

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

УДК 528.85/.87(15)

Номер государственной регистрации АААА-А19-119072590030-9

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института космических исследований
Российской академии наук
Член-корреспондент РАН



А.А.Петрукович

« 24 » декабря 2020 г.

отчет о НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера
(промежуточный)

Тема Космос-Д

0024-2019-0014

Научный руководитель

к.т.н. _____ А.А. Прошин

« 24 » декабря 2020 г.

Москва

2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

старший научный сотрудник
к.т.н.



Прошин А.А.

Ответственные исполнители разделов темы:

ведущий научный сотрудник
д.ф.-м.н.



Лукьянова Р.Ю.

научный сотрудник
к.ф.-м.н.



Мещеряков А.В.

старший научный сотрудник
к.т.н.

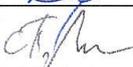
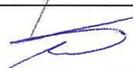
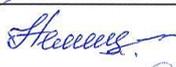
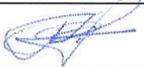
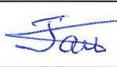


Прошин А.А.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ отдел 54

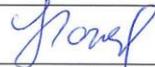
Должность, ученая степень, ученое звание	Дата	Подпись	ФИО	Номера разделов отчета в работе по которым принимал участие исполнитель
главный специалист	10.12.2020		Кузьмин А.К.	1
ведущий научный сотрудник дн	10.12.2020		Лукьянова Р.Ю.	1
старший научный сотрудник	10.12.2020		Мерзлый А.М.	1
ведущий инженер	10.12.2020		Никифоров О.В.	1
научный сотрудник кн	10.12.2020		Ожередов В.А.	1
ведущий инженер	10.12.2020		Янаков А.Т.	1

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ отдел 52

Должность, ученая степень, ученое звание	Дата	Подпись	ФИО	Номера разделов отчета в работе по которым принимал участие исполнитель
инженер	10.12.2020		Бельведерский М.И.	2
старший лаборант	10.12.2020		Борисов В.Д.	2
старший научный сотрудник кн	10.12.2020		Буренин Р.А.	2
старший лаборант	10.12.2020		Быков С.Д.	2
младший научный сотрудник	10.12.2020		Зазнобин И.А.	2
научный сотрудник кн	10.12.2020		Карасев Д.И.	2
ведущий инженер	10.12.2020		Лыскова Н.С.	2
младший научный сотрудник	10.12.2020		Ляпин А.Р.	2
научный сотрудник кн	10.12.2020		Медведев П.С.	2
научный сотрудник кн	10.12.2020		Мещеряков А.В.	2
старший лаборант	10.12.2020		Немешаева А.А.	2
старший лаборант	10.12.2020		Николаева С.М.	2
научный сотрудник кн	10.12.2020		Филиппова Е.В.	2
научный сотрудник кн	10.12.2020		Хорунжев Г.А.	2

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ отдел 56

Должность, ученая степень, ученое звание	Дата	Подпись	ФИО	Номера разделов отчета, в работе по которым принимал участие исполнитель
старший научный сотрудник, к.т.н.	10.12.2020		Балашов И.В.	3
инженер	10.12.2020		Бриль А.А.	3
старший научный сотрудник, к.т.н.	10.12.2020		Бурцев М.А.	3
главный специалист	10.12.2020		Дегай А.Ю.	3
научный сотрудник, к.т.н.	10.12.2020		Кашницкий А.В.	3
младший научный сотрудник, к.т.н.	10.12.2020		Кобец Д.А.	3
главный специалист, к.ф.-м.н.	10.12.2020		Козочкина А.А.	3
инженер	10.12.2020		Константинова А.М.	3
старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	10.12.2020		Крашенинникова Ю.С.	3
заведующий отделом, д.т.н.	10.12.2020		Лупян Е.А.	3
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.	10.12.2020		Мазуров А.А.	3
ведущий конструктор.	10.12.2020		Марченков В.В.	3
младший научный сотрудник	10.12.2020		Матвеев А.М.	3
старший научный сотрудник, к.т.н.	10.12.2020		Прошин А.А.	3
заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.	10.12.2020		Пыркков В.Н.	3
ведущий инженер	10.12.2020		Радченко М.В.	3
инженер	10.12.2020		Сенько К.С.	3
младший научный сотрудник	10.12.2020		Сычугов И.Г.	3
старший научный сотрудник, к.т.н.	10.12.2020		Толпин В.А.	3

старший научный сотрудник, к.т.н.	10.12.2020		Уваров И.А.	3
инженер	10.12.2020		Черных В.Н.	3
Старший лаборант	10.12.2020		Юдин Д.А.	3

РЕФЕРАТ

Отчет 61 стр., 28 рис., 34 источника.

