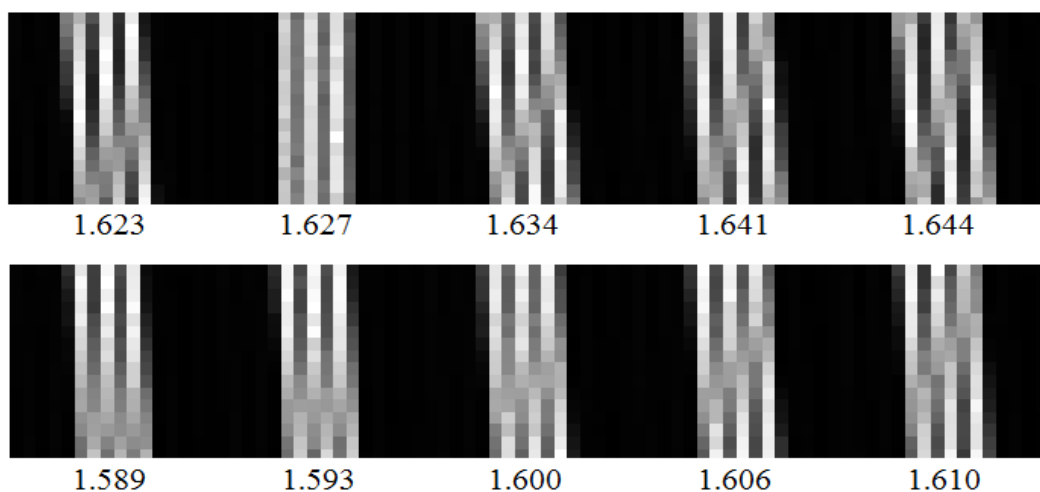


Рисунок 1.2.2.4 — Разрешение в 47 и 48 порядках (полосы CH_4 и CO_2). $R \sim 23\,000$

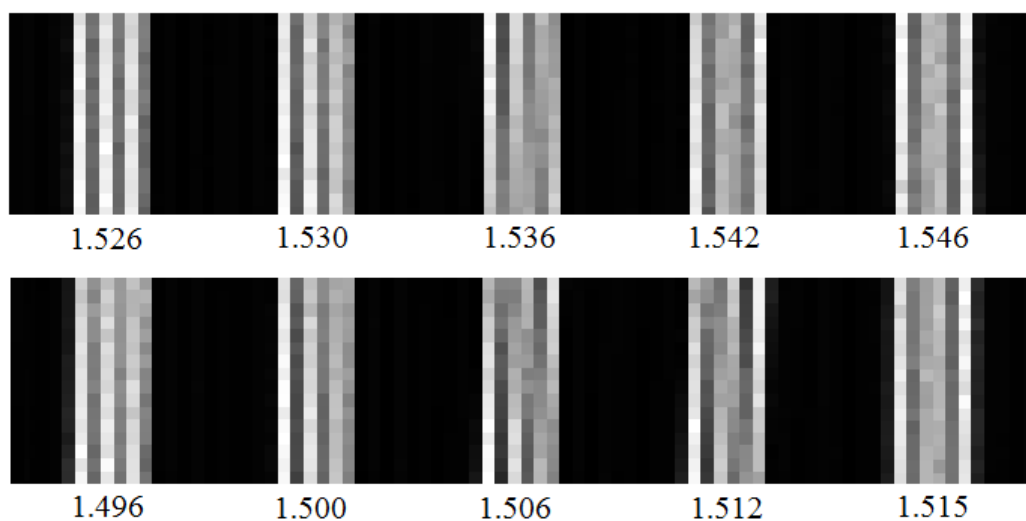


Рисунок 1.2.2.5 — Разрешение в 50 и 51 порядках (полосы HDO). $R \sim 21\,000$

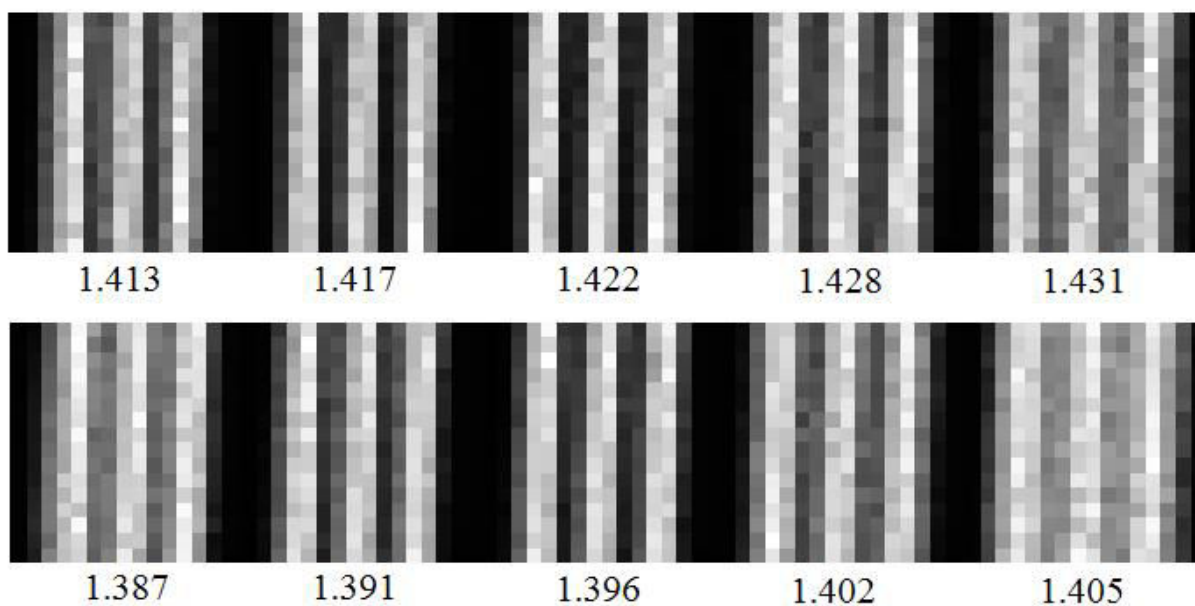


Рисунок 1.2.2.6 — Разрешение в 54 и 55 порядках (полосы H₂O). $R \sim 18\,000$

Изображение земной поверхности проецируется входной оптикой на щель 1. Лучи от этой щели коллимируются и попадают на брэгговскую дифрешётку. Ломающее зеркало способствует удобной компоновке (рисунок 1.2.2.7).

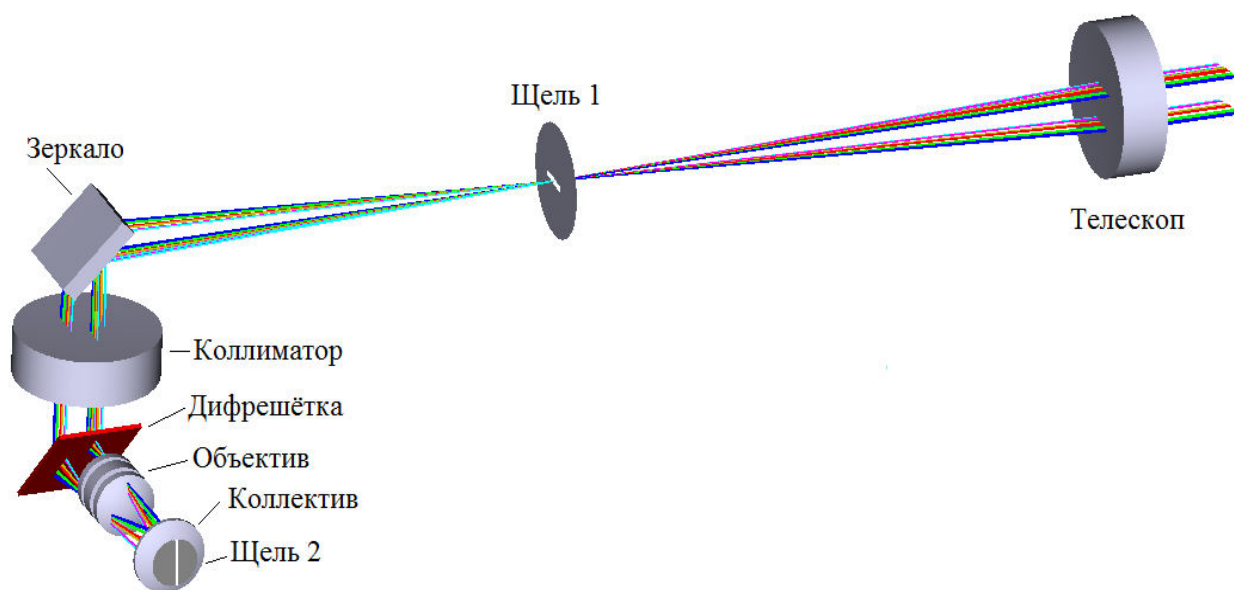


Рисунок 1.2.2.7 — Ход лучей во входной оптике

Такой формат входной оптики базируется на исключительной эффективности дифрешётки (0,9–0,97 в диапазоне 1,4–1,7 мкм). Частота решётки $940,1\text{ мм}^{-1}$ обеспечивает высокую дисперсию и несколько необычный ход лучей (рисунок 1.2.2.8). Коллектив (линза у щели 2) сопрягает зрочки входной оптики (объектив) и спектрометра (эшелле). Таким образом, на щели 2 (она же — входная щель спектрометра) формируются разнесённые спектральные порядки эшелле (рисунок 1.2.2.9).

В целом прибор обеспечивает заданное разрешение и не слишком сложен по конструкции, однако требует макетирования для получения опыта работы с брэгговскими решетками (до сих не использовались в приборах коллектива лаборатории).

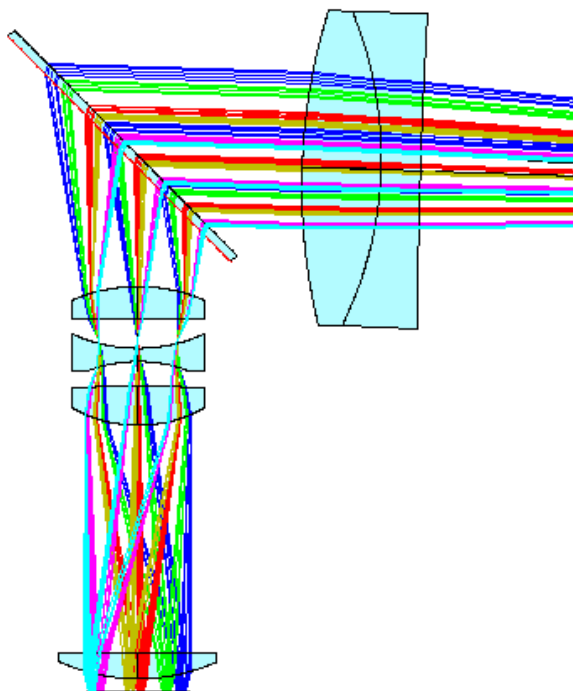


Рисунок 1.2.2.8 — Формирование порядков прозрачной дифракционной решёткой

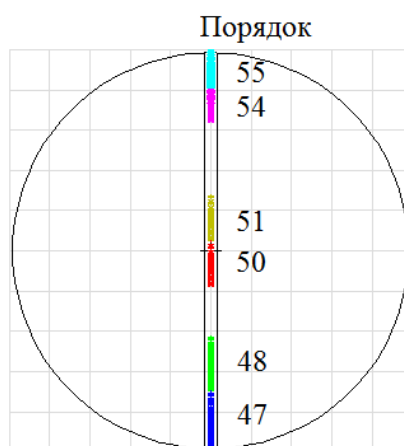


Рисунок 1.2.2.9 — Укладка порядков эшелле на входной щели спектрометра

1.2.3 Перспективные направления для создания аппаратуры картирования

Как уже было отмечено, ряд задач измерений ПГ и МГС требует относительно высокого пространственного разрешения (менее 1 км). Это, во-первых, накладывает ограничения на используемое время экспозиции, так как при съёмке изображений с орбиты существует существенный смаз из-за времени экспозиции. Характерные скорости пролёта КА над поверхностью исчисляются километрами в секунду. Для видимого диапазона данный эффект проявляется для съёмки с высоким пространственным разрешением, так как по сравнению с ИК-диапазоном яркость сцены заметно выше и регистрируемый диапазон как правило составляет как минимум десятки нанометров. Для ИК-спектрометров, измеряющих ПГ, освещённость на длинах волн ~ 1500 нм в разы меньше, а диапазон длин волн на пикселе составляет доли нанометров. За счёт этого для получения приемлемых значений отношения «сигнал – шум» (качество спектров, определяющих точность дальнейшего восстановления концентраций) необходимо либо увеличивать время экспозиции, либо суммировать отдельные кадры, но и то и другое ухудшает

пространственное разрешение. Чувствительные материалы матриц для ИК-диапазона — это соединения кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe) и индий-галлий-арсенид (InGaAs). Первые требуют охлаждения до криотемпературы и за счёт этого обладают крайне низким уровнем шума, вторые могут работать при комнатной температуре, но более шумные. Для охлаждения кадмий-ртуть-теллур-детекторов используются микрокриогенные системы Стирлинга, однако их ресурс ограничен десятками тысяч часов (чуть более года работы). Тем не менее, для космического применения возможно создание пассивных систем охлаждения. Номенклатура доступных приёмников инфракрасного излучения в последнее время довольно ограничена, так как этот диапазон активно применяется в негражданских задачах, однако на рынке присутствуют отечественные системы, позволяющие принять это направление в качестве перспективного.

Фотоприёмные устройства как отечественных, так и доступных зарубежных производителей имеют общепризнанный формат 640×512 элементов при шаге 15 мкм. Существует также формат 1280×1024 элемента, но он пока менее распространён, а цена устройств выше.

Представляется целесообразным и технологичным запланировать для разработки аппаратуры концепцию использования дифракционной решётки (эшелле), работающей в единственном порядке дифракции. В плюсы можно отнести понятные (классические) принципы построения оптической схемы, простота (в сравнении с фурье-решёткой), отсутствие специфичных оптических элементов (как например иммерсионные дифракционные решётки), отсутствие механических частей, непосредственное получение спектров поглощения для дальнейшей обработки. Отдельные каналы аппаратуры измеряют свои относительно узкие диапазоны длин волн, решая обособленные научные задачи. В отличие от компромиссных решений в космическом эксперименте «Дриада», где не ставилась задача картирования, новые эксперименты необходимо планировать с прицелом на глобальное покрытие и хорошее пространственное разрешение.

При разложении излучения в спектр используется одна координата детектора, как правило, большая — 640, а по второй (до 512) логично организовывать пространственное разрешение. Поле зрения спектрометра определяется узкой входной щелью спектрометра, ориентированной поперёк трассы. В таком случае спектрометр по мере пролёта замечает подстилающую поверхность для получения спектрального изображения (*англ.* push broom спектрометр). Ширина полосы захвата полностью определяется входной оптикой, которая может легко заменяться, однако число разрешимых элементов остаётся неизменным. То есть 512 элементов на 30°, или 512 на 15°, или на 1°. Важно отметить, что при специальной необходимости можно заменить входную оптику на узкое поле зрения и уйти от картирования в пользу качества спектров: при суммировании кадра детектора по вертикали шум результирующего спектра улучшается как корень из числа усреднённых строк.

Принципиальная схема спектрометра изображена на рисунке 1.2.3.1. Входная оптика формирует изображение подстилающей поверхности на щели и блокирует длины волн вне исследуемого порядка дифракции (светофильтр или акустооптический фильтр). Эшелле-спектрометр принципиально состоит из коллиматора (линзового или зеркального), дифракционной решётки и детектора. Схема может быть как автоколлимационной (как на рисунке 1.2.3.1), так и не автоколлимационной с применением линзовой оптики: отдельно коллиматор, отдельно камерный объектив перед детектором, но подобное решение будет более громоздко и технически усложнено.

Для отработки схемотехнических решений и проверки компьютерных расчётов, из имеющихся у коллектива компонентов был собран макет эшелле спектрометра высокого разрешения (рисунок 1.2.3.2). В качестве коллиматора используется внеосевое (10°) параболическое зеркало с фокусным расстоянием 200 мм. Дифракционная решётка имеет угол блеска 70° и частоту нарезки 24,35 штр./мм. В фокальной плоскости установлен детекторный модуль XSW-640 фирмы Xenics, InGaAs матрица 640×512 пикселей с

пелтье охлаждением и размером пикселя 15 мкм. Элементы установлены на подвижные подахи с возможностью наклонов, что обеспечивает гибкость настроек и возможность юстировки. Сменные щели позволяют исследовать энергетические и спектральные характеристики (в первую очередь разрешение).

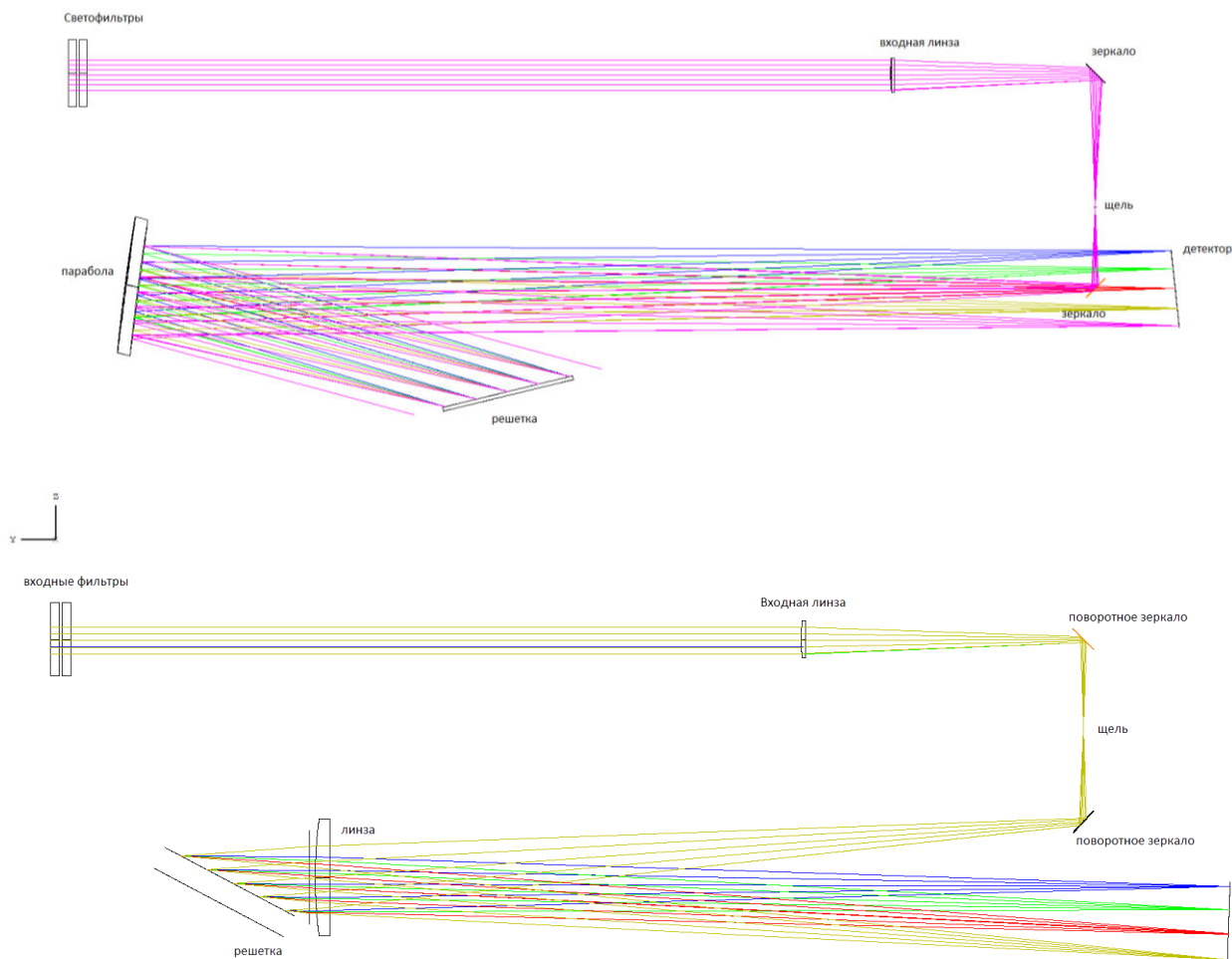


Рисунок 1.2.3.1 — Принципиальная компоновка эшелле-спектрометра в автоколлимационной схеме с помощью зеркального или линзового коллиматора

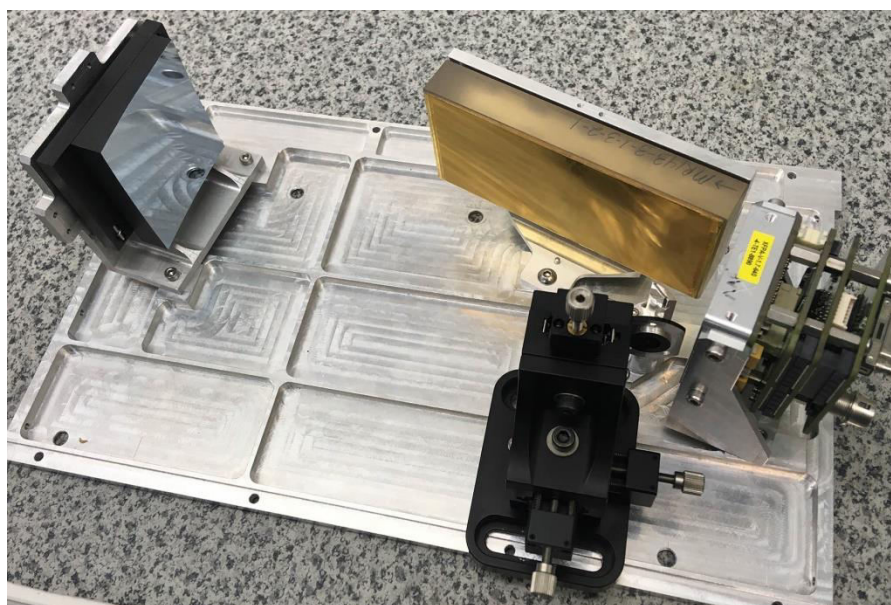


Рисунок 1.2.3.2 — Лабораторный макет эшелле-спектрометра ближнего ИК-диапазона

Пример кадра спектрометра представлен на рисунке 1.2.3.3, в данном случае установлена щель высотой 3 мм, что соответствует высоте изображения в 200 пикселей — 200 разрешимых элементов по пространственной координате. Засветка щели осуществляется лабораторными источниками света. На рисунке 1.2.3.3 представлен пример наблюдения дифракционного порядка 57 с центральной длиной волны 1354 нм. В данном диапазоне содержится много линий поглощений водяного пара, отчётливо видных на спектре в виде вертикальных полос. Небольшой изгиб линий возникает вследствие оптических искажений изображения щели и может быть скорректирован либо программно, либо использованием изогнутой щели. В дальнейшем планируется изучить изображающие свойства оптической схемы данного push-broom гиперспектрометра.

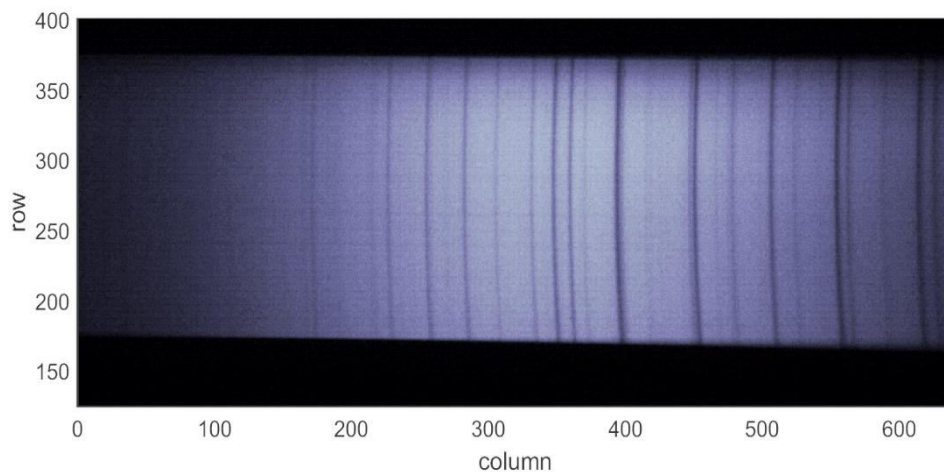


Рисунок 1.2.3.3 — Пример кадра детектора спектрометра. По горизонтальной оси — излучение раскладывается в спектр, по вертикальной — пространственное разрешение

Заключение

Представленные в настоящей главе материалы показывают, что в рамках решения основной задачи проекта — разработки новых методов измерения малых газовых составляющих в атмосфере Земли (в том числе с использованием и комбинированием новых частотных каналов и различных методик зондирования) на втором этапе (2023) получены следующие основные результаты:

- проведён детальный анализ применимости доступной спутниковой информации по МГС атмосферы для решения задачи научного мониторинга концентраций и потоков малых газовых составляющих с помощью развиваемой в рамках темы исследований оригинальной методики расчёта атмосферной динамики и балансовых оценок;
- выработаны рекомендации по отбору и применению информации, наиболее востребованной на этапе отработки и верификации развиваемой методики;
- продолжены работы по созданию отечественных приборов спутникового мониторинга газового состава атмосферы: для отработки схемотехнических решений и проверки компьютерных расчётов собран макет эшелле-спектрометра высокого разрешения.

Представленные материалы позволяют сделать вывод, что запланированные работы второго этапа (2023) в рамках основной задачи разработки новых методов измерения малых газовых составляющих в атмосфере Земли (в том числе с использованием и комбинированием новых частотных каналов и различных методик зондирования) выполнены в полном объёме.

ГЛАВА 2 НОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ ПО ПОЛЯМ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Введение

В рамках решения задачи создания новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли по полям малых газовых составляющих (в том числе, позволяющих восстанавливать детализированную пространственно-временную динамику полей, реализующиеся в них потоки) на втором этапе выполнения проекта (2023) были осуществлены следующие работы:

- отработана методика пересчёта данных спутниковых наблюдений о концентрациях МГС атмосферы в единицы полного массового содержания, необходимые для реализации технологии балансовых расчётов эмиссий и стоков МГС;
- определены и программно реализованы алгоритмы восстановления атмосферной динамики для расчёта горизонтальных потоков МГС в атмосфере;
- предложена и программно реализована методика контекстного заполнения пропусков данных в полях интегрального содержания МГС, восстанавливаемых по спутниковым данным;
- для задач визуализации и обработки потоковых данных больших объёмов создано специализированное программное обеспечение «Просмотр потоков» (Viewflow); получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [1].

Полученные результаты, в частности, были представлены в публикации [7].

2.1 Преобразование исходных данных спутниковых наблюдений в требуемые единицы измерения

Исследования, описанные в разд. 1.1, продемонстрировали существенную (с точки зрения решаемой задачи оценки баланса МГС) нехватку данных спутниковых измерений газового состава атмосферы. В качестве одного из возможных путей решения обозначенной проблемы рассмотрена возможность формирования композитных глобальных карт распределения МГС, сформированных путём объединения/комбинирования данных, поступающих с различных спутниковых приборов. При этом, как оказалось, продукты по одинаковым газовым компонентам могут предоставляться в различных единицах измерения, причём зачастую отсутствует какая-либо техническая документация, описывающая правила их взаимного пересчёта. В связи с этим были проведены исследования по возможности преобразования различных величин, характеризующих концентрацию МГС в атмосфере, с оценкой потенциальной точности этих переходов.

Как показали результаты анализа данных современных спутниковых систем мониторинга МГС в атмосфере Земли (таблица 2.1.1), а также научной периодики по данному вопросу, «классически» используемыми единицами измерений концентраций парниковых газов являются ppb (*англ.* parts per billion) и ppm (*англ.* parts per million), соответствующие усреднённой по вертикальному столбу сухого воздуха доле газовых компонент.

В формульном виде эта величина, встречающаяся под наименованиями column mean molar fraction, или column averaged dry-air mole fraction, или column averaged dry-air mixing ratio и т.п., определяется как: $X_{\text{GhG}} = N_{\text{GhG}}/N_{\text{dry-air}}$, где X_{GhG} — усреднённая по вертикальному столбу сухого воздуха доля конкретного парникового газа GhG (*англ.* Greenhouse Gas); N_{GhG} — общее число молекул конкретного парникового газа в вертикальном столбе атмосферы с основанием 1 м^2 ; $N_{\text{dry-air}}$ — общее число молекул сухого воздуха в вертикальном столбе атмосферы с основанием 1 м^2 .

Таблица 2.1.1 — Единицы измерения, в которых представляются продукты по содержанию МГС

МГС	Название прибора						
	ACE-FTS	OCO-2	TANSO-FTS	MORITT	TROPOMI	MLS	OMPS
CO ₂	ppmv (профиль)	ppmv	ppmv	—	—	—	—
CH ₄	ppmv (профиль)	—	молекул/см ²	молекул/см ²	моль/м ² , ppbv	—	—
SO ₂	—	—	—	—	моль/м ²	ppmv (профиль)	молекул/см ²
N ₂ O	ppmv (профиль)	—	—	—	—	ppmv (профиль)	—

Согласно закону Авогадро, переменные, стоящие в правой части уравнения, могут быть заменены на соответствующие значения количества вещества или занимаемые объёмы (в вертикальном столбе атмосферы с основанием 1 м²) на основании соотношений $n = N/R$ (n — количество вещества, R — универсальная газовая постоянная) и $V = V_M n$ (V — общий объём, занимаемый газом, V_M — молярный объём). Естественно, при использовании второго выражения следует учитывать зависимость входящих в него переменных от температуры и давления. При этом вне зависимости от выбранных переменных (объём, количество вещества или число молекул) численные значения параметра X_{GhG} будут совпадать (имея при этом разную размерность (моль/моль), (м³/м³) или (шт./шт.)). Переход к массовой доле газа, имеющей размерность (кг/кг), выполняется через соответствующие значения молярных масс всех компонент смеси $m = M_n$ (m — полная масса, M — молярная масса). Получаемое значение массовой доли будет отличаться от объёмной доли газа (она же — мольная доля, она же — количественная доля). При этом для обоих случаев, ввиду существенной малости получаемых значений, принято использовать в качестве единиц измерения уже упомянутые ppb и ppm. Во избежание путаницы следует обязательно указывать, о какой доле (*англ.* number, volume, mole или mass) идёт речь (что делается далеко не всегда).

В свою очередь, для оценки баланса парниковых газов (расчёта членов $Q(x, y)$ и $\vec{F}_A(x, y)$, стоящих в правой части балансового уравнения, см. разд. 1.1) требуется знание такого интегрального параметра, как масса вещества в столбе атмосферы с основанием 1 м², имеющая размерность (кг/м²).

Как видно из представленных ранее выкладок, прямой переход от измеряемого спутниками параметра X_{GhG} к искомой $M_{\text{GhG}}^{\text{TC}}$ (имеющей названия total column GhG, GhG total или vertically integrated GhG) невозможен. Для этого необходимо знать величину $N_{\text{dry-air}}$ для столба атмосферы над точкой проведения измерений. Эта информация в данных спутниковых измерений отсутствует.

Таким образом, частной задачей исследования была реализация перехода от измеряемой спутником усреднённой по столбу атмосферы объёмной доли газа X_{GhG} к массе данного газа в столбе.

В общем случае уравнение состояния реального газа описывается уравнением Ван-дер-Ваальса. Для практических вычислений обычно используют уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона): $pV = nRT$, где: p — давление, V — объём, n — количество вещества, R — универсальная газовая постоянная, T — температура.

Для модели слоистой атмосферы при постоянстве температуры и давления в пределах слоя определяемого высотой h , состояние воздуха, как идеального газа, будет определяться выражением: $p(h)V = nRT(h)$.

Количество вещества сухого воздуха, содержащегося в 1 м^3 объёма на высоте h , можно рассчитать следующим образом: $n(h) = p(h)/RT(h)$.

Тогда общее число молекул сухого воздуха в вертикальном столбе атмосферы с основанием 1 м^2 $N_{\text{dry-air}}$ может быть найдено интегрированием по всей высоте атмосферного столба: $N_{\text{dry air}} = \int_0^H n(h) dh$, где H — верхняя граница атмосферы.

Общая масса GhG газа в атмосферном столбе будет равна: $M_{\text{GhG}}^{\text{TC}} = X_{\text{GhG}} N_{\text{dry air}} M_{\text{GhG}} \times 10^{-9} \text{ кг/м}^2$ (если X_{GhG} указано в ppb), где M_{GhG} — молярная масса газа GhG.

Из представленных соотношений видно, что для выполнения перехода от усреднённой по столбу атмосферы объёмной доли газа M_{GhG} к массе данного газа в столбе необходимо знать дополнительно вертикальное распределение температуры и давления для столба атмосферы над точкой проведения измерений.

Рассмотренный подход должен корректно описывать ситуацию для сухого воздуха. Наличие водяного пара в атмосферном столбе приведёт к уменьшению полученных расчётных значений параметра $M_{\text{GhG}}^{\text{TC}}$ за счёт снижения удельной концентрации сухого воздуха. Учёт этого фактора требует наличия дополнительной информации о высотном распределении плотности водяного пара и может быть выполнен в будущем.

Для проведения тестовых расчётов на основе приведённых выражений необходимо иметь информацию о параметрах X_{GhG} , $M_{\text{GhG}}^{\text{TC}}$, $p(h)$ и $T(h)$, совмещённых в пространстве и во времени. Единственным доступным источником таких значений в глобальном объёме и на длительных интервалах времени являются базы данных реанализа. При этом, к сожалению, не удалось в пределах одной базы данных получить все интересующие параметры. Так, параметры $M_{\text{GhG}}^{\text{TC}}$, $p(h)$ и $T(h)$ были заимствованы из базы CAMS global atmospheric composition reanalysis (EAC4) (<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4?tab=overview>), а параметр X_{GhG} из базы ECMWF CAMS global greenhouse gas reanalysis (EGG4) (<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-ghg-reanalysis-egg4?tab=overview>).

Помимо этого, существенным затруднением при использовании данных реанализа является отсутствие документации, отражающей связь предоставляемых физических величин и алгоритмы их получения.

На следующей далее серии рисунков (рисунки 2.1.1–2.1.5) представлены параметры атмосферы, необходимые для проверки приведённых соотношений, в графическом виде.

На первом этапе тестирования (для отработки общих правил перехода между единицами измерения концентрации) выполнялся расчёт массы метана в столбе атмосферы через известные $p(h)$ и $T(h)$, а также профиль массовой доли метана в атмосфере $x_{\text{CH}_4}^m(h)$, указываемый в ppb и имеющий размерность (кг/кг).

Зная молярную массу сухого воздуха $M_{\text{dry-air}}$ ($28,9644 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$) и вертикальные профили давления и температуры $p(h)$ и $T(h)$, можно определить плотность сухого воздуха на высоте h : $\rho_{\text{dry air}}(h) = \frac{p(h)M_{\text{dry air}}}{T(h)R}$.

Здесь в качестве проверки можно использовать значение $1,29 \text{ кг/м}^3$, которое соответствует плотности сухого воздуха при стандартном давлении и температуре 0°C .

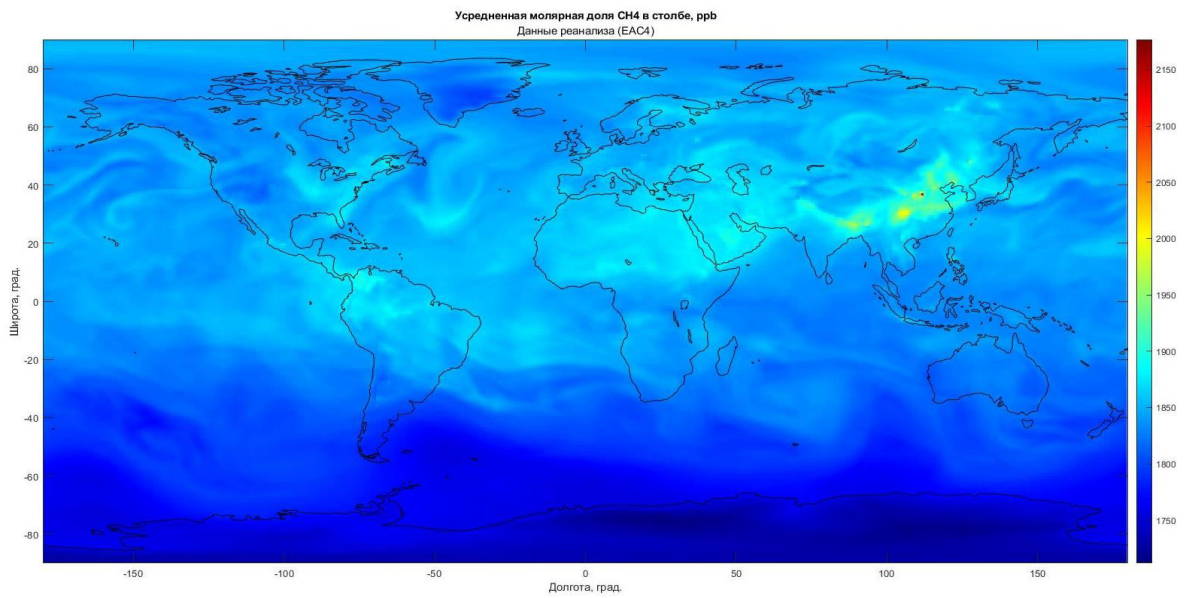


Рисунок 2.1.1 — Глобальная карта распределения параметра X_{GHG}

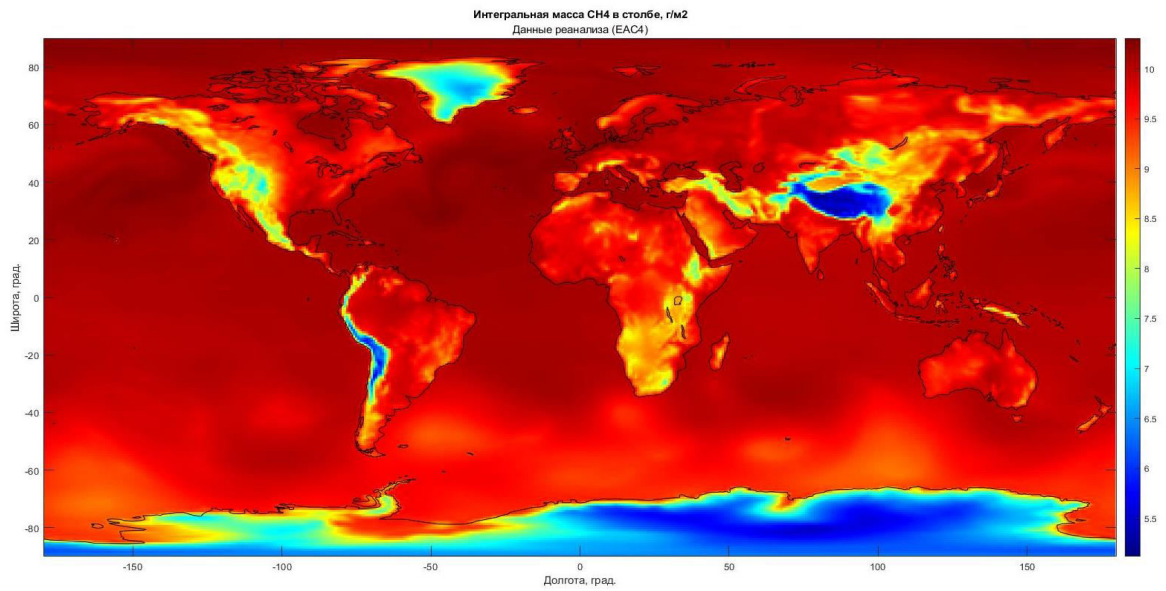


Рисунок 2.1.2 — Глобальная карта распределения параметра $M_{\text{GHG}}^{\text{TC}}$

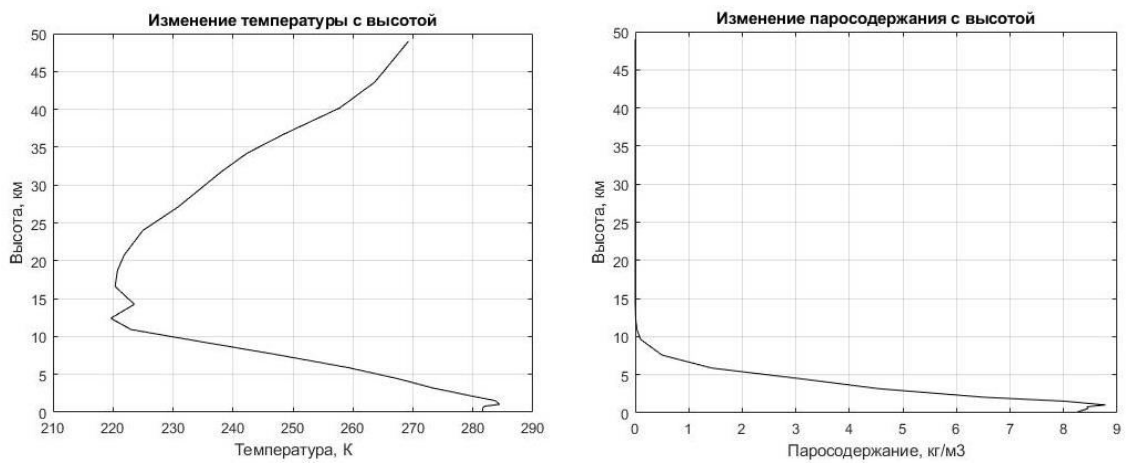


Рисунок 2.1.3 — Примеры вертикальных профилей температуры и паросодержания атмосферы по данным реанализа

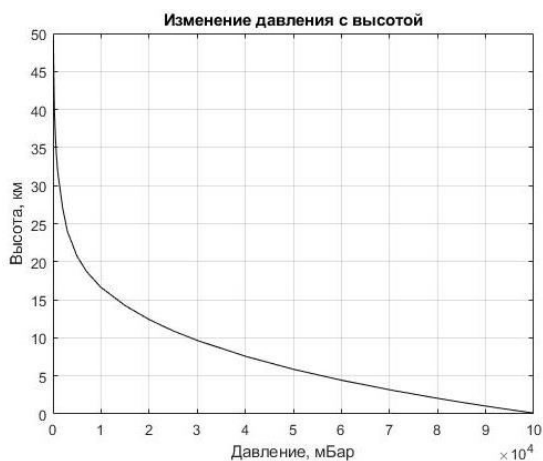


Рисунок 2.1.4 — Изменение давления в атмосфере от высоты

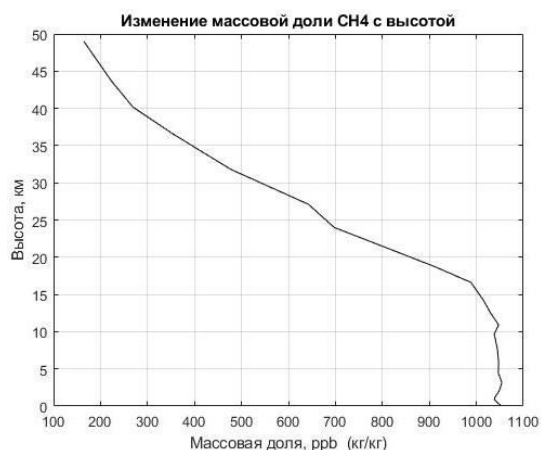


Рисунок 2.1.5 — Пример вертикального распределения массовой доли метана в атмосфере по данным реанализа

При этом удельная масса метана будет равна: $\rho_{\text{CH}_4}(h) = \rho_{\text{dry air}}(h)x_{\text{CH}_4}^m(h)$, а искомый параметр общей массы метана в столбе атмосферы $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}$ определяется интегрированием

$$\text{по высоте: } M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}} = \int_0^H \rho_{\text{CH}_4}(h) dh.$$

Результаты расчёта данного параметра для тестовых данных приведены ниже. Очевидно, что полученные значения существенно превышают оригинальные данные, приведённые в реанализе (см. рисунок 2.1.1). Оценка относительной ошибки расчёта $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}$ приведена на рисунке 2.1.7. Следует обратить внимание на тот факт, что минимум ошибки наблюдается для поверхности Мирового океана, а максимумы — в горных районах поверхности Земли. Подобный характер полученных отклонений свидетельствует о необходимости корректировки получаемых значений с учётом высоты рассматриваемой географической точки над уровнем моря.