НАСТОЯЩИЙ ОТЧЕТ ПОСВЯЩЕН ОПИСАНИЮ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ, ПОЛУЧЕННЫХ В 2020 ГОДУ В РАМКАХ ТЕМЫ "КОСМОС-Д" (№ 0024-2019-0014), ВЫПОЛНЯЮЩЕЙСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ ИНСТИТУТОМ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК.

Тема «Космос-Д» «Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера» сформирована для развития новой парадигмы «больших данных» в науках о космосе и получения качественных новых результатов на этой основе. Тема впервые сформирована в 2019 г в рамках программы Министерства высшего образования и науки по созданию новых лабораторий, на основе задела, созданного в других «профильных» темах государственного задания ИКИ РАН.

В ОТЧЕТЕ ПРИВОДЯТСЯ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ, ЗАПЛАНИРОВАННЫХ НА 2020 ГОД ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ:

Развитие комплекса взаимосвязанных физико-математических моделей для диагностики и прогнозирования состояния высокоширотной ионосферы. Разработки общей модели взаимодействия в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера-нейтральная атмосфера Земли.

Применение методов машинного обучения и глубокого обучения для обработки и анализа больших массивов астрономических данных в задачах наблюдательной астрофизики.

Разработка новых методов и подходов организации хранения и параллельной обработки сверхбольших объемов данных для решения задач анализа долговременных наблюдений в интересах ведения мониторинга и изучения различных процессов и явлений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, СВЕРХБОЛЬШИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ АРХИВЫ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, БЛОЧНЫЙ ДОСТУП К ДАННЫМ В АРХИВАХ, АНАЛИЗ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ СЕРИЙ НАБЛЮДЕНИЙ, ТЕХНОЛОГИЯ UNISAT, МИССИЯ ЭКЗОМАРС-2016, АППАРАТ TGO, MARS EXPRESS, ИНФОРМАЦИОННЫЙ СЕРВИС ARES, ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, ДОСТУП К АРХИВАМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ, АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ, ПРОГНОЗЫ СОСТОЯНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА.

ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА, ВЫСОКОШИРОТНАЯ ИОНОСФЕРА, ПРОДОЛЬНЫЕ ТОКИ, ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ, ОБРАБОТКА МАССИВОВ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ И РАДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ, КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ "СПЕКТР-РГ", РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОФИЗИКА, ОБЗОРЫ НЕБА

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	7
СОДЕРЖАНИЕ.....	8
ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1 Развитие комплекса взаимосвязанных и дополняющих друг друга физико-математических моделей для диагностики и прогнозирования состояния высокоширотной ионосферы в северном и южном полушариях, которые электродинамически связаны между собой через область средних широт. Разработки общей модели взаимодействия в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера-нейтральная атмосфера Земли.	13
Введение	13
1.1. Продольные токи во время сильных магнитных бурь 24-го солнечного цикла по данным измерений низкоорбитальных спутников Swarm	13
1.1.1 Постановка задачи	13
1.1.2 Мелкомасштабные ПТ экстремальной плотности	15
1.2 Разработка методов диагностики локальной ионизации, обусловленной метеорными следами в области полярной мезосферы-нижней термосферы	16
1.2.1 Постановка задачи	16
1.2.2 Данные	16
1.2.3 Результаты.....	17
1.2.3.1. Распределение высот метеорных радиоэхо	17
1.2.3.2. Соотношение между частотой зеркальных и незеркальных отражений	18
1.3. Развитие численной модели распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы.....	20
1.3.1 Постановка задачи	20
1.3.2 Блок-схема модели	20
1.3.3 Зависимость от солнечного зенитного угла: новая интерпретация формирования полярного пика	21
1.4 Развитие ГИС «Аврора-Арктика» и моделей ионосферы для нее, методов дистанционной диагностики	22
Заключение.....	24
ГЛАВА 2 Применение методов машинного обучения и глубокого обучения для обработки и анализа больших массивов астрономических данных в задачах наблюдательной астрофизики	25
Введение	25
2.1 Разработка и применение алгоритмов машинного обучения для детектирования, кросс-отождествления и классификации астрономических объектов в многоволновых данных современных цифровых обзоров неба	25
2.2 Развитие методов машинного обучения для прогнозирования красных смещений внегалактических объектов по данным фотометрии неба в различных спектральных диапазонах.....	26
2.3 Развитие методов классификации астрономических данных методами глубокого обучения в условия ограниченной разметки	28
2.4. Развитие перспективных алгоритмов инкрементального моделирования и машинного обучения с подкреплением применительно к задачам астрономических исследований.....	29
Заключение.....	30
ГЛАВА 3 Разработка новых методов и подходов организации хранения и параллельной обработки сверхбольших объемов данных для решения задач анализа долговременных наблюдений в интересах ведения мониторинга и изучения различных процессов и явлений	31
Введение	31

3.1. Разработка технологии динамического блочного представления спутниковых данных системам распределенной обработки	32
3.1.1 Краткие сведения о реализации технологии.....	32
3.1.2 Особенности организации блочной обработки данных по большим территориям	35
3.1.3 Выбор оптимальных разбиений на блоки и кластеры обработки.....	36
3.1.3.1. Этап подготовки	36
3.1.3.2. Этап обработки	37
3.1.3.3. Восстановление экспериментальных зависимостей времен различных процессов от размера блока данных	38
3.1.3.4. Выбор оптимальных значений размеров блоков и кластеров.....	38
3.1.3.5. Пример расчета оптимального размера блока при выделении для обработки фиксированного числа вычислительных узлов	40
3.2. Разработка новых инструментов для работы с данными архивов долговременных наблюдений ЦКП «ИКИ-Мониторинг»	41
3.2.1 Применение тайловой схемы доступа к картам в интерфейсах, построенных по технологии GEOSMIS	41
3.2.2 Использование облачных ресурсов Google Cloud Storage и их интеграция с ресурсами ЦКП «ИКИ-Мониторинг».....	44
3.2.3 Построение отказоустойчивых узлов доступа к данным ДЗЗ в системах мониторинга	46
3.2.4 Взаимная интеграция сервисов данных распределённых систем спутникового мониторинга	49
3.2.5 Развитие инструментов графического анализа рядов данных в системах семейства «Созвездие-Вега»	52
3.2.5.1. Перевод клиентской части на технологию модульной разработки и компиляции	52
3.2.5.2. Переход к централизованному формированию метаинформации необходимой в графическом интерфейсе	54
3.2.5.3. Переход к централизованному формированию метаинформации, необходимой в графическом интерфейсе	54
3.3. Использование новых подходов при построении ЦКП «ИКИ-Мониторинг».....	54
Заключение.....	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
ПУБЛИКАЦИИ	57

ВВЕДЕНИЕ

Институт космических исследований Российской академии наук проводит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в соответствии с государственным заданием ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ по следующим научным направлениям:

- Фундаментальные и прикладные научные исследования в области астрофизики и радиоастрономии (номер направления в Программе 16, 14);
- Фундаментальные и прикладные научные исследования в области Физики космической плазмы, энергичных частиц, Солнца и солнечно-земных связей (номер направления в Программе 16, 14);
- Фундаментальные и прикладные научные исследования планет и малых тел Солнечной системы (номер направления в Программе 16, 71);
- Фундаментальные и прикладные научные исследования планеты Земля (номер направления в Программе 79,80);
- Фундаментальные и прикладные научные исследования в области механики, систем управления и информатики (номер направления в Программе 21);
- Развитие исследовательской, конструкторской, опытно-экспериментальной базы научного космического приборостроения и методов экспериментальной физики (номер направления в Программе 16).