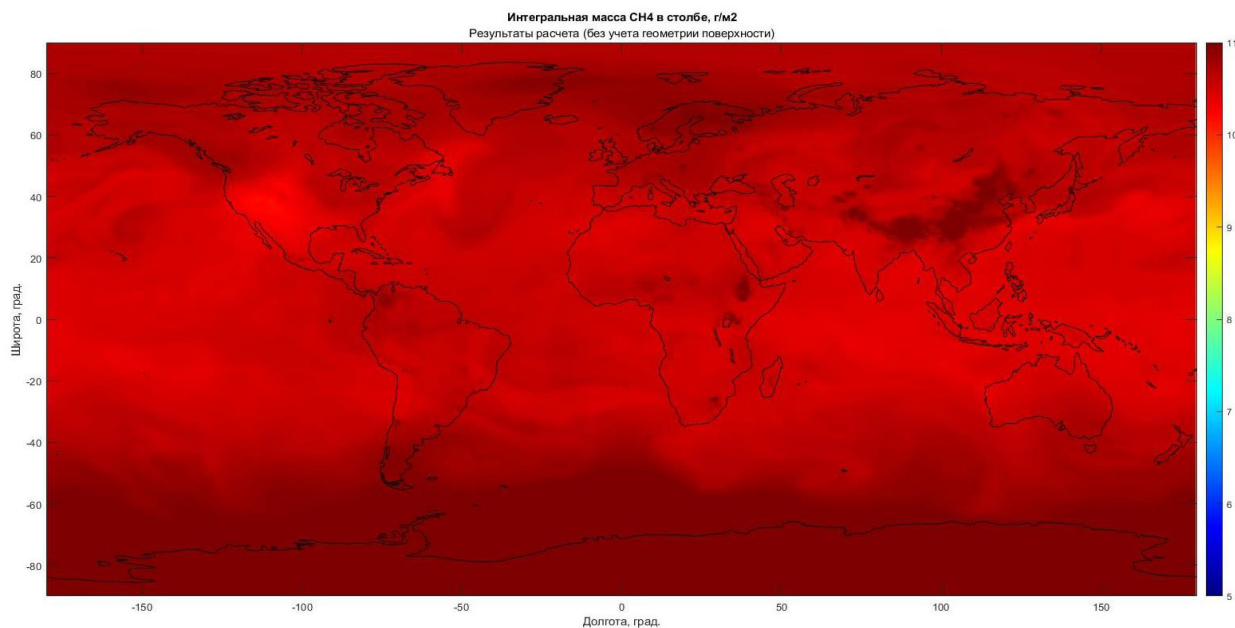


Рисунок 2.1.6 — Результаты расчёта общей массы метана в столбе атмосферы

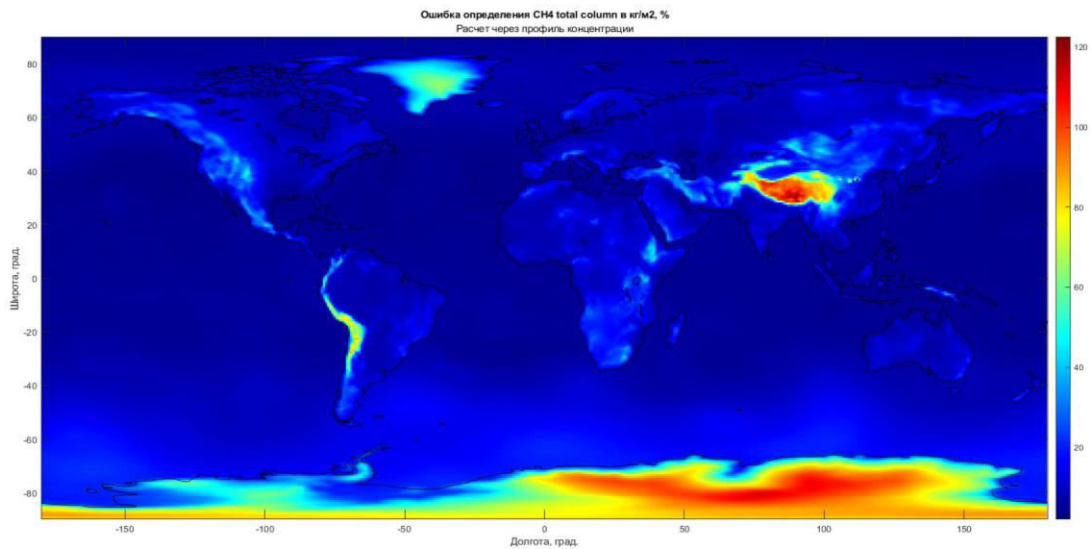


Рисунок 2.1.7 — Относительная ошибка расчёта общей массы метана в столбе атмосферы (сравнение с оригинальными данными из реанализа)

Технически это означает необходимость замены нижнего предела интегрирования в выражении $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}} = \int_{h_s}^H \rho_{\text{CH}_4}(h) dh$.

Информация о величине h_s (высоте над уровнем моря для выделенной географической точки) была получена из цифровой модели рельефа (орографические данные ECMWF ERA5), представленной на рисунке 2.1.8.

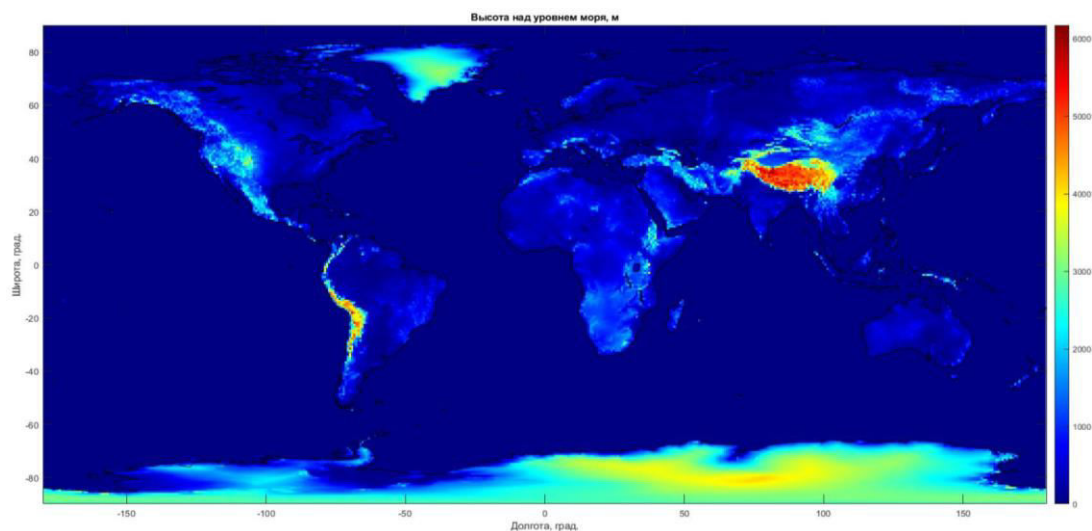


Рисунок 2.1.8 — Топографическая карта, используемая при решении тестовых задач

Учёт распределения высот над уровнем моря позволил получить результаты, представленные на рисунке 2.1.9. Также, на рисунке приведены значения относительной ошибки в сравнении с оригинальными данными из реанализа.

Из представленных изображений видно, что учёт высот земной поверхности позволил существенно снизить ошибку вычислений параметра $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}$. В большинстве случаев ошибка вычислений не превышает 5%. Существенные отклонения наблюдаются в областях высоких градиентов высоты, что может быть следствием расхождений используемой в данной тестовой задаче топографической карты и карты высотных уровней, применяемой в базах данных реанализа. Остаётся открытым вопрос о росте

расхождений южнее 40° ю.ш. К сожалению, как это было отмечено ранее, в открытом доступе не обнаружено никаких технических документов, описывающих теоретические основы, применяемые при построении баз данных реанализа и связывающих предоставляемые физические величины. Обеспечение минимизации расхождений может стать следующим этапом решения данной задачи.

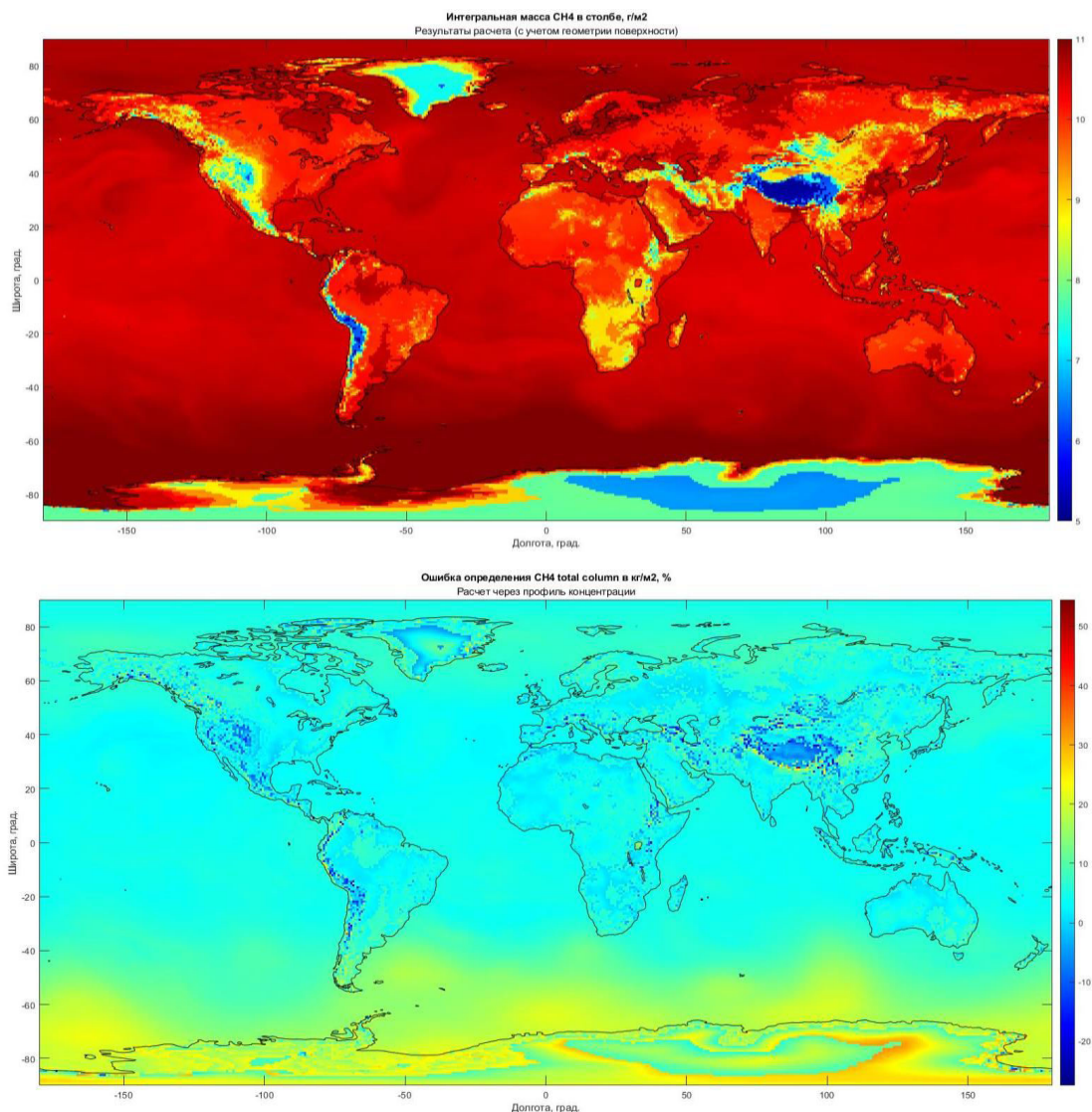


Рисунок 2.1.9 — Результаты расчёта интегральной массы метана в столбе атмосферы (вверху) и относительная ошибка по отношению к оригинальным данным из реанализа

Над большей частью суши, особенно в отсутствие высоких градиентов высот, и над большинством акваторий Мирового океана величина полученных расхождений не превышает 5%. Это означает, что переход от высотных распределений массовой концентрации метана к общему значению массы метана в столбе выполняется с удовлетворительной точностью для территорий приоритетного интереса (в том числе для территории Сибири и России в целом).

На втором этапе тестирования проводилось вычисление усреднённой по столбу атмосферы объёмной концентрации метана X_{CH_4} через известные $p(h)$ и $T(h)$, а также профиль массовой доли метана в атмосфере $x_{\text{CH}_4}^m(h)$.

На первом шаге решения необходимо определить профиль количества вещества сухого воздуха $n_{\text{dry-air}}(h)$ через уравнение состояния идеального газа $n_{\text{dry air}}(h) = \frac{p(h)}{T(h)R}$.

Далее нужно провести вычисление профиля количества вещества метана $n_{\text{CH}_4}(h)$:

$$n_{\text{CH}_4}(h) = n_{\text{dry air}}(h) \left(x_{\text{CH}_4}^m(h) \frac{M_{\text{dry air}}}{M_{\text{CH}_4}} \right),$$

где выражение, стоящее в скобках, описывает

переход от массовой доли метана к объёмной при фиксированных значениях давления и температуры; M_{CH_4} — молярная масса метана, равная $16,0425 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Искомое значение усреднённой по столбу атмосферы объёмной доли метана рассчитывается через отношение: $X_{\text{CH}_4} = \int_0^H n_{\text{CH}_4}(h) dh / \int_0^H n_{\text{dry air}}(h) dh$.

Для представления полученного значения в ppb его следует умножить на 10^{-9} . Результаты оценок параметра X_{CH_4} для тестовой задачи приведены на рисунке 2.1.10.

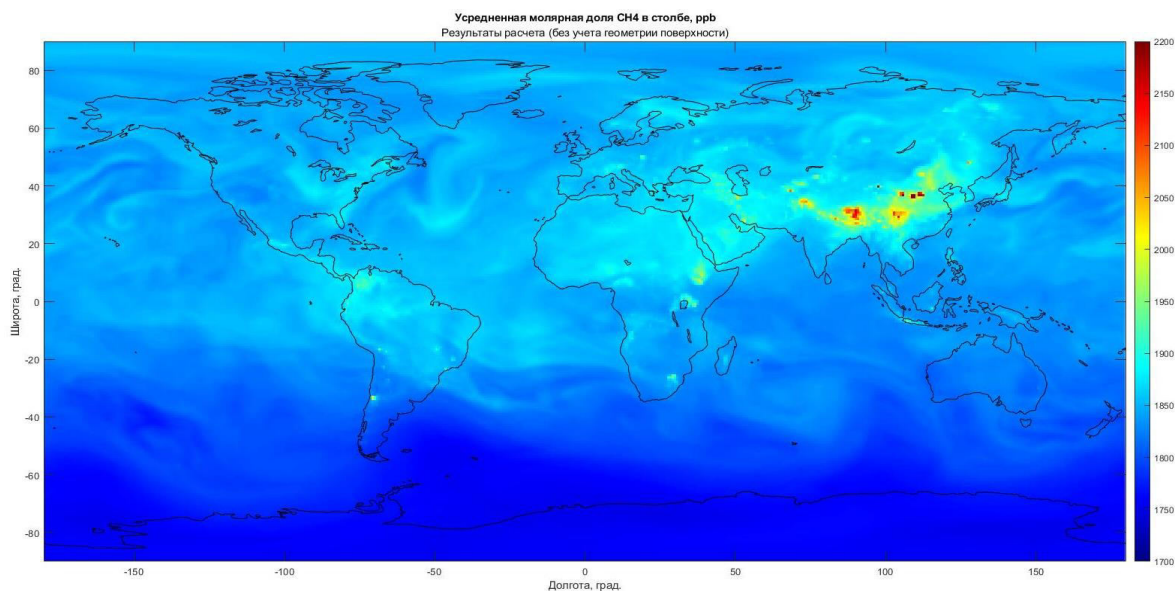


Рисунок 2.1.10 — Результаты расчёта усреднённой по столбу атмосферы объёмной доли метана в сухом воздухе

Следует отметить, что в отличие от первой тестовой задачи, результаты расчётов оказались практически идентичны оригинальным данным. Несмотря на это, к полученным результатам также была применена дополнительная коррекция с учётом высоты подстилающей поверхности. Итоговые результаты представлены на рисунке 2.1.11 вместе с относительной ошибкой их расчёта в сравнении с опорными данными из реанализа.

Как и в случае первой тестовой задачи, наибольшие расхождения наблюдаются в области сильных градиентов высоты поверхности. При этом пиковые значения ошибок расчёта усреднённой концентрации не превышают 2%. Вероятнее всего, причины наблюдаемых расхождений аналогичны описанным при обсуждении первой тестовой задачи и могут быть минимизированы при их устранении.

Это подтверждает возможность использования описанной методики перехода от профиля массовой доли метана к усреднённой по столбу атмосферы объёмной доли метана в дальнейших расчётах.

Как было показано ранее, взаимные переходы между массовыми и объёмными долями метана, а также вычисление усреднённых или интегральных по столбу атмосферы параметров требуют наличия информации о вертикальных профилях температуры и

давления в точке проведения измерений. Как указано ранее, получение такой информации не обеспечивается спутниковыми измерениями совместно с информацией о концентрации малых газовых составляющих.

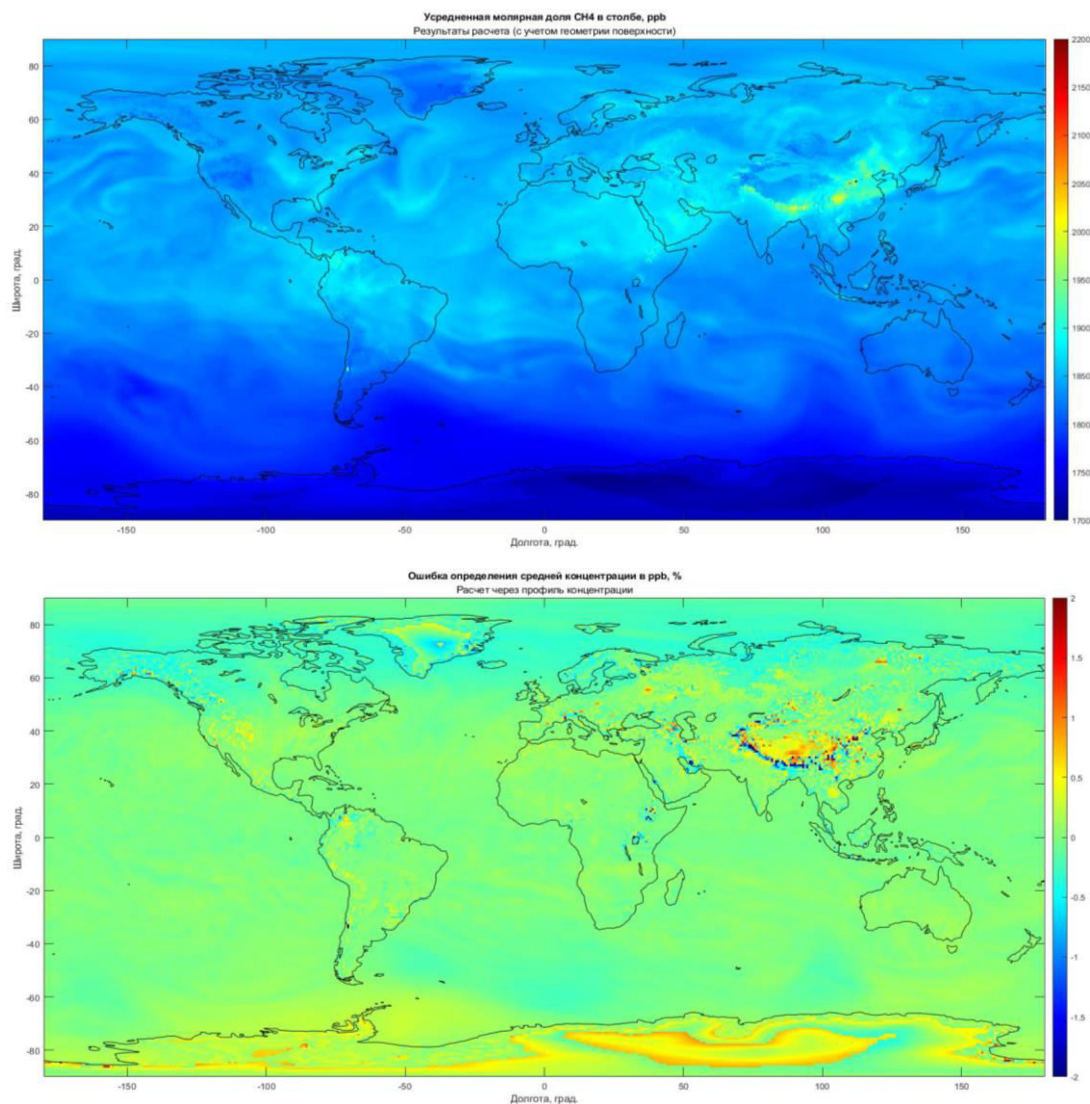


Рисунок 2.1.11 — Результаты расчёта средней объёмной доли метана в столбе атмосферы (вверху) и относительная ошибка в сравнении с оригинальными данными из реанализа

Требуется предложить подход, позволяющий с минимальными ошибками конвертировать результаты спутниковых измерений в интересующие параметры. Этой проблеме была посвящена третья часть тестовых расчётов. А именно, зная параметр усреднённой по столбу атмосферы объёмной концентрации метана (данная информация поступает, например, с прибора TROPOMI), нужно вычислить общую массу метана в столбе атмосферы.

Для решения поставленной задачи был предложен следующий подход.

В качестве замены реальным профилям температуры и давления ($p(h)$ и $T(h)$), соответствующим столбам атмосферы над выделенными географическими точками проведения измерений, был выбран стандартный профиль тропической атмосферы, характеризующийся параметрами $p_{STD}(h)$ и $T_{STD}(h)$. Для этих распределений выполнялся расчёт вертикального профиля удельной концентрации молекул сухого воздуха $n_{dry-air}(h)$. После чего с использованием представленных ранее выражений и реального значения усреднённой по вертикальному столбу атмосферы объёмной доли метана X_{CH_4}

вычислялось искомое значение общей массы метана в столбе атмосферы $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}$:

$$M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}} = X_{\text{CH}_4} \cdot 10^{-9} \int_0^H n_{\text{dry air}}(h) dh \cdot M_{\text{CH}_4}.$$

Результаты вычислений величины $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}$, а также относительная ошибка по сравнению с данными реанализа, приведены на рисунке 2.1.12.

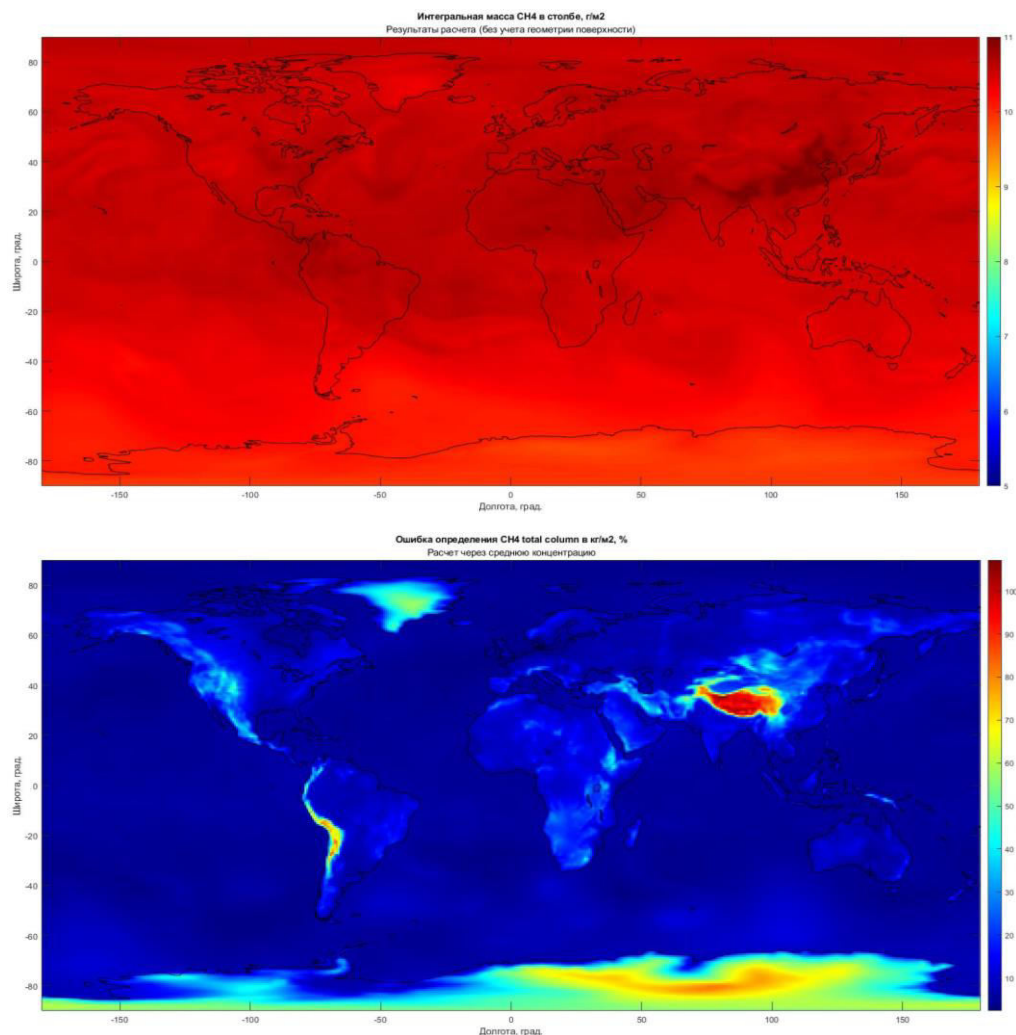


Рисунок 2.1.12 — Результаты расчёта общей массы метана в столбе атмосферы (вверху) и относительная ошибка её расчёта (внизу) (сравнение с оригинальными данными из реанализа, без учёта высоты поверхности над уровнем моря)

Как и в случае работы с реальными высотными распределениями температуры, влажности и давления, на следующем шаге был выполнен учёт геометрии подстилающей поверхности путём изменения нижнего предела интегрирования представленного выражения. Результаты данной операции приведены на рисунке 2.1.13.

Анализ полученных результатов показывает, что, как и в предыдущих случаях, в районах с малыми перепадами высот, ошибка расчёта искомого параметра не превышает 3–5%. При этом, средние ошибки вычислений оказались ниже, чем при использовании реальных профилей температуры и давления. Максимальные расхождения имеют характер выбросов и наблюдаются в областях сильных градиентов высоты.

В среднем расчётные значения оказываются всегда выше опорных, взятых из реанализа. Так, для всего объёма тестовых данных средние значения параметра $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}$ по данным реанализа составляют $9,5 \text{ г/м}^2$, в то время как аналогичное значение по расчётным

данным составляет $10,1 \text{ г/м}^2$. Эта зависимость наглядно проявляется на диаграмме разброса, представленной на рисунке 2.1.14.

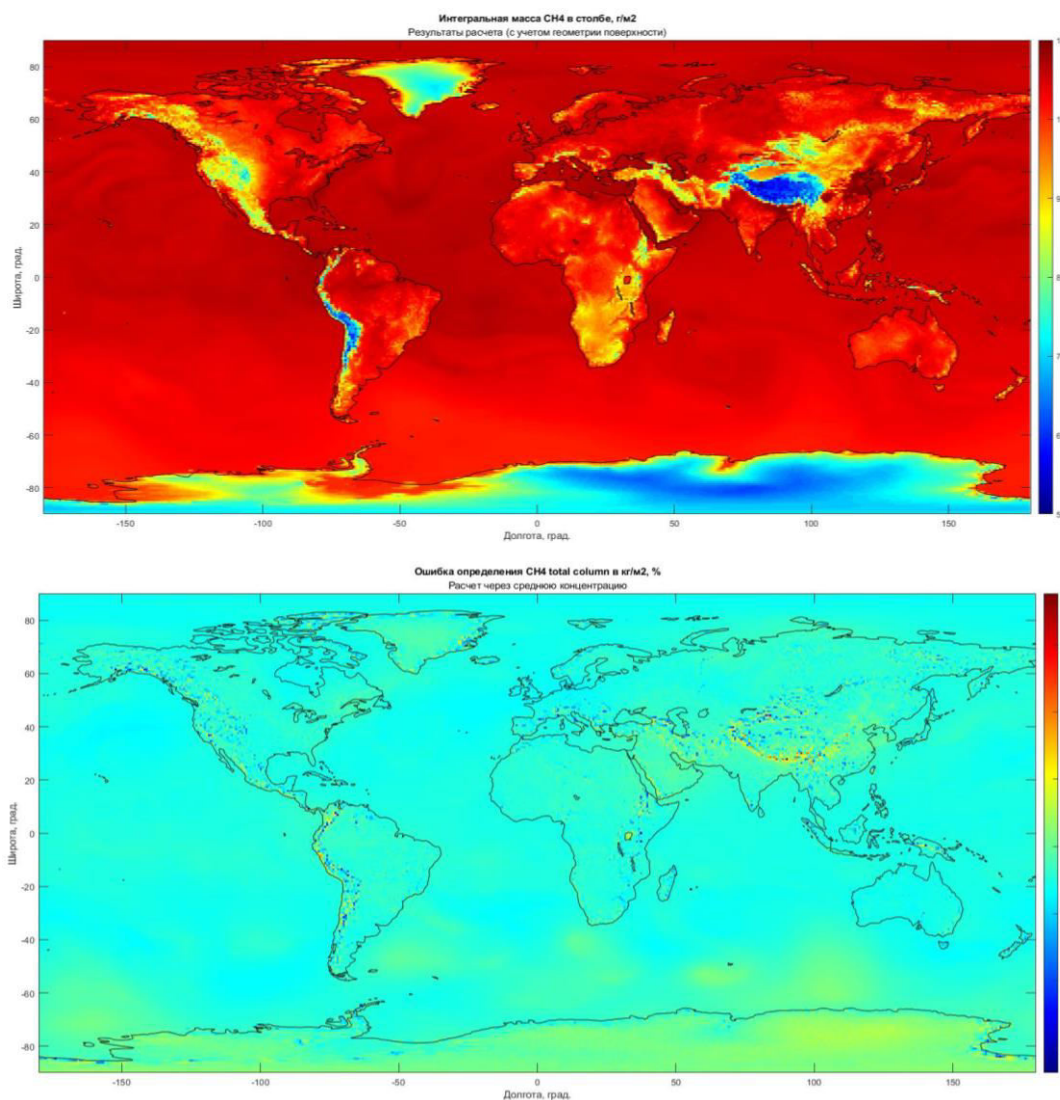


Рисунок 2.1.13 — Результаты расчёта общей массы метана в столбе атмосферы (вверху) и относительная ошибка её расчёта (внизу) (сравнение с оригинальными данными из реанализа с учётом высоты поверхности над уровнем моря)

Высокая степень корреляции сравниваемых величин и постоянство величины смещения между ними позволяют выбрать корректирующую функцию в виде линейной зависимости. Для рассмотренного тестового полигона может быть рекомендована

следующая аппроксимация: $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}(\text{fin}) = \frac{M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}(\text{calc})}{0,94} - 0,0012$, позволяющая обеспечить

максимальное совпадение расчётных значений параметра $M_{\text{CH}_4}^{\text{TC}}$ с опорными данными, взятыми из реанализа. Результат коррекции представлен на рисунке 2.1.15.

Обобщая результаты тестовых расчётов, можно с уверенностью сказать, что в ходе проделанной работы удалось выработать схему обработки данных спутникового мониторинга концентрации малых газовых составляющих, в частности — метана, позволяющую с высокой точностью проводить пересчёт измеряемых параметров в величины, необходимые для оценки потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли.

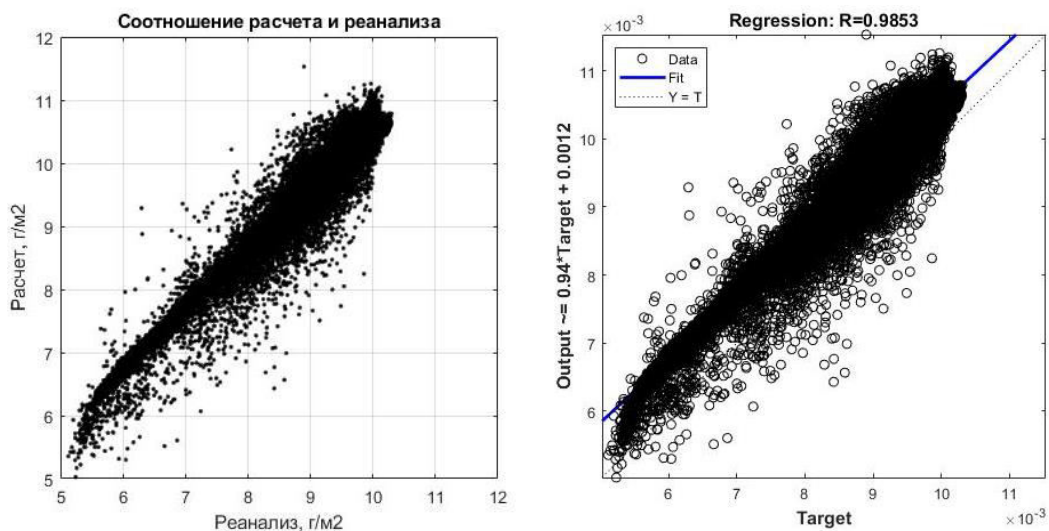


Рисунок 2.1.14 — Диаграмма разброса, демонстрирующая соотношение расчётных и опорных значений общей массы метана в столбе атмосферы (слева). Справа — результат подбора аппроксимирующей функции

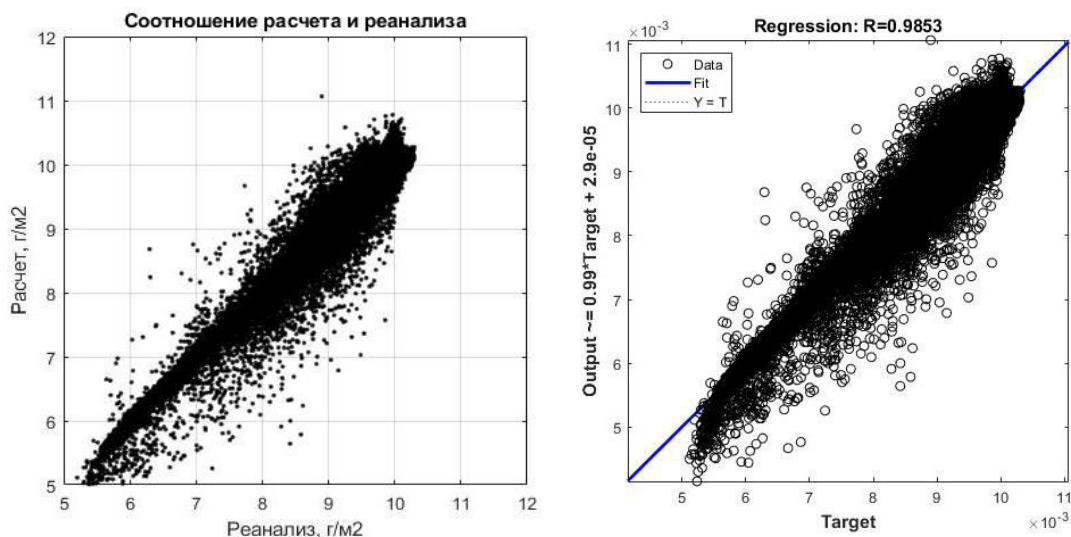


Рисунок 2.1.15 — Диаграмма разброса, демонстрирующая соотношение скорректированных расчётных и опорных значений общей массы метана в столбе атмосферы (слева). Справа — результат подбора аппроксимирующей функции

Источники наблюдаемых ошибок можно разделить на две группы. К первой группе (недостатки используемых тестовых данных) следует отнести отсутствие технической документации, детально описывающей методические особенности формирования данных реанализа, в связи с чем оказывается невозможным точное воспроизведение результатов пересчёта одних физических величин в другие. Вторая группа (погрешности расчёта) включает в себя приближения, используемые в предложенном подходе, а также технические аспекты его программной реализации. В частности, несмотря на малый вклад водяного пара в оценки объёмных отношений газовых составляющих, его учёт необходимо реализовать в будущем. Другим немаловажным аспектом является необходимость улучшения вертикального разрешения используемых переменных по высоте. В силу экспоненциального характера большинства из них, это должно существенно повысить точность интегральных оценок. Также следует рассмотреть дифференцированный подход к выбору типа стандартного профиля атмосферы в рамках предложенного подхода.

Обобщая результаты, полученные по данному направлению исследований, можно сделать вывод, что пересчёт спутниковых данных, представленных в разных единицах измерения, основанный на классическом уравнении состояния идеального газа и дополненный статистическими аппроксимациями, можно выполнить с необходимой точностью. При этом несмотря на отсутствие полного набора параметров, требуемых для решения поставленной задачи, привлечение их модельных (среднестатистических) распределений позволяет обеспечить точность пересчёта на уровне относительной погрешности 5 %. В свою очередь, это открывает новые возможности построения глобальных карт содержания МГС в атмосфере, основанные на комбинировании данных различных спутниковых систем.

2.2 Выбор и реализация алгоритмов оптического потока для восстановления горизонтальных потоков газа

Одним из новых подходов, предложенных в рамках работы над темой в 2023 г., является применение алгоритмов технического зрения для восстановления горизонтальных потоков малых газовых составляющих/парниковых газов в атмосфере на основе данных ДЗЗ. Имея последовательность результатов обработки наблюдений, представляющих собой поля концентраций на равномерной сетке и с равномерной периодичностью, можно трактовать эти данные, как набор изображений, размеры которых соответствуют размерам сетки вычислений, а интенсивность (яркость) в каждой точке пропорциональна величине газовой концентрации. Это позволяет применить к такой последовательности измерений алгоритмы анализа оптического потока. Указанные алгоритмы дают оценку видимого перемещения отдельных точек и фрагментов изображения, устанавливая соответствия между их положениями на парах последовательных изображений. Так формируется векторное поле оценок смещений — оптический поток. Он, в свою очередь, может быть использован для оценки скорости горизонтальных потоков в полях концентраций газовых компонент после пересчёта смещений из координат расчётной сетки в реальные расстояния и деления на интервал времени между последовательными наблюдениями. Алгоритмы оценки оптического потока были изначально разработаны и применялись в основном для работы с последовательностью видеок кадров (видеорядом), поэтому в общем случае требуется подготовка данных к такой обработке. Динамический диапазон величины, кодирующей яркость изображения, может не соответствовать динамическому диапазону величины исходного параметра. Это может быть исправлено масштабированием до требуемого диапазона. Как показали многократные численные эксперименты, даже в случае масштабирования в 8-битный одноканальный формат, динамического диапазона изображений всё ещё достаточно для адекватной оценки оптического потока. А в отдельных случаях полезно применить общее масштабирование для пар соседних кадров, что повышает соответствие одному из принятых в таких алгоритмах допущений. Также следует учитывать, что классические алгоритмы анализа оптического потока построены для равномерной прямоугольной сетки данных. Далее предполагается, что работа проводится именно на такой сетке с последующей возможной коррекцией полученных величин (интерполяцией) в соответствии с реальными положениями точек измерений.

2.2.1 Основы алгоритмов оптического потока

Предлагается рассматривать изображение как функцию интенсивности от координат $I(x, y)$ и, соответственно, последовательность изображений — как функцию от координат и времени $I(x, y, t)$, это также может быть записано как $I(\bar{x}, t)$, где $\bar{x} = (x, y)^T$. Задача состоит в том, чтобы найти вектор смещения $\bar{u} = (u, v)^T$ для каждой точки, такой, чтобы он соответствовал относительному положению каждого перемещённого фрагмента на новом изображении по сравнению с исходным его положением. При этом принимается

упрощающее предположение — считается, что величина яркости точки не изменится при перемещении (уравнение (2.2.1.1)). Когда яркость точек кодирует величину газовой концентрации, такое упрощение, вообще говоря, неверно, однако практика показывает, что оно обеспечивает адекватные результаты расчёта оптического потока, особенно коротких интервалах времени между наблюдениями.

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t). \quad (2.2.1.1)$$

На коротких интервалах функцию можно приблизить при помощи разложения в ряд Тейлора до первой производной.