Эти направления НИР и ОКР соответствуют следующим направлениям фундаментальных исследований, указанным в Программе фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 03 декабря 2012 г., № 2237-р

п/п	Направление фундаментальных исследований	Номер направления в «Программе»
1	Современные проблемы астрономии, астрофизики и исследования космического пространства, в том числе происхождение, строение и эволюция Вселенной, природа темной материи и темной энергии, исследование Луны и планет, Солнца и солнечно-земных связей, развитие методов и аппаратуры внеатмосферной астрономии и исследований космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач	16
2	Современные проблемы физики плазмы, включая физику астрофизической плазмы, физику низкотемпературной плазмы и основы её применения в технологических процессах	14
3	Закономерности формирования минерального, химического и изотопного состава Земли. Космохимия планет и других тел Солнечной системы. Возникновение и эволюция биосферы Земли, биогеохимические циклы и геохимическая роль организмов.	129
4	Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика: инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии.	138
5	Эволюция окружающей среды и климата под воздействием природных и антропогенных факторов, научные основы рационального	137

	природопользования и устойчивого развития; территориальная организация хозяйства и общества	
6	Общая механика, навигационные системы, динамика космических тел, транспортных средств и управляемых аппаратов, механика живых систем.	21

Тема Космос-Д «Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера» соответствует направлению 16.

Тема впервые сформирована в 2019 г в рамках программы Министерства высшего образования и науки по созданию новых лабораторий, на основе задела, созданного в других «профильных» темах государственного задания ИКИ РАН.

Работы по теме сфокусированы на новой парадигме «больших данных». В космических исследованиях переход к новой парадигме обусловлен беспрецедентным ростом количества и разнообразия данных наблюдений. Существующие и будущие дальние космические миссии и системы наблюдения Земли из космоса становятся все более сложными, представляя высокое пространственное/временное/спектральное разрешение. Такое развитие экспериментальной базы требует адекватного усовершенствования подходов к анализу и моделированию соответствующих физических процессов. Перспективным представляется развитие интеллектуальной автоматизированной аналитики, усовершенствование методов моделирования с применением ассимиляции и глубокого машинного обучения, использование новых подходов организации хранения и управления данными (в том числе с использованием облачных технологий и высокопроизводительных вычислительных систем для масштабируемого анализа). Также, результативными могут быть и новые применения традиционных методов анализа с учетом специфики больших данных.

В работах по теме «Космос-Д», начатых в 2019 г и продолженных в 2020 г, предусматривается создание новых подходов к анализу данных космических экспериментов и мониторинга в астрофизике, солнечно-земной физике, физике солнечной системы, дистанционном зондировании Земли. Работы по этим направлениям объединяются разработкой уникальной единой системы хранения и анализа информации.

Работы по теме ведутся по следующим основным направлениям:

- Развитие комплекса взаимосвязанных и дополняющих друг друга физико-математических моделей для диагностики и прогнозирования состояния высокоширотной ионосферы в северном и южном полушариях, которые электродинамически связаны между собой через область средних широт. Разработка общей модели взаимодействия в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера-нейтральная атмосфера Земли. Работы 2020 года были направлены на развитие методов диагностики источников и исследование физических механизмов локальной, наиболее динамичной ионизации в высокоширотной ионосфере, которая обусловлена магнитосферно-ионосферными связями, а также вторгающимися в атмосферу малыми космическими объектами. Были также продолжены работы по усовершенствованию численной модели F-области полярной ионосферы.
- Применение методов машинного обучения и глубокого обучения для обработки и анализа больших массивов астрономических данных в задачах наблюдательной астрофизики. В 2020 году основные результаты были достигнуты по следующим разделам работ:
 - Разработка и применение алгоритмов машинного обучения для детектирования, кросс-отождествления и классификации астрономических объектов в многоволновых данных современных цифровых обзоров неба.
 - Развитие методов машинного обучения для прогнозирования красных смещений внегалактических объектов по данным фотометрии неба в различных спектральных диапазонах.
 - Развитие методов классификации астрономических данных методами глубокого обучения в условия ограниченной разметки

- Развитие перспективных алгоритмов машинного обучения с подкреплением в задачах комбинаторной оптимизации и определения чувствительности к воздействию применительно к задачам астрономических исследований.
- Разработка новых методов и подходов организации хранения и параллельной обработки сверхбольших объемов данных для решения задач анализа долговременных наблюдений в интересах ведения мониторинга и изучения различных процессов и явлений. В 2020 году основные работы в данном направлении были связаны с разработкой и реализацией динамического блочного подхода подготовки данных для проведения их обработки по большим территориям.