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{dI}{dx} \Delta x + \frac{dI}{dy} \Delta y + \frac{dI}{dt} \Delta t + O(\Delta x^2, \Delta y^2, I''). \quad (2.2.1.2)$$

При этом стоит отметить, что, если пренебречь компонентами более высокого порядка $O(\Delta x^2, \Delta y^2, I'')$, то из выражений (2.2.1.1) и (2.2.1.2) можно получить уравнение

$$\frac{dI}{dx} \Delta x + \frac{dI}{dy} \Delta y + \frac{dI}{dt} \Delta t = 0. \quad (2.2.1.3)$$

Далее, разделив на Δt , можно перейти к выражению смещений в виде скорости $V_x = dx/dt$, $V_y = dy/dt$. Надо также отметить, что $(dy/dt)\Delta t$ представляет собой изменение яркости в текущей рассматриваемой точке. И таким образом в уравнении (2.2.1.3) получается два неизвестных — собственно искомые Δx , Δy . Поскольку одного уравнения с двумя неизвестными недостаточно для получения однозначного решения, различные реализации алгоритмов анализа оптического потока применяют дополнительные условия и ограничения, обеспечивающие единственность решения.

2.2.2 Метод Лукаса – Канаде

Один из наиболее известных классических методов определения оптического потока был предложен Б. Лукасом (*англ.* B.D. Lucas) и Т. Канаде (*англ.* T. Kanade) в 1981 г., его развитие и модификации предложили также Бейкер С. с соавторами (*англ.* Baker S.) и Буге Ж.-Ю. (*англ.* Bouguet J.-Y.). Он основан на предположении, что объекты на изображении представлены более чем одним пикселем и, соответственно, смещение для соседних точек будет равным или близким. Поэтому рассматривается окно размера m в окрестностях текущей точки, и это даёт $n = m \times m$ уравнений. Для краткости обозначим частные производные $I'_x = dI/dx$, $I'_y = dI/dy$, $I'_t = dI/dt$, оцениваемые конечно-разностными выражениями на регулярной сетке. Тогда для всех точек окна $p = p_1, \dots, p_n$ получится

$$I'_x(p_i)dx + I'_y(p_i)dy = -I'_t(p_i), \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.2.2.1)$$

Полученная переопределённая система в общем случае не имеет единственного строгого решения, но может быть получено оптимальное приближенное решение, например, по критерию метода наименьших квадратов. Можно перейти к матричной форме и ввести новые обозначения для смещений $dx = u$, $dy = v$, которые будут использоваться далее:

$$A = \begin{bmatrix} I'_x(p_1) & I'_y(p_1) \\ I'_x(p_2) & I'_y(p_2) \\ \vdots & \vdots \\ I'_x(p_n) & I'_y(p_n) \end{bmatrix}, \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} -I'_t(p_1) \\ -I'_t(p_2) \\ \vdots \\ -I'_t(p_n) \end{bmatrix}. \quad (2.2.2.2)$$

Тогда в матричной форме получим уравнение:

$$A\bar{u} = b, \quad (2.2.2.3)$$

из которого следует:

$$A^T A\bar{u} = A^T b, \quad (2.2.2.4)$$

$$\bar{u} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2.2.2.5)$$

и в итоге:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i I'_x(p_i)^2 & \sum_i I'_x(p_i)I'_y(p_i) \\ \sum_i I'_y(p_i)I'_x(p_i) & \sum_i I'_y(p_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_i I_x(p_i)I_t(p_i) \\ -\sum_i I_y(p_i)I_t(p_i) \end{bmatrix}. \quad (2.2.2.6)$$

Также для повышения влияния центральной точки в рассматриваемом окне вводят диагональную матрицу весовых коэффициентов W (диагональная матрица $n \times n$), распределённых так, чтобы наибольший из них соответствовал центральной точке (например, распределённых по Гауссу).

$$\begin{aligned} A^T W A \bar{u} &= A^T W b \\ \bar{u} &= (A^T W A)^{-1} A^T W b \end{aligned} \quad (2.2.2.7)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i w_i I'_x(p_i)^2 & \sum_i w_i I'_x(p_i)I'_y(p_i) \\ \sum_i w_i I'_y(p_i)I'_x(p_i) & \sum_i w_i I'_y(p_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_i w_i I_x(p_i)I_t(p_i) \\ -\sum_i w_i I_y(p_i)I_t(p_i) \end{bmatrix} \quad (2.2.2.8)$$

Для решения требуется, чтобы матрица $A^T A$, а в случае использования взвешенной матрицы, $A^T W A$, была положительно определена с определителем, существенно отличным от 0. Это условие не выполняется в случае так называемой проблемы апертуры, когда периодически повторяющийся или однородный фон не позволяет определить направление движения. Также корректной разрешимости препятствует высокий шум, мешающий поиску соответствия исходной и сдвинутой точек.

Помимо этого, метод, использующий приближение всего из одной производной в виде разностей, корректно работает только в условиях небольших смещений. Для преодоления этого недостатка используется многомасштабный метод: строится так называемая пирамида изображений. То есть рассматривается ряд изображений более низкого разрешения, например, в случае использования коэффициента 2, для изображения $a \times b$, рассматриваются $(a/2^l) \times (b/2^l)$ для $l = 0, \dots, k-1$ в пирамиде с k уровнями, где $l = 0$ соответствует исходному изображению, а $l = k-1$ – наиболее грубому разрешению. При этом результаты вычисления потока на более низком разрешении соответствуют большим величинам смещения и передаются в уровни с более высоким разрешением в качестве исходного приближения для уточнения.

2.2.3 Оценка применимости метода Лукаса – Канаде

Тем не менее, применимость метода всё ещё остаётся ограниченной. В стандартной реализации (принятой, например, в используемой библиотеке `Opencv` (*англ.* Open Source Computer Vision Library)), он реализован в классе разреженных (*англ.* sparse), т.е. работающих не на каждой точке растра, а на наборе заданных точек (в противоположность так называемым плотным (*англ.* dense), вычисляющим поток во всех точках). Рекомендуются использование специальной функции для выбора подходящих точек. Также имеются методы оценки результатов на корректность, сигнализирующие о возможной ошибке. При этом, однако, численные эксперименты на реальных и модельных данных выявили высокий процент ошибок, не определяемых вышеупомянутой функцией фильтрации (рисунок 2.2.3.1).

Несмотря на высокий процент ошибок, на искусственном примере с движением тестового объекта мода значений найденных векторов с хорошей точностью совпадает с ожидаемой величиной для небольших перемещений, но показывает менее качественные результаты на больших смещениях и участках с низким контрастом.

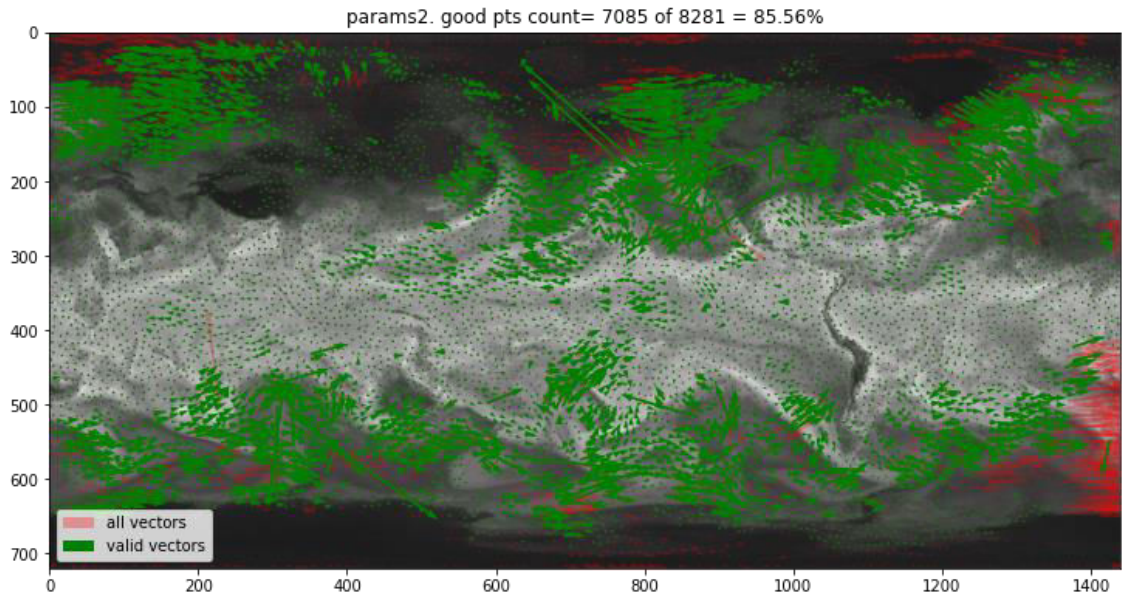


Рисунок 2.2.3.1 — Тестирование метода Лукаса-Канаве на реальном изображении. Точки отмечают все места, где проводилась оценка. Красным отмечены векторы, оцененные стандартной функцией как некорректные

2.2.4 Метод Farneback

Метод, предложенный Гуннаром Фарнебеком (*швед.* Gunnar Farneback), использует уже квадратичную форму аппроксимации,

$$I_i(x) = \bar{x}^T A_1 \bar{x} + \bar{b}_1^T \bar{x} + c_1, \quad (2.2.4.1)$$

где A — симметричная матрица \bar{b} — вектор, и c — скаляр. $\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$. Для следующего

изображения $I_2(\bar{x})$, представленного, как исходное изображение со смещением \bar{d} : $I_2(x) = I_1(\bar{x} - \bar{d})$, можно записать

$$\begin{aligned} I_2(x) &= (\bar{x} - \bar{d})^T A_1 (\bar{x} - \bar{d}) + \bar{b}_1^T (\bar{x} - \bar{d}) + c_1 = \\ &= \bar{x}^T A_1 \bar{x} + (\bar{b}_1 - 2A_1 \bar{d})^T \bar{x} + \bar{d}^T A_1 \bar{d} - \bar{b}_1^T \bar{d} + c_1 = \bar{x}^T A_2 \bar{x} + \bar{b}_2^T \bar{x} + c_2, \end{aligned} \quad (2.2.4.2)$$

где

$$A_2 = A_1, \quad \bar{b}_2 = \bar{b}_1 - 2A_1 \bar{d}, \quad c_2 = \bar{d}^T A_1 \bar{d} - \bar{b}_1^T \bar{d} + c_1. \quad (2.2.4.3)$$

Если A_1 обратима, то второе уравнение в выражениях (2.2.4.3) можно решить относительно \bar{d} .

$$2A_1 \bar{d} = -(\bar{b}_2 - \bar{b}_1), \quad \bar{d} = -\frac{1}{2} A_1^{-1} (\bar{b}_2 - \bar{b}_1). \quad (2.2.4.4)$$

Рассматривая вместо единого смещения \bar{d} векторное поле смещения $\bar{d}(\bar{x})$, и применив для A оценку:

$$A(\bar{x}) = \frac{A_1(\bar{x}) + A_2(\bar{x})}{2}, \quad (2.2.4.5)$$

а также обозначив

$$\Delta \bar{b}(\bar{x}) = -\frac{1}{2} (\bar{b}_2(\bar{x}) - \bar{b}_1(\bar{x})), \quad (2.2.4.6)$$

можно записать:

$$A(\bar{x}) \bar{d}(\bar{x}) = \Delta \bar{b}^T. \quad (2.2.4.7)$$

Также, аналогично предыдущему случаю, для уменьшения шумов предполагается, что соседние точки движутся примерно одинаково. Рассматривается окрестность текущей

точки и если проинтегрировать $|A(\bar{x})\bar{d}(\bar{x}) - \Delta b^T|^2$ по всей окрестности с аналогичными весовыми коэффициентами, увеличивающими значимость центральной точки $w(\Delta\bar{x})$, можно найти оптимальное значение $\bar{d}(\bar{x})$, минимизирующее ошибку.

$$\bar{d}(\bar{x}) = \left(\sum w A^T A \right)^{-1} \sum w A^T \Delta \bar{b}. \quad (2.2.4.8)$$

При этом сама минимальная ошибка

$$e(\bar{x}) = \left(\sum w \Delta \bar{b}^T \Delta \bar{b} \right) - \bar{d}(\bar{x})^T \sum w A^T \Delta \bar{b} \quad (2.2.4.9)$$

может быть использована, как величина, обратная уровню достоверности оценки.

Также предлагается повышение надёжности при помощи нескольких приёмов:

- масштабирование A и $\Delta \bar{b}$,
- рассмотрение параметрического поля смещения,
- учёт априорной информации о смещении (при наличии).

И аналогично методу Лукаса – Канаде, используется многомасштабный метод, позволяющий учитывать смещения разной величины по пирамидальному принципу.

2.2.5 Оценка применимости метода *Farneback*

Тестирование алгоритмов проводилось в серии численных экспериментов синтезом специальных модельных примеров. В частности, в одном из примеров на фоне, в качестве которого использовались изображения восстановленных по данным реальных измерений полей концентрации, был нанесён искусственный «объект» в виде круга фиксированной яркости. На последовательных (во времени) изображениях объект перемещался с заранее заданной возрастающей скоростью под углом 45° , т.е. с равными по модулю dx и dy на северо-восток, так что в координатах изображения получалось перемещение с положительной величиной dx и отрицательной, но равной по модулю dy . Такой тест позволил оценить корректность оценки перемещения при различных величинах сдвига, а также подробно наблюдать поведение алгоритма в условиях высокого контраста или, наоборот, монотонного участка изображения.

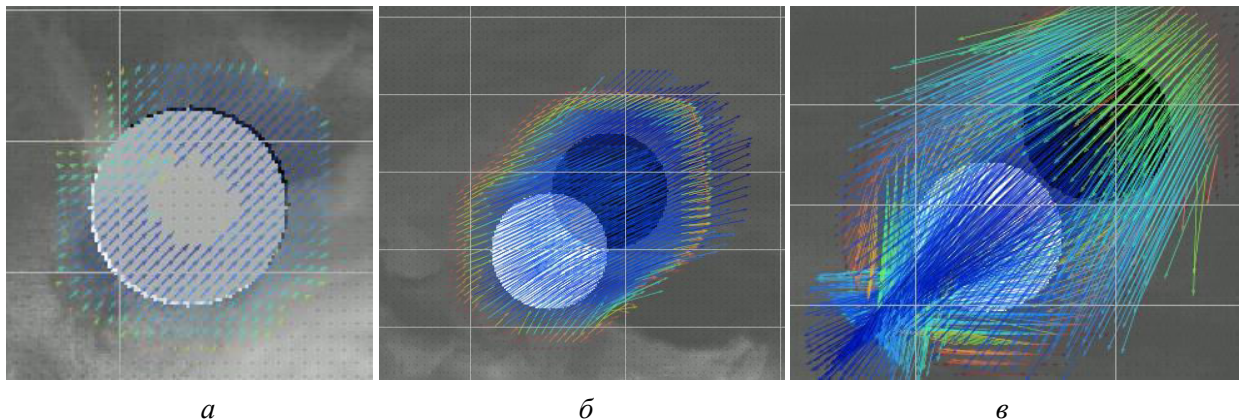


Рисунок 2.2.5.1 — Расчёт векторов смещения модельного объекта при его по сдвиге по горизонтали и вертикали: a — на 1 узел сетки; b — на 31 узел сетки; v — на 44 узла сетки

При тестировании алгоритмов (использовалась реализация на `opencv`), лучшие показатели точности обеспечил метод Лукаса – Канаде, особенно при средних масштабах смещений. Дополнительно его преимуществом является то, что он реализован как плотный. Однако остаётся ряд проблем, в основном связанных с работой в гладких и малококонтрастных областях, порождающих шум и артефакты в рассчитанном векторном поле потока. Так, начиная с некоторого порога ожидаемой величины перемещения,

получаемые оценки, оставаясь формально верными, перестают корректно описывать наблюдаемые перемещения, интерпретируя изменения как «растворение» объекта в схожих областях более мелкого размера (рисунок 2.2.5.1б). Также он склонен «не замечать» перемещение однородных объектов (что, впрочем, вполне объяснимо проблемой апертуры в условиях, когда окно меньше объекта) (рисунок 2.2.5.1а). При увеличении перемещения пропорционально увеличивается область, которую алгоритм относит к объекту (рисунок 2.2.5.1б, в).

2.2.6 Method dense inverse search (DIS)

Наиболее современный из рассмотренных методов предложен Kroeger T. с соавторами. Его основное преимущество — эффективный поиск соответствия фрагментов. Рассматриваются фрагменты исходного изображения I_t в скользящем окне размером $m \times m$ пикселей, и методом градиентного поиска находятся наиболее вероятные соответствия им в виде фрагментов того же размера следующего рассматриваемого изображения I_{t+1} . Причём для поиска используется модификация обратного алгоритма Лукаса – Канаде. Находится такой \bar{d} , чтобы в окне минимизировать сумму квадратов разностей между отождествляемыми фрагментами.

$$\bar{d} = \operatorname{argmin}_d \sum_x \left[I_{t+1}(x + \bar{d}') - T(x) \right]^2. \quad (2.2.6.1)$$

Оригинальный алгоритм Лукаса – Канаде требовал дорогостоящей переоценки гессиана деформации на каждой итерации. Вместо этого предложено оптимизировать обратную целевую функцию

$$\sum_x \left[T(x - \Delta \bar{d}) - I_{t+1}(x + \bar{d}) \right]^2, \quad (2.2.6.2)$$

что избавляет от необходимости расчёта градиентов изображения $I_{t+1}(x + \bar{d})$ и повторного вычисления якобиана и гессиана на каждой итерации и даёт в результате значительный прирост скорости вычисления. При этом также используется нормализация каждого фрагмента по среднему для повышения устойчивости решения.

Как и в вышеописанных случаях, используется многомасштабный подход, но вместо независимой оптимизации фрагментов вычисляется промежуточное плотное поле потока и повторно инициализируются фрагменты на каждом уровне, от самого грубого уровня пирамиды изображений к самому точному, на каждом из которых и проводится поиск оптического потока.

Также важным фактором является используемое в алгоритме быстрое вариационное уточнение, вводящее объединённый критерий гладкости в виде функции штрафа, учитывающего интенсивность и постоянство градиента.

2.2.7 Оценка применимости метода dense inverse search (DIS)

Благодаря всем рассмотренным особенностям среди рассмотренных вариантов данный алгоритм при тестировании показал наилучшие результаты.

Плотный поток, рассчитываемый на каждом уровне пирамиды изображений, позволяет воспроизвести с хорошей точностью смещения разных масштабов. Учёт критерия гладкости и постоянства градиента обеспечивает устойчивость и относительно малое количество ошибок и выбросов. Оптимизация при помощи обратной целевой функции даёт достаточно высокое быстродействие.

Также этот метод, единственный из рассмотренных, способен восстанавливать перемещение пикселей внутри однородного движущегося объекта даже на небольших перемещениях (рисунок 2.2.7.1а), что важно с учётом характера спутниковых данных. Стоит отметить хорошую точность оценки перемещения вплоть до самого большого из имеющихся в модели масштабов (55 узлов сетки по горизонтали и вертикали, что

соответствует $\sim 12,75^\circ$ по долготе и широте или общему смещению более чем на 18 географических градусов) (таблица 2.2.7.1). За счёт всего этого алгоритм показывает, в частности, самый низкий уровень ошибки пропуска движения (нулевых значений скорости) в выборке (рисунок 2.2.7.2).

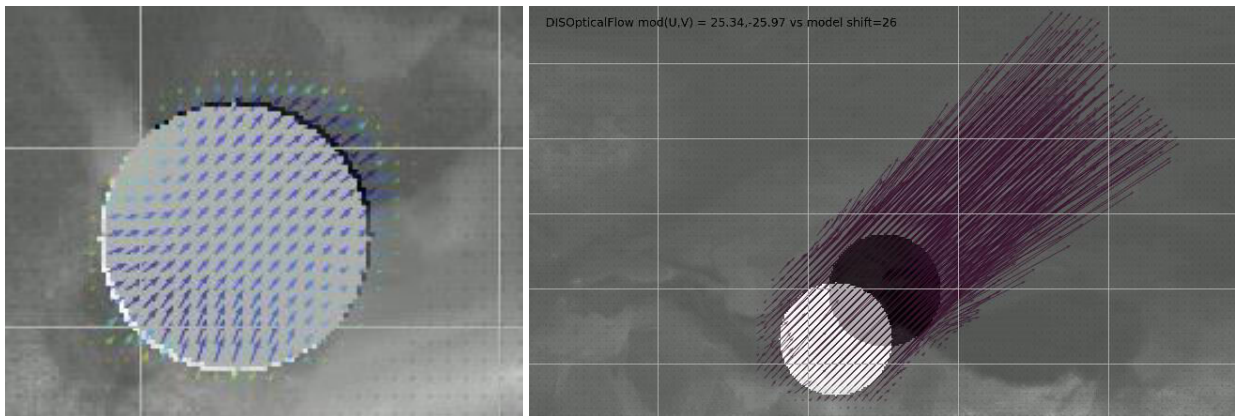


Рисунок 2.2.7.1 — Расчёт векторов смещения модельного объекта при его по сдвиге по горизонтали и вертикали: *a* — на 1 узел сетки; *б* — на 26 узлов сетки

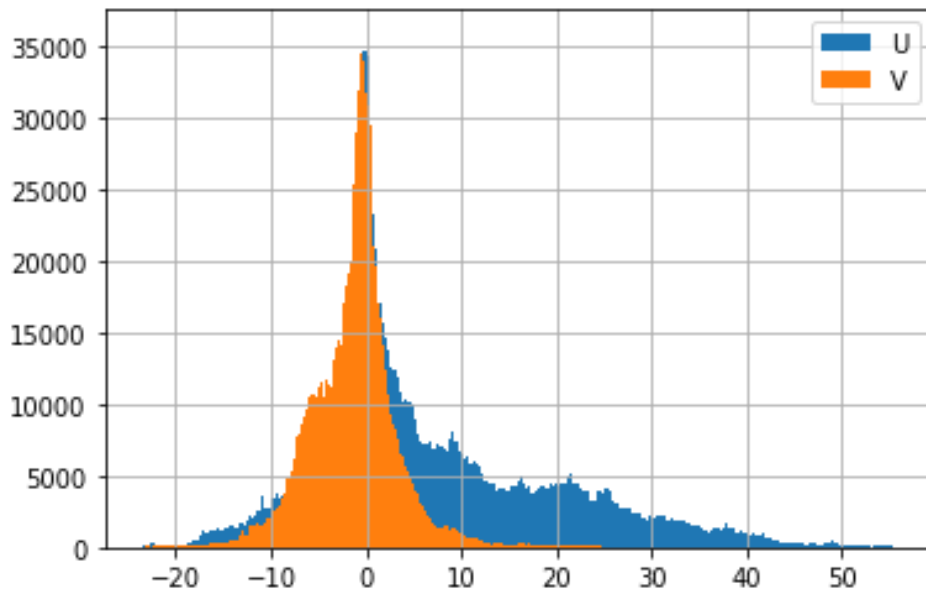


Рисунок 2.2.7.2 — Гистограмма распределения значений компонентов векторов (на реальном изображении)

Таблица 2.2.7.1

Мода оценки смещения		Модельное смещение (dx = dy)
dx	dy	
0,8006	-1,095	1
1,605	-2,336	2
0,8008	-3,912	4
5,688	-6,017	7
9,165	-8,837	9
12,66	-12,54	13
14,88	-17,46	17
20,08	-21	21

Мода оценки смещения		Модельное смещение (dx = dy)
dx	dy	
25,34	-25,97	26
30,9	-31	31
36,76	-36,74	37
44	-43,98	44
47,19	-50,92	51

Таким образом, применительно к задачам проекта, следует рекомендовать к использованию данный алгоритм.

2.3 Заполнение пропусков данных в полях интегрального содержания МГС на примере данных TROPOMI

Серьёзной проблемой при работе с данными ДЗЗ о концентрации парниковых газов и малых газовых составляющих является наличие областей пропуска данных. Одной из главных причин этой проблемы является специфика измерений в ИК-диапазоне длин волн. Надёжное восстановление значений газовой концентрации невозможно в условиях облачности и над некоторыми типами поверхности, поэтому даже при благоприятных условиях относительная площадь суточного покрытия Земли пригодными для обработки данными измерениями составляет около 50–70%. На рисунке 2.3.1 представлен пример суточной карты интегрального содержания CO по данным TROPOMI. (Как показано в Разделе 1, именно суточные композиты интегрального содержания CO инструмента TROPOMI наилучшим образом удовлетворяют требованиям к данным для восстановления вертикальных потоков МГС (см. разд. 1.1), в связи с чем они выбраны для отработки развиваемой методики балансовых оценок).

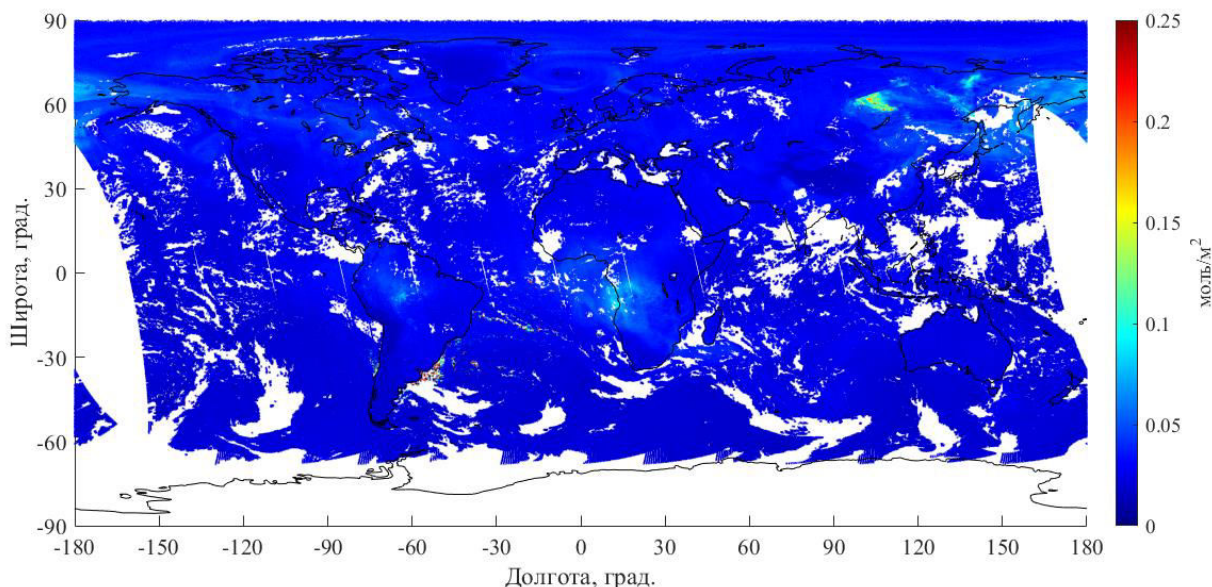


Рисунок 2.3.1 — Суточный композит интегрального содержания CO, восстановленной прибором TROPOMI. Белые области соответствуют отсутствию данных

Непосредственное применение алгоритмов расчёта оптического потока к такого рода фрагментированным данным приведёт к тому, что области с пропусками данных будут трактоваться как движущиеся объекты. Отслеживание кажущегося движения таких ложных объектов на фоне менее контрастных реальных фрагментов будет приводить к значительным артефактам. Поэтому требуется сформировать изображение, в котором пропуски будут закрыты гладким образом для минимизации ошибок детектирования

движения. Заполнение таких пропусков данными с других спутников не представляется возможным, ввиду их малого количества и частных особенностей формирования пространственного покрытия различными приборами.

В рамках работы над темой в 2023 г. для решения вышеперечисленных проблем был опробован метод контекстного заполнения, применяемый для обработки изображений различного происхождения. Для объяснения метода на рисунке 2.3.2 проиллюстрированы точка p , которая находится на границе $\partial\Omega$ области для заполнения Ω . Выбирается небольшая область $B_\varepsilon(p)$ известного размера ε вокруг точки p .

При достаточно малом размере области ε , можно ввести приближение, что яркость изображения в точке p , расположенной на границе заполняемой области, определяется яркостью всех элементов множества ε . При этом влияние отдельно взятой точки q формируется за счёт двух основных компонент — известной яркости изображения в точке q , принадлежащей области ε , а также величины градиента яркости между элементами p и q (правая нижняя часть рисунка 2.3.2):

$$I_q(p) = I(q) + \nabla I(q) \cdot (p - q).$$

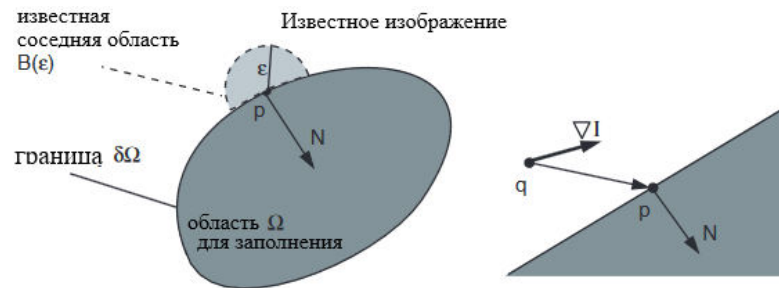


Рисунок 2.3.2 — Принцип методики контекстного заполнения изображения

Используя последнее выражение для всех точек, принадлежащих области ε , и введя весовые функции $w(p, q)$ для каждой из них, получим итоговое выражение для яркости точки p в виде:

$$I_q(p) = \frac{\sum_{q \in B_\varepsilon(p)} w(p, q) [I(q) + \nabla I(q)(p - q)]}{\sum_{q \in B_\varepsilon(p)} w(p, q)}.$$

Опыт практического применения показывает, для данной задачи наиболее эффективной является следующее представление весовой функции:

$$w(p, q) = \text{dir}(p, q) \cdot \text{dst}(p, q) \cdot \text{lev}(p, q),$$

где

$$\text{dir}(p, q) = \frac{p - q}{\|p - q\|} \cdot N(p), \quad \text{dst}(p, q) = \frac{d_0^2}{\|p - q\|^2}, \quad \text{lev}(p, q) = \frac{T_0}{1 + |T(p) - T(q)|}.$$

Компонента $\text{dir}(p, q)$ (*англ.* directional) увеличивает вклад пикселей, расположенных вблизи локальной нормали к границе заполняемой области в точке p . Функция $\text{dst}(p, q)$ (*англ.* geometric distance) изменяется обратно пропорционально расстоянию между точками p и q , а $\text{lev}(p, q)$ (*англ.* level set) увеличивает вклад точек, расположенных максимально близко к границе областей B и Ω .

Работа такого алгоритма контекстного заполнения осложняется некоторыми особенностями данных: при большом разрешении исходных данных и значительных размерах зон пропусков возникает несогласованность работы алгоритма на отдельных участках границы зоны пропуска. Контекстное заполнение приводит к некорректным результатам и появлению контрастных артефактов. Наибольшие погрешности возникают при увеличении шумовой компоненты вблизи области пропуска данных.

В ходе работы было выявлено, что вышеперечисленные проблемы можно решить, понизив разрешение исходных данных. Исходное разрешение данных TROPOMI по концентрации CO составляет 7×4 км, что менее $0,1 \times 0,1^\circ$. При огрублении разрешения до $0,25 \times 0,25^\circ$ обеспечивается подавление пространственно-высокочастотных шумов, представлявших проблему при контекстном заполнении. Также уменьшение абсолютных размеров областей повышает скорость и устойчивость результатов такого заполнения. Пример результатов предварительной обработки данных TROPOMI по заполнению пропусков представлен на рисунке 2.3.3.

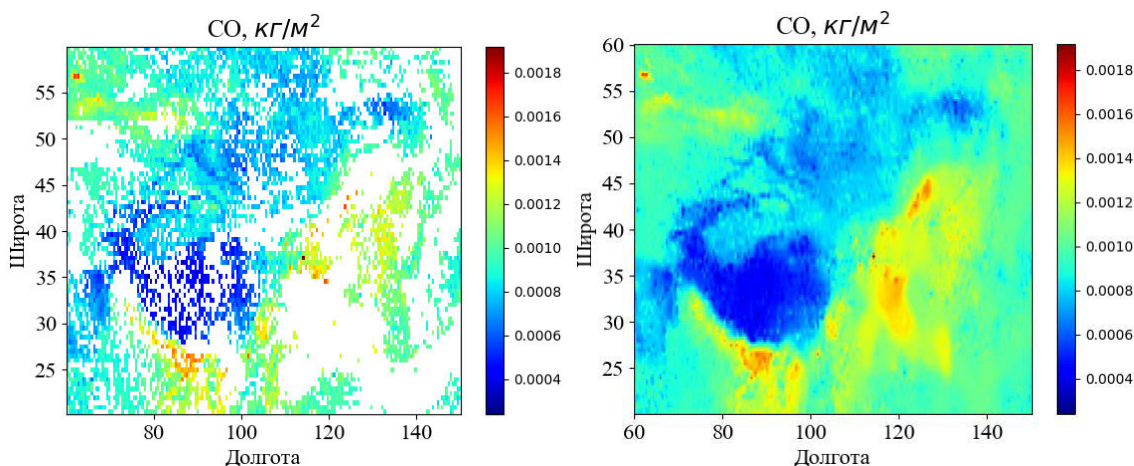


Рисунок 2.3.3 — Сравнение фрагмента исходных и подготовленных данных TROPOMI по интегральному содержанию CO

Видно, что отсутствующие фрагменты данных были полностью заполнены. При этом фрагменты большого размера, для которых контекстное заполнение не даёт эффективного решения, заполняются средним значением, вычисленным по всем точкам изображения, содержащим данные. Такой подход позволяет минимизировать артефакты расчёта оптического потока, осуществляемого на следующем шаге. Пример глобального поля интегрального содержания CO, полученный из суточного композита TROPOMI с помощью контекстного заполнения, показан на рисунке 2.3.4.

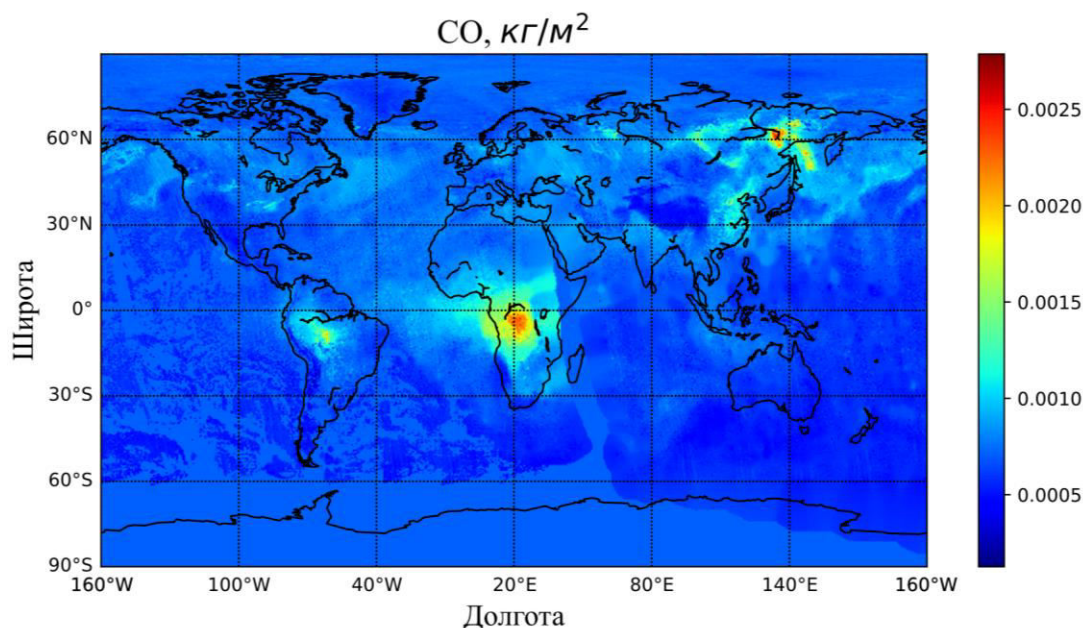


Рисунок 2.3.4. Пример предварительно подготовленного поля интегрального содержания CO за 01.08.2022 с заполненными пропусками данных

На рисунке видно, что в области Сибири и по всей территории Российской Федерации (в летний сезон, когда отсутствие данных вызвано в основном облаками), контекстное заполнение позволило адекватно заполнить все пропуски и получить гладкое непрерывное поле данных. Поля интегрального содержания, прошедшие описанную выше процедуру, пригодны для дальнейшей обработки с помощью алгоритмов оценки оптического потока.

2.4 Программа «Просмотр потоков» (Viewflow)

В ходе работы над темой в 2023 году была разработана программа просмотра потоков парниковых газов. При работе с данными концентраций малых газовых составляющих атмосферы или парниковых газов требуется одновременная визуализация карты концентраций/интегрального содержания и векторных полей горизонтальных движений этих газов, а также построение величин, вычисляемых как в заданной точке, так и интегрально по заданной области. Известные существующие средства не обеспечивали одновременно таких возможностей в пригодном для пользователя визуальном режиме.

Поэтому была поставлена задача написания такой программы просмотра, которая бы обеспечивала:

- чтение файлов netCDF специального формата,
- отображение полей газовых концентраций/интегрального содержания,
- одновременное отображение поверх них векторного поля горизонтального движения газов или водяного пара,
- управления выбором времени отображаемых полей в пределах интервала, охваченного имеющимися данными,
- выбор региона наблюдения,
- получение данных в выбранной точке,
- получение расчётных параметров в выбранном регионе или заданных точках
- экспорт полученных данных для дальнейшей обработки другими средствами.

2.4.1 Входные данные

Входная информация для программы — файл или набор последовательных файлов формата netCDF специального формата (рисунок 2.4.1.1). Он должен содержать поля:

- поля данных. Формат: трёхмерный массив 32- или 64-битных чисел с плавающей точкой (координаты массива — см. ниже в «индексные (координатные) поля»):
 - содержания водяного пара или выбранного газа (имя зависит от состава информации),
 - компоненты (зональная и меридиональная) вектора скорости горизонтального переноса (U, V);
- индексные (координатные) поля:
 - долготы и широты lon, lat. Формат: 32 или 64 битное число с плавающей точкой,
 - timestamp - условное время съёмки в формате unix timestamp UTC. Формат: 64-битное число с плавающей точкой;
- также возможны дополнительные поля:
 - поле данных Time (формат как у остальных полей данных), содержащее реальные значения времени съёмки для каждой точки,
 - htime, stime, timeshort (+timeshortFields) — дублирующие поля условного времени, предназначенные для контроля, читаемости без декодирования и возможности альтернативного чтения в других программах,
 - (возможно) кадры любого другого параметра, в формате массива чисел с плавающей точкой одинарной или двойной точности.

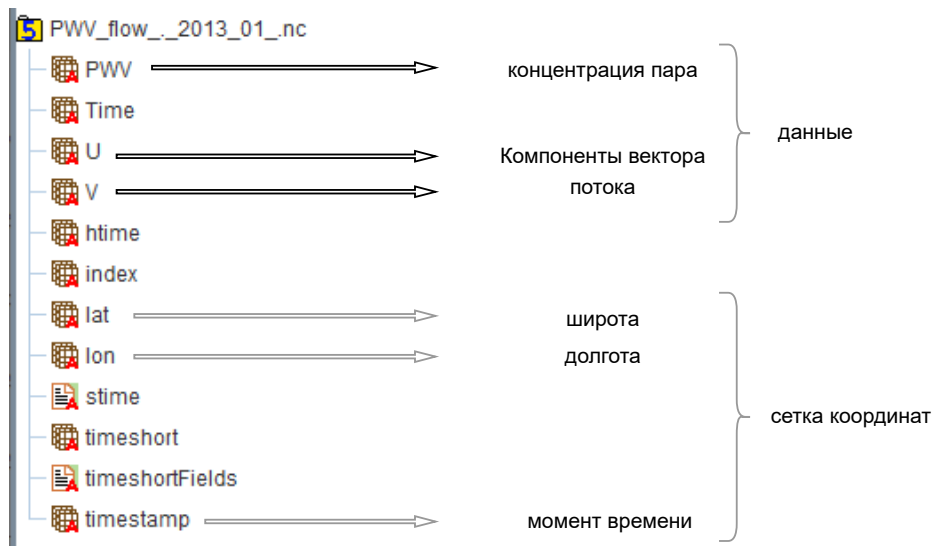


Рисунок 2.4.1.1 — Ключевые поля входного файла netCDF

2.4.2 Логика работы программы

Программа позволяет исследовать представленные данные в виде динамической карты содержания газовых компонент с наложенным поверх него векторным полем потока и крупномасштабной контурной картой.

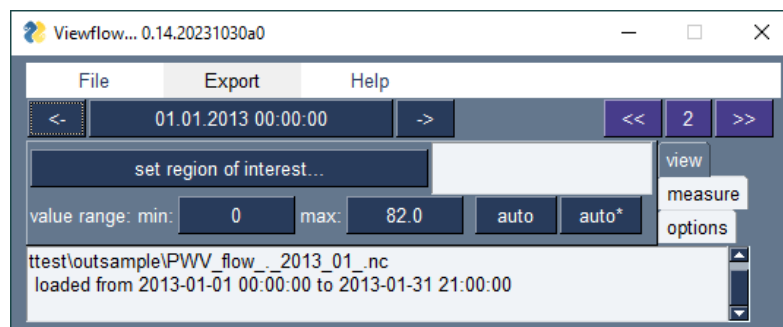


Рисунок 2.4.2.1 — Основное окно программы

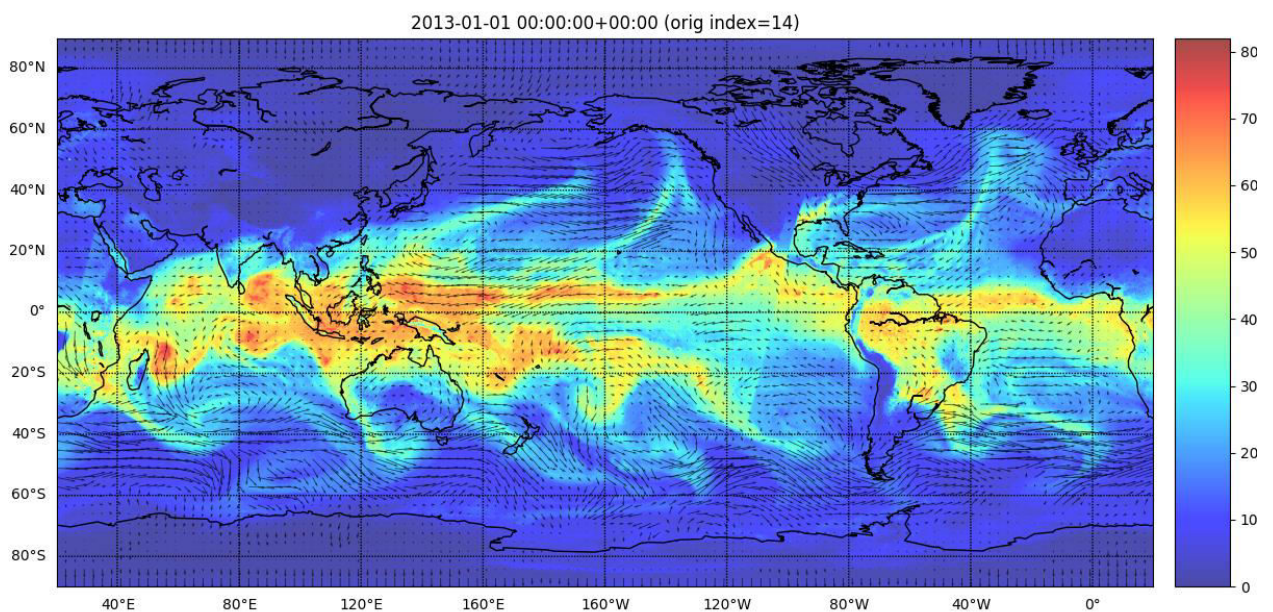


Рисунок 2.4.2.2 — Содержимое окна отображения геофизических полей (без управляющих элементов)

Окно управления позволяет оператору выбрать время наблюдений для отображения как напрямую, так и в формате последовательного просмотра, наблюдая динамику изменения.