Представлению результатов, полученных в данных направлениях, посвящены соответствующие главы настоящего отчета.

ГЛАВА 1 Развитие комплекса взаимосвязанных и дополняющих друг друга физико-математических моделей для диагностики и прогнозирования состояния высокоширотной ионосферы в северном и южном полушариях, которые электродинамически связаны между собой через область средних широт. Разработки общей модели взаимодействия в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера-нейтральная атмосфера Земли.

Введение

Работы 2020 года были направлены на развитие методов диагностики источников и исследование физических механизмов локальной, наиболее динамичной ионизации в высокоширотной ионосфере, которая обусловлена магнитосферно-ионосферными связями, а также вторгающимися в атмосферу малыми космическими объектами. Были также продолжены работы по усовершенствованию численной модели F-области полярной ионосферы. По тематике полученные результаты можно разделить на три группы:

- характеристики продольных токов во время сильных магнитных бурь 24-го солнечного цикла,
- методы диагностики вариаций локальной ионизации, обусловленной метеорными следами в области полярной мезосферы-нижней термосферы,
- тестирование и апробация модели полярной ионосферы; проведение численных экспериментов.

Также выполнен ряд работ по развитию моделей ионосферы, методике использования данных авроральных свечений для определения параметров ионосферы и развитию базы данных наблюдений и моделей ионосферы.

Подробно полученные в данном направлении результаты изложены в следующих научных публикациях [1-3, 5, 9, 10, 18, 29-34].

1.1. Продольные токи во время сильных магнитных бурь 24-го солнечного цикла по данным измерений низкоорбитальных спутников Swarm

1.1.1 Постановка задачи

Продольные электрические токи (ПТ) протекают вдоль высокопроводящих силовых линий магнитного поля Земли, обеспечивают основную электродинамическую связь в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера, и за счет них в ионосферу поступает большая часть энергии солнечного ветра. Поскольку прямые измерения ПТ невозможны, измеряются вариации магнитного поля, которые ПТ создают над ионосферой, и затем по закону Ампера рассчитывается плотность тока. Магнитные измерения проводятся с помощью высокоточных магнитометров, установленных на борту низкоорбитальных спутников с полярной орбитой. С 2014 г. на орбите работает группировка Swarm, состоящая из трех идентичных космических аппаратов (КА). Спутники имеют низкую круговую орбиту, лежащую в меридиональной плоскости и пересекающую полярные области Земли, на высоте 450–500 км. База данных измерений представлена на сайте ESA (<http://earth.esa.int/swarm>) и регулярно пополняется.

Во время магнитной бури ПТ становятся очень динамичными из-за высвобождения энергии, накопленной в хвосте магнитосферы, и развития кольцевого тока. Распределение ПТ усложняется, а их интенсивность увеличивается и может значительно превысить номинальный уровень, предсказанный моделями. Эволюция буревых ПТ, включая их мелкомасштабные структуры, плотность тока в которых может

достигать очень больших значений, изучена недостаточно. На рисунке 1.1.1.1 характеристики 24 солнечного цикла и обозначен период, в течение которого проводились наблюдения КА Swarm.