Общая блок-схема логики работы программы представлена на рисунке 2.4.2.4. Программа выполнена в традиционном графическом интерфейсе, обеспечивающем параллельный доступ к большинству функций отображения непосредственно из основного окна и его вкладок. В стартовом режиме, когда загружен файл для просмотра, отображаются два окна: основное управляющее окно, представленное на рисунке 2.4.2.1, отделённое от окна отображения и всегда видимое для постоянного доступа к управлению; окно отображения геофизических полей (рисунок 2.4.2.2).

Вкладки view и options позволяют управлять следующими параметрами:

- координаты региона рассмотрения (region of interest);
- настройка диапазона цветовой шкалы значений (автоматическая, ручная, по коэффициенту);
- палитра цветовой шкалы значений;
- пространственная частота прореживания поля векторов;
- тип отображения векторов: в линейном или логарифмическом масштабе;
- отображение или скрытие векторов.

Возможно изменение масштаба отображения для подробного изучения выбранного участка. Предусмотрена также возможность экспорта отображаемого фрагмента в графический файл.

Внизу расположено окно журнала исполнения, показывающего сообщения о событиях, возможных ошибках, а также величинах в выбранных пользователем точках, с тем чтобы эти величины можно было экспортировать или использовать при выборе точки наблюдения или границ участков при вычислениях на последовательности изображений.

Все управляющие действия сразу отображаются в окне. Поскольку отображение организовано при помощи свободной библиотеки matplotlib, окно содержит также ряд стандартных для неё управляющих элементов (рисунок 2.4.2.3), позволяющих осуществлять временное масштабирование без выбора региона и экспорт в графические файлы различных форматов.



Рисунок 2.4.2.3 — Панель управления в окне отображения

На вкладке изменений предусмотрена возможность выбора региона исследования, а также выход в диалог настройки вычисления параметров на серии изображений (рисунок 2.4.2.5).

В нём есть следующие возможности:

- выбора региона исследования (дублирующая выбор на вкладке изменений);
- выбора диапазона времени;
- прореживания по изображения;
- запуска процесса вычисления различных параметров:
 - конвергенции потоков;
 - переноса вещества (отдельно по всем границам прямоугольного региона);
 - суммы массового содержания в регионе;
 - вычисляемых значений в наборе наблюдаемых точек;
 - экспорта видеофайла, показывающего динамику изменения состояния;
 - формирования отчёта по характеристикам региона.

В окне результата в виде текстовой таблицы отображается предварительный просмотр результата вычисления, а полные результаты можно экспортировать в файлы форматов .csv и .xls.

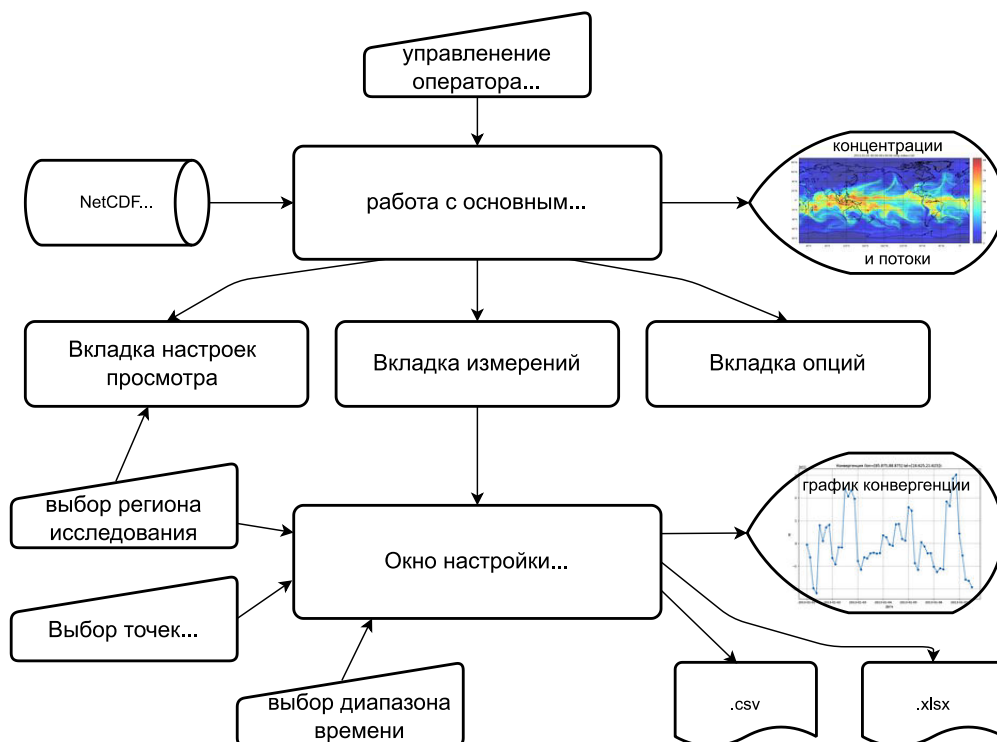


Рисунок 2.4.2.4 — Функциональная схема программы

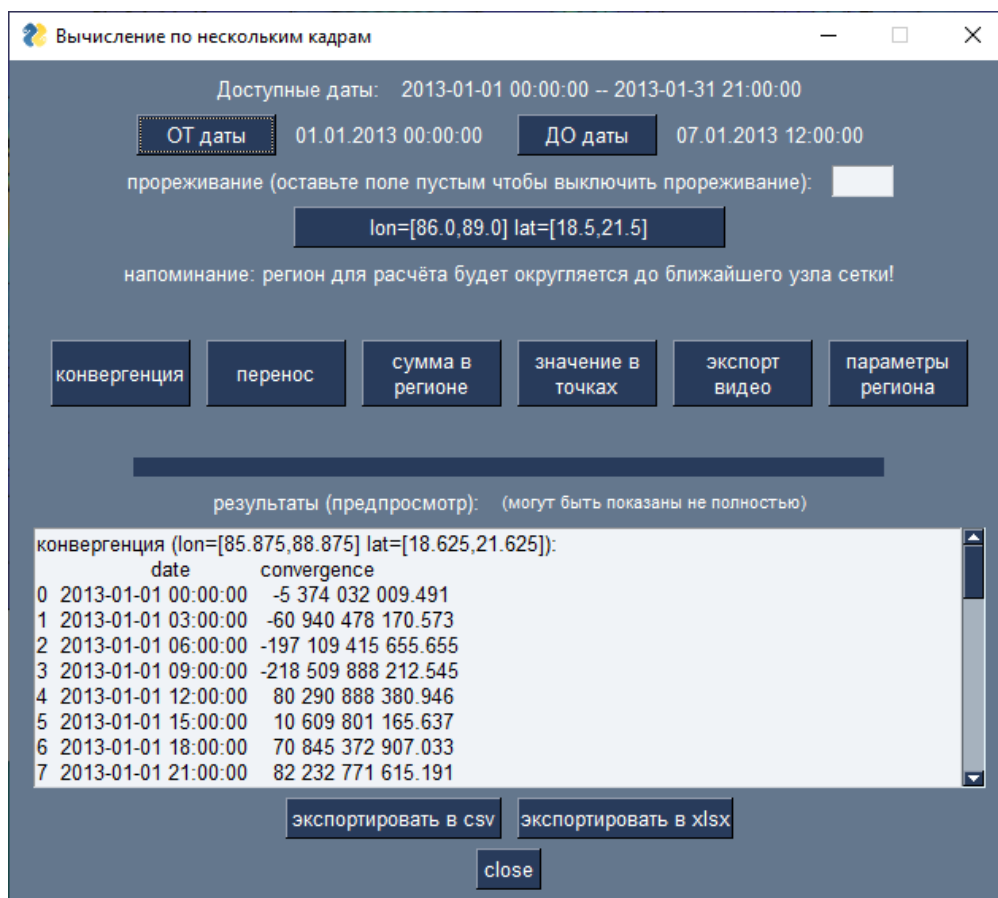


Рисунок 2.4.2.5. — Окно настройки вычислений по серии изображений

Для случая расчёта конвергенции потоков также формируется дополнительный график предварительного просмотра величины конвергенции в зависимости от времени (рисунок 2.4.2.6), который может быть экспортирован при помощи меню в окне графика.

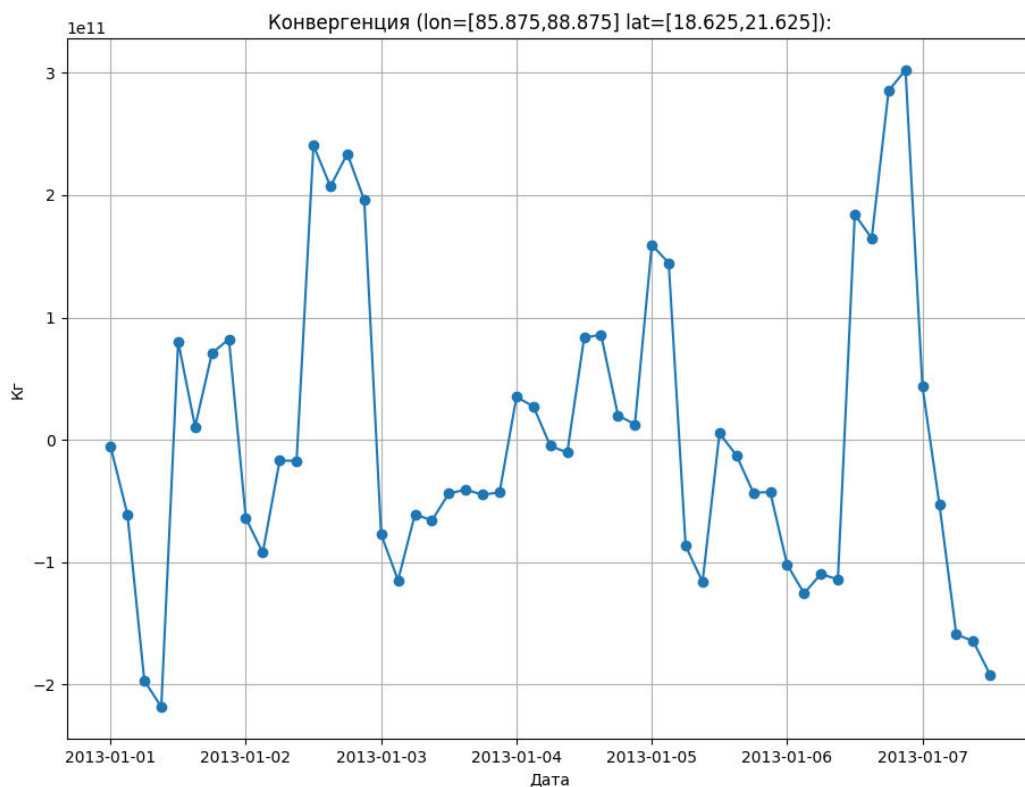


Рисунок 2.4.2.6 — График конвергенции

Таким образом, созданная программа обеспечивает возможность визуализации характеристик газового состава атмосферы и анализ динамики их изменения во времени, а также расчёт ряда точечных и интегральных характеристик.

Программа востребована для решения широкого круга задач исследования атмосферного состояния и динамики: динамических атмосферных процессов, в том числе связанных с формированием экстремальных погодных условий, атмосферной ветви углеродного цикла, потоков различных газовых компонент, в том числе климатически значимых.

Программа зарегистрирована в качестве результата интеллектуальной деятельности (свидетельство №2023680977).

Заключение

Представленные в настоящей главе материалы показывают, что в рамках решения основной задачи проекта — создания новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли по полям малых газовых составляющих (в том числе, позволяющих восстанавливать детализированную пространственно-временную динамику полей, реализующиеся в них потоки) на втором этапе работ (2023 г.) получены следующие основные результаты:

- отработана методика пересчета данных спутниковых наблюдений о концентрациях МГС атмосферы в единицы полного массового содержания, необходимые для реализации технологии балансовых расчетов эмиссий и стоков МГС;
- определены и программно реализованы алгоритмы восстановления атмосферной динамики для расчета горизонтальных потоков МГС в атмосфере;

- предложена и программно реализована методика контекстного заполнения пропусков данных в полях интегрального содержания МГС, восстанавливаемых по спутниковым данным;
- для задач визуализации и обработки потоковых данных больших объёмов создано специализированное программное обеспечение «Просмотр потоков» («Viewflow»); получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Представленные материалы позволяют сделать вывод о том, что запланированные работы второго этапа (2023 г.) в рамках основной задачи создания новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли по полям малых газовых составляющих (в том числе, позволяющих восстанавливать детализированную пространственно-временную динамику полей, реализующиеся в них потоки) выполнены в полном объёме.

ГЛАВА 3 РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ ДЗЗ И ПРОДУКТОВ ИХ ОБРАБОТКИ В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Введение

В рамках решения задачи развития методов усвоения данных ДЗЗ и продуктов их обработки в численных моделях атмосферной циркуляции на втором этапе выполнения проекта (2023 г.) были осуществлены следующие работы:

- дано общее математическое описание предложенной методики балансовых оценок для расчёта эмиссий и стоков МГС атмосферы;
- описана и программно реализована методика расчёта элементов балансового уравнения, в том числе, атмосферного горизонтального переноса МГС;
- описана, программно реализована и протестирована на примере наблюдения выбросов CO крупными лесными пожарами методика получения балансов (вертикального обмена) МГС;
- проанализированы и выявлены корреляционные связи между концентрациями различных МГС и другими физическими параметрами атмосферы в интересах восполнения пропусков спутниковых измерений (в том числе, связанных с неблагоприятными условиями наблюдений).

Полученные результаты, в частности, были представлены в публикациях [4, 9].

3.1 Общее описание подхода балансовых оценок

Одной из основных задач работы текущего года является развитие методов усвоения данных ДЗЗ и продуктов их обработки в численных моделях атмосферной циркуляции. В рамках работы по теме в 2023 году были развиты подходы усвоения данных ДЗЗ в балансовой модели, которая позволяет оценивать разность между суммарным выбросом газа в пределах какой-либо территории и его суммарным стоком на той же территории за определённый период времени или баланс парниковых газов (ПГ) для территории.

Известно несколько подходов к оценкам баланса ПГ. Общепринятым является кадастровый подход, заключающийся в расчётах на основе инвентарной информации о типах и параметрах источников и поглотителей ПГ на данной территории и утверждённых модельных соотношений, описывающих интенсивность эмиссии/стока для каждого из них. Для уточнения этих модельных соотношений с учётом разнообразия источников и стоков ПГ и изменчивости их параметров (а также параметров окружающей среды) создаются «углеродные полигоны», где осуществляются прямые измерения вертикальных потоков ПГ со специально оборудованных вышек. В силу неизбежной разреженности прямых измерений развиваются подходы так называемого «инверсного моделирования», усваивающие результаты наземных измерений и дополнительную спутниковую информацию в модельных описаниях динамики распространения ПГ в атмосфере Земли.

Все указанные подходы не лишены определённых недостатков. В рамках кадастрового подхода проблему представляет полное параметрическое описание всех возможных типов источников ПГ с учётом их изменчивости. Во всяком случае, получение оперативных оценок по большим территориям невозможно без привлечения данных дистанционного зондирования и решения ряда сложных обратных задач интерпретации этих данных. Отдельную проблему представляет оценка стоков ПГ. Открытым, вообще говоря, представляется и вопрос научно обоснованной (независимой) верификации итоговых кадастровых оценок для произвольно выбранной территории.

Наземные углеродные полигоны дают непрерывные ряды локальных («точечных») измерений баланса ПГ. С точки зрения их репрезентативности в экосистемном, региональном, глобальном масштабах сложным вопросом остаётся влияние как естественной пространственно-временной изменчивости в пределах наблюдаемой экосистемы, так и нелокальных факторов окружающей среды, региональные различия

которых могут быть достаточно велики. Таким образом, наземные измерения крайне важны для калибровки других методов балансовых оценок ПГ, однако непосредственное применение получаемых результатов за пределами функционирующих углеродных полигонов проблематично и требует дополнительных обоснований в каждом конкретном случае.

Инверсное моделирование формально позволяет преодолеть последний отмеченный недостаток за счёт усвоения результатов наземных измерений в динамической модели атмосферы. Однако в методику моделирования заложен учёт статистики эмиссионных и поглощающих свойств подстилающей поверхности по заданному ПГ для территории исследования. А уточнение и детализация этой статистики и становятся конечной целью всех перечисленных подходов.

В ходе работы в 2023 году был предложен новый подход к расчёту баланса ПГ, основанный на вычислительной схеме, замкнутой относительно данных спутниковых измерений концентрации ПГ. Методика опирается на предположение о том, что влияние химических реакций с участием рассматриваемого ПГ на его концентрацию в атмосфере пренебрежимо мало на выбранном интервале наблюдений. В этом случае из закона сохранения вещества следует, что изменение содержания ПГ в замкнутом объёме атмосферы возможно только за счёт его притока (оттока) через граничную поверхность этого объёма (рисунок 3.1.1).

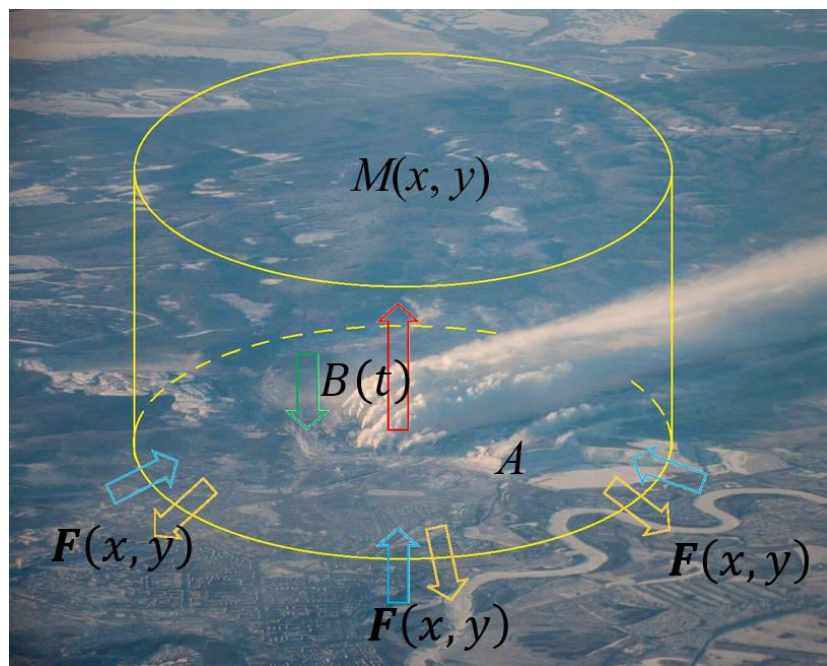


Рисунок 3.1.1 — Иллюстрация модели оценки баланса парниковых газов

Интерес представляет частный случай объёмной фигуры, нижнее основание которой, A , соответствует рассматриваемой территории, а боковая поверхность образована «бесконечно высокими» вертикальными стенками, перекрытыми «бесконечно высоко» верхней гранью. Для этого случая справедливо равенство (с учётом новых обозначений, описанных ниже):

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} B(t) dt = - \iint_A M(x, y) dx dy \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} - \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \iint F(x, y) dn, \quad (3.1.1)$$

где t_{\min} и t_{\max} — начало и конец интервала наблюдений, соответственно; $B(t)$ — «мгновенный» баланс ПГ для заданной территории A , т.е. разность между интенсивностью эмиссии и стока ПГ (в $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$); $M(x, y)$ — массовое содержание ПГ в вертикальном атмосферном столбе единичной площади (в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$); \mathbf{p} — ориентированная

замкнутая граница области A (см. далее); \mathbf{n} — ориентированная нормаль к границе \mathbf{p} (положительное направление — внутрь контура); \mathbf{F} — интегральный по высоте атмосферы горизонтальный поток ПГ (в $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$).

Величина $M(x, y)$ может быть рассчитана через плотность ПГ $\rho(x, y, z)$:

$$M(x, y) = \int_0^{+\infty} \rho(x, y, z) dz.$$

Величина \mathbf{F} , в свою очередь, определяется следующим образом:

$$F(x, y) = \int_0^{+\infty} \rho(x, y, z)v(x, y, z) dz = M(x, y)v^*(x, y), \quad (3.1.2)$$

где v — горизонтальная скорость ветра в точке (x, y, z) (в м/с); z — высота; v^* — эффективная (взвешенная по высоте атмосферы) скорость горизонтального переноса ПГ (в м/с).

Следует отметить, что при наличии на территории A источников интенсивных выбросов (например, сильных пожаров), можно считать, что поглощение ПГ пренебрежимо мало по сравнению с эмиссией. В этом случае стоящая в левой части уравнения (3.1.1) величина характеризует суммарную эмиссию ПГ за интервал наблюдений $[t_{\min}, t_{\max}]$ со всей территории A . В общем случае интерес, как сказано ранее, представляет именно разность между выбросом и стоком, т.е. интеграл B . Как видно из выражения (3.1.1), для его вычисления достаточно знать общее содержание ПГ над заданной территорией — первое слагаемое в правой части уравнения (3.1.1) и горизонтальный поток ПГ через охватывающие территорию A вертикальные стенки — второе слагаемое в правой части уравнения (3.1.1). В свою очередь, из уравнения (3.1.2) видно, что для этого достаточно вычислить эффективную (взвешенную по высоте) горизонтальную скорость переноса ПГ.

Суть методики восстановления горизонтальных потоков ПГ в атмосфере, применённой в предложенной и разрабатываемой в рамках темы методике, состоит в вычислении такого поля скорости горизонтального переноса v^* , которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию наблюдаемых полей средней концентрации ПГ, выстроенных в хронологическом порядке, при дополнительных ограничительных требованиях (непрерывности, гладкости). Реализующие такой подход алгоритмы в системах технического зрения получили название «анализа оптического потока». Подробно алгоритмы анализа оптического потока и предварительная обработка данных ДЗЗ для повышения качества их работы рассматривались в гл. 2. Далее будут рассмотрены результаты применения предложенного подхода балансовых оценок к реальным спутниковым измерениям концентрации газов.

3.2 Восстановление горизонтальных потоков CO по данным TROPOMI за лето 2022 и 2023 годов

Восстановление скоростей горизонтальных потоков парниковых газов по данным ДЗЗ является важным элементом расчёта баланса парниковых газов, а также позволяет исследовать и прогнозировать перенос этих газов в атмосфере Земли. В рамках работ 2023 г. был развит подход к восстановлению горизонтальной скорости перемещения ПГ с применением алгоритмов технического зрения. Для применения подобных алгоритмов необходимы регулярные во времени и не имеющие пропусков данные поля интегрального содержания газа в атмосфере. Данные о газовых концентрациях, удовлетворяющие этим условиям, в настоящий момент могут быть получены только на основе измерений инструмента TROPOMI, установленного на борту спутника Sentinel-5. Этот инструмент проводит измерения в ИК-диапазоне и обеспечивает ширину полосы сканирования 2600 км при солнечно-синхронной орбите. Такая геометрия сканирования обеспечивает охват измерениями практически всего Земного шара один раз в сутки. На первом этапе

обработки развиваемой методики принято решение об использовании полей интегрального содержания CO (см. гл. 1). Несмотря на то, что CO не является парниковым газом, он является малой газовой составляющей и хорошим индикатором процессов горения. Наиболее сильные повышения концентраций CO наблюдаются в областях сильных лесных пожаров, которые, таким образом, могут быть использованы в качестве целевых объектов для проверки методик как расчётов горизонтальных потоков, так и балансов МГС и ПГ. Таким образом, для обработки методики далее использовались данные измерений интегрального содержания CO по данным инструмента TROPOMI.

Данные TROPOMI были предоставлены ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в виде суточных композитов. Доступ к данным осуществляется через сервис «Vega-Science» (<http://sci-vega.ru/>). В настоящий момент в базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» хранятся суточные композиты интегрального содержания CO в единицах моль/м² с флагами качества выше 0,5. При этом достигается покрытие данными одного суточного композита порядка 40 % земного шара (рисунок 3.2.1).

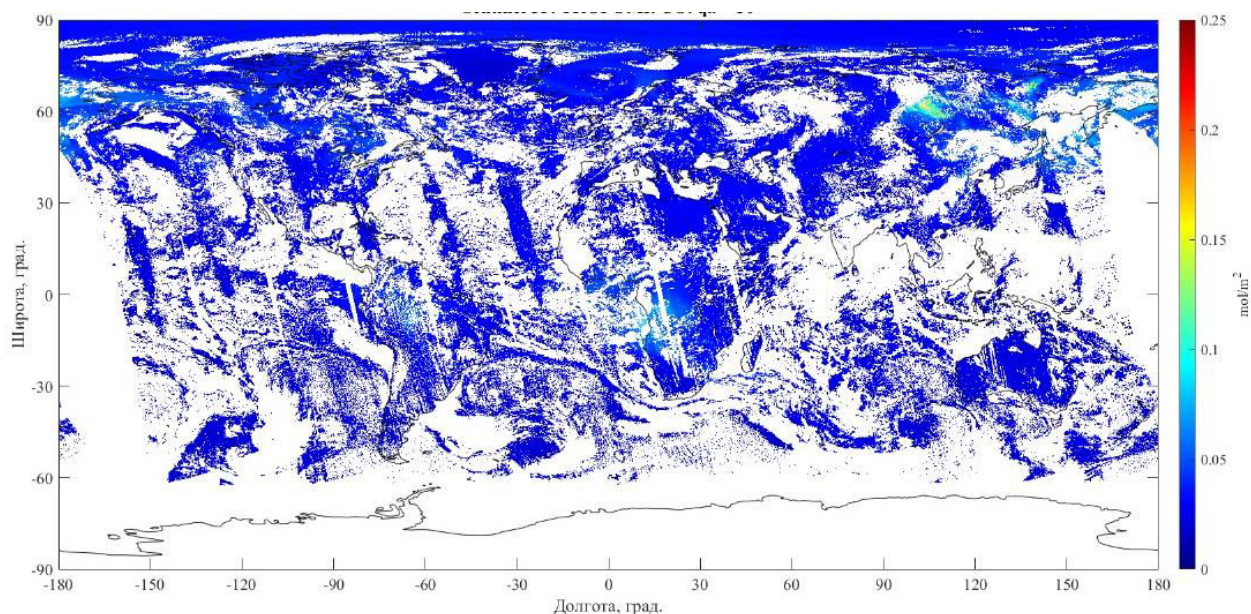


Рисунок 3.2.1 — Пример исходного композита интегрального содержания CO TROPOMI

На наличие данных сильно влияет альbedo поверхности, в частности снежный покров не позволяет надёжно восстанавливать концентрации над ним, и поскольку наибольший интерес для исследований представляет Северное полушарие, использовались данные TROPOMI за летние месяцы: июнь – август 2022 и 2023 гг. Далее, к суточным композитам применялась методика заполнения пропусков данных, описанная в разд. 2.3. В результате были получены полностью заполненные данными глобальные поля интегрального содержания CO с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ и периодом в 1 сут (см. рисунок 2.3.4).

Полученный набор глобальных полей интегрального содержания CO был обработан с помощью алгоритмов оценки оптического потока, которые описаны в разд. 2.2. Наиболее подходящим для поставленной задачи был признан алгоритм DIS (англ. Dense Inverse Search). Преимуществами алгоритма DIS для поставленной задачи представляются вычисление плотного оптического потока (в каждой точке исходного изображения), вариационная коррекция по критерию гладкости, уменьшающая число и величину артефактов, что обеспечивает более высокую итоговую точность, возможность анализа в большом диапазоне пространственных масштабов за счёт субпиксельной интерполяции для малых масштабов и анализа пирамиды изображений (пространственного сглаживания) для больших масштабов.

В результате был получен набор глобальных полей векторов скорости горизонтального переноса CO (в м/с) с временным и пространственным разрешением исходных композитов (рисунок 3.2.2).

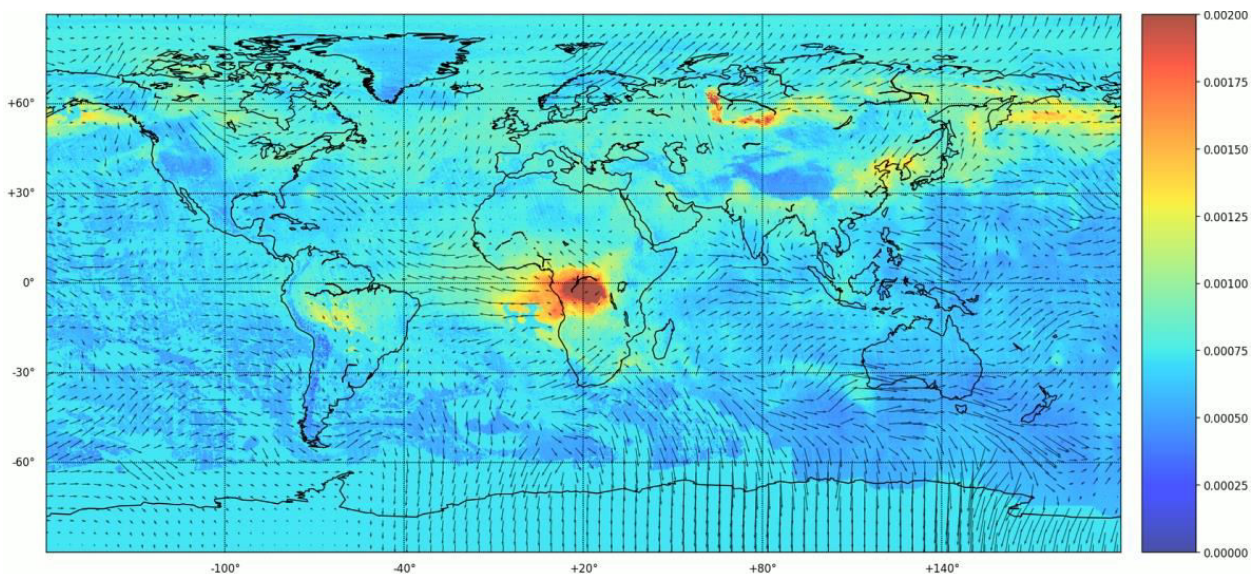


Рисунок 3.2.2 — Пример восстановленного глобального поля скорости горизонтального переноса CO по данным TROPOMI. Векторы скорости отображены стрелками (и прорежены для более наглядной визуализации). Интегральное содержание в $\text{кг}/\text{м}^2$ отображено цветом

Перевод интегрального содержания CO из $\text{моль}/\text{м}^2$ в $\text{кг}/\text{м}^2$ осуществляется умножением на молярную массу CO. Для получения горизонтальных потоков газа в $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ необходимо перемножить поле скорости горизонтального переноса на поле интегрального содержания CO. Таким образом производится вычисление всех составляющих для расчёта баланса CO по уравнению (3.1.1).

3.3 Восстановление балансов CO по данным TROPOMI в областях крупных лесных пожаров

Газ CO является малой газовой составляющей и выделяется в основном при горении. Наиболее сильными источниками CO являются лесные пожары. Учитывая этот факт и то, что интегральное содержание CO очень хорошо измеряется спутниковым инструментом TROPOMI, выбросы CO во время лесных пожаров можно использовать для проверки методики расчёта баланса парниковых газов, описанной в гл. 3.1.

В первую очередь для такой проверки необходимо найти крупное локализованное скопление очагов лесных пожаров, которые длились значительный промежуток времени. Решить такую задачу помогает ресурс «Vegetation Science», являющийся одним из сервисов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Сервис содержит набор инструментов для ежедневного мониторинга очагов лесных пожаров. Анализируя информацию с сервиса «Vegetation Science» за летние периоды 2022 и 2023 года, выделили подходящий для исследования объект (рисунок 3.3.1).

Данное скопление очагов лесных пожаров существовало в июле – августе 2022 г. на севере Хабаровского края и юго-востоке Республики Саха. С 10 июля по 10 августа 2022 г. наблюдалось очень кучное скопление очагов в области примерно $10\times 10^\circ$ (выделенной красным прямоугольником на рисунке 3.3.1), при этом вокруг этой области пожары практически отсутствуют.

На данных об интегральном содержании CO полученных в этот период TROPOMI также хорошо видно повышение концентрации в области пожаров (рисунок 3.3.2).

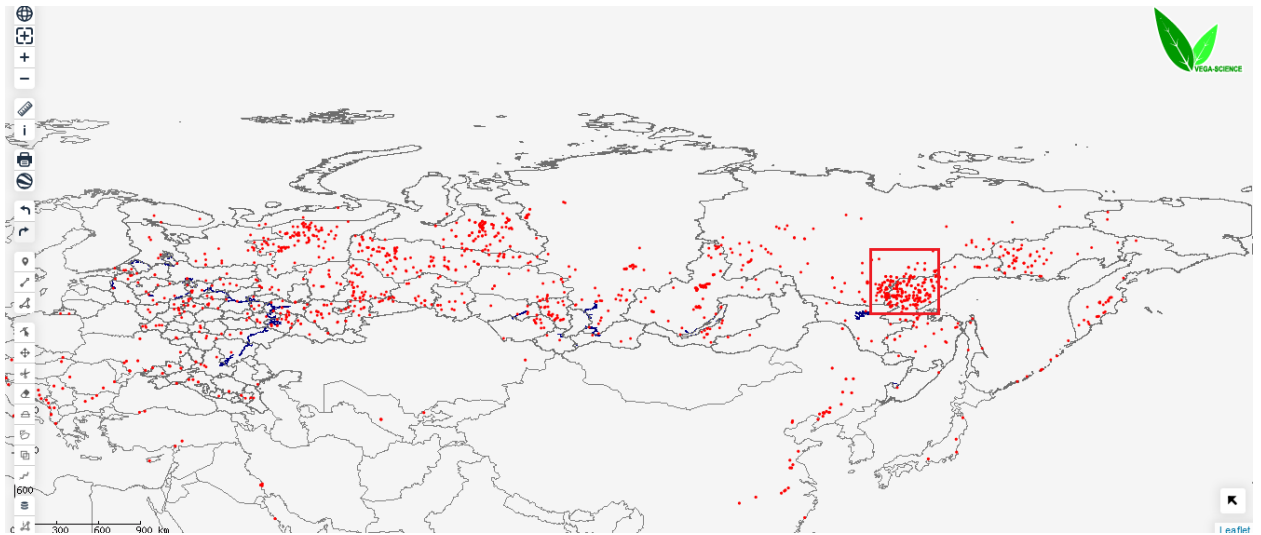


Рисунок 3.3.1 — Карта очагов лесных пожаров за 18.07.2022 с ресурса «Vega-Science»

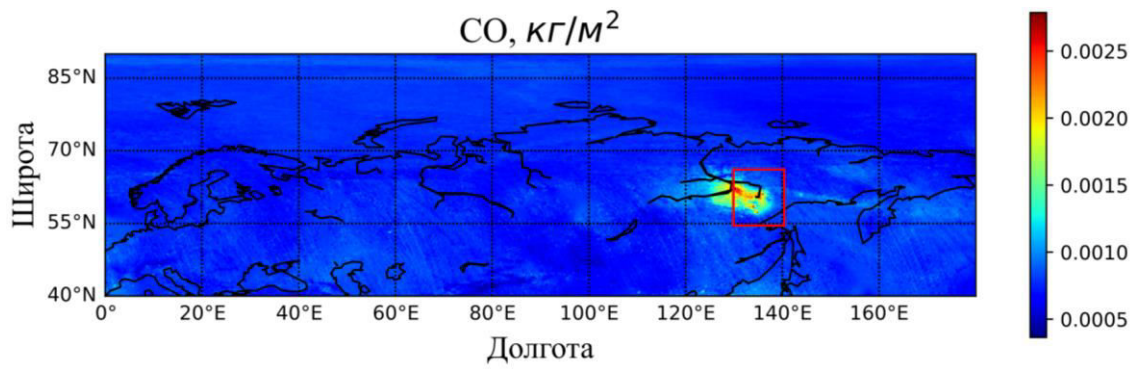


Рисунок 3.3.2 — Поле интегрального содержания CO по данным TROPOMI 18.07.2022

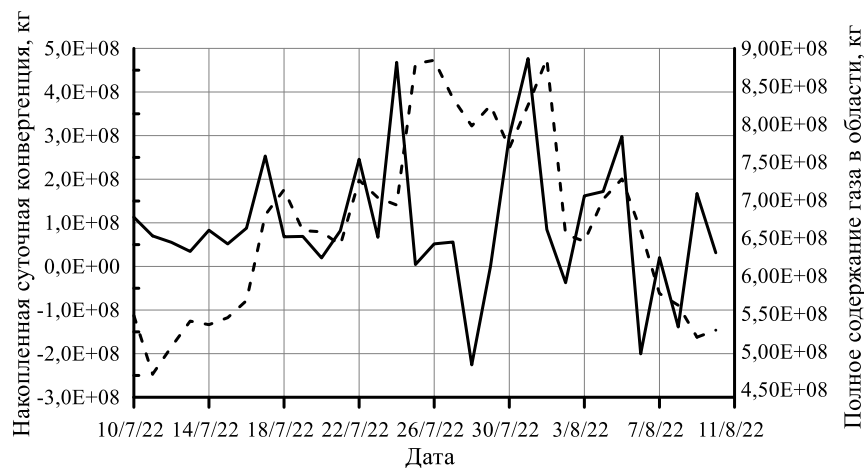


Рисунок 3.3.3 — Элементы уравнения (3.1.1), рассчитанные для указанной области за рассматриваемый период. Сплошная линия — накопленная суточная конвергенция, пунктирная — полное содержание газа в области

Далее для области, обозначенной красным прямоугольником на рисунке 3.3.2, которая имеет координаты 55–65° с.ш., 130–140° в.д. (назовём её A в соответствии с обозначением в разд. 3.1), требуется найти все составляющие балансового уравнения (3.1.1). Все необходимые для этого предварительные расчёты уже были выполнены, как описано в предыдущих пунктах — были получены поля интегрального содержания CO по данным TROPOMI с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ и периодом 1 сут, с помощью которых, интегрируя поля по площади A на границах интересующего

временного интервала, можно получить первое слагаемое в уравнении (3.1.1) и, имея горизонтальные потоки CO через границу области A, можно рассчитать второе слагаемое в уравнении (3.1.1) — конвергенцию потоков CO внутрь области. Результаты расчёта приведены на рисунке 3.3.3. График накопленной суточной конвергенции умножен на -1 в соответствии со знаком второго слагаемого уравнения (3.1.1)

Из графиков видно, что временной ход полного содержания газа в целом отражает фазы развития и затухания пожаров. Конвергенция же часто меняет знак, но имеет преимущественное направление на истечение газа из области. Смена знака (наряду с возможными артефактами предобработки данных) может быть вызвана ситуацией, когда уже вышедший из области газ задувается обратно резко сменившимися направлением ветрами. Подстановка рассчитанных величин в правую часть уравнения (3.1.1) даёт общий баланс CO на рассматриваемой территории за указанный интервал времени (1 мес). Он составил $2,94 \times 10^9$ кг.

Полученные результаты требуют сравнения с независимыми оценками. В качестве таковых использована информация глобальной базы выбросов газов при лесных пожарах Global Fire Emissions Database (GFED) (<https://www.globalfiredata.org/>). В ней содержатся результаты модельных расчётов ежемесячных выбросов углерода в лесных пожарах и распределение ежедневной доли общего выброса на сетке координат с ячейкой $0,25 \times 0,25^\circ$. Для пересчёта выброса углерода в выброс CO был использован коэффициент пересчёта, рекомендованный для случая горения бореальных лесов в летнее время года и равный 0,127.

Результат обработки данных базы GFED для той же области и периода времени в сравнении с рассчитанным по предлагаемой в работе методике расчёта суточного баланса показан на рисунке 3.3.4.

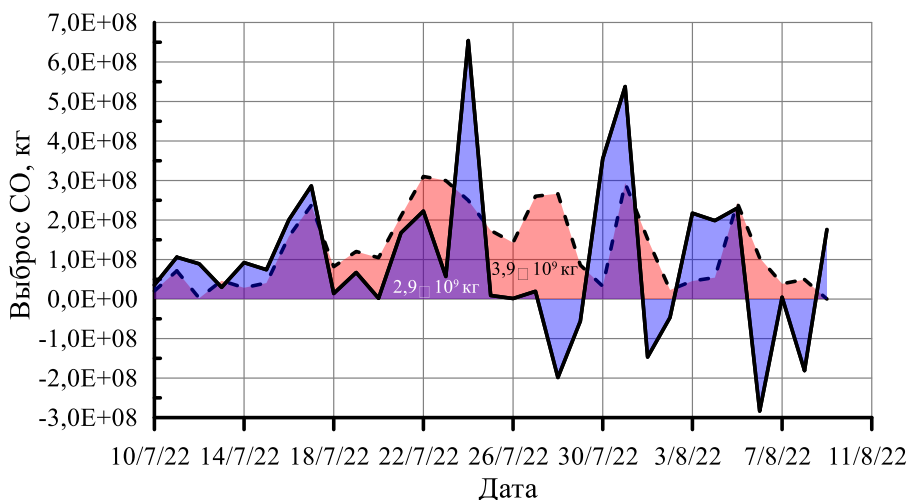


Рисунок 3.3.4 — Суточный баланс CO для области лесных пожаров, рассчитанный по предлагаемой методике (сплошная линия) и модельные расчёты выбросов CO по данным базы GFED (пунктирная линия). Числа в закрашенных областях — интегральный выброс по соответствующим оценкам

Следует отметить, что временной ход на обоих графиках имеет общие черты, отражающие интенсификацию и ослабление горения. В то же время, не следует ожидать их точного соответствия в силу различий в методиках расчёта: модельные оценки GFED закономерно оказываются более гладкими, не имеют резких (тем более, отрицательных) выбросов. С другой стороны, важным достоинством методики, предложенной в ходе работы над темой, является её универсальный характер и отсутствие большого числа «свободных» параметров. Настройка таких параметров не свободна от произвола исследователя, в связи с чем надёжность и окончательность получаемых оценок, возможность использования их для калибровки альтернативных методик вызывает

вопросы. В частности, надо отметить, что для пересчёта выброса углерода в CO в более общем случае горения лесов в летнее время в рамках той же модели GFED рекомендовано значение коэффициента 0,061, что вдвое ниже использованного 0,127. В совокупности эти два коэффициента дают разброс значений, в который укладывается величина интегрального баланса, полученная по развиваемой коллективом методике. Нельзя исключать, что учёт региональных особенностей вызовет необходимость дальнейшего уточнения настроечных модельных коэффициентов, например, для бореальных лесов Сибири или даже отдельных её районов. В этом отношении единообразие и простая логика предложенной методики приобретает большое значение. Изменение итоговых расчётов баланса газовой компоненты по этой методике возможно только в связи с улучшением качества исходных данных и восстанавливаемых по ним полям адвекции. Прогресс в этих направлениях исследований должен привести к повышению устойчивости и надёжности балансовых расчётов по предложенной методике.

3.4 Выявление корреляционных связей между концентрациями различных МГС и другими физическими параметрами атмосферы

Проведение исследований по выявлению корреляционных связей между концентрациями различными МГС (и парниковых газов, в том числе) и физическими параметрами атмосферы и подстилающей поверхности преследовало две основные цели. Во-первых, данный подход рассматривался в качестве одного из способов устранения локальных пропусков в результатах спутниковых наблюдений, вызванных физическими ограничениями применяемых методов количественной спектроскопии (невозможность восстановления при наличии облачного покрова, зависимость результатов от освещённости или меняющегося альbedo подстилающей поверхности и пр.). Второй причиной является нехватка (или отсутствие) данных спутниковых измерений различными приборами по ключевому парниковому газу — CO₂ (несмотря на декларированную, в ряде случаев, возможность таких измерений). Соответственно, наличие корреляционных связей между распределением МГС в атмосфере, может быть использовано для выполнения предварительных оценок выбросов этого парникового газа при успешном определении баланса других газовых компонент, спутниковые данные по которым имеются.

Работы в данном направлении предполагали последовательное решение нескольких задач: определение источника тестовых данных, проведение корреляционного анализа, выявление наиболее связанных компонент, разработка и обучение нейронной сети и её применение для заполнения пропущенных данных на тестовых суточных композитах. В силу того, что лишь данные реанализа содержат полный спектр анализируемых величин (как по содержанию МГС, так и физических параметров атмосферы) с необходимыми характеристиками (глобальность покрытия и пространственно-временное разрешение), исследования проводились только на их основе.

Как и в задаче с преобразованием единиц измерений, физические параметры атмосферы были заимствованы из базы CAMS global atmospheric composition reanalysis (EAC4), а информация по содержанию МГС — из базы ECMWF CAMS global greenhouse gas reanalysis (EGG4). Глобальные поля распределения в атмосфере Земли были составлены для следующего набора МГС: CO₂, CH₄, CO, H₂O и NO₂. В качестве основного параметра использовалась усреднённая по вертикальному столбу атмосферы объёмная концентрация отдельного газа. Соответствующие единицы измерения — ppm и ppb. Формируемые наборы данных также содержали информацию о физических параметрах атмосферы для каждого пространственного элемента разрешения (температура, давление, влажность, интенсивность облачного покрова), и о характеристиках подстилающей поверхности (тип поверхности, ее температура, высота над уровнем моря). Помимо этого, привлекалась информация о дате и времени измерений, а также о широтной принадлежности соответствующего элемента поверхности. Пространственное разрешение

формируемых глобальных карт содержания МГС в атмосфере Земли составляет 0,75°, временное разрешение — 3 ч. В анализируемый временной интервал вошли данные с 1 по 31 июля 2020 г.

Ко всему объёму данных (всему набору суточных глобальных карт распределения параметров и каждому элементу разрешения в них) была применена операция нахождения перекрёстных корреляционных связей для всех описанных ранее параметров. Ее результат представлен на рисунке 3.4.1. Для удобства анализа полученных результатов использована цветовая индикация – параметры с сильной линейной связью (положительной или отрицательной) имеют более насыщенные цвета, с малой – ближе к белому.

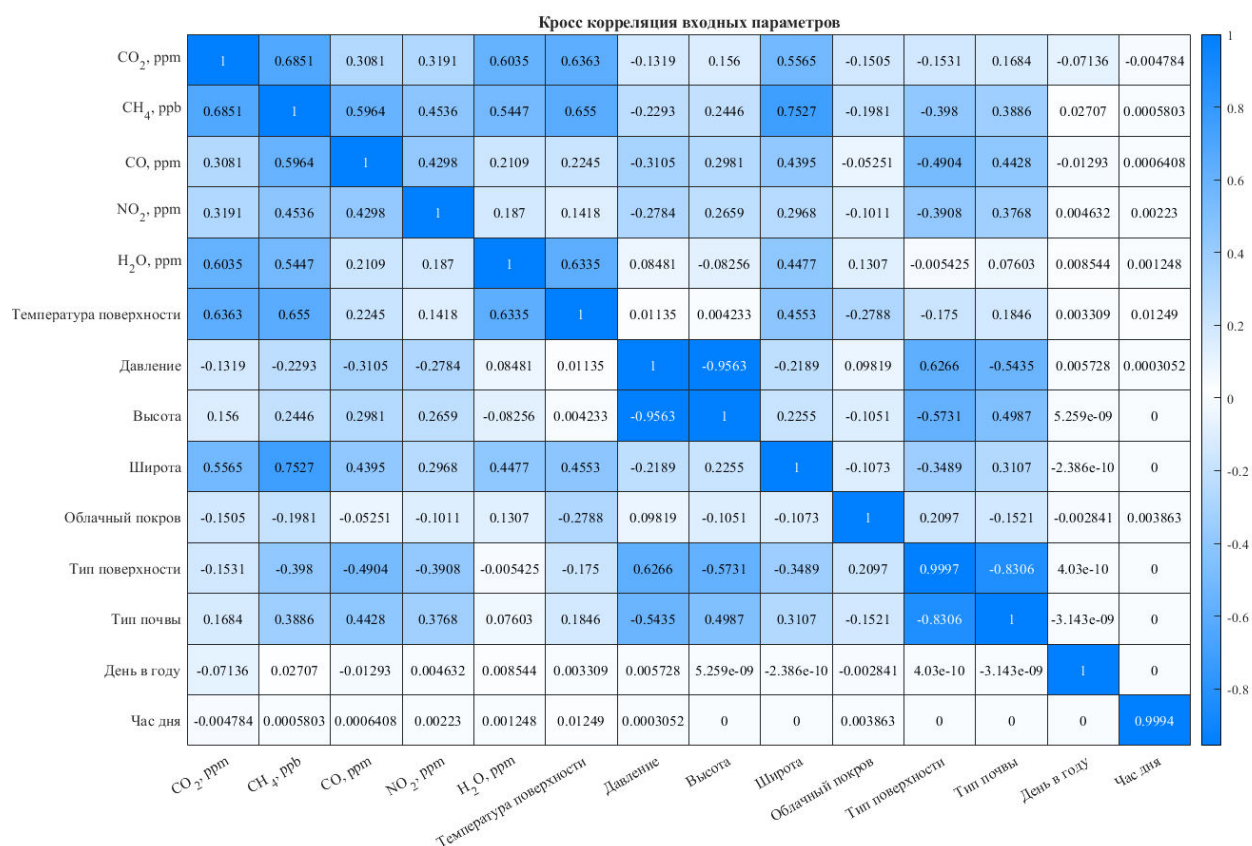


Рисунок 3.4.1. Кросс-корреляция параметров атмосферы и подстилающей поверхности

Ожидаемым результатом для всех МГС является их сильная корреляция с влажностью атмосферы и типом подстилающей поверхности, а также ее температурой. Зависимость от высоты рельефа и атмосферного давления слабо выражена, поскольку, как уже было рассмотрено в предыдущем разделе, усреднённые по вертикальному столбу атмосферы объёмные концентрации рассчитываются с учётом этого параметра. Иначе бы обстояло дело при использовании общих масс МГС в столбе атмосферы, именно поэтому анализ проводился не для них. Также, присутствует слабая широтная зависимость всех анализируемых величин. А вот зависимость от включённых в анализ времени суток и дня в году — практически отсутствует. Обнаруженная инвариантность (вопреки ожиданиям) к времени года является следствием рассмотрения малого временного интервала. С точки зрения последующих исследований интересной представляется достаточно сильная зависимость между отдельными МГС. Так, степень линейной связи между диоксидом углерода и метаном характеризуется значением 0,69, между угарным газом и метаном — чуть ниже, 0,59, но все равно заметна. Диоксид азота также имеет значимые связи с метаном и угарным газом. Полученные результаты, помимо обозначенной цели

настоящего раздела, могут быть использованы и отдельно в рамках будущих исследований по тематике работы.

Поскольку для части приведенных параметров отсутствие корреляционных связей могло быть вызвано ограниченным объёмом выборки, с целью отработки общего подхода к решению поставленной задачи при дальнейшей разработке нейронной сети использовался полный набор параметров, без отсеивания. Общая схема нейронной сети представлена на рисунке 3.4.2. Сеть содержит 26 нейронов в скрытом слое, входом являются 13 переменных, характеризующих газовый состав атмосферы и физические параметры атмосферы и подстилающей поверхности. Выходные функции имеют вид гиперболического тангенса (на выходе скрытого слоя) и линейной зависимости (общий выход). Сеть ориентирована на вычисление усреднённой по вертикальному столбу атмосферы объёмной доли углекислого газа.

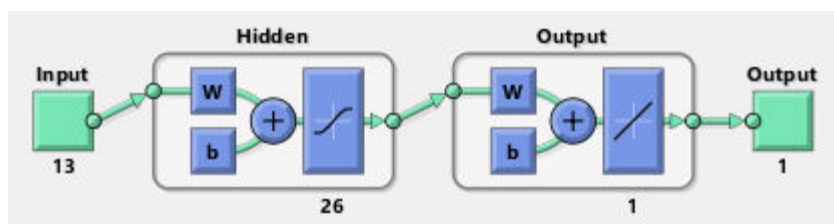


Рисунок 3.4.2. Схема используемой нейронной сети

В качестве критерия окончания процесса обучения предложенной нейросети было введено ограничение на количество эпох — 1000. Некоторые из параметров (среднеквадратичная ошибка (mse), градиент и количество попыток неудачной валидации), контролируемых в ходе обучения, представлены на рисунке 3.4.3.

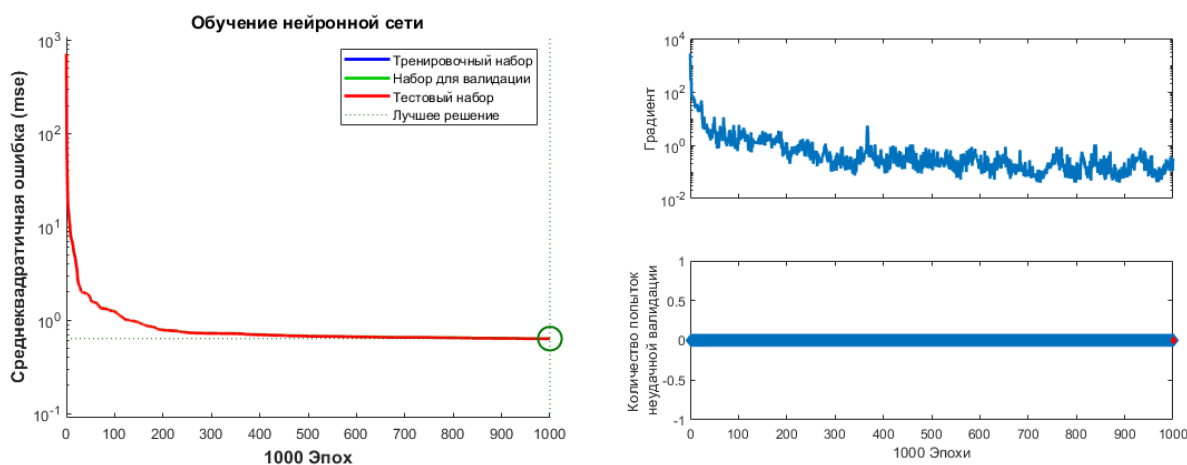


Рисунок 3.4.3. Зависимости, демонстрирующие ход обучения нейросети

По окончании процесса обучения были произведены оценки на показатели точности работы нейросети, а также её чувствительности к входным параметрам.

Испытания нейросети на тестовой выборке данных (выделенной в отдельный массив на этапе формирования обучающей выборки) показали, что коэффициент корреляции между опорными концентрациями углекислого газа, взятыми из реанализа и рассчитанными по наборам сопутствующих параметров, составляет 0,917, а СКО не превышает 0,5 ppm в диапазоне значений объёмной доли CO_2 от 410 до 415 ppm (рисунок 3.4.4).

Для анализа влияния входных параметров нейронной сети на выходное значение усреднённой объёмной доли углекислого газа была проведена серия модельных расчётов. При этом была сгенерирована выборка, состоящая из 10 млн различных комбинаций

входных параметров. Генерация каждой новой комбинации выполнялась по принципу изменения случайным образом лишь одного входного параметра, при постоянстве прочих, с целью последующей имитации процесса нахождения частной производной по выделенному параметру. Для каждого набора из 13 входных значений был произведён расчёт по обученной нейронной сети. Все 10 млн комбинаций были проанализированы на предмет получения их статистических оценок (среднее значение и среднеквадратическое отклонение) по каждому из входных параметров по отдельности. На рисунке 3.4.5 приведены графики влияния входных параметров нейронной сети на расчёт CO_2 . Результаты представлены в нормированном виде (для каждого из параметров), для упрощения восприятия полученных данных. Следует отметить, что полученные зависимости хорошо согласуются с результатами корреляционного анализа, приведёнными на рисунке 3.4.1.

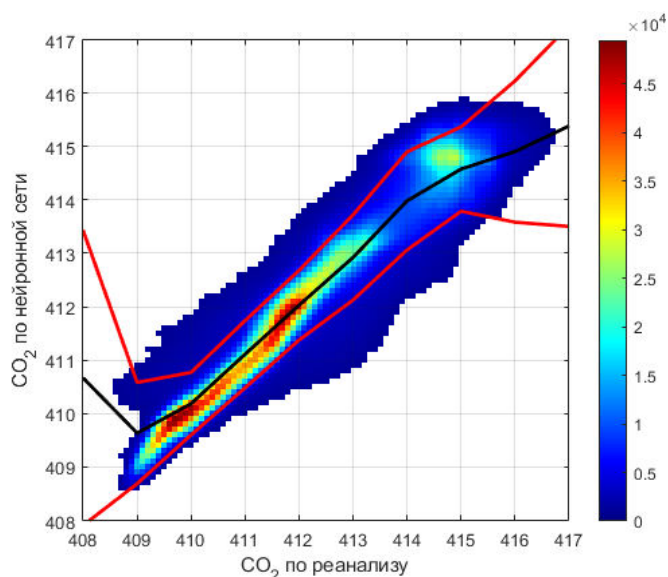


Рисунок 3.4.4. Диаграмма рассеяния между опорными и расчетными значениями концентрации CO_2 . Цветовая шкала отражает количество тестовых точек, попавших в тот, или иной диапазоны

Исследование возможности применения предложенной нейронной сети для заполнения пропусков в спутниковых данных проводилось на основе глобальной карты распределения усреднённой объёмной доли углекислого газа, взятой из реанализа и соответствующей 21:00 UTC 25 июля 2020 года (рисунок 3.4.6).

Для имитации пропусков в измерениях на соответствующей глобальной карте, с использованием данных о состоянии облачности, были устранены элементы, для которых плотность облачного покрова превышала 50%. Результат этой операции представлен на рисунке 3.4.7.

На следующем этапе для каждого элемента областей отсутствующих данных выполнялся расчёт усреднённой объёмной доли углекислого газа с использованием разработанной нейронной сети на основе считающихся известными 13 входных параметров (рисунок 3.4.8). После чего результаты восстановления совмещались с искусственно созданным на первом этапе изображением (рисунок 3.4.7) в единую глобальную карту, представленную на рисунке 3.4.9.

Как видно на последнем изображении — сформированное композитное поле хорошо описывает глобальные особенности распределения углекислого газа в атмосфере Земли. Четко прослеживается широтное распределение указанного параметра, видны потоки, сформированные крупномасштабными атмосферными процессами. Могут быть локализованы источники значимых выбросов и атмосферные шлейфы, им соответствующие.

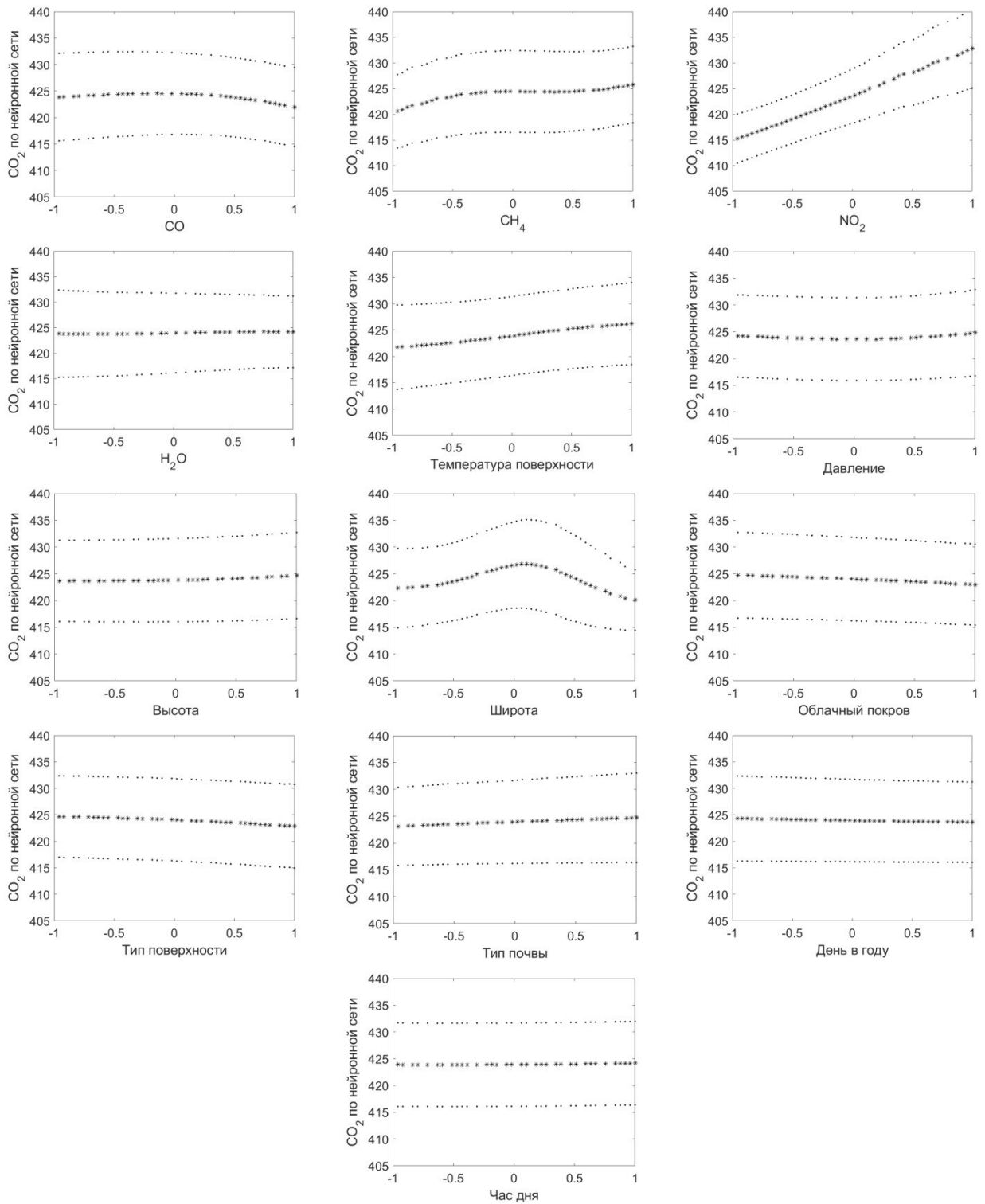


Рисунок 3.4.5. Влияние входных параметров нейронной сети на расчёт объёмной доли CO₂. Звёздочки — среднее значение, точки — SKO

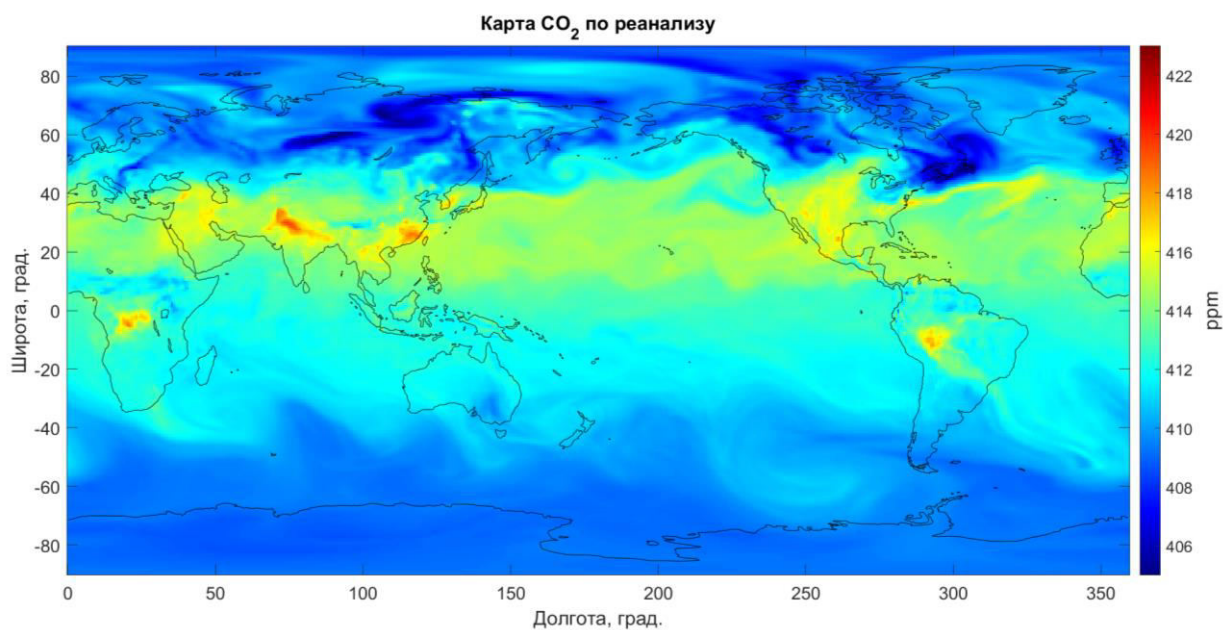


Рисунок 3.4.6. Исходное поле распределения усреднённой объёмной доли углекислого газа по данным реанализа. 21:00, 25 июля 2020 г.

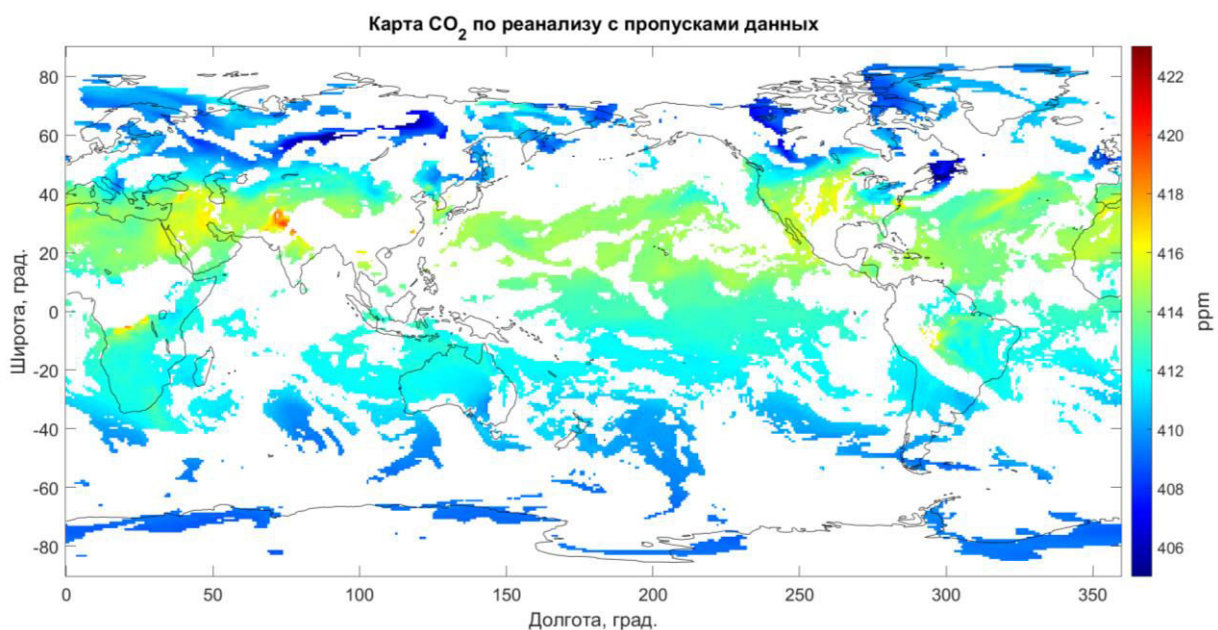


Рисунок 3.4.7. Поле объёмной доли углекислого газа с искусственно введёнными пропусками

Детальное рассмотрение карты расхождения абсолютных значений исходной и восстановленных глобальных карт распределения усреднённой объёмной доли углекислого газа, представленной на рисунке 3.4.10, позволяет выделить ряд негативных аспектов подобного подхода. Несмотря на то, что для подавляющего большинства точек, ошибка не превышает уровня 0,5 ppm, она, в основном, имеет положительные значения. При этом наблюдается резкий переход между областями реконструкции и априорно известными в рамках моделируемой ситуации. В свою очередь, это является серьёзной проблемой при дальнейшем использовании подобных изображений в задачах оценки интенсивности горизонтального переноса МГС. Наибольшие отличия проявляются в областях исходно высоких/низких значений объёмной доли диоксида углерода. В частности, нейронная сеть дала существенно более низкие значения концентрации для северо-западной части Южной Америки и переоценила соответствующие величины для

восточного побережья Северной Америки и на севере Индии. Следует отметить, что, как и любые аппроксимирующие функции, нейронные сети дают существенные ошибки при выходе искомым значений за пределы исходной обучающей выборки. Таким образом, увеличение временного интервала, используемого для обучения сети, может способствовать их уменьшению. Снижению общего уровня ошибки, помимо увеличения обучающей выборки, должно способствовать и расширение перечня входных данных. Назначение земель сельхозугодий, тип растительности, тип леса и его возраст и т.п. оказывают существенное влияние на интенсивность эмиссии/поглощения парниковых газов, поэтому включение подобных переменных должно также способствовать повышению качества работы нейросети.

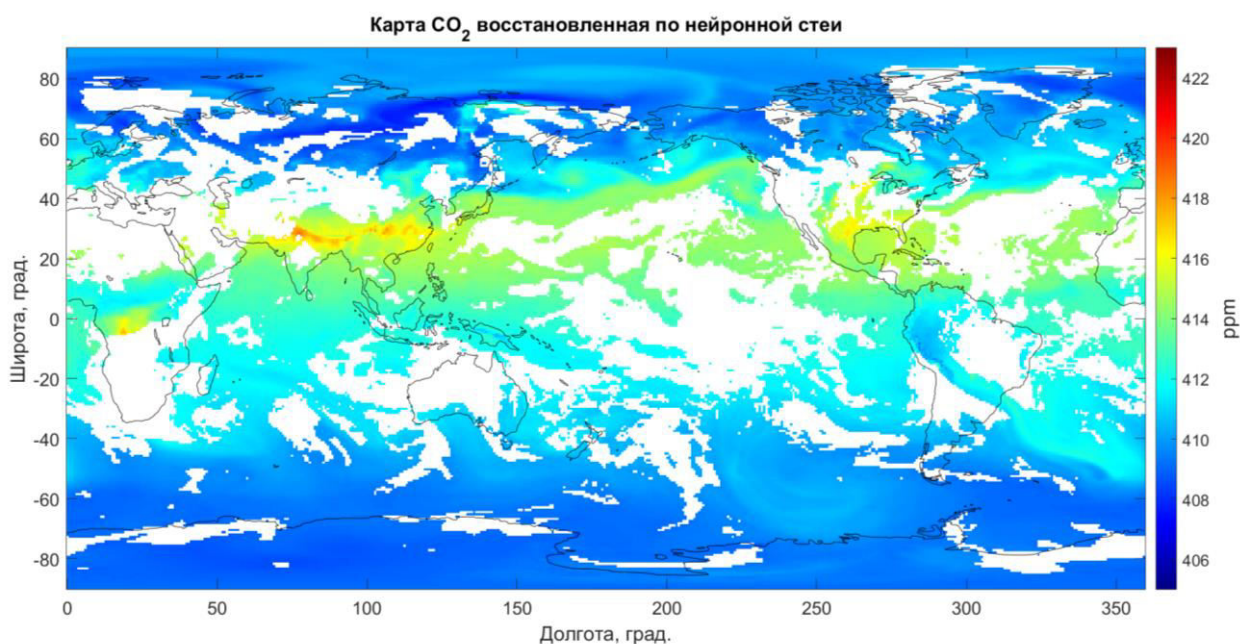


Рисунок 3.4.8. Поле распределения объёмной доли углекислого газа, рассчитанное нейронной сетью

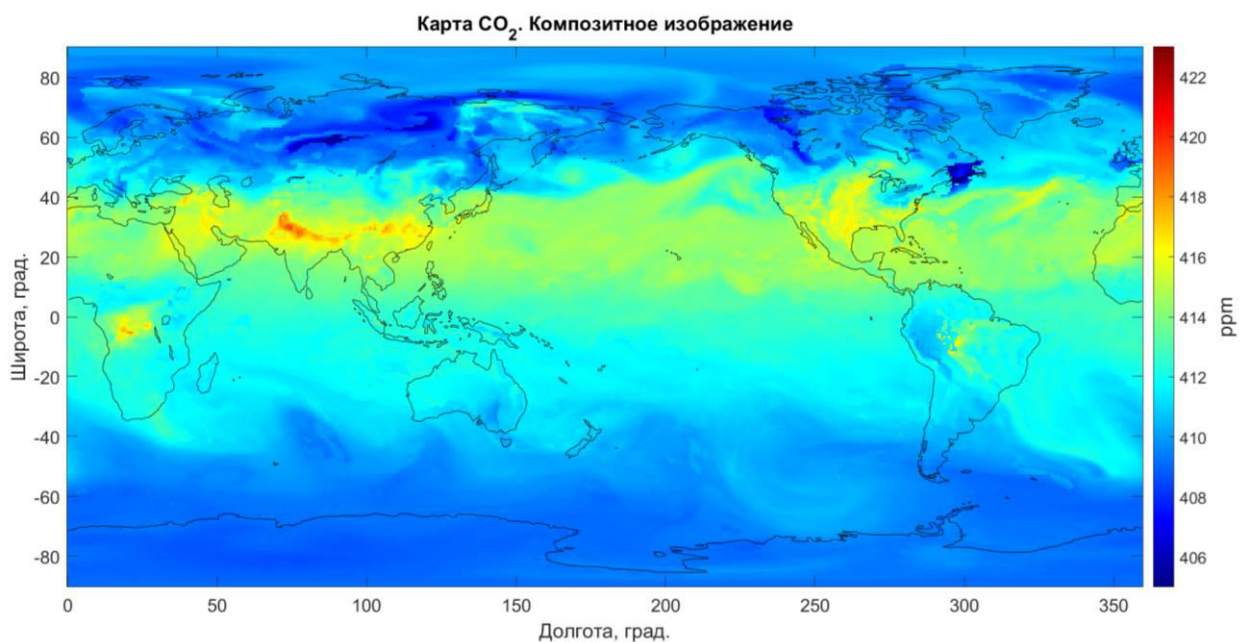


Рисунок 3.4.9. Композитное поле распределения объёмной доли углекислого газа

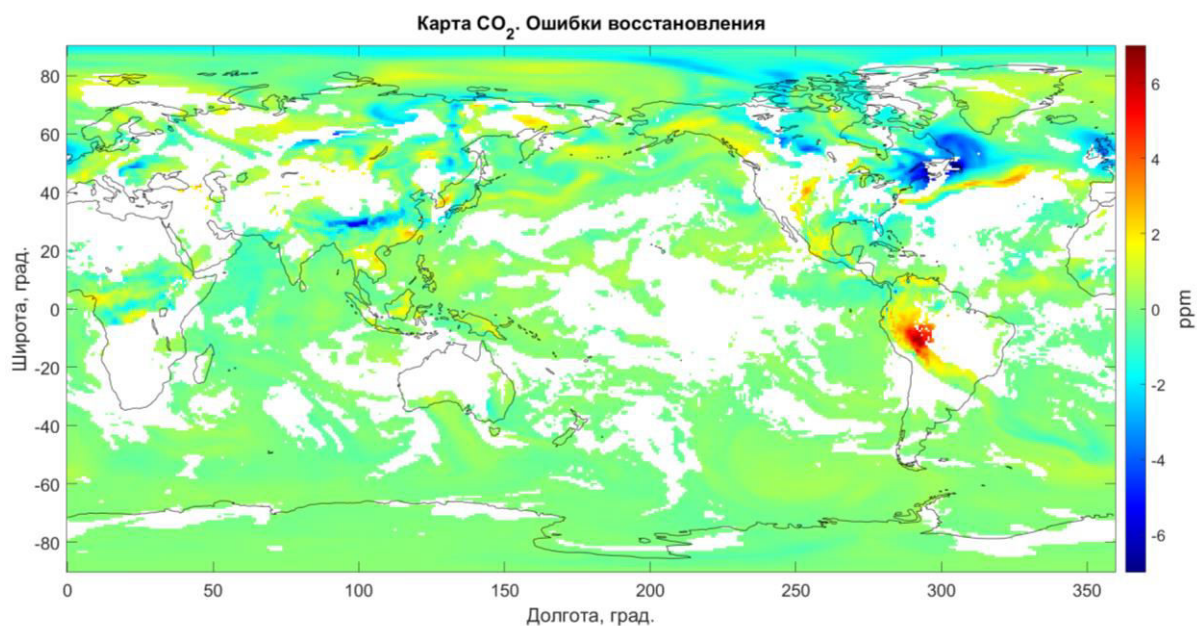


Рисунок 3.4.10. Карта распределения абсолютной ошибки восстановления усредненной объёмной доли углекислого газа с использованием нейронной сети

Заключение

Представленные в настоящей главе материалы показывают, что в рамках решения основной задачи проекта — развития методов усвоения данных ДЗЗ и продуктов их обработки в численных моделях атмосферной циркуляции на втором этапе работ (2023 г.) получены следующие основные результаты:

- дано общее математическое описание предложенной методики балансовых оценок для расчета эмиссий и стоков МГС атмосферы;
- описана и программно реализована методика расчета элементов балансового уравнения, в том числе, атмосферного горизонтального переноса МГС;
- описана, программно реализована и протестирована на примере наблюдения выбросов CO крупными лесными пожарами методика получения балансов (вертикального обмена) МГС;
- проанализированы и выявлены корреляционные связи между концентрациями различных МГС и другими физическими параметрами атмосферы в интересах восполнения пропусков спутниковых измерений (в том числе, связанных с неблагоприятными условиями наблюдений).

Представленные материалы позволяют сделать вывод о том, что запланированные работы второго этапа (2023) в рамках основной задачи развития методов усвоения данных ДЗЗ и продуктов их обработки в численных моделях атмосферной циркуляции выполнены в полном объеме.

ГЛАВА 4 СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО (СПУТНИКОВОГО) НАУЧНОГО МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИЙ И ПОТОКОВ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ

Введение

Как уже отмечалось в отчете по настоящей теме за 2022 год, в последние десятилетия было создано и запущено значительное число приборов, обеспечивающих восстановление различных характеристик МГС. Это привело к тому, что в настоящее время создан целый ряд технологий и систем, которые обеспечивают регулярное получение различных информационных продуктов о состоянии МГС в атмосфере. Были созданы долговременные, постоянно пополняющиеся архивы данных таких продуктов. Следует также отметить, что многие из этих архивов в настоящее время находятся в свободном доступе (как минимум для проведения научных исследований). Это позволяет использовать данную информацию для мониторинга МГС и реализации различных научных проектов. Во многих случаях, в том числе и для выполнения настоящего проекта, возникает необходимость в комплексном анализе информации о МГС, получаемой на основе различных спутниковых систем, а также анализе данной информации совместно с другими спутниковыми, метеорологическими и наземными данными. Для реализации таких возможностей на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru>) создана и в 2023 году в рамках настоящего проекта продолжала поддерживаться и активно развиваться подсистема работы с различной информацией о МГС, получаемой на основе спутниковых наблюдений (далее Подсистема). Отметим, что Подсистема также обеспечивает возможность работы и с данными об аэрозольных загрязнениях атмосферы. Описанию основных текущих возможностей данной Подсистемы и посвящен данный раздел настоящего отчета.

Полученные в рамках работ второго этапа (2023 г.), в частности, представлены в публикациях [2, 6].

4.1 Информационные продукты о концентрациях малых газовых составляющих, работа с которыми организована в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

В настоящее время Подсистема обеспечивает возможность автоматического получения стандартных информационных продуктов о МГС, формируемых на основе данных приборов TROPOMI (Sentinel-5P) и OMI (AURA). (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>; https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/OMI/3.3_ScienceDataProductDocumentation/3.3.2_ProductRequirements_Designs/README.OMI_DUG.pdf). В список стандартных информационных продуктов о МГС входят концентрации МГС в различных слоях атмосферы, в том числе общее содержание газовой компоненты в полном атмосферном столбе, а также продукт аэрозольного индекса, являющийся качественным показателем, указывающим на наличие приподнятых слоёв аэрозолей со значительным поглощением (пыль пустыни, горячая биомасса, вулканические пепловые облака). Данные продукты представлены в свободном доступе в следующих центрах распространения спутниковых данных и результатов их обработки: LAADS DAAC (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) и Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) (далее Центры). Список продуктов, которые предоставляют эти центры, приведён в таблице 4.1.1.

Данные стандартные информационные продукты (далее, информационные продукты) формируются и распространяются Центрами в двух вариантах:

- NRTI (Near real time interval) – продукты, предоставляемые в режиме реального времени, как правило, в течение 3 часов после измерения. Такие продукты строятся на основе данных уровня L1B.

- RPRO (ReProcessing) – продукты более высокого уровня обработки. Алгоритмы расчёта таких продуктов включают в себя дополнительные параметры, например, метеоданные.

Таблица 4.1.1 — Стандартные информационные продукты о концентрации МГС, доступные в открытом доступе в системах LAADS DAAC и Copernicus Open Access Hub

Прибор	Продукт	Характеристика	Ссылка на описание продукта
TROPOMI	<u>UV Aerosol Index</u>	Индекс аэрозоля	http://www.tropomi.eu/data-products/uv-aerosol-index
TROPOMI	<u>Aerosol Layer Height</u>	Высота аэрозольного слоя	http://www.tropomi.eu/data-products/aerosol-layer-height
TROPOMI	<u>Carbon monoxide (CO)</u>	Общее содержание CO в атмосферном столбе	http://www.tropomi.eu/data-products/carbon-monoxide
TROPOMI	<u>Cloud</u>	Альбедо, давление на верхней границе облачного слоя	http://www.tropomi.eu/data-products/cloud
TROPOMI	<u>Formaldehyde (HCHO)</u>	Общее содержание HCHO в атмосферном столбе	http://www.tropomi.eu/data-products/formaldehyde
TROPOMI	<u>Methane (CH₄)</u>	Общее содержание CH ₄ в атмосферном столбе	http://www.tropomi.eu/data-products/methane
TROPOMI	<u>Nitrogen dioxide (NO₂)</u>	Общее содержание NO ₂ в атмосферном столбе	http://www.tropomi.eu/data-products/nitrogen-dioxide
TROPOMI	<u>Ozone profiles</u>	Профили концентрации O ₃	http://www.tropomi.eu/data-products/ozone-profiles
TROPOMI	<u>Sulphur dioxide (SO₂)</u>	Общее содержание SO ₂ в атмосферном столбе	http://www.tropomi.eu/data-products/sulphur-dioxide
TROPOMI	<u>Ozone (O₃)</u>	Общее содержание O ₃ в атмосферном столбе	http://www.tropomi.eu/data-products/total-ozone-column
TROPOMI	<u>Tropospheric Ozone (O₃)</u>	Концентрация O ₃ в столбе тропосферы	http://www.tropomi.eu/data-products/tropospheric-ozone-column
OMI	<u>Nitrogen dioxide (NO₂)</u>	Общее содержание NO ₂ в полном, тропосферном, стратосферном столбе	https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html
OMI	<u>Ozone (O₃)</u>	Общее содержание O ₃ в атмосферном столбе	https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html
OMI	<u>Sulphur dioxide (SO₂)</u>	Общее содержание SO ₂ в столбе	https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html
OMI	<u>UV Aerosol Index</u>	Индекс Аэрозоля	https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html

Продукты высокого уровня обработки представляются Центрами в виде файла, содержащего информацию с одного витка в проекции пролёта, в то время как продукты, близкие к реальному времени, в виде пятиминутных гранул в проекции пролёта. Продукты NRTI обычно используются только для получения оперативных сведений о текущих распределениях МГС и аэрозоля. Для проведения анализа динамики МГС и аэрозоля в атмосфере используются обычно продукты более высокого уровня обработки, а также информация, полученная на их основе.