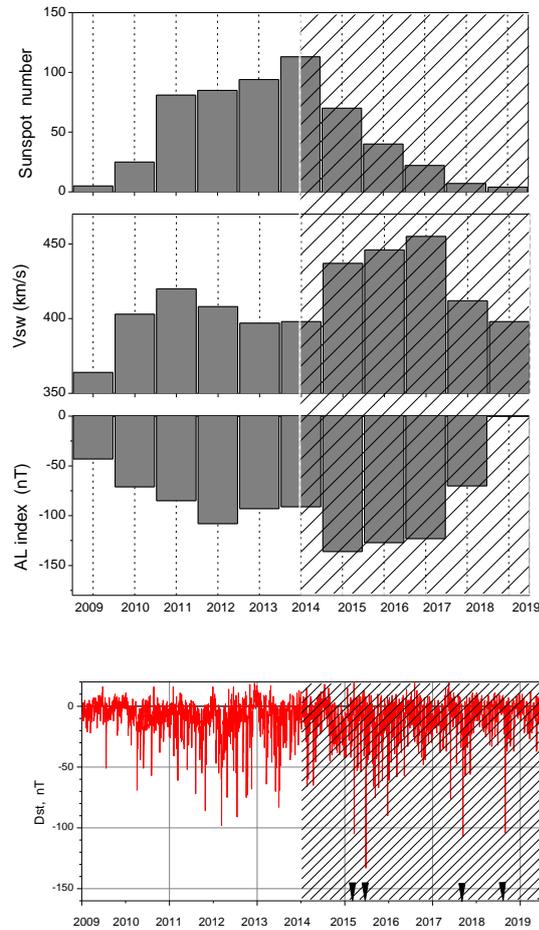


Рисунок 1.1.1.1 — Среднегодовые значения числа солнечных пятен, скорости солнечного ветра и индекса AL и среднесуточные значения индекса Dst в ходе 24 солнечного цикла. Штриховкой обозначен период, в течение которого проводились наблюдения КА Swarm. На нижнем графике черными треугольниками обозначено время крупных магнитных бурь

Наиболее интенсивные магнитные бури 24 цикла, когда среднесуточные значения Dst индекса были меньше -100 нТл, произошли 16-19 марта и 22-25 июня 2015 г., 6–9 сентября 2017 г. и 25-28 августа 2018 г. Для этих бурь по данным магнитных измерений Swarm при каждом пролете через авроральную зону северного и южного полушарий были вычислены следующие параметры:

- средняя плотность ПТ в слое втекающего и вытекающего из ионосферы тока,
- экваториальной границы области, занятой ПТ (из-за смещения орбиты полярная граница идентифицируется в небольшом числе случаев),
- экстремальные значения ПТ на масштабе 7.5 км (стандартные измерения с частотой 1 Гц).

По этим данным был проведен регрессионный анализ и проанализирована эволюция параметров ПТ в ходе магнитных бурь.

1.1.2 Мелкомасштабные ПТ экстремальной плотности

ПТ проявляются в широком пространственном диапазоне от крупномасштабных токовых слоев шириной в сотни километров до нитевидных токов шириной в сотни метров. Чтобы получить временные ряды пиковых плотностей тока, из каждого пересечения заданного временного сектора MLT независимо от полушария были выбраны самые большие положительные и отрицательные секундные (т.е. масштаба 7.5 км) значения. Значения $>50 \mu\text{A}/\text{m}^2$ определялись как экстремальные. Такие значения появлялись только на пике главной фазы бури. Были построены корреляции между магнитными широтами, на которых наблюдаются втекающие и вытекающие мелкомасштабные ПТ экстремальной интенсивности (рисунок 1.1.2.1). Сортировка данных по секторам MLT показала, что в предполуденном секторе втекающие и вытекающие токи появляются парами (биполярными структурами), корреляция между широтами их обнаружения составляет 0.94. В послеполуночном секторе сепарация по широте между мелкомасштабными втекающими и вытекающими токами максимальна. Причиной такого пространственного распределения и изменчивости могут быть различия в механизмах формирования мелкомасштабных ПТ.

Интерпретация биполярной структуры мелкомасштабные ПТ связана с процессом пересоединения на дневной магнитопаузе в области каспа и в хвосте магнитосферы при отрицательном Vz. Это может быть сигнатура плазменных инъекций, которые сопровождаются парами ФАС, генерируемыми из-за образования события передачи потока (FTE) или множественного пересоединения на магнитопаузе. Магнитные топологии, связанные с FTE, ранее наблюдались спутниками МЕО. Спутниками LEO эти сигнатуры ранее не идентифицировались. В целом, наблюдаемые мелкомасштабные ПТ, вероятно, являются следствием турбулентности и неустойчивости, связанных с процессом разрыва ранее замкнутых силовых линий магнитосферы и их пересоединения ММП.