В ЦКП «ИКИ-Мониторинг» реализована процедура полностью автоматического получения информационных продуктов из различных предоставляющих Центров. Организовано получение данных всех видов, как NRTI, так и RPRO. Получаемые данные автоматически усваиваются в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг», которые реализованы на

основе технологии UNISAT. Физическое хранение данных в архивах организовано в виде фрагментов, содержащих данные, за пять минут наблюдения (пятиминутные гранулы). Данные записаны в формате GeoTiff. Состав архивов информационных продуктов, полученных из Центров, представлен в таблице 4.1.2. Оперативную информацию о составе данных архивов можно получить на сервере ЦКП «ИКИ-Мониторинг» по ссылке http://d902.iki.rssi.ru/archstat-cgi/unisat_products_stat.pl?true_stat=1.

Таблица 4.1.2 Состав информационных продуктов о концентрациях МГС, доступных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Спутник	Прибор	Компонента	Доступность данных в архивах ЦКП
Sentinel 5P	TROPOMI	NO ₂	2018 г. по настоящее время
		SO ₂	
		O ₃	
		CO	
		Aerosol	
		CH ₄	
AURA	OMI	SO ₂	2006 г. по настоящее время
		NO ₂	
		Aerosol	

После усвоения данных в архивы эти данные автоматически становятся доступны в программных и веб-интерфейсах различных информационных систем, реализованных ИКИ РАН с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг», в том числе в системе «Вега-Science» (<http://sci-vega.ru/>). Все это, в частности, позволяет пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг» практически оперативно работать с данными NRTI.

4.2 Построение временных композитов на основе накопленных в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» информационных продуктов о концентрациях МГС

Для изучения динамики концентраций МГС, в том числе долговременной, во многих случаях удобно использовать не отдельные («мгновенные») измерения, а данные, интегрированные за различные периоды времени. Такие информационные продукты (временные композиты) обычно представляют собой изображения, покрывающие какую-то территорию, в каждой точке которых содержится информация о какой-либо характеристике, полученной на основе всех имеющихся в данной точке наблюдений за заданный период времени. Например, среднее, максимальное или минимальное значение концентрации МГС за заданный период времени. Также следует отметить, что в некоторых случаях при построении временных композитов следует учитывать только те данные, которые удовлетворяют определённым условиям наблюдений. Например, при использовании только данных, полученных в условиях, когда ветер не превышал определённого порога скорости, можно построить временные композиты, которые могут быть эффективны при выявлении источников загрязнений.

На основе получаемых данных, описанных выше, в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» реализована полностью автоматическая процедура, позволяющая формировать временные композиты для различных характеристик МГС и аэрозольного индекса за произвольные периоды времени. В настоящий момент реализовано построение временных композитов за день, неделю, месяц и год. Полная схема организации потоковой обработки по усвоению данных о концентрации МГС, а также формируемых на основе этих продуктов временных композитов различных характеристик в ЦКП «ИКИ-Мониторинг», представлена на рисунке 4.2.1.

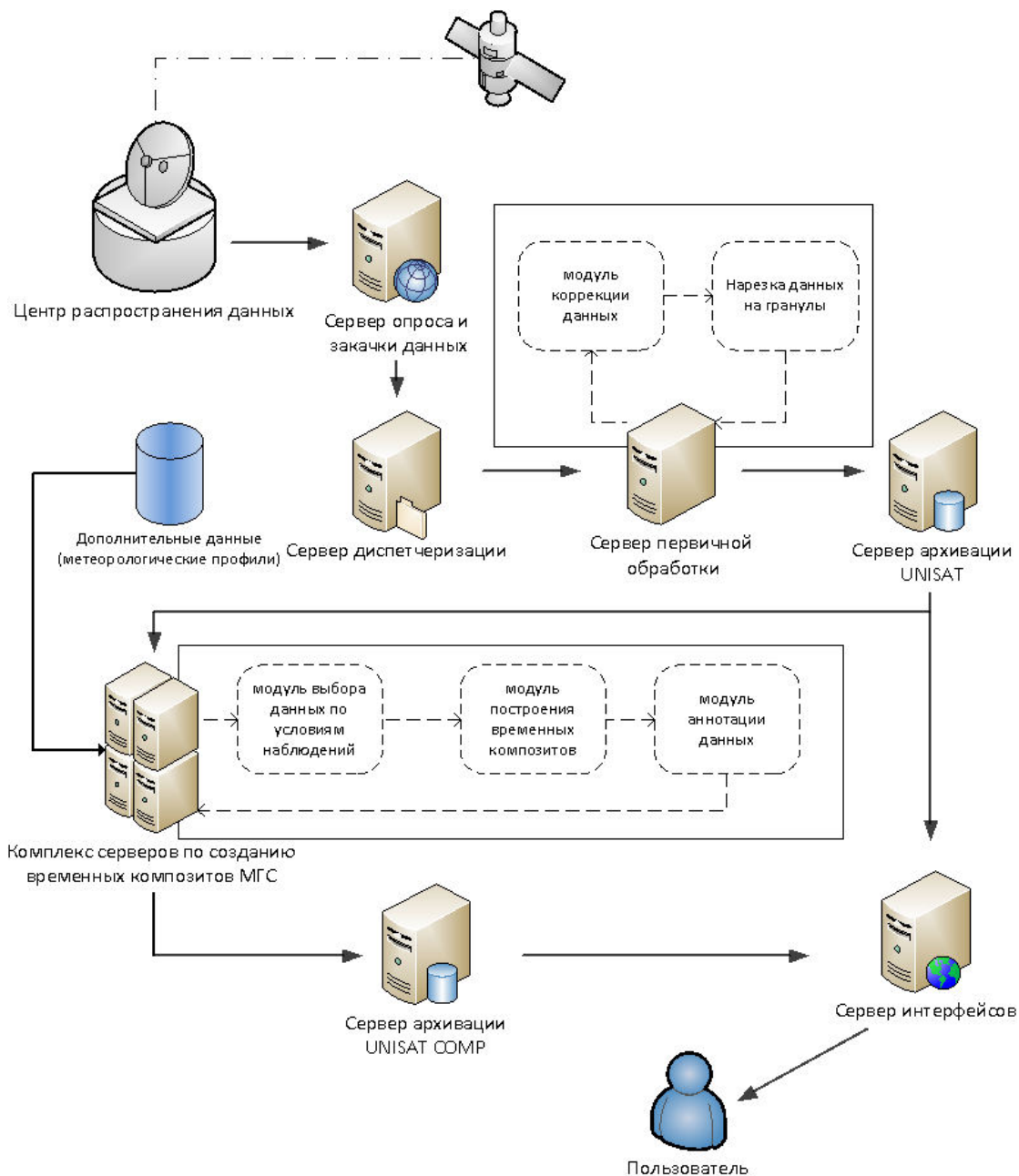


Рисунок 4.2.1. Блок-схема организации обработки, архивации и представления различных продуктов по МГС в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Модуль предварительной обработки обеспечивает дополнительную очистку и коррекцию стандартных продуктов, поступающих из Центров. Такая обработка может требоваться для некоторого типа продуктов. Так, например, в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» такая обработка проводится для стандартных продуктов по концентрации SO_2 и обеспечивает более корректный учёт условий наблюдений. Для этого разработан алгоритм, основанный на методе анализа гистограмм. Суть метода заключается в анализе распределения значений концентрации SO_2 при разных углах наблюдения. Данный алгоритм позволяет существенно сократить шумовые эффекты, наблюдаемые при использовании стандартного продукта по SO_2 .

Модуль построения временных композитов (МТВК) осуществляет выбор данных, необходимых для построения конкретного композита, из архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Все полученные за заданный промежуток времени данные переводятся в одну проекцию, и для всего набора данных формируются одинаковые (имеющие одинаковый размер, пространственное разрешение и географическую привязку)

растровые карты. Если при расчёте композита необходим учёт условий наблюдения (например, метеоусловий), то к каждой растровой карте, описанной выше, также формируется бинарная растровая карта-маска в той же проекции. После того, как сформирован необходимый набор карт для обработки, на его основе производится расчет необходимых статистических характеристик (например, средних, минимальных и максимальных значений), необходимых для построения временных композитов. На основе результатов расчёта формируется соответствующая растровая карта, которая сохраняется в формате GeoTiff. Основой МПВК является программный модуль, реализованный на базе языка программирования python3 с использованием стандартных библиотек работы с растровыми и векторными данными. Данный модуль позволяет формировать композитное изображение за любой промежуток времени по заданным правилам построения конкретного временного композита.

Модуль усвоения временных композитов в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Модуль обеспечивает аннотацию данных, то есть формирование метаданных к ним, включающей: название спутника, прибора, время начала или конца съёмки и хэши-сумму для проверки целостности данных, а также автоматическое помещение созданных продуктов в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг». При этом модуль выполняет процедуры контроля состояния архивов на предмет наличия одинаковых продуктов, осуществляет контроль актуальности вводимых и уже существующих в архивах продуктов, для обеспечения погружения в архивы наиболее актуальных продуктов.

Таблица 4.2.1 — Состав архивов временных композитов в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Временной композит	Характеристика	Прибор	МГС
Ежедневный	Минимум Максимум Среднее	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
		OMI	Aerosol Index, NO ₂ , O ₃
Еженедельный	Минимум Максимум Среднее	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
		OMI	NO ₂
Ежемесячный	Минимум Максимум Среднее	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
Годовой	Минимум Максимум Среднее	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
Многолетний	Минимум Максимум Среднее	TROPOMI	NO ₂
		OMI	NO ₂
Сезонный	Максимум Среднее	TROPOMI	NO ₂

После того как сформированные временные композиты помещены в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг», доступ к ним может быть обеспечен стандартными схемами, которые используются в ЦКП, в том числе они становятся доступны в веб-интерфейсах системы «Вега-Science» (<http://sci-vega.ru/>). Возможности работы с ними также могут быть интегрированы в различные специализированные информационные системы, созданные, работающие и развивающиеся на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

В настоящее время в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» осуществляется автоматическое построение достаточно широкого набора временных композитов различных характеристик МГС, получаемых на основе данных приборов OMI и TROPOMI. В

большинстве случаев такие композиты строятся на территории всего Земного шара. Состав архивов временных композитов характеристик МГС на момент подготовки отчета приведён в таблице 4.2.1.

Некоторые примеры формируемых временных композитов приведены на рисунке 4.2.2.

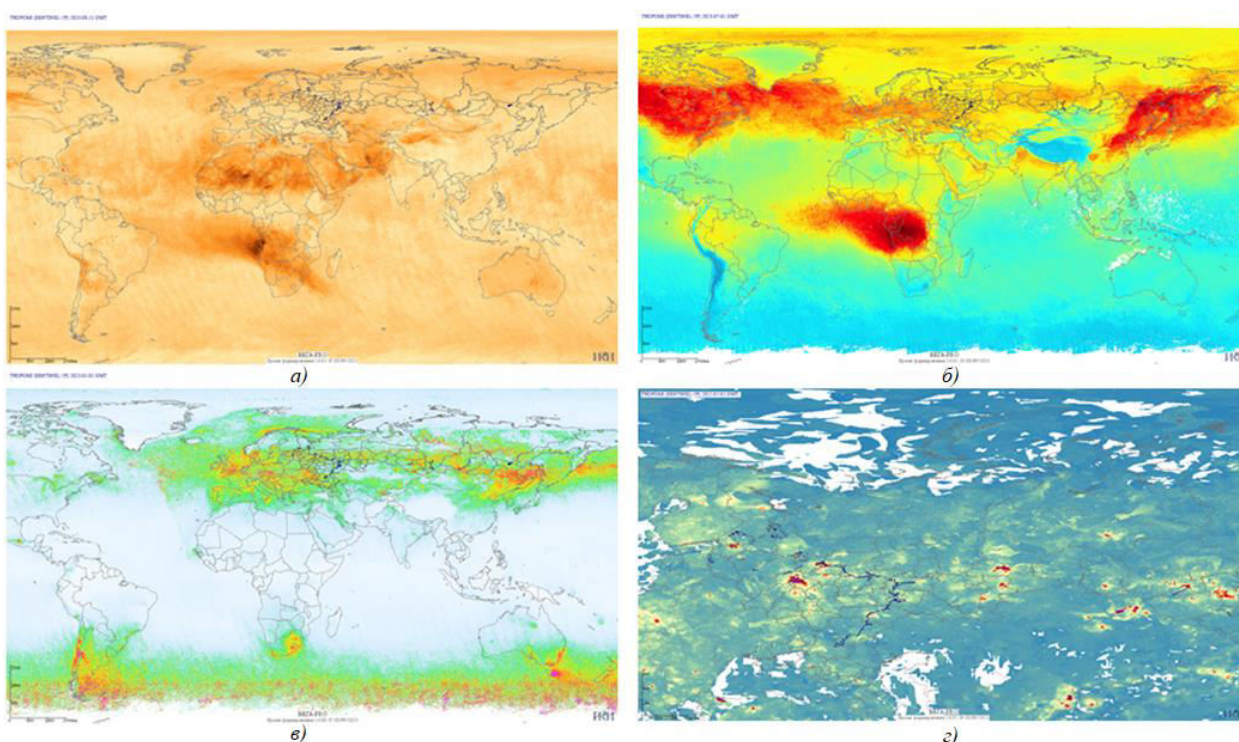


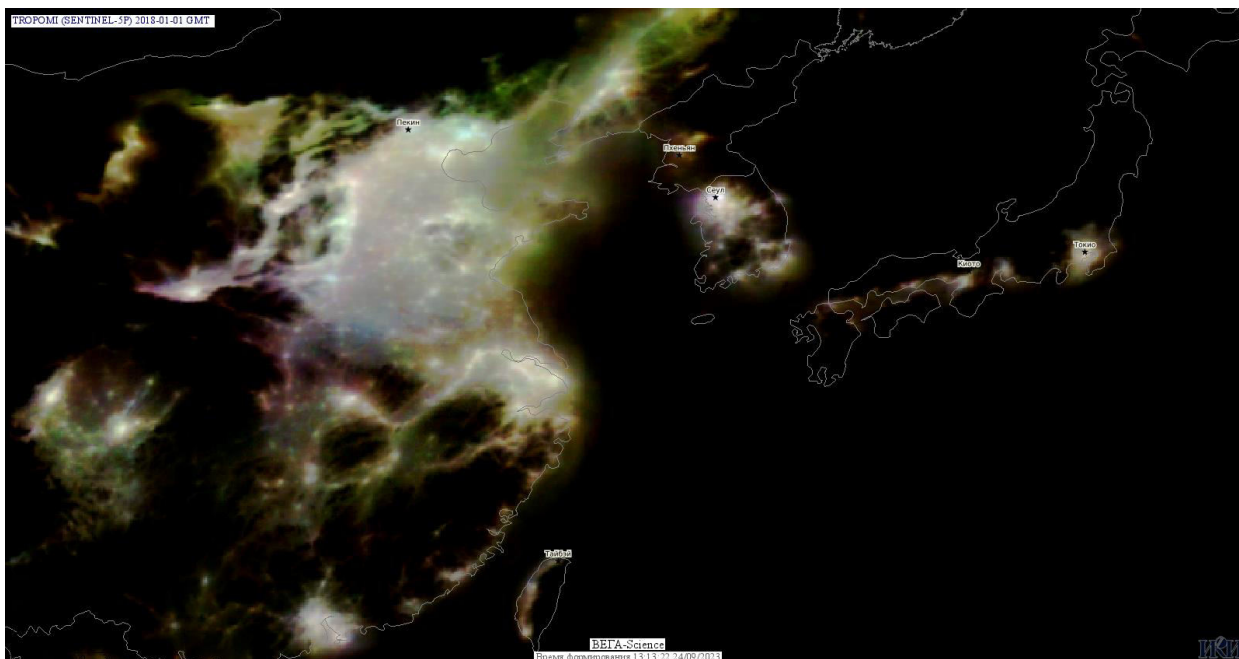
Рисунок 4.2.2. Примеры временных композитных изображений по данным прибора TROPOMI: *а)* среднее значение аэрозольного индекса на территорию всего земного шара за неделю с 2023-08-21 по 2023-08-28; *б)* среднее значение CO за месяц с 2023-07-01 по 2023-07-31 на территорию всего земного шара; *в)* среднее значение SO₂ за неполный 2023 год с января по август на территорию всего земного шара; *г)* максимальное значение NO₂ за летний сезон 2022 года с первого мая по первое октября на территорию России с условием выбора измерений концентраций только в безветренные дни

Отметим, что созданная система формирования временных композитов характеристик МГС достаточно универсальна и может быть легко применена для работы с различными данными о концентрациях МГС, в том числе для формирования на их основе различных разновременных композитов.

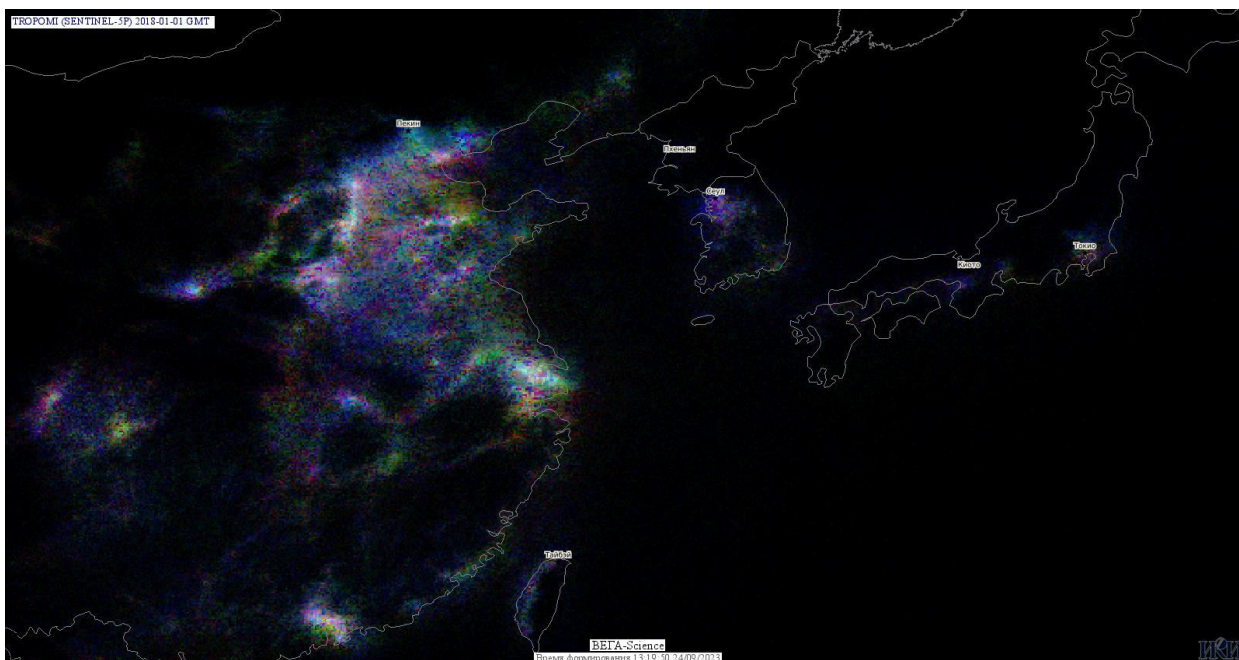
4.3 Основные возможности работы с временными композитами характеристик МГС, реализованные в системе Vega-Science

Одной из возможностей работы с данными МГС и сформированными на их основе информационными продуктами, накопленными в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг», является использование системы «Vega-Science» (<http://sci-vega.ru/>), которая предоставляет достаточно широкий набор инструментов для получения и анализа таких данных. Система в том числе позволяет:

- Обеспечивать возможность проведения выбора, визуализации и анализа как стандартных продуктов, так и временных композитов, в частности совместно анализировать данные, полученные в различные временные сроки. Инструмент позволяет синтезировать (формировать) RGB-изображения, в том числе на основе временных композитов за различные моменты времени. Пример результатов такого синтеза приведён на рисунке 4.3.



a



b

Рисунок 4.2.3 — Примеры разновременных цветосинтезированных изображений, построенных на основе годовых композитов концентраций NO_2 , восстановленных по данным прибора TROPOMI за 2022 (красный), 2020 (зелёный) и 2018 (синий) годы: *a* — на основе композитов средних концентраций за соответствующий год; *b* — на основе композитов минимальных концентраций за соответствующий год

На нём показаны результаты синтеза данных о концентрациях NO_2 по территории центрального и восточного Китая, Корейского полуострова и южных островов Японии. Цветовая изменчивость представленных изображений отражает изменчивость наблюдаемых концентраций NO_2 в различные годы. Так, например, можно обратить внимание, что минимальный уровень концентраций наблюдаемых минимальных за год значений NO_2 (рисунок 4.2.3б) на значительных территориях имеет ярко выраженный синий оттенок. Это, в том числе, может быть объяснено тем, что на данных территориях в период до

распространения COVID-19 уровень загрязнения был ощутимо выше, чем в периоды пандемии и после.

- Проводить анализ численных значений концентрации МГС в различных точках, в том числе и изменение этих концентраций по времени.
- Создавать анимации, которые позволяют анализировать распространение МГС и аэрозолей от различных источников. Например, в ИС «Вега-Science» была создана анимация на основе ежедневных композитных изображений (<http://sci-vega.ru/animation/1694095228.gif>), на которой хорошо видна циркуляция аэрозолей, вызванных мощными лесными пожарами в Сибири в июле-августе 2019 года.
- Рассчитывать различные статистические характеристики (среднее, минимальное, максимальное значения, площади пикселей с определёнными значениями и т. п.) внутри границ произвольных полигонов на основе создаваемых композитных изображений с концентрацией МГС. Строить временные ряды этих характеристик в модуле анализа временных рядов и, таким образом, отслеживать и анализировать состояние некоторых объектов, например, локализованных источников выбросов различных газов.

Заключение

Таким образом, реализованная на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и в настоящее время поддерживаемая в рамках настоящего проекта подсистема сбора, автоматизированной обработки и анализа данных о концентрациях МГС в атмосфере может быть использована для решения различных научных и прикладных задач. В настоящее время основной задачей Подсистемы является обеспечение информацией проекта. Подсистема в настоящее время активно используется для решения различных задач проекта, которые, в частности описаны в главах 3 и 5 настоящего отчета.

Следует также отметить, что формируемые подсистемой архивы спутниковых данных и результатов их обработки, а также инструменты, обеспечивающие возможности их распределённого анализа, уже сегодня интегрированы и используются в информационных системах различных научных и прикладных проектов, например, в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ-Рослесхоз, <https://pushkino.aviales.ru/>), информационной системе мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил (VolSatView, <http://volcanoes.smislab.ru/>), информационно-аналитической системе мониторинга углерода наземных экосистем (ИАС «Углерод-Э», <http://carbon.geosmis.ru/>).

Представленные материалы настоящего раздела позволяют сделать вывод о том, что в 2023 г. в рамках проекта на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» развивалась и поддерживалась инфраструктура и элементы технологии и системы дистанционного (спутникового) научного мониторинга концентраций и потоков малых газовых составляющих атмосферы. Это позволило осуществлять решение различных задач проекта. Поэтому следует считать, что работы, проводимые по данному направлению, в рамках проекта выполнены полностью.

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСТОЯННОГО ДИСТАНЦИОННОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Введение

В рамках работ над основной задачей проекта - обеспечением возможности оперативной оценки, на основе существующих и перспективных средств постоянного спутникового мониторинга, пространственных распределений концентраций и потоков парниковых газов на территории России в 2023 году решались в первую очередь задачи, связанные с оценкой возможностей и разработкой методов мониторинга крупных источников выбросов парниковых газов. Решение данных задач необходимо для организации постоянного мониторинга выбросов парниковых газов и других загрязнений в атмосферу. На этапе 2023 г. проводились следующие основные работы:

- исследование возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа пространственных распределений концентраций малых газовых составляющих в районах расположения крупных антропогенных объектов на примере анализа концентраций диоксида азота;
- оперативное построения карт интенсивности горения пожаров для оценок потенциальной гибели лесной растительности и интенсивности выбросов парниковых газов в атмосферу и пространственного распределения их концентраций;
- исследование связи вариаций концентрации парниковых газов над водно-болотными угодьями с их фенологическими фазами, определяемыми по спутниковым данным.

Основные результаты, полученные в рамках проекта, представлены в настоящем разделе отчёта и в публикациях [3, 8].

5.1 Возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа пространственных распределений концентраций малых газовых составляющих в районах расположения крупных антропогенных объектов на примере анализа концентраций диоксида азота

Настоящий раздел отчёта посвящён описанию возможностей анализа данных концентрации малых газовых составляющих (МГС) на примере данных прибора TROPOMI, содержащих информацию о концентрации диоксида азота (NO_2). В нем обсуждаются вопросы выделения основных источников выбросов данного газа. Приводятся примеры результатов обработки данных с концентрацией NO_2 с помощью технологии объектного мониторинга в районах расположения стационарных источников. Следует отметить, что подходы, предлагаемые и используемые для данного анализа, применимы и для мониторинга и анализа распределений концентраций и других парниковых газов.

Диоксид азота — одна из газовых составляющих атмосферы Земли, присутствующая как в тропосфере, так и в стратосфере. Этот газ является токсичным и попадает в атмосферу в результате антропогенной деятельности (диоксид азота занимает одно из первых мест), в частности, в результате сжигания топлива и биомассы, а также природных процессов, таких как лесные пожары, молнии, почвенные процессы и т.п. Основными источниками загрязнения диоксидом азота в современных мегаполисах являются автотранспорт и энергетика. В процессе высокотемпературного сгорания органического топлива происходят реакции двух типов: между кислородом воздуха и азотом в топливе (содержание азота в угле составляет около 1 %, в нефти и природном газе — порядка 0,2–0,3 %) и между кислородом и азотом, содержащимися в воздухе. При

этом в атмосферный воздух поступает оксид азота NO, который в присутствии кислорода и озона трансформируется в диоксид азота NO₂ по схеме $NO + O_3 = NO_2 + O_2$.

5.1.1 Основа для выполнения работ

Проведённые работы основывались, в том числе, на использовании Подсистемы работы с информационными продуктами о концентрациях малых газовых составляющих, подробно описанных в гл. 4 настоящего отчёте.

Кроме этого, для выполнения работы использовалась технология объектного мониторинга, разработанная в ИКИ РАН и реализованная, в том числе, в рамках уникальной научной установки ИС Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>). Данная технология позволяет автоматически рассчитывать интегральные характеристики (среднее, минимальное, максимальное значения и т.п.) в границах произвольных полигонов исследуемых объектов на основе различных тематических продуктов/данных измерений, имеющихся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Технология даёт возможность проводить не только единоразовые расчёты, но и осуществлять постоянный мониторинг таких объектов, автоматически проводя расчёты по новым данным, появляющимся в архивах. Данная технология была задействована для постоянного слежения за стационарными источниками выбросов NO₂ на основе композитных изображений, создаваемых по данным TROPOMI (Sentinel-5P), с помощью инструментов технологии объектного мониторинга, том числе в регионах расположения российских городов-миллионников (<https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>), представляющих собой крупные источники выбросов диоксида азота, по ежемесячным композитным изображениям TROPOMI (Sentinel-5P).

5.1.2 Некоторые особенности организации анализа и интерпретации получаемых результатов

В рамках работы был проведён анализ взаимосвязи спутниковых и наземных измерений, основной целью которого была оценка того, насколько концентрации, получаемые на основе данных TROPOMI, связаны с концентрациями диоксида азота в приземном слое атмосферы. Анализ проводился с использованием информации, получаемой на основе данных TROPOMI и наземных данных автоматических измерительных станций «Мосэкомониторинга» (<https://mosecom.mos.ru/>). Наземные и спутниковые данные содержат информацию о разных типах концентрации в разных единицах измерения: концентрация в приземном слое в мг/м³ и концентрация в столбе тропосферы в мкмоль/м² соответственно. Приведение значений к единому показателю является достаточно сложной задачей, которая в том числе требует достаточно детальных знаний о состоянии атмосферы (см. гл. 1), поэтому при оценке связи концентраций в столбе атмосферы с локально измеренными обычно исследуются корреляции в поведении таких данных. При выполнении настоящей работы такие корреляции анализировались на основе временного совмещения рядов значений концентраций, полученных разными способами, и построения диаграмм рассеяния. Сравнивались ежедневные (рисунок 5.1.2.1), еженедельные и ежемесячные данные (рисунок 5.1.2.2) TROPOMI, усреднённые в границах Москвы, с усреднёнными данными измерительных станций, расположенных в разных районах Москвы: вблизи автомагистралей, жилых районов и природных зон. В расчёт брались дни, когда были измерения хотя бы по 20 из 53 измерительных станций, данные усреднялись по неделям, если были хотя бы 4 дня с измерениями, по месяцам — более 15 дней с измерениями. Данные сравнивались с апреля 2018 года по ноябрь 2021 г., усреднённые за разный временной период: день, неделя, месяц. Анализ показал, что корреляция между спутниковыми и наземными измерениями присутствует, наибольшая корреляция наблюдается для ежемесячных данных, поэтому целесообразно анализировать спутниковые данные, усреднённые по месяцам и сезонам. Данная корреляция также хорошо видна визуально на совмещённых временных рядах данных (рисунок 5.1.2.3).

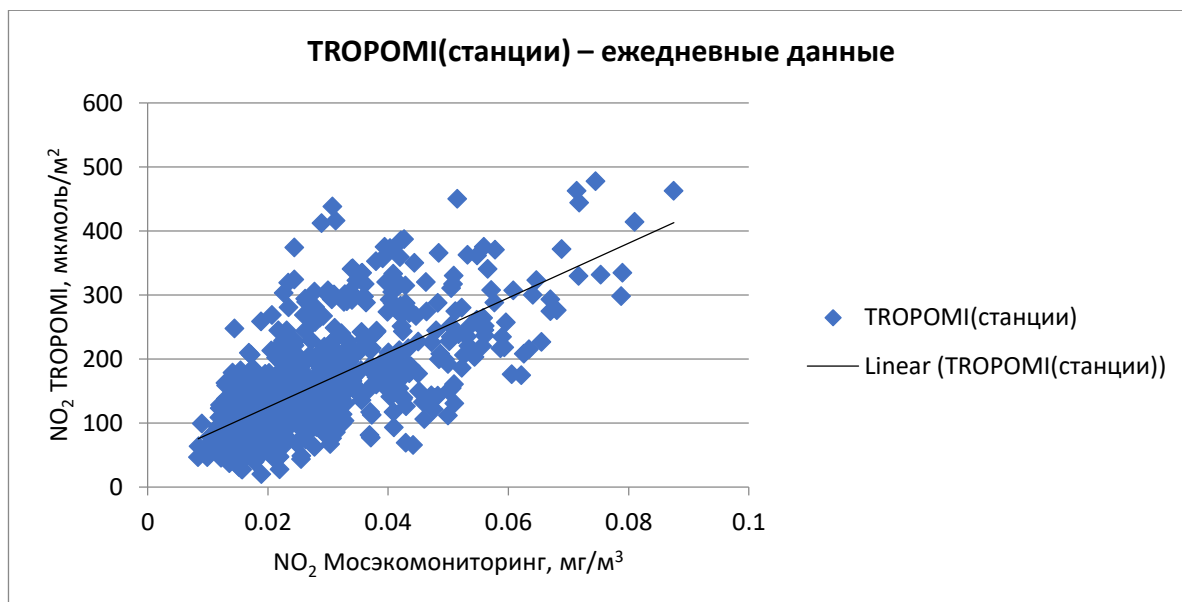


Рисунок 5.1.2.1 — Диаграмма рассеяния средних концентраций NO₂ над территорией Москвы, полученных по ежедневным композитным изображениям TROPOMI, от концентраций, полученных путём наземных измерений

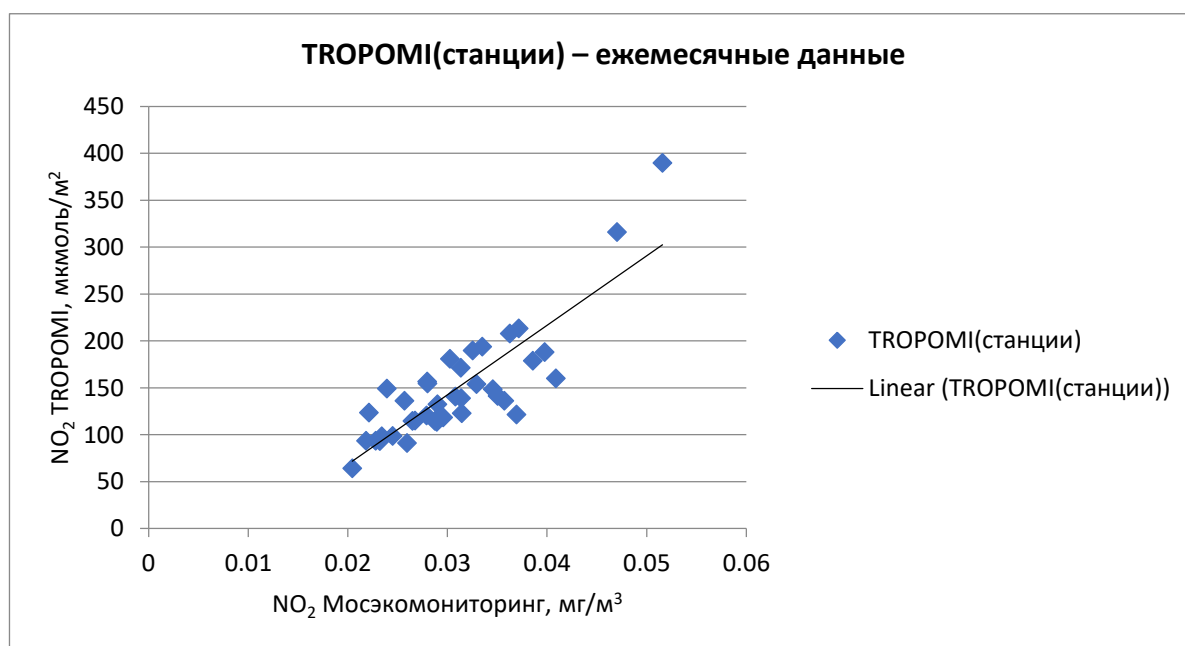


Рисунок 5.1.2.2 — Диаграмма рассеяния средних концентраций NO₂ над территорией Москвы, полученных по ежемесячным композитным изображениям TROPOMI, от концентраций, полученных путём наземных измерений

Также был проведён анализ изменчивости концентрации NO₂ в зависимости от дня недели на примере летних данных (июнь-август), результаты приведены на рисунке 5.1.2.4. Из рисунков видно, что, как для спутниковых, так и для наземных данных наблюдается тренд снижения концентрации в выходные дни, в особенности в воскресенье, при этом в будние дни концентрация меняется незначительно. Такие результаты отражают реальную картину для Москвы, где основным источником выбросов NO₂ является автотранспорт, а также подтверждаются исследованиями (https://yandex.ru/company/researches/2014/ya_traffic_msk_2014). Следует отметить, что информация о наземной концентрации бралась в часы, соответствующие времени пролёта спутника (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5/satellite-description/orbit>).

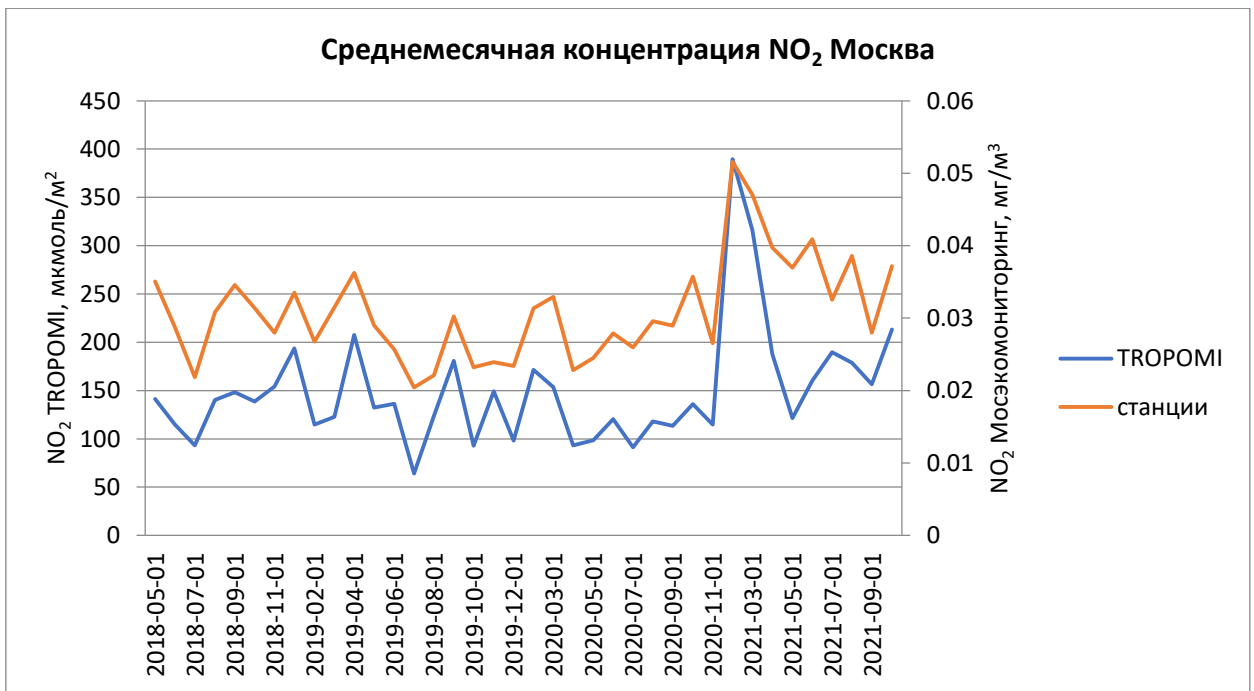


Рисунок 5.1.2.3 — Сравнительный анализ концентрации NO₂ над территорией Москвы, полученной по ежемесячным композитным изображениям TROPOMI, совместно с наземными данными

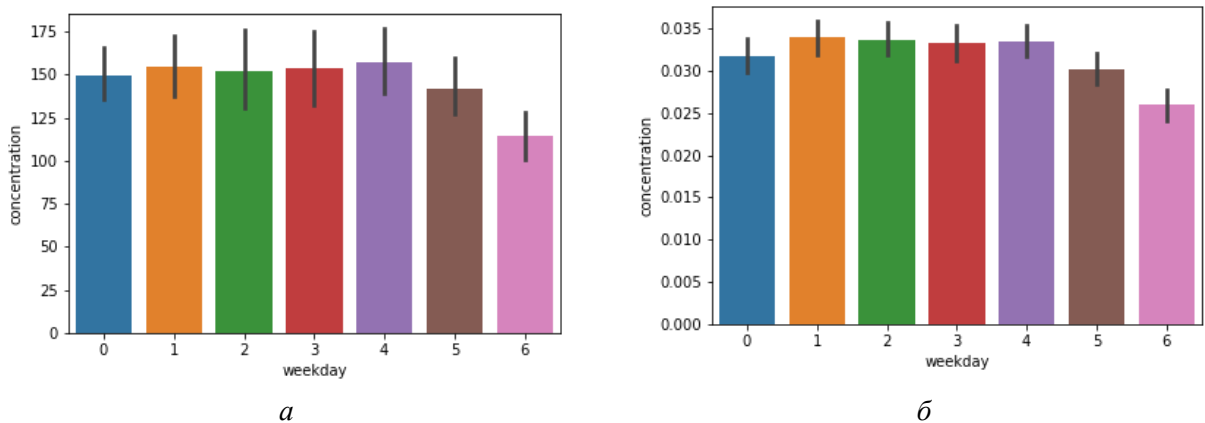


Рисунок 5.1.2.4 — Зависимость концентрации NO₂ от дня недели в летние месяцы (Москва): *а* — концентрация, полученная по прибору TROPOMI; *б* — концентрация, полученная наземными измерительными станциями

Следует отметить, что NO₂ — газ, распространяющийся на десятки километров от источника по направлению ветра, и его концентрация над источником сильно зависит от метеорологических условий и особенностей рельефа. Неблагоприятные метеорологические условия, способствующие накоплению загрязняющих веществ в атмосфере: отсутствие ветра, туманы, инверсия температуры. На рисунке 5.1.2.5 представлены выбросы NO₂ от Москвы, наблюдаемые в августе 2018 года в дни с разной скоростью ветра: 22 августа 2018 г. (скорость ветра составила 4,42 м/с) и 2 августа 2018 г. (скорость ветра составила 0,78 м/с). Информация о скорости ветра была получена из данных реанализа NCEP/NCAR. На рисунке 5.1.2.6 приведено сравнение рядов концентрации NO₂ и скорости ветра с мая по август 2018 г. Из рисунков хорошо видно, что при небольших значениях скорости ветра растёт концентрация и наоборот. Чтобы локализовать источники выбросов, было предложено создать композитное изображение с концентрацией NO₂ только в синоптически устойчивые дни (на первом этапе выбирались

только «безветренные» дни, когда выбросы от источников не уносятся на большие расстояния, а остаются над ним). Чтобы определить понятие «безветренного» дня, были построены зависимости концентрации NO_2 по спутниковым и наземным данным от скорости ветра, представленные на рисунке 5.1.2.7.

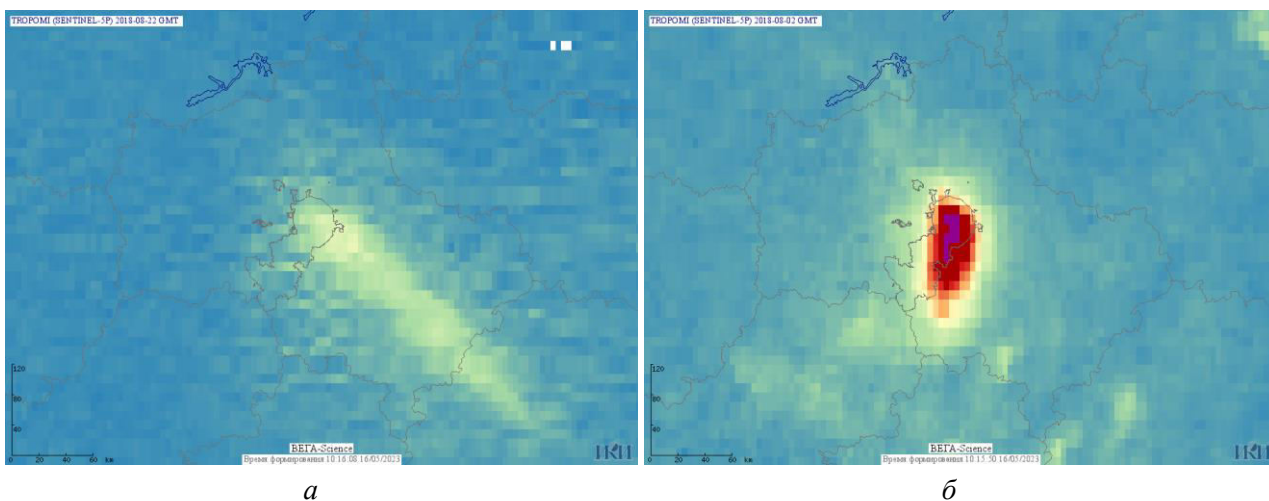


Рисунок 5.1.2.5 — Выбросы NO_2 от Москвы в дни с разной скоростью ветра: *a* — 4,42 м/с 22 августа 2018 г.; *б* — 0,78 м/с 2 августа 2018 г.



Рисунок 5.1.2.6 — Выбросы NO_2 от Москвы в дни с разной скоростью ветра

Для создания композитного изображения в качестве «безветренных» дней были взяты дни, когда скорость ветра не превышала 1,5 м/с, а в качестве периода осреднения данных в годовом разрезе был выбран период с мая по сентябрь, когда наблюдается наибольшее покрытие данными. Значения летнего периода нужны для получения репрезентативных данных для всей территории России, так как определение концентрации диоксида азота основано на измерении поглощения солнечного излучения. Соответственно, корректные измерения содержания газа для всех регионов, включая арктические, возможны только в летний период. При этом за один сезон «безветренных» дней и, как следствие, измерений оказалось незначительное количество, поэтому на сезонных композитных изображениях помимо постоянных источников выделялись лесные пожары, представляющие собой природные источники выбросов NO_2 . Чтобы исключить такие шумы как пожары, было создано единое композитное изображение за весь период миссии Sentinel-5P (TROPOMI), начиная с 2018 по 2023 год, представленное на рисунке 5.1.8.

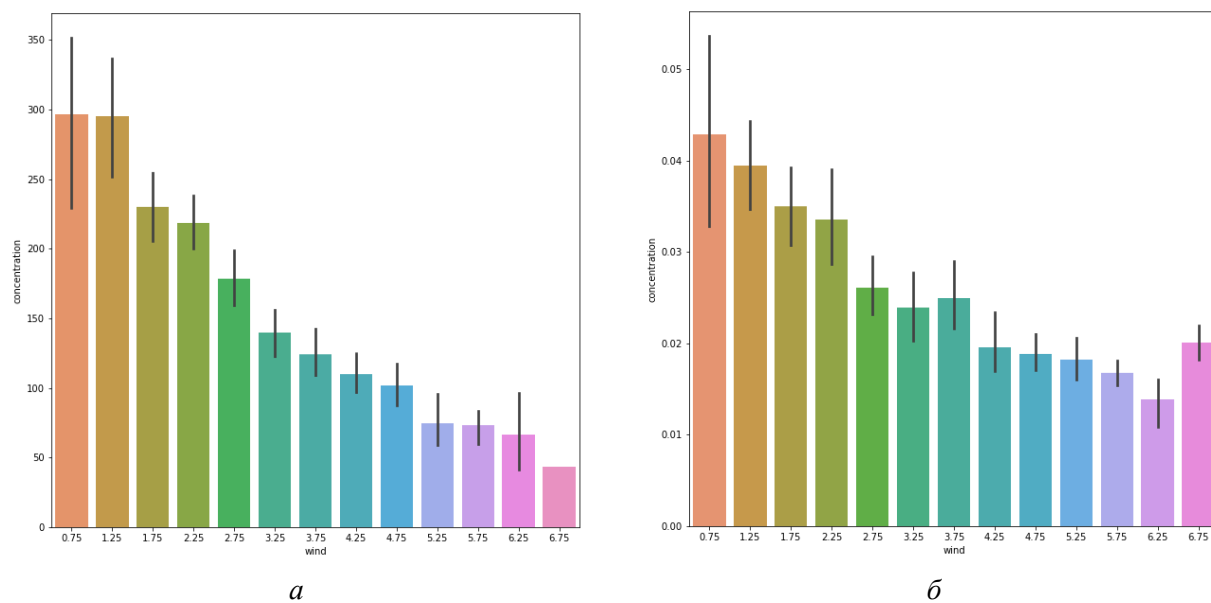


Рисунок 5.1.2.7 — Зависимость концентрации NO_2 от скорости ветра с шагом 0,5 м/с (Москва): *а* — концентрация, полученная по прибору TROPOMI; *б* — концентрация, полученная наземными измерительными станциями

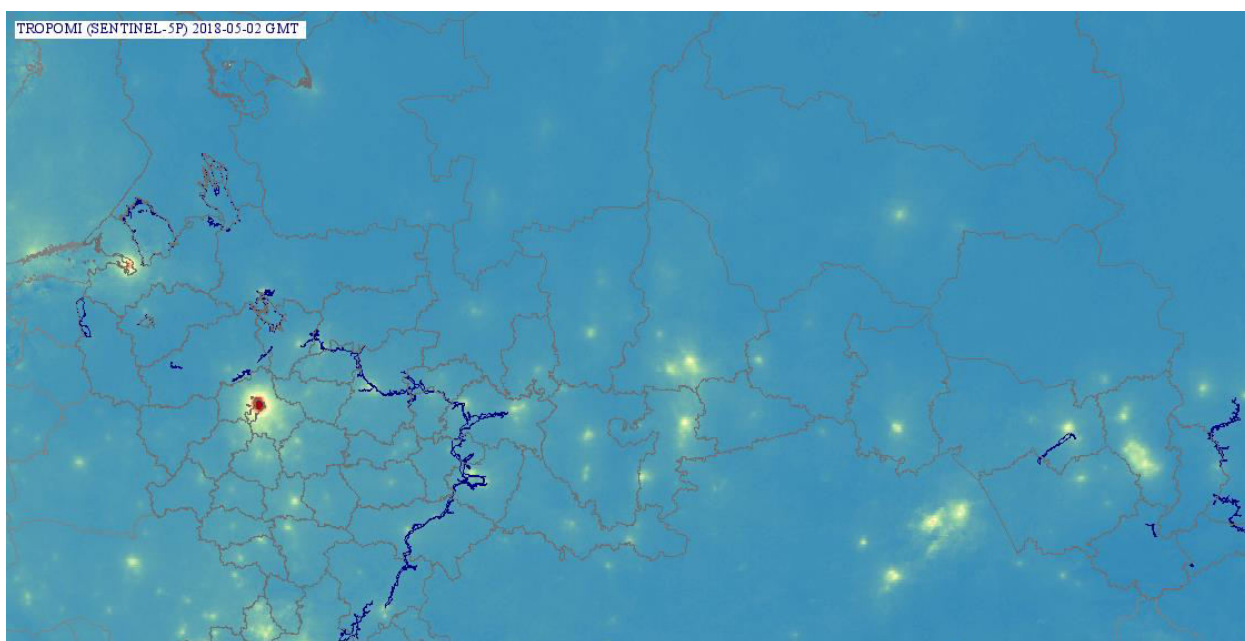


Рисунок 5.1.2.8 — Многолетнее «безветренное» композитное изображение со средней концентрацией NO_2 по прибору TROPOMI (Sentinel-5P) за 2018–2023 гг. (период осреднения май – сентябрь)

5.1.3 Выделение стационарных источников выбросов диоксида азота

Полученный многолетний «безветренный» композит на наш взгляд является хорошей основой для выделения источников выбросов NO_2 , а также выбора границ источников для расчёта различных статистических показателей выбросов. Для выделения непосредственно таких источников по полученным данным применялся пороговый подход, при котором выделялись кластеры пикселей, в которых значение превышало выбранный порог. Первоначальные попытки поиска единого порога для определения границ источников приводили к выделению в некоторых случаях слишком больших районов, где могло находиться несколько источников загрязнений. Поэтому было

предложено использовать итерационно несколько пороговых значений для построения карты источников разной интенсивности. На первом шаге высоким порогом выделялись наиболее крупные источники, для каждого следующего более низкого порога выделенные на предыдущем шаге области исключались, что позволило решить проблему объединения источников. Пример полученной карты с границами выделенных источников приведён на рисунке 5.1.3.1.

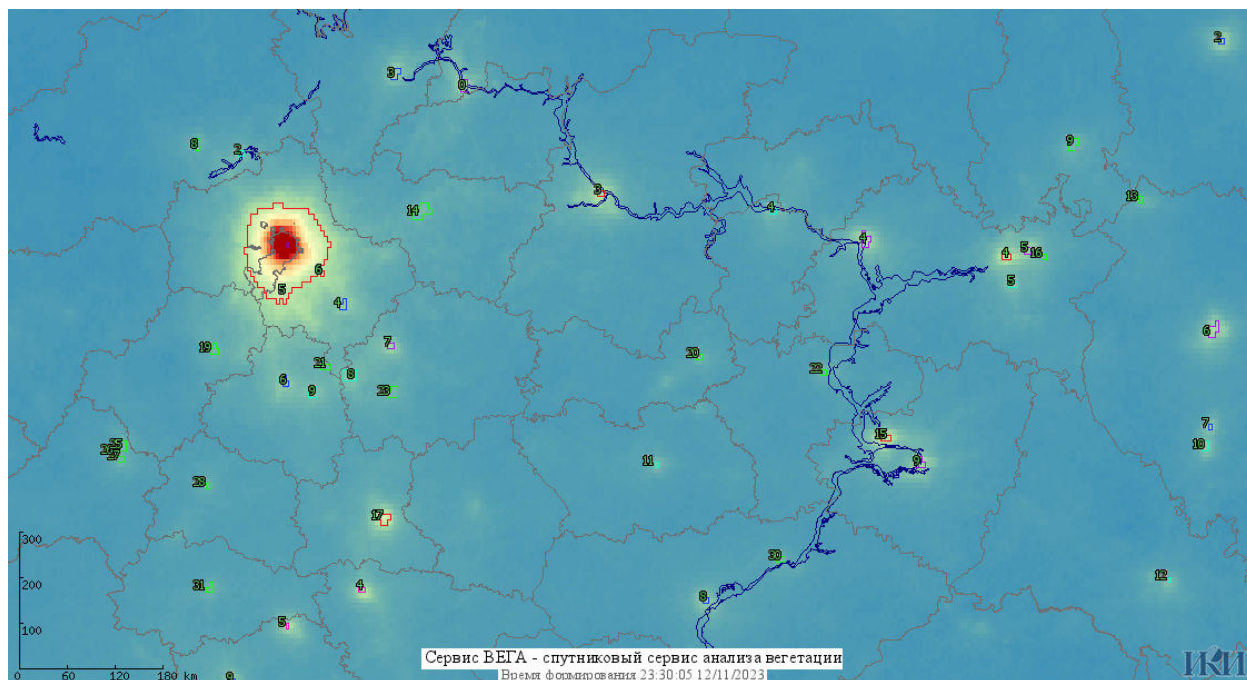


Рисунок 5.1.3.1 — Карта источников выбросов NO_2 , выделенных разными порогами: от 90 до 30 $\text{мкмоль}/\text{м}^2$, с шагом 10 $\text{мкмоль}/\text{м}^2$

Таблица 5.1.3.1 — Классификация выделенных источников выбросов NO_2

Города-миллионники	ГРЭС	Промышленные города	Угольные разрезы	Цементные заводы
Москва	Рефтинская	Липецк	Талдинский	Михайловцемент
Санкт-Петербург	Новочеркасская	Тольятти	Киселёвский	Серебрянский цементный завод
Краснодар	Беловская	Нижекамск	Бачатский	Вольский цементный завод
Ростов-на-Дону	Костромская	Магнитогорск	Евтинский	Мальцовский портландцемент
Нижний Новгород	Невинномысская	Новокузнецк	Коркинский	Мордовцемент
Челябинск	Сургутская	Кемерово		
Екатеринбург	Конаковская	Ангарск		
Омск	Новомосковская	Губкин		
Новосибирск	Заинская	Ачинск		
Воронеж	Южноуральская	Рязань		
Казань	Ставропольская	Набережные Челны		
Самара	Рязанская	Тюмень		
Уфа	Киришская	Барнаул		
Красноярск	Кармановская	Череповец		

Города-миллионники	ГРЭС	Промышленные города	Угольные разрезы	Цементные заводы
Волгоград	Ириклинская	Ярославль		
Пермь		Саратов		

В результате анализа выделенных областей были выявлены источники выбросов NO₂, которые легко разделяются на несколько типов: города-миллионники и крупные города, где основным источником выбросов является автотранспорт и теплоэнергетика; промышленные города с предприятиями металлургической и нефтехимической промышленности; угольные разрезы; города и рабочие посёлки при ГРЭС и цементных заводах. Примеры выделенных источников приведены в таблице 5.1.3.1.

5.1.4 Примеры анализа данных для городов-миллионников России

Для сравнения статистических показателей выбросов источников, представляющих собой города-миллионники, их границы были выделены единым порогом на многолетнем «безветренном» композитном изображении. В качестве значения порога было взято максимальное значение, при котором в карту источников попали все города-миллионники, оно составило 60 мкмоль/м². С помощью технологии объектного мониторинга для выделенных границ были посчитаны средние концентрации NO₂ по ежемесячным композитным изображениям. В анализе учитывались месяцы с апреля по октябрь, для которых наблюдалось более 20 дней с измерениями. На рисунках 5.1.4.1, 5.1.4.2 и 5.1.4.3 представлены сезонные тренды концентраций NO₂ для нескольких исследуемых городов. Как видно из графиков, тренды имеют стабильный характер и практически не меняются из года в год. При этом в летние месяцы наблюдаются низкие значения концентрации, предположительно связанные с периодом отпусков и, как следствие, уменьшением количества машин в крупных городах. Преимущественно это заметно в июле для мегаполисов Москвы и Санкт-Петербурга, где большая часть выбросов приходится на автотранспорт (исключение представляет июль 2021 г.). В более холодные месяцы значения концентраций выше, что может быть связано с несколькими факторами: с отопительным периодом и, как следствие, увеличением выбросов от ТЭС, наличием температурной инверсии в холодное время, увеличением времени жизни NO₂, а также возможными ошибками восстановления значения концентрации.

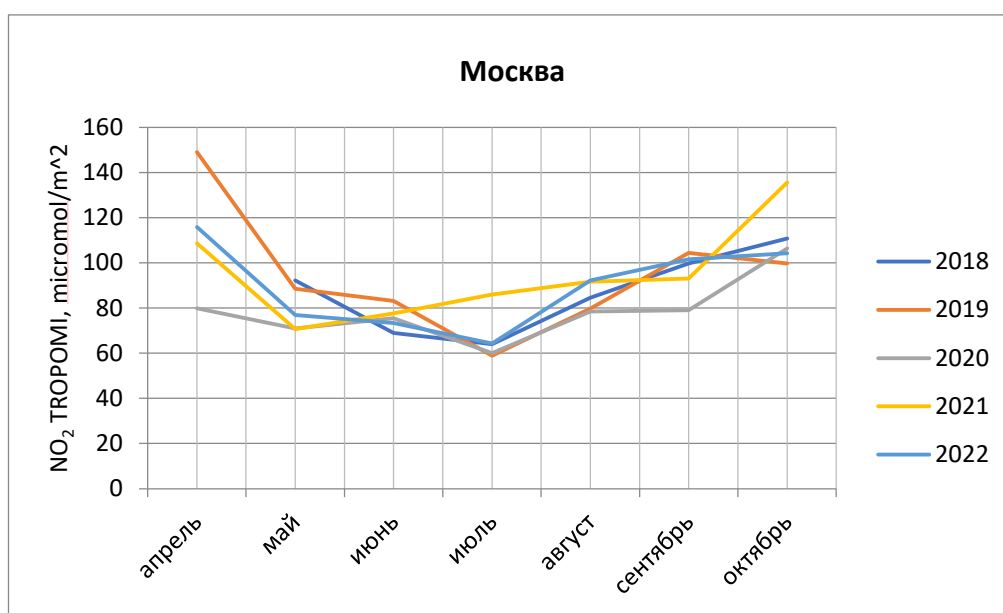


Рисунок 5.1.4.1 — Средняя месячная концентрация NO₂ для Москвы по TROPOMI, мкмоль/м²

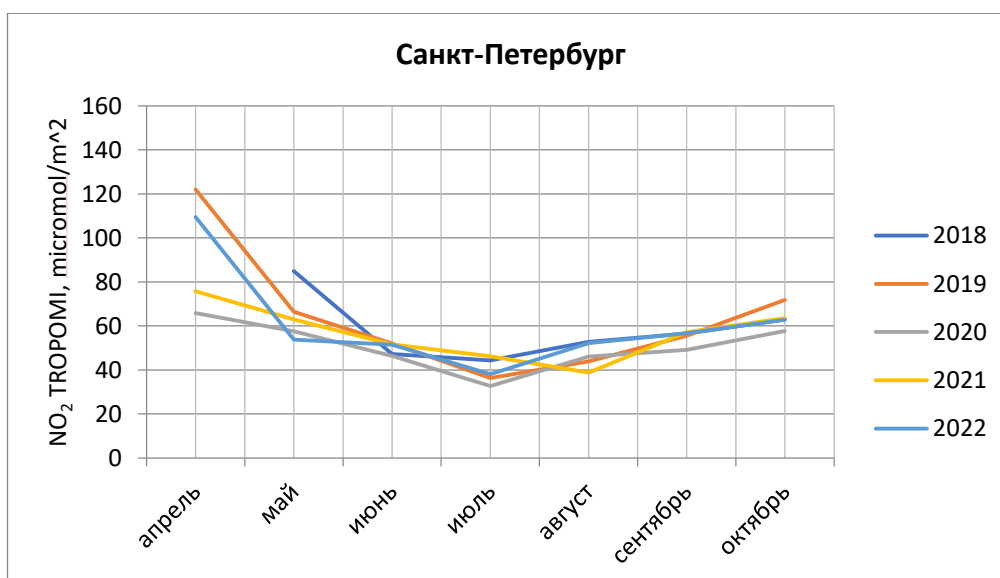


Рисунок 5.1.4.2 — Средняя месячная концентрация NO₂ для Санкт-Петербурга по TROPOMI, мкмоль/м²

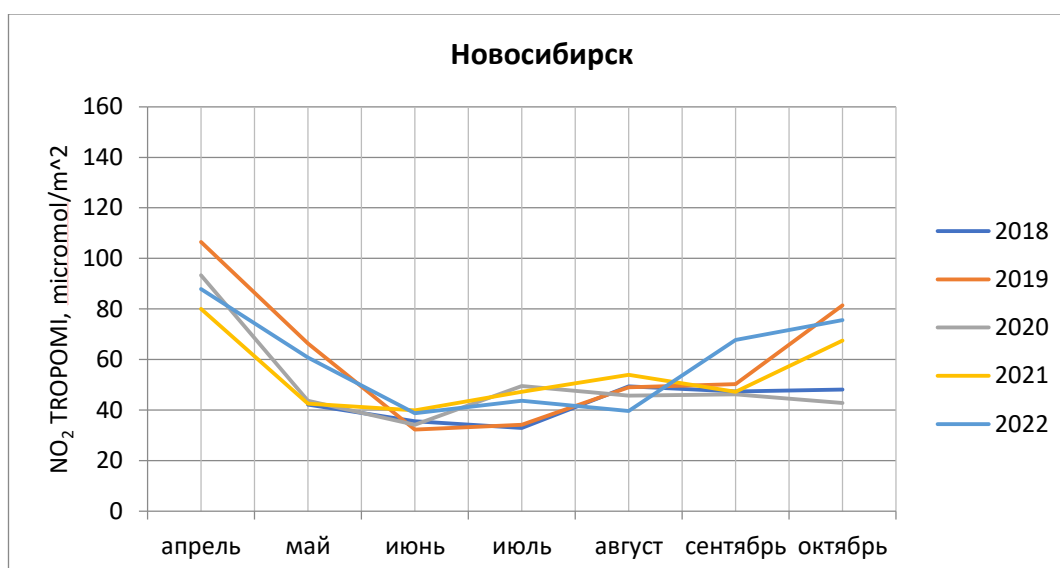


Рисунок 5.1.4.3 — Средняя месячная концентрация NO₂ для Новосибирска по TROPOMI, мкмоль/м²

В атмосфере Москвы и Санкт-Петербурга наблюдается тренд снижения концентрации в апреле 2020 г., когда были введены ограничительные меры во время распространения COVID-19, по сравнению со значениями, зафиксированными в предыдущие годы. При этом для других городов подобные тренды не были обнаружены, что связано с тем, что инфраструктура и промышленность этих городов продолжала работать.

В таблице 5.1.4.1 представлена средняя многолетняя концентрация NO₂ для исследуемых городов, отсортированная по убыванию значения концентрации. Наиболее высокими концентрациями выделяются мегаполисы Москва и Санкт-Петербург, представленные значительно большим количеством населения, а следовательно и количеством транспорта.

На рисунке 5.1.4.4 представлена зависимость удельной концентрации (средняя многолетняя концентрация, делённая на численность населения в городе) от количества жителей. Полученные данные можно аппроксимировать степенной функцией: $y = 0,3101x^{0,656}$. При предположении, что основной источник выбросов NO₂ в

мегаполисе — это автотранспорт, данная зависимость показывает, что процент числа используемых автомобилей обратно пропорционален количеству жителей. Это, видимо, связано и с уровнем развития общественного транспорта в мегаполисах. При этом можно предположить, что наличие достаточно хорошо выявляемой зависимости удельного выброса NO_2 косвенно отражает наличие «оптимального» уровня обеспеченности общественным транспортом для городов с различным числом жителей. Отклонение от этой «оптимальной» кривой может говорить о «повышенном» или «пониженном» уровне обеспеченности общественным транспортом в различных городах.

Таблица 5.1.4.1 — Средняя многолетняя концентрация NO_2 по прибору TROPOMI за 2018–2022 гг. (период осреднения апрель–октябрь) для городов-миллионников

Город	Концентрация (C , $\mu\text{моль}/\text{м}^2$)	Население (P , чел)	$C_{\text{уд}} = C/P$, $\mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{чел})$
Москва	89,67	12645258	0,071
Санкт-Петербург	59,04	5380923	0,110
Новосибирск	52,09	1620746	0,321
Челябинск	42,84	1183624	0,362
Краснодар	40,35	1226226	0,329
Нижний Новгород	39,13	1239102	0,316
Ростов-на-Дону	38,48	1136199	0,339
Красноярск	38,01	1097937	0,346
Екатеринбург	37,68	1494333	0,252
Волгоград	37,27	1002973	0,372
Воронеж	37,09	1049670	0,353
Самара	37,04	1140734	0,325
Казань	36,26	1258257	0,288
Пермь	36,24	1045981	0,346
Омск	34,07	1133045	0,301
Уфа	33,74	1130497	0,298

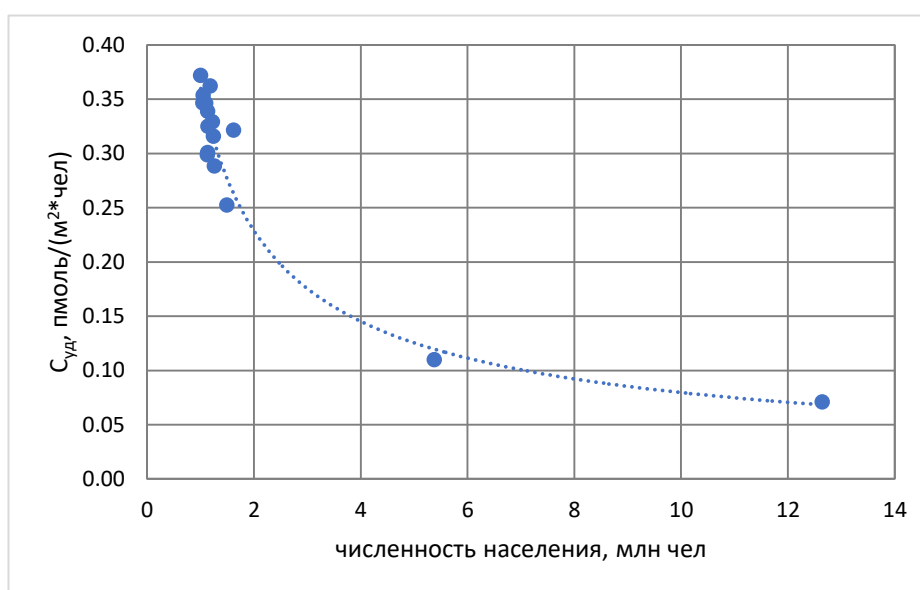


Рисунок 5.1.4.4 — Зависимость удельной концентрации от численности населения

Это косвенно подтверждает рейтинг городов России по качеству общественного транспорта (<https://publictransport.simetragroup.ru/rating>), в котором первые места преимущественно занимают города, удельные выбросы которых лежат ниже «оптимальной» кривой.

В целом по результатам выполненной работы можно сказать, что спутниковые методы на основе пространственного анализа распределений концентраций малых газовых составляющих могут сегодня не только обеспечить возможность выделений крупных источников выбросов различных газов, в том числе парниковых, но и позволить проводить оценку особенностей этих выбросов. Как уже отмечалось ранее, помимо анализа концентраций NO₂ предложенные подходы могут также использоваться для исследования выбросов других парниковых газов.

5.2 Оперативное построение карт интенсивности горения пожаров для оценок потенциальной гибели лесной растительности и интенсивности выбросов парниковых газов в атмосферу и пространственного распределения их концентраций

Среди различных характеристик лесных пожаров информация об интенсивности горения может быть использована для решения многих актуальных задач в области лесной пирологии. Разработано значительное число методов и подходов, использующих данные об интенсивности горения для оценки повреждений растительного покрова пожарами. Также данная информация может использоваться для оценок объёмов выбросов углерода в атмосферу в результате действия пожаров. В данных направлениях продолжается вестись значительное число работ, ориентированных на уточнение зависимостей степени повреждения лесного покрова от интенсивности наблюдаемых пожаров и разработку подходов получения оперативных оценок потенциальной гибели лесов. На основе выявленных зависимостей также был предложен метод оперативной оценки ожидаемых площадей гибели лесов. Следует отметить, что подобная информация в первую очередь важна для оценки источников выбросов парниковых газов в атмосферу и оценки их характеристик. Поэтому на основе предложенного метода при поддержке проекта в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) были разработаны системы оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия (далее Система). В настоящем разделе представлены общие характеристики Системы, архитектура её построения и некоторые особенности реализации. Также описаны основные особенности и получаемые в результате работы Системы информационные продукты, которые обеспечивают возможность оперативной оценки потенциальных повреждений лесного покрова пожарами. Кратко обсуждён вопрос возможности использования получаемых информационных продуктов.

5.2.1 Используемые в Системе данные

Основным источником входных данных для разработанной Системы является оперативная база данных (БД) пожаров, формируемая на основе шестой коллекции данных приборов MODIS (Collection 6 MODIS Active Fire / Hotspot Data (MCD14DL)) (<http://earthdata.nasa.gov>). Для каждой горячей точки (пожарный пиксель сцены MODIS, ГТ) в БД имеется информация об интенсивности горения, наблюдавшейся в данной точке, количественно выраженной в величине FRP (*англ.* Fire Radiative Power), а также дата регистрации ГТ и её фактический размер в зависимости от угла сканирования прибора. Для того чтобы можно было сопоставлять информацию, приходящую от пикселей разного размера, далее в методе используется значение FRP, поделённое на площадь пиксела (FRPS), т.е. удельный поток с единицы площади для наблюдаемой ГТ. Данная БД также содержит информацию о группах ГТ, объединённых по пространству и времени (ГТ,

центры которых лежат на расстоянии меньше 0,5 км и время их регистрации отличается не более, чем на 5 дней). Такие группы в дальнейшем будут именоваться пожарами.

Другим типом входных данных является созданная в ИКИ РАН и ежегодно обновляемая карта территории Российской Федерации, содержащая информацию об основных типах лесного покрова.

5.2.2 Схема анализа данных

Реализованная в Системе общая схема анализа данных представлена на рисунке 5.2.2.1. В первом блоке происходит преобразование исходной информации о пожарах в растровый вид.

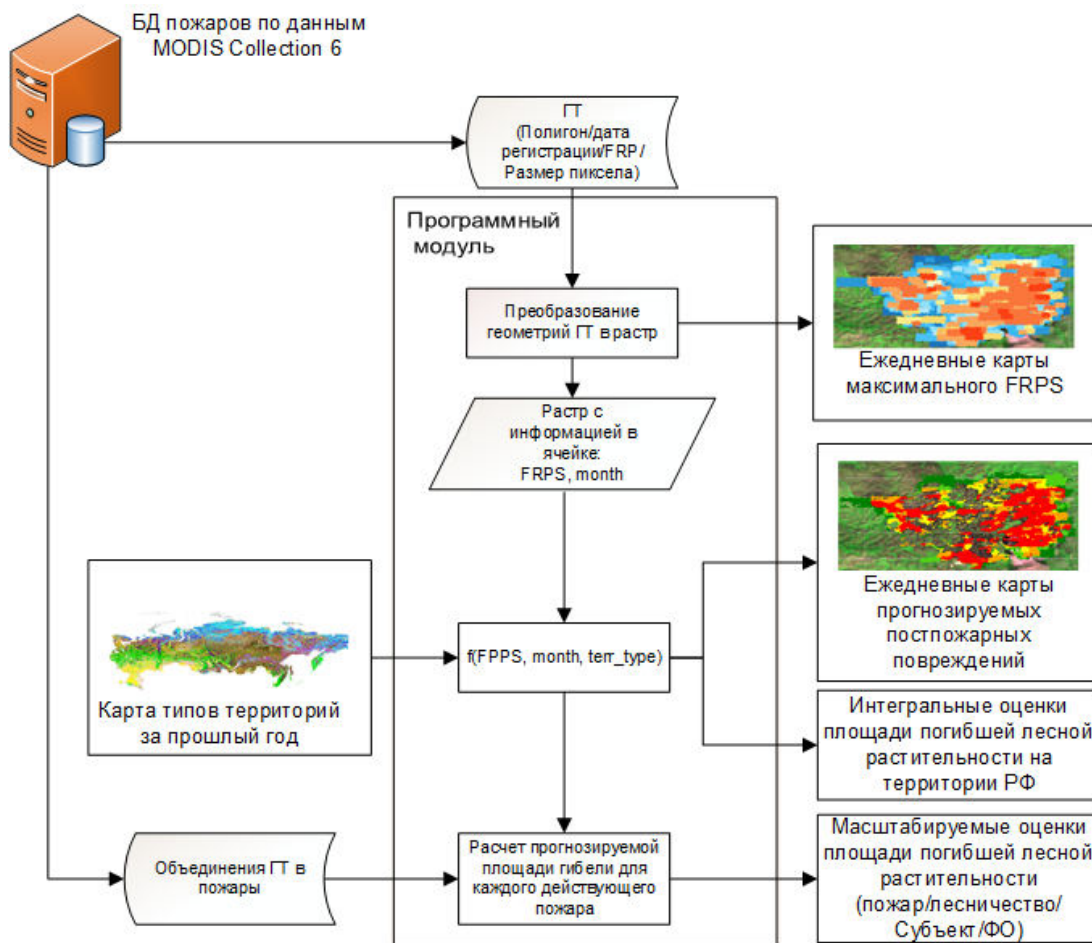


Рисунок 5.2.2.1 — Общая схема анализа данных реализованная в Системе

На выходе получается ежедневный ряд карт с информацией о максимальной интенсивности горения пожаров за сезон. Другим видом выходных данных является аналогичный ряд карт, дополненный информацией о дате зарегистрированного максимального FRPS в каждом пикселе карты. На втором этапе данные объединяются с информацией о типе растительности, после чего в каждом пикселе карты осуществляется преобразование трёх значений (FRPS, месяц, тип растительности) в оценку доли пикселя, в которой прогнозируется гибель растительного покрова. В результате получается ежедневный ряд карт прогнозируемых постпожарных повреждений и интегральные оценки площади погибшей растительности, рассчитываемые по полученному ряду карт. На последнем этапе пожары из исходной БД пересекаются с рядом карт постпожарных повреждений с целью получения оценок площади погибшей растительности для каждого отдельно взятого пожара. Для построения на основе полученных данных различной статистической информации о гибели лесов на различных территориях (лесничествах,

субъектах, районах и т.д.) используются схемы и программные модули, реализованные в различных системах, созданных и функционирующих на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Для реализации описанной схемы обработки данных реализован программный модуль (скрипт), написанный на языке Python, использующий библиотеки `pymru`, `pymysql`, `gdal`, `datetime` и `os`. Созданный модуль автоматически ежедневно запускается и обеспечивает обработку информации, полученной о возникших с начала года на территории России лесных пожарах. В следующих пунктах будут более детально описаны отдельные элементы процедуры анализа данных.

5.2.3 Построение карт максимального FRPS

Алгоритм действий первого блока программного модуля представлен на рисунке 5.2.3.1. Первым шагом является подключение к БД пожаров для получения информации о геометриях ГТ, детектированных с начала календарного года по день запуска скрипта, вместе с датой их регистрации (*dt*), FRP и размерах ГТ (*size_x*, *size_y*). Как было отмечено ранее, для однородности представления FRP каждой ГТ нормируется на площадь этой точки ($FRPS = FRP / (size_x \times size_y)$).

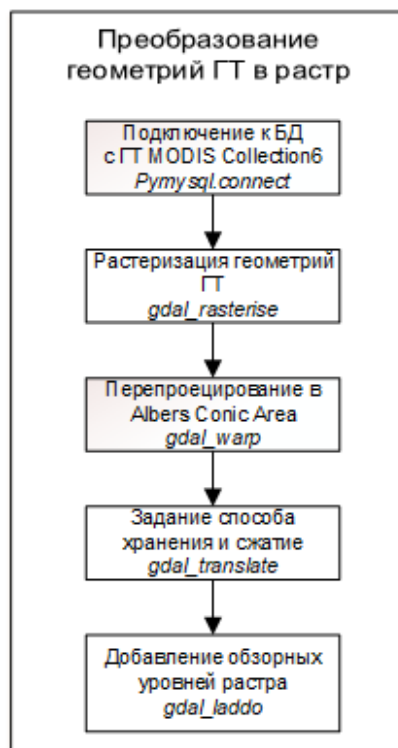


Рисунок 5.2.3.1 — Алгоритм действий первого блока программного модуля

На втором шаге происходит растеризация геометрий с занесением соответствующих им FRPS с округлением до целого в каждый пиксель выходного изображения. В случае пересечения нескольких геометрий ГТ в каждом пикселе, покрывающем это пересечение, выбирается максимальное из значений FRPS. Как было ранее отражено при описании общей структуры технологии, помимо растров, содержащих только максимальное FRPS, аналогичным образом создаются растры с дополненной информацией о дате зарегистрированного FRPS. Таким образом обеспечивается одновременное хранение необходимой информации – день регистрации FRPS находится в разрядах с 3-го по 5-й, а разряды с 6 по 9 служат для хранения FRPS. При этом первые два разряда остаются пустыми для дальнейшего добавления в них информации о типе растительности в следующем блоке программного модуля:

$$\text{round}(FRP / (size_x \times size_y)) \times 100000 + \text{DAYOFYEAR}(dt) \times 100.$$

На третьем шаге происходит перепроецирование изображения в равновеликую коническую проекцию Альберса с размером одного пиксела в 230 метров. Такой выбор был продиктован форматом данных о постпожарных повреждениях лесов, с которыми ранее сопоставлялись карты максимального FRPS. Так как сформированные зависимости, преобразующие FRPS в предсказываемую долю пиксела с погибшей растительностью, были получены именно для данных параметров пространственного изображения, было решено сохранить их во избежание возможной ошибки оценки площади погибшей растительности, связанной с другими проекцией и разрешением данных.

Последние два шага связаны с удобством хранения и визуализации полученных карт. Задается тайловый способ хранения изображения и метод его сжатия (TILED=YES, COMPRESS=LZW, BIGTIFF=YES). В конце для растра создаются его обзорные уровни. На рисунке 5.2.4.2 в левом столбце представлена серия фрагментов получаемых карт максимального FRPS, охватывающих развивающийся пожар.

5.2.4 Построение карт прогнозируемых постпожарных повреждений

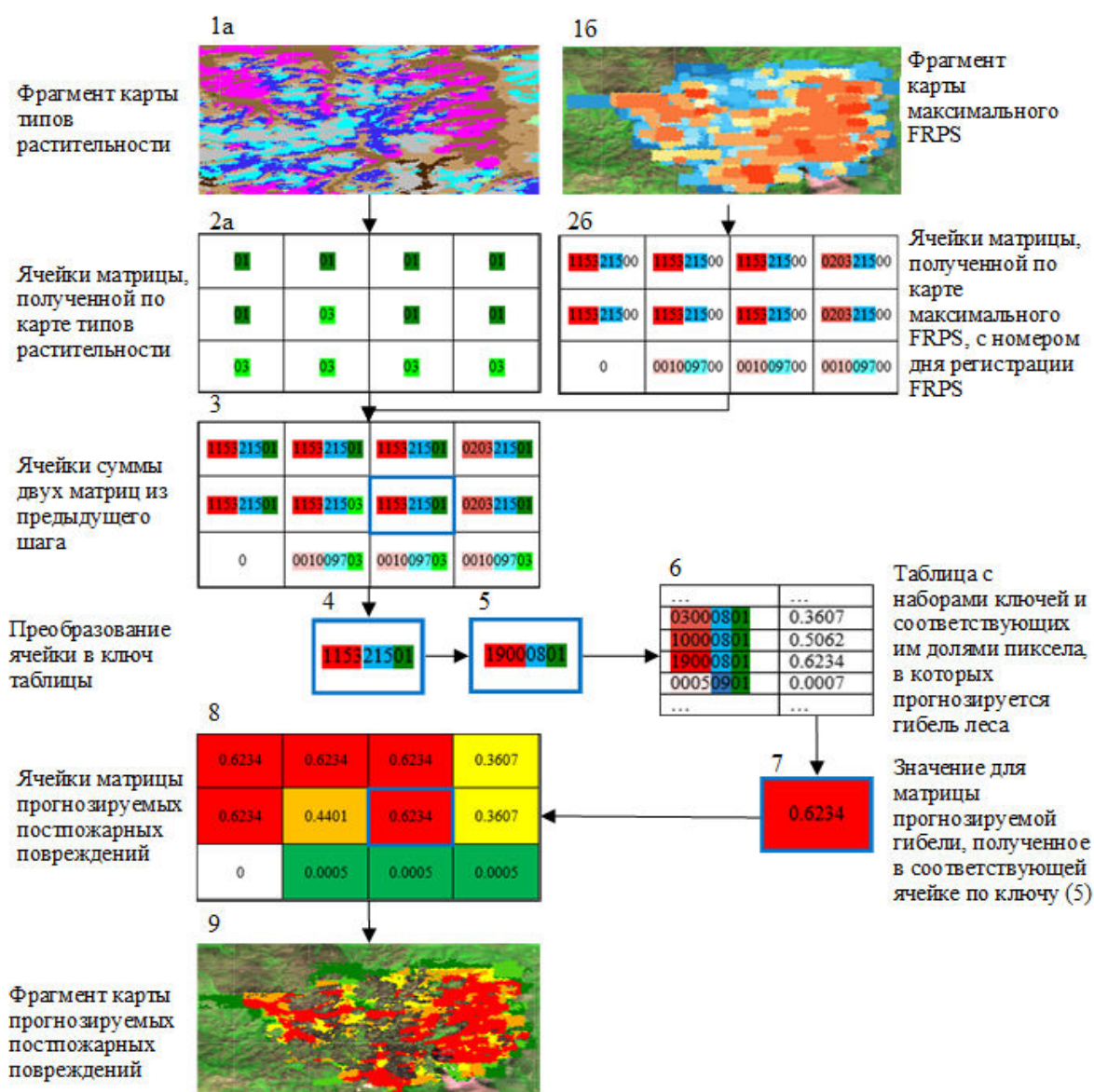


Рисунок 5.2.4.1 — Схема преобразования карт максимального FRPS, дополненных номером дня регистрации FRPS и карт типов растительности, в карты прогнозируемых постпожарных повреждений

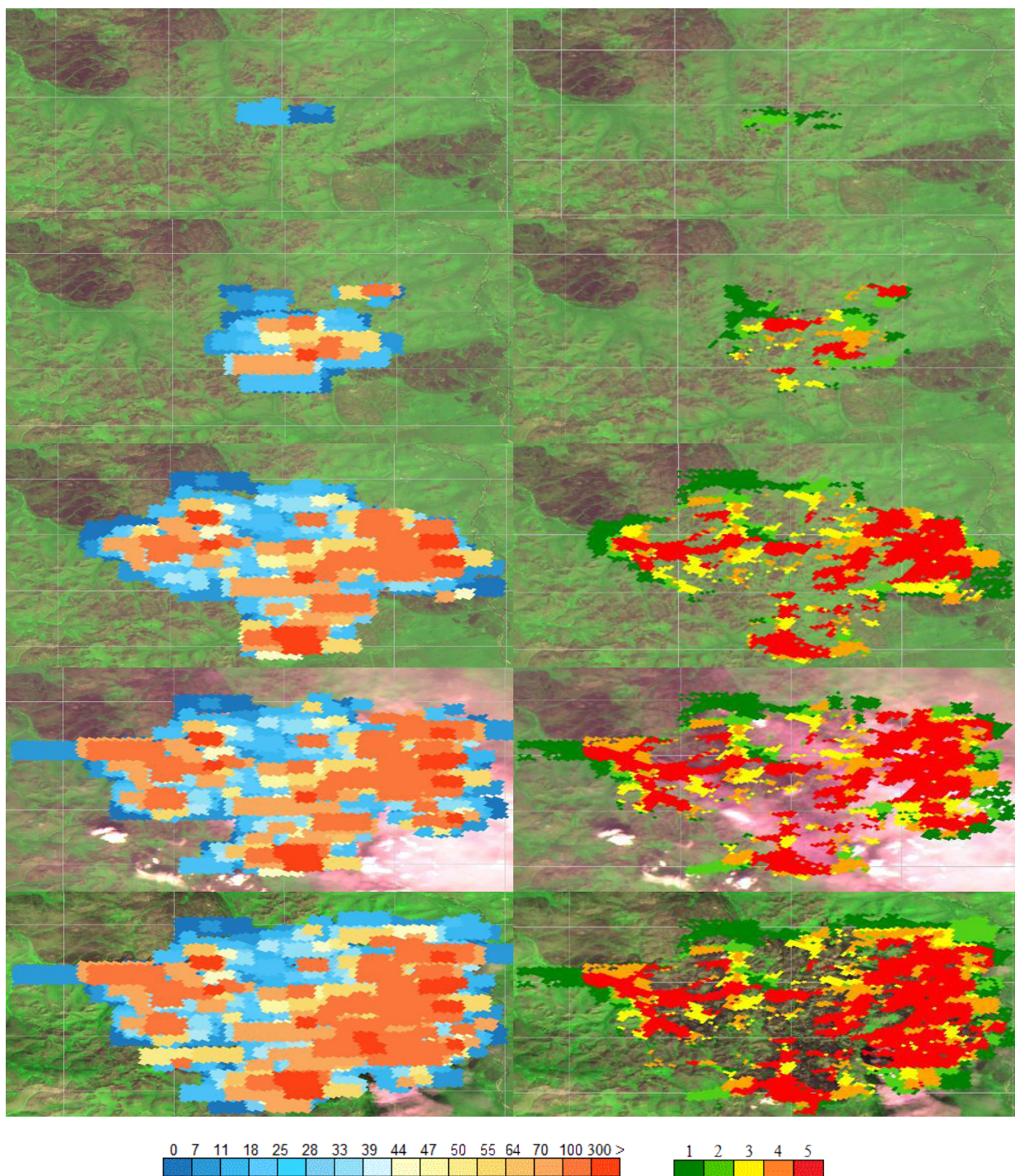


Рисунок 5.2.4.2 — Серия фрагментов карт максимального FRPS (слева) и оперативной оценки постпожарных повреждений лесной растительности по FRPS (справа) для пожара, протекающего с 4 по 31 июля 2023 г. на территории Аяно-Майского района Хабаровского края. FRPS измеряется в $\text{МВт}/\text{км}^2$, повреждения оценены дискретными категориями от 1 до 5 (1 — отсутствие повреждений, 5 — полная гибель растительности)
(Дата фрагментов карт сверху вниз: 4, 11, 18, 25, 31 июля)

На рисунке 5.2.4.1 представлена схема преобразования карт максимального FRPS, дополненных номером дня регистрации FRPS (1а) и карт типов растительности (1б) в карты прогнозируемых постпожарных повреждений (9). Общая идея данного преобразования заключается в использовании зависимостей вероятности гибели лесной растительности от величины FRPS пожара с учетом типа растительности и месяца действия пожара. На настоящий момент такие зависимости получены для основных

лесных типов растительности и всех месяцев года. Они представлены в табличном виде (6), где каждому ключу (5), состоящему из верхней границы диапазона FRPS, месяца пожара и индекса типа растительности, ставится в соответствие доля пикселя с прогнозируемой гибелью лесной растительности (7).