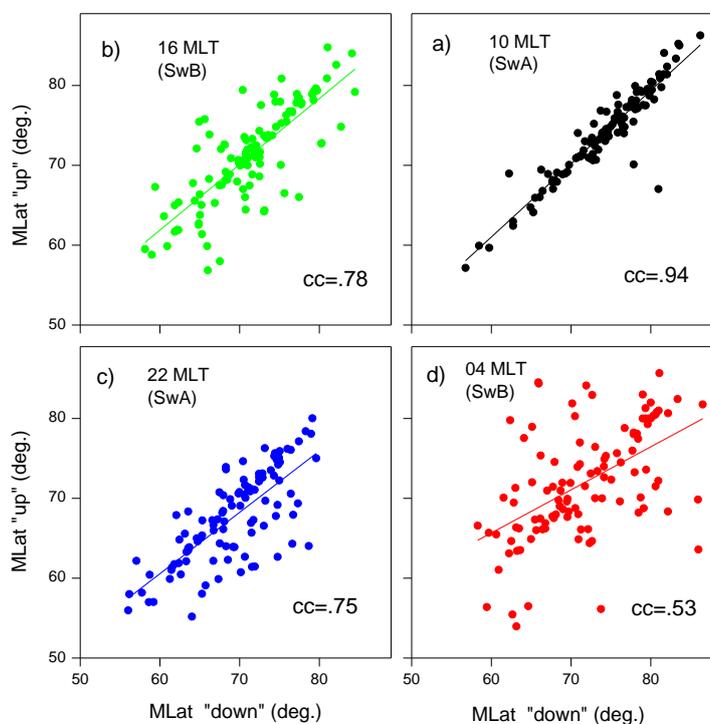


Рисунок 1.1.2.1 — Корреляции между магнитными широтами, на которых наблюдаются втекающие и вытекающие мелкомасштабные ПТ экстремальной интенсивности: (а) 06-12, (б) 12-18, (с) 18-24, (д) 00-06 MLT

1.2 Разработка методов диагностики локальной ионизации, обусловленной метеорными следами в области полярной мезосферы-нижней термосферы

1.2.1 Постановка задачи

Постоянно вторгающиеся в атмосферу Земли метеороиды при столкновении с молекулами атмосферного газа ионизуют их, оставляя за собой след повышенной электронной концентрации, от которого отражаются УКВ радиоволны. Следы метеоров расширяются в радиальном направлении и затухают вследствие амбиполярной диффузии на высотах D-области ионосферы. Большинство метеорных радиолокационных эхосигналов, обнаруживаемых УКВ моностатическим метеорным радаром, происходит от ионизованных следов, которые создаются относительно небольшими метеороидами. Неплотные следы характеризуются линейной концентрацией электронов много меньше, чем $2,4 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-1}$. Амплитуда таких эхо-сигналов резко увеличивается до максимального значения, а затем сразу падает квазиэкспоненциально, а длительность обычно составляет менее 0,2 с. Следы, имеющие линейную электронную плотность больше $2,4 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-1}$, классифицируются как сверхплотные. В большинстве случаев их длительность составляет до 1 с.

Отражение радиоволн (обратное рассеяние) как от неплотных, так и от сверхплотных следов является «зеркальным» (specular), т. е. когда луч радара перпендикулярен следу. Помимо зеркальных эхо-сигналов, УКВ-радары иногда обнаруживают «незеркальные» (non-specular) эхо-сигналы, когда луч радара не перпендикулярен метеоритному следу. В таких случаях отражение возникает из-за обратного рассеяния Брэгга от неоднородностей электронной плотности в пространственном масштабе половинной длины волны радара, генерируемого в пределах ионизированного следа метеора. Поскольку ионосферные плазменные структуры имеют тенденцию вытягиваться вдоль магнитного поля, незеркальные (НЗ) эхо-сигналы объясняются продольными неоднородностями, которые, могут быть вызваны градиентно-дрейфовой неустойчивостью. Это объяснение подходит для низких или средних широт, где силовые линии магнитного поля имеют составляющую, параллельную земной поверхности. НЗ радиоэхо в высоких широтах нельзя объяснить продольными неоднородностями, поскольку магнитное поле у полюсов почти вертикально и, следовательно, луч радара не может быть направлен перпендикулярно магнитному полю.