Далее для каждой значимой ячейки по номеру дня в году определяется месяц, а для FRPS подбирается верхнее значение соответствующего ему диапазона значений FRPS, для которого была получена статистическая оценка прогнозируемой гибели лесной растительности. В результате получается ключ (5), и по нему происходит обращение к таблице (6). Соответствующее ключу (5) значение (7) подставляется вместо ключа в обрабатываемую матрицу. После выполнения такого преобразования для всех ячеек получившаяся матрица (8) растрируется в ту же проекцию, что и исходная карта (1б), в результате чего получается целевой растр (9) — карта прогнозируемых постпожарных повреждений. На рисунке 5.2.4.2 в правом столбце представлена серия фрагментов получаемых карт, соответствующих картам максимального FRPS из левого столбца того же рисунка. Можно заметить, что покрытие карты FRPS больше, чем карты прогнозируемых постпожарных повреждений. Это связано с тем, что для карты максимального FRPS ГТ, геометрия которой покрывает не только лесную растительность, целиком отображается на карте. Для карты прогнозируемых постпожарных повреждений ГТ отображается не целиком, а только её часть, соответствующая лесной растительности.

Ежедневно составляемые карты максимального FRPS и карты оперативной оценки постпожарных повреждений лесной растительности описанным выше способом строятся с покрытием всей территории Российской Федерации. Постоянный размер ячейки таких карт позволяет перейти к интегральной площадной оценке погибшей растительности для территории страны. Для этого все значения в пикселях карты (dam_val) суммируются, и полученная величина умножается на площадь ячейки $S_{pix} = 5,9$ га. Затем к результату применяется линейная коррекция с экспериментально выведенным коэффициентом $K_{forest} = 0,859$. Данная коррекция проводится с целью устранения погрешности, связанной с субпиксельной неопределённостью ячейки карты типов растительности. Таким образом, суммарная площадь погибшей в результате действия пожаров лесной растительности на территории Российской Федерации рассчитывается по формуле:

$$S_{dam} = S_{pix} K_{forest} \sum \sum dam_val_{i,j} \text{ га.} \quad (5.2.4.1)$$

5.2.5 Получение оценок площадей возможной гибели лесов на различных территориях

На последнем этапе пожары из исходной БД пересекаются с рядом карт постпожарных повреждений с целью получения оценок площади погибшей растительности для каждого отдельно взятого пожара. В связи с этим в последнем блоке Системы действующие пожары соотносятся с составленной картой погибшей растительности. Общая схема блока представлена на рисунке 5.2.5.1.

После выгрузки информации о пожарах из БД запускается цикл по всем активным пожарам. На каждом шаге этого цикла выбирается один пожар (fi) и для этого пожара происходит расчет S_fi — оценки площади погибшей растительности в результате действия пожара fi . После расчёта для всех пожаров из цикла набор (S_fi), состоящий из оценок S_fi вместе с соотнесёнными к ним идентификаторами пожаров fi , заносится в БД. Важным требованием к расчёту является аддитивность оценок для «связных» по территории пожаров – пожаров, контура которых пересеклись в пространстве в течении сезона. Для этого при расчёте S_fi для каждого fi сначала находится F_intr — множество завершённых пожаров за год, пересёкшихся с fi (в случае пересечения активных пожаров их объединение уже произведено в исходной БД). Данное множество также включает сам пожар из цикла fi . Затем для этого множества строится его объединённый контур ($Cont$), а также рассчитывается S_last — сумма оценок площадей для пожаров из F_intr (исключая

пожар f_i), которые уже были рассчитаны ранее. Таким образом в случае, если в F_{intr} входит только пожар f_i (пожар из цикла не пересёкся ни с одним из пройденных за сезон пожаров), $Cont$ совпадёт с контуром пожара f_i , а $S_{last}=0$. На следующем шаге происходит растеризация контура $Cont$ для получения маски в проекции карты прогнозируемых постпожарных повреждений. Маска в матричном виде пересекается с картой в результате чего получается фрагмент глобальной карты, соответствующий объединениям пожаров F_{intr} . Для данного фрагмента по формуле (5.2.5.1) происходит расчёт S_{dam} - прогнозируемой площади повреждений для F_{intr} . Так как все пожары из F_{intr} кроме f_i не являются активными, S_{dam} отличается от S_{last} только за счёт действия f_i . В связи с этим значение $S_{fi}=S_{dam}-S_{last}$ вместе с идентификатором пожара f_i добавляются в набор S_f и цикл переходит на следующий шаг.

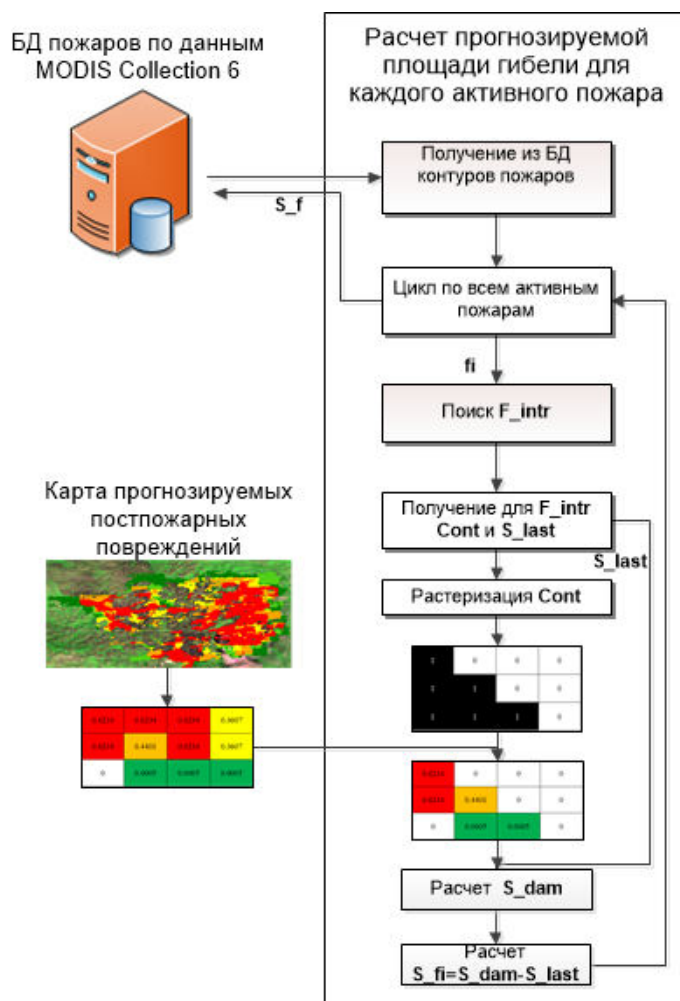


Рисунок 5.2.5.1 — Алгоритм действий третьего блока программного модуля. Здесь f_i — активный пожар i -го шага цикла, F_{intr} — множество завершённых пожаров за год, пересекающихся с f_i вместе с f_i , $Cont$ — объединённый контур пожаров из F_{intr} , S_{last} — сумма оценок площадей погибших для пожаров из F_{instr} (исключая оценку для f_i), S_{dam} — оценка площади погибших, полученная для F_{instr} . S_{fi} — оценка площади погибших для f_i , S_f — набор S_{fi} с соответствующими идентификаторами f_i

Разработанная Система в настоящее время позволяет в полностью автоматическом режиме формировать следующие информационные продукты:

- ежедневно обновляемые карты максимального FRPS на территории Российской Федерации,
- ежедневно обновляемые карты прогнозируемых постпожарных повреждений лесной растительности на территории Российской Федерации,

- ежедневно обновляемые оценки площади погибшей лесной растительности в результате действия пожаров на территории Российской Федерации с возможностью получения соответствующих оценок для различных Федеральных округов, регионов, районов, лесничеств и конкретных пожаров,
- соответствующие ряды карт и оценок, полученные по архивным данным с 1 января 2001 года.

Данный набор продуктов предоставляет большой набор данных, которые могут быть использованы для оценки характеристик лесных пожаров, как крупных источников выбросов в атмосферу, а также для широкого круга исследовательских и прикладных задач. Одним из главных достоинств реализованной системы является оперативность получаемых продуктов, что делает возможным их применение при решении задач, требующих быстрого реагирования на развитие пожара.

Таким образом в рамках данного направления работ в 2023 г. были решены в целом ключевые задачи, связанные с оценкой возможностей и разработкой методов мониторинга крупных источников выбросов парниковых газов. А именно:

- возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа пространственных распределений концентраций малых газовых составляющих в районах расположения крупных антропогенных объектов на примере анализа концентраций диоксида азота,
- возможности оперативного построения карт интенсивности горения пожаров для оценок потенциальной гибели лесной растительности и интенсивности выбросов парниковых газов в атмосферу и пространственного распределения их концентраций.

5.3 Связь вариаций концентрации парниковых газов над водно-болотными угодьями с их фенологическими фазами, определяемыми по спутниковым данным

Водно-болотные угодья Северного полушария являются важнейшим компонентом ландшафта бореальной зоны. Кроме этого, они являются переносчиком и преобразователем большого количества углерода, полученного естественным и антропогенным путём. Экосистемы высоких широт подвергаются серьёзным трансформациям в условиях изменения климата. Однако механизмы положительных и отрицательных климатических обратных связей до конца не ясны. Для глобального баланса углерода особенно важна судьба его огромных запасов в северных водно-болотных угодьях. Предполагается, что вынос органического углерода из наземной среды будет увеличиваться с ростом температуры и осадков. Наличие участков вечной мерзлоты может давать дополнительный вклад в вынос углерода при оттаивании. Анализ процессов, связанных с эмиссией углерода водно-болотными угодьями, становится ключом к пониманию их роли в глобальном углеродном цикле, а также климатических изменений, происходящих на нашей планете.

В данном пункте отчёта приводятся результаты исследований, начатых в 2022 году, по анализу связи сезонного изменения концентрации CO_2 в атмосфере над водными объектами бореальной и субарктической зоны с их фенологическими фазами. В 2023 году такой анализ выполнен для различных водно-болотных угодий Западной Сибири. Целью этих исследований было показать сезонную цикличность концентрации CO_2 в атмосфере над различными водными объектами, которая устойчиво связана их с фенологическими фазами. Для всех подобных объектов динамика концентрации CO_2 схожа, и определяется сезонными фазами, связанными процессами увлажнения и засыхания, замерзания и оттаивания, а также с изменением состояния растительности — её развитием и увяданием. Максимум концентрации CO_2 наблюдается в начале весеннего периода, когда сходит снежный покров, разрушается лёд и отмерзает поверхность почвы.

В исследовании были использованы данные реанализа CAMS (EGG4) по концентрации CO₂ в атмосфере и данные продукта L1C SMOS микроволнового радиометра MIRAS, по которым определялись фенологические фазы исследуемых водных объектов.

5.3.1 Исследуемые водные объекты

В качестве исследуемых объектов было выбрано четыре области центральной части Западно-Сибирской равнины, на которой расположены обширные водно-болотные угодья и большое количество малых озёр. Это две области, расположенные на территории Большого Васюганского болота (рисунок 5.3.1.1а, б), и две - на территории Мухринского торфяника (рисунок 5.3.1.1в, г). На рисунке 5.3.1.1 представлены исследуемые территории, где белым цветом выделена область, соответствующая ячейке продукта SMOS L1C (см. разд. 5.3.3). В таблице 5.3.1.1 даны координаты центра этих исследуемых ячеек, а также указан ближайший к ячейке населённый пункт, регион и природная зона, в которой ячейка расположена.

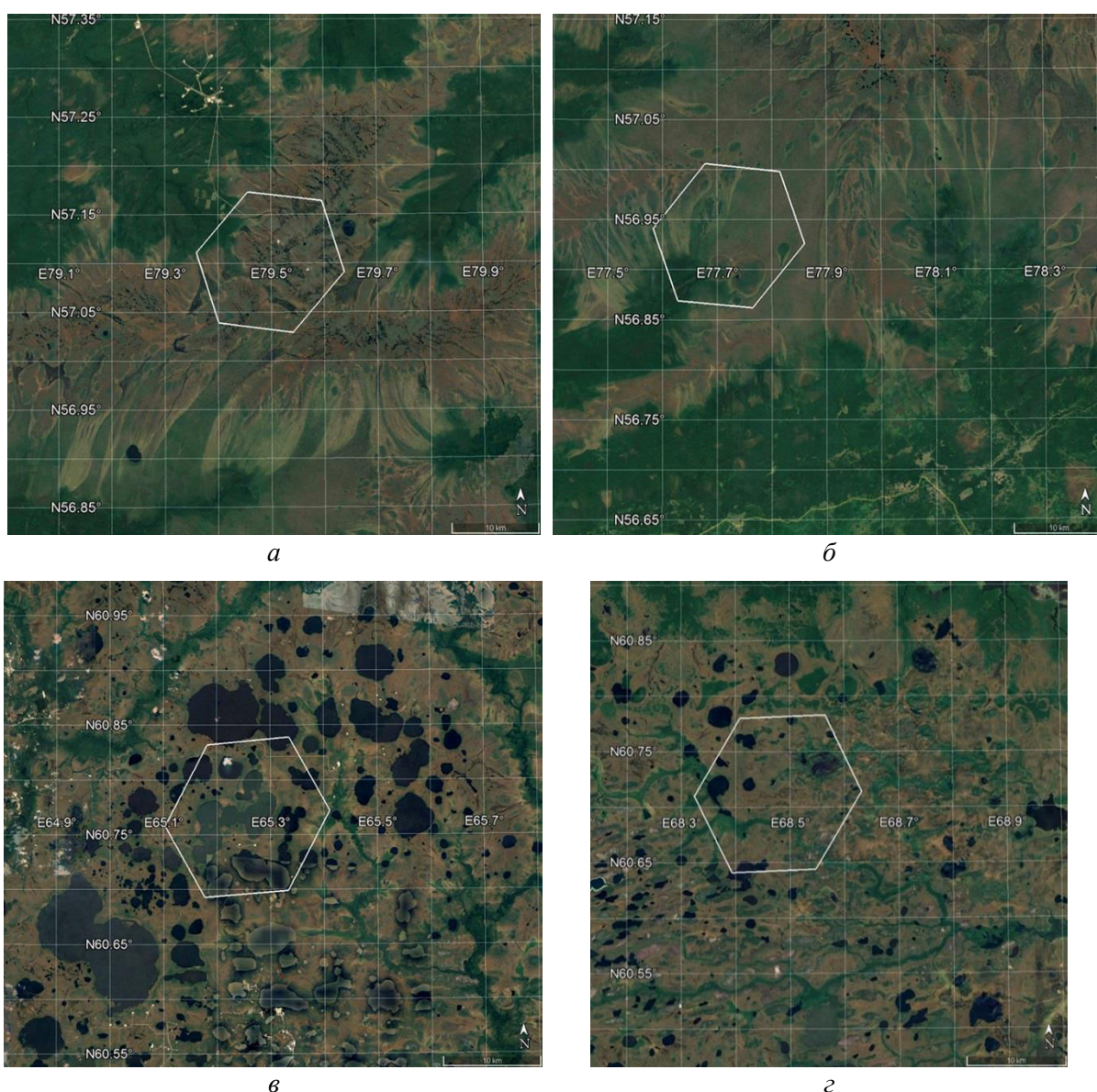


Рисунок 5.3.1.1 — Исследуемые области центральной части Западно-Сибирской равнины: Большое Васюганское болото: а — Кедровый; б — Остяцк; Мухринский торфяник; в — Супра; г — Ханты-Мансийск (см. таблицу 5.3.1.1). Белым цветом указана область, соответствующая ячейке продуктов SMOS L1C

Таблица 5.3.1.1 — Исследуемые водно-болотные угодья Западно-Сибирской равнины, населённый пункт и регион, природная зона, координаты центра ячейки продукта SMOS L1C

Водный объект	Населённый пункт, регион	Природная зона	Координаты, град с.ш., в.д.
Болота	Кедровый, Томская обл.	Бореальная	57,10, 79,50
Болота	Остяцк, Новосибирская обл.	Бореальная	56,93, 77,72
Болота, озёра	Супра, Тюменская обл.	Бореальная, субарктическая	60,77, 65,26
Болота, озёра	Ханты-Мансийск, Тюменская обл.	Бореальная, субарктическая	60,71, 68,48

Большое Васюганское болото (Васюганские болота) одно из самых больших болот на Земле. Площадь болота составляет величину около 53–55 тыс. км². Оно расположено в междуречье Оби и Иртыша. Это болото занимает территорию Томской области, а также часть Новосибирской и Омской областей и Ханты-Мансийского автономного округа. Большое Васюганское болото расположено в зоне, где мелколиственные леса переходят в южную тайгу. Большое Васюганское болото имеет асимметричную структуру: северный склон покрыт олиготрофными и мезотрофными болотами, в южной части преобладают эвтрофные типы болот. На территории этого болота было выбрано два участка. Первый находится на северном склоне, где преобладают олиготрофные и мезотрофные болота. Ячейка продукта SMOS L1C, выбранная на этом участке (см. рисунок 5.3.1.1а), расположена в Томской области в 50 км южнее города Кедровый (таблица 5.3.1.1). Второй участок расположен на южном склоне Большого Васюганского болота, где преобладают эвтрофные типы болот. Ячейка продукта SMOS L1C выбранная на этом участке (см. рисунок 5.3.1б) расположена в Новосибирской области в 30 км северо-западнее села Остяцк (таблица 5.3.1.1).

Мухринский торфяник (Мухринское болото) расположен на восточной террасе реки Иртыш в 20 км к югу от места её слияния с р. Обь, в зоне средней тайги Западно-Сибирской равнины. Климат региона — субарктический или бореальный с продолжительной холодной зимой и коротким тёплым летом. Среднегодовая температура на метеостанции Ханты-Мансийск за период 1983–2013 гг. составляет –0,7 °С, годовое количество осадков — 526 мм. Мухринский торфяник представляет собой приподнятые олиготрофные болота с мозаикой гряд и ложбин, а также олиго-мезотрофные болота. Ряд небольших озёр шириной до 300 м расположены в наиболее заболоченных районах, а центральная часть торфяника занята широким водотоком. Средняя глубина торфа составляет 3,3 м. На территории Мухринского торфяника выбрано два участка. Первый находится в сильно заболоченном районе, где присутствует большое количество малых озёр. Ячейка продукта SMOS L1C, выбранная на этом участке (см. рисунок 5.3.1.1в), расположена в Тюменской области в 20 км юго-восточнее села Супра (таблица 5.3.1.1). Второй участок находится в менее заболоченной области. Ячейка продукта SMOS L1C, выбранная на этом участке (см. рисунок 5.3.1.1г), расположена в Тюменской области в 35 км юго-западнее города Ханты-Мансийка, недалеко от Полевой станции Мухрино (таблица 5.3.1.1).

5.3.2 Данные реанализа

Для оценки содержания углекислого газа в атмосфере над исследуемыми акваториями были использованы данные реанализа CAMS global greenhouse gas reanalysis (EGG4). CAMS считается крупнейшим набором данных реанализа о составе атмосферы, предоставляемым ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Он состоит из трёхмерных полей данных об аэрозолях и химических составляющих

атмосферы с полным покрытием земного шара. В настоящий момент доступны данные за период с 2003 по 2020 г. Реанализ CAMS EGG4 — продукт 4d-var системы ассимиляции, в основе которой лежит модель прогноза ECMWF IFS CY42R1 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>). Реанализ ассимилирует данные спутникового дистанционного зондирования земли в 12-часовом временном окне с 09:00 до 21:00 UTC и с 21:00 до 09:00 UTC и обеспечивает глобальные поля атмосферных параметров на регулярной сетке координат $0,75 \times 0,75^\circ$ с временной периодичностью 3 ч. В работе использовались данные CAMS EGG4 о среднем содержании CO_2 в столбе воздуха (в ppm). Ошибки данных реанализа CAMS EGG4 по CO_2 и по данным наземных экспериментов в среднем находятся в пределах 1 % в нижних слоях тропосферы (https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2021-04/CAMS84_2018SC3_D5.1.2-2020.pdf). Данные реанализа CAMS EGG4 были получены с сервера <https://atmosphere.copernicus.eu/> и совмещены по пространству и времени с данными по яркостной температуре, полученной из продуктов SMOS L1C за период 2012–2020 гг.

5.3.3 Спутниковые данные и фенологические фазы водно-болотных угодий

Для определения фенологических фаз выбранных областей водно-болотных угодий были использованы данные SMOS L1C (продукт MIR_SCLF1C версий 620 и 724).

Яркостная температура поверхности Земли T_{Br} с учётом поляризации измеряется в диапазоне углов визирования $0\text{--}60^\circ$ микроволновым радиометром MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis). Радиометр MIRAS расположен на спутнике Европейского космического агентства (*англ.* ESA — European Space Agency) SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). Он принимает восходящее излучение на частоте 1,41 ГГц. Максимальный пространственный охват достигается при угле визирования $42,5^\circ$, при этом пространственное разрешение составляет величину 35×65 км. Пересчёт значений T_{Br} из связанной с антенной системы координат (T_X и T_Y) в систему координат, связанную с поверхностью земли (T_H и T_V) — так называемое «вращение» вектора поляризации — производится по штатным алгоритмам SMOS с помощью пакета SMOS-BOX версии 5.8.1 в программной среде SNAP. Данные SMOS L1C привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9. Линейный размер ячейки сетки составляет величину порядка 16 км, а площадь — около 195 км^2 . Таким образом, значение яркостной температуры для любой ячейки сетки формируется участком подстилающей поверхности площадью от 1780 км^2 (по уровню 3 дБ). Получается, что один пиксель радиометра MIRAS содержит в среднем порядка девяти ячеек геодезической сетки DGG ISEA 4N9. Сама же ячейка площадью 195 км^2 расположена в центре этого участка. Для достижения максимальной достоверности, из анализа были исключены следующие измерения:

- 1) значения, связанные с влиянием радиочастотных помех;
- 2) данные с погрешностью определения T_H и T_V более 5 К;
- 3) данные с коэффициентом поляризации (T_H/T_V) вне диапазона 0,01–0,99.

Непрерывный архив данных SMOS L1C за период с 2012 г. по настоящее время хранится на серверах ESA.

На основе данных радиометра MIRAS были изучены специфические особенности микроволнового излучения водно-болотных угодий Западно-Сибирской равнины. Методика исследований включала в себя: анализ сезонной динамики яркостной температуры подстилающей поверхности на тестовых участках, полевые измерения физических параметров подстилающей поверхности, а также лабораторные измерения диэлектрических характеристик природных сред (вода, почва, растительность).

На примере Мухринского болота в сезонной динамике T_{Br} было выделено пять характерных периодов, соответствующих фенологическим фазам водно-болотных угодий бореальной и субарктической зоны (рисунки 5.3.3.1):

1) 1–2 «Зимнее плато» — период, длящийся примерно с начала ноября по конец марта. В этот период значение яркостной температуры на горизонтальной поляризации ($T_{ВН}$) постоянно (в пределах доверительных интервалов) и составляет величину порядка 255 К, или имеет слабо выраженный положительный тренд.

2) 2–3 «Весеннее таяние» — быстрое (10–30 дней) уменьшение значений $T_{ВН}$ до 220 К. Этот период связан с сильным увлажнением, а также покрытием водой значительной части подстилающей поверхности в результате таяния сезонного снежного покрова.

3) 3–4 «Летний период 1» — в разные годы наблюдается разная динамика $T_{ВН}$, вид которой зависит от вегетационных циклов болотной растительности. В точке 4 достигается максимальное значение $T_{ВН}$. Оно соответствует максимальному высыханию заболоченной территории, или максимальному развитию болотной растительности и экранированию ею излучения водной поверхности.

4) 4–5 «Летний период 2» — связан с постепенным увяданием надводной растительности.

5) 5–1 «Осенне-зимнее промерзание болотной толщи». Вид сезонной динамики $T_{ВН}$ зависит от особенностей промерзания болотной толщи как многослойной системы, состоящей из слоёв живой растительности, отмершей растительности и почвы.

Точность определения границ этих интервалов зависит от периодичности спутниковой съёмки и составляет от 1 до 3 дней в зависимости от географической широты места наблюдения.

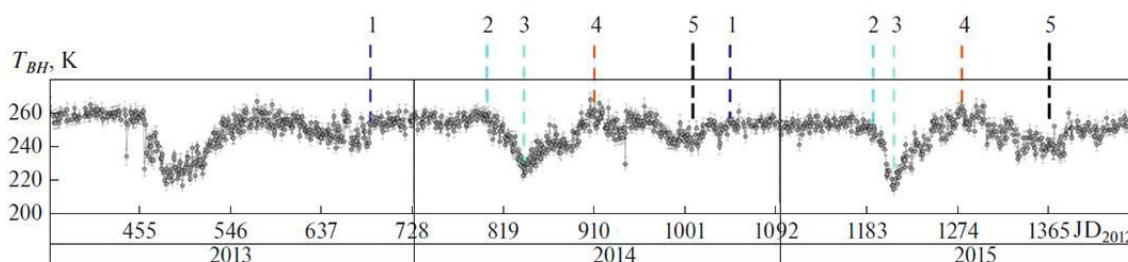


Рисунок 5.3.3.1 — Типичные сезонные вариации яркостной температуры на горизонтальной поляризации и соответствующие им фенологические фазы для водно-болотных угодий бореальной и субарктической зоны. Расшифровка интервалов 1-2-3-4-5-1 дана в тексте. JD — юлианский день, отсчитываемый с 01.01.2012

Сезонная динамика содержания углекислого газа в атмосфере над исследуемыми водными объектами была сопоставлена с сезонными изменениями фенологических фаз, определённых по данным спутника SMOS, за период 2012–2020 гг. Результаты и анализ этого сравнения представлены в следующем разделе.

5.3.4 Результаты и их обсуждение

Сезонная динамика T_{Br} выбранных участков водно-болотных угодий (рисунок 5.3.4.1) значительно отличается от сезонной динамики T_{Br} больших пресноводных акваторий. Значения T_{Br} на горизонтальной и вертикальной поляризации для тестовых участков водно-болотных угодий имеют другую величину и амплитуду изменений. Связано это с наличием на исследуемых участках растительности (лес, кустарники, мхи и т.п.). Наличие растительности приводит к увеличению количества фенологических фаз водно-болотных угодий по сравнению с пресноводными акваториями — появляются фазы, связанные с сезонной динамикой болотной растительности (развитие, увядание и т.п.).

Максимальные значения T_{Br} для Большого Васюганского болота (рисунок 5.3.4.1а, б) соответствуют середине лета и связаны с максимальным развитием растительности. Далее значения T_{Br} уменьшаются, что обусловлено увяданием растительности и последующим замерзанием поверхности. В зимний период значения T_{Br}

немного увеличиваются или остаются постоянными. Минимум яркостной температуры соответствует периоду весеннего таяния, когда поверхность становится влажной, а растительность ещё не начала развиваться. После минимума происходит резкий рост значений T_{Br} , связанный с высыханием поверхности и быстрым развитием растительности.

У Мухринского торфяника сезонная динамика T_{Br} схожа с сезонной динамикой T_{Br} Большого Васюганского болота. Различие заключается в значениях T_{Br} и их амплитуде. Максимальные значения T_{Br} для Мухринского торфяника приходятся уже не на середину лета, а на период весеннего таяния (рисунок 5.3.4.1в, з). Эти различия связаны с наличием на исследуемых ячейках территории Мухринского торфяника большого количества небольших озёр, фенологические фазы которых отличаются от фенологических фаз водно-болотных угодий.

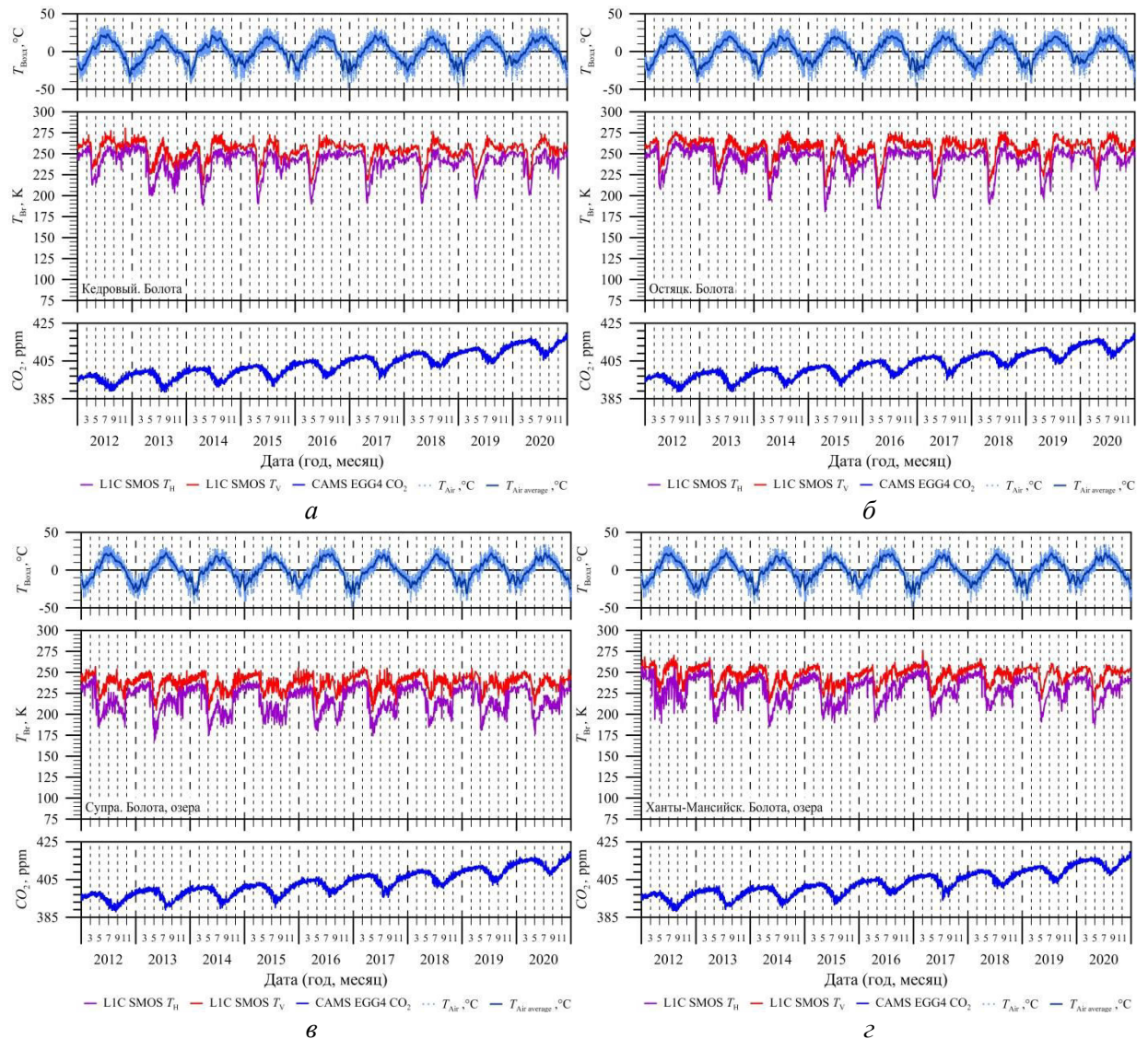


Рисунок 5.3.4.1 — Сезонная динамика яркостной температуры, температуры воздуха и концентрации CO_2 для исследуемых водно-болотных угодий: а — Большое Васюганское болото, Кедровый; б — Остяк; Мухринский торфяник; в — Супра; з — Ханты-Мансийск (см. таблицу 5.3.4.1)

Сезонные изменения концентрации CO_2 в столбе атмосферы над тестовыми участками Большого Васюганского болота и Мухринского торфяника также как и у пресноводных акваторий, носят циклический характер. Минимум концентрации

углекислого газа приходится на летний период, соответствующий максимуму фотосинтеза, определяемому буйным развитием растительности. Максимум концентрации CO_2 приходится на весенний период, когда начался период таяния (освобождения поверхности от снега и льда), а растительность ещё не начала развиваться. Кратковременных весенних выбросов CO_2 , как у пресноводных акваторий бореальной зоны, на тестовых участках ни в один из сезонов не наблюдается, что является косвенным доказательством связи этих выбросов с разрушением ледяного покрова пресноводных акваторий бореальной зоны. Влияние трофического уровня исследуемых водно-болотных угодий на сезонную динамику концентрации CO_2 в столбе атмосферы над ними, обнаружено не было.

В данном исследовании приведены результаты сравнения сезонной динамики концентрации углекислого газа в атмосфере, полученной по данным реанализа SAMS EGG4, и фенологических фаз водно-болотных угодий Северного полушария, расположенных в бореальной и субарктической зоне, за период 2012–2020 гг. Фенологические фазы водно-болотных угодий определялись по данным спутниковой микроволновой радиометрии (спутник SMOS).

В результате выполненных исследований показана связь данных спутниковой микроволновой радиометрии, по которым можно отслеживать фенологические фазы различных водных объектов бореальной и субарктической зоны, с динамикой концентрации CO_2 в столбе атмосферы над ними. Приведённые результаты продемонстрировали схожесть сезонной динамики концентрации CO_2 для всех исследуемых водных объектов (озера, водно-болотные угодья). Концентрация CO_2 в атмосфере над исследуемыми водными объектами имеет сезонный циклический характер. Минимум концентрации соответствует летнему периоду из-за сильного фотосинтеза, в результате которого углекислый газ поглощается растительностью водно-болотных угодий или фитопланктоном пресноводных акваторий. Максимум концентрации CO_2 над водными объектами соответствует окончанию зимнего периода. Зимой из-за сильного понижения температуры воды резко уменьшается фотосинтез, что приводит к сильному уменьшению поглощения CO_2 и, соответственно, увеличению его концентрации в водных объектах и дальнейшей эмиссии. У замерзающих озёр бореальной зоны иногда наблюдается ещё и сильный кратковременный выброс углекислого газа, соответствующий стадии разрушения ледяного покрова. Этот выброс объясняется более высокой биопродуктивностью водоёмов бореальной зоны по сравнению с акваториями субарктической зоны.

В данном исследовании объяснены причины сезонной цикличности концентрации CO_2 в столбе атмосферы над водными объектами, а также наличие или отсутствие кратковременного выброса CO_2 в период разрушения льда у ряда акваторий. Выполнить контактные измерения сезонной динамики концентрации углекислого газа в атмосфере для всех водных объектов субарктической и бореальной зоны практически невозможно. Однако для них можно использовать данные спутника SMOS. Таким образом, данные спутниковой микроволновой радиометрии могут быть использованы для косвенной оценки сезонного изменения концентрации CO_2 в атмосфере над крупными пресноводными акваториями и водно-болотными угодьями бореальной и субарктической зоны.

5.3.5 Трофическая классификация водных объектов

Водные объекты по условиям питания водных организмов и продукцией органического вещества подразделяются на несколько классов:

- Олиготрофные — водные объекты с малым количеством питательных веществ и малой продукцией органического вещества.
- Мезотрофные — водные объекты со средними условиями питания.

- Эвтрофные — водные объекты с большим содержанием биогенных и органических веществ и бурным развитием фитопланктона.
- Дистрофные — водные объекты с избыточным содержанием органического вещества, в результате чего продукты его неполного окисления становятся вредными для жизнедеятельности организмов. Наблюдается недостаток кислорода.
- Иногда используются промежуточные классы водных объектов: ультраолиготрофные — водные объекты с ещё меньшим содержанием питательных веществ и продукцией органического вещества, чем олиготрофные.

Заключение

В рамках работ над основной задачей проекта – обеспечением возможности оперативной оценки, на основе существующих и перспективных средств постоянного спутникового мониторинга, пространственных распределений концентраций и потоков парниковых газов на территории России в 2023 г. решались в первую очередь задачи, связанные с оценкой возможностей и разработкой методов мониторинга крупных источников выбросов парниковых газов. Решение данных задач необходимо для организации постоянного мониторинга выбросов парниковых газов и других загрязнений в атмосферу. На этапе 2023 г. были выполнены следующие основные работы:

- Исследование возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа пространственных распределений концентраций малых газовых составляющих в районах расположения крупных антропогенных объектов на примере анализа концентраций диоксида азота;
- Оперативное построение карт интенсивности горения пожаров для оценок потенциальной гибели лесной растительности и интенсивности выбросов парниковых газов в атмосферу и пространственного распределения их концентраций;
- Исследование связи вариаций концентрации парниковых газов над водно-болотными угодьями с их фенологическими фазами, определяемыми по спутниковым данным.

Таким образом, поставленные на данном этапе проекта задачи по направлению обеспечения возможности оперативной оценки, на основе существующих и перспективных средств постоянного спутникового мониторинга, пространственных распределений концентраций и потоков парниковых газов на территории России выполнены полностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный отчёт по теме «Дистанционный мониторинг распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли» (№ FFWG-2022-0013) показывает, что в соответствии с планом ИКИ РАН на 2023 г. они велись по следующим основным направлениям:

1. Разработка новых методов измерения малых газовых составляющих в атмосфере Земли (в том числе с использованием и комбинированием новых частотных каналов и различных методик зондирования).
2. Создание новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли по полям малых газовых составляющих (в том числе, позволяющих восстанавливать детализированную пространственно-временную динамику полей, реализующиеся в них потоки).
3. Развитие методов усвоения данных ДЗЗ и продуктов их обработки в численных моделях атмосферной циркуляции.
4. Создание технологии и системы дистанционного (спутникового) научного мониторинга концентраций и потоков малых газовых составляющих атмосферы, в том числе — парниковых газов (система будет ориентирована на мониторинг всей территории России и пограничных стран).
5. Обеспечение возможности оперативной оценки, на основе существующих и перспективных средств постоянного спутникового мониторинга, пространственных распределений концентраций и потоков парниковых газов на территории России.

В рамках данной тематики опубликовано в 2023 г. 8 работ, из них 4 в рецензируемых изданиях, входящих в Scopus и WoS (плановый показатель 4), а также сделано 4 доклада на Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, Москва, 13–17 ноября 2023 г. (плановый показатель 2). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (плановый показатель 1).

Таким образом, поставленные в плане задачи на 2023 г. в рамках данной темы решены в полном объёме.

ПУБЛИКАЦИИ

Опубликовано 8 работ, из них:

- в зарубежных изданиях — 0
- книг — 0
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах — 4
- статьи в сборниках материалов конференций — 0
- материалы конференции — 4
- доклады, тезисы — 0
- публикаций по грантам РФФИ — 0
- в соавторстве с зарубежными авторами — 0
- статьи в WOS и Scopus — 4
- статьи в WOS и Scopus (Q1, Q2) 0
- статьи в WOS и Scopus (Q3, Q4) 4

РИД

Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Патенты

1. *Втюрин С.А.* Viewflow: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680977. 09 октября 2023 г.

Публикации в отечественных научных рецензируемых изданиях

2. *Бриль А.А., Константинова А.М., Лупян Е.А., Бурцев М.А.* Возможности работы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 6. № 5. С. 85–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
3. *Лозин Д.В.* Система оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 6. № 5. С. 96–106. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-96-106. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
4. *Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Ермаков Д.М., Садовский И.Н.* Отработка методики балансовых расчётов выбросов парниковых газов по данным спутникового мониторинга на примере крупных лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 6. № 6. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
5. *Садовский И.Н., Пашинов Е.В., Сазонов Д.С.* Анализ возможности расчета элементов баланса атмосферных парниковых газов по современным данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 6. № 6. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)

Материалы конференции

6. *Бриль А.А., Константинова А.М., Лупян Е.А., Бурцев М.А.* Возможности работы с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Материалы

- 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023. С. 16. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
7. *Втюрин С.А., Пашинов Е.В.* «Viewflow»: программный инструмент визуализации и анализа динамики полей характеристик газового состава атмосферы // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023. С. 18. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
 8. *Константинова А.М., Бриль А.А., Луян Е.А.* Выделение стационарных источников загрязнений атмосферы на территории России с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 445. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
 9. *Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Ермаков Д.М.* Методика восстановления баланса парниковых газов в атмосфере Земли по данным ДЗЗ // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 449. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)