В отличие от зеркальных механизм рассеяния НЗ радиоэхо мало изучен даже в низких широтах. В высоких широтах он практически не исследовался. В работах 2020 года на большой статистике было проведено исследование высокоширотных НЗ радиоотражений от ионизованных метеорных следов с целью выявления физических механизмов образования долгоживущих НЗ отражений и связанной с ними локальной ионизации, а также разработки новых методов выделения метеорных потоков на фоне спорадических высыпаний.

1.2.2. Данные

Для анализа были использованы данные десятилетних наблюдений метеорного радара Геофизической обсерватории Соданкюля. Стандартный анализ параметров метеорных эхо используется преимущественно для оценки температуры атмосферы и построения моделей нейтрального ветра на соответствующих высотах. Между тем, оказывается, что из данных метеорных радаров помимо этих характеристик можно извлечь важную информацию о свойствах метеорных потоков и спорадических метеоров, а также ионосферные параметры. В данной работе мы анализировали данные первого уровня, которые в рамках стандартного алгоритма обработки не выводятся. В первичных данных можно обнаружить три типа сигналов. На рисунке 1.2.2.1 представлены примеры этих типов: зеркальных неплотного и сверхплотного метеорных следов, а также НЗ сигнала, которые показывают их кардинальное отличие друг от друга.

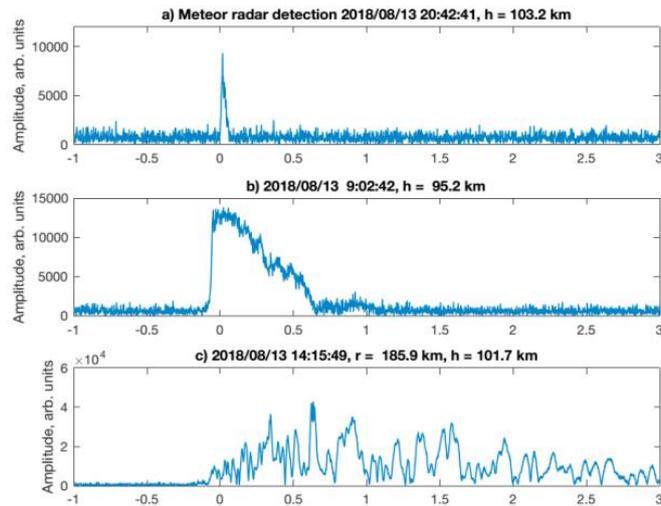


Рисунок 1.2.2.1 — Типичные формы зеркального сигнала, принятого на одной из антенн, от неплотного и сверхплотного метеорных следов, а также пример высокоширотного незеркально отраженного сигнала

1.2.3 Результаты

1.2.3.1. Распределение высот метеорных радиоэхо

Был разработан алгоритм для разделения НЗ отражений. Для 4-с записи амплитуды рассчитывалось отношение (R) средней амплитуды (A_2) между 0,5 и 3,0 с после начала обнаружения метеора к средней амплитуде (A_1) между 1,0 и 0,5 с до начала обнаружения. В случаях зеркальных эхосигналов продолжительностью менее 1 с уровень шума до и после метеорного эхо примерно одинаков, так что $A_1 \approx A_2$ и $R \approx 1$. Для НЗ сигналов отношение больше 1. Для автоматического распознавания НЗ было выбрано пороговое значение $R = R_{tr} = 0,2$.

Рассчитывались высотные параметры радиоотражений (медианная высота, верхний и нижний квартили) для каждого дня года за весь период наблюдений. Рисунок 1.2.3.1.1 показывает изменение высот для каждого дня года. Годовой ход распределения высот метеоров приблизительно согласуется с сезонными вариациями плотности атмосферы, в то время как резкие пики в несколько дней связаны с метеорными потоками. Потоки большой интенсивности перечислены в таблице 1.2.3.1.1.

Таблица 1.2.3.1.1 — Параметры метеорных потоков: номер пика (как показано на рисунке 1.2.3.1.1), даты и название потока

Номер пика на рисунке 1.2.3.1.1	Даты потока	Название потока
1	2-4 января	Квадратиды
2	26-30 января	(?) Альфа Леониды
3	21-23 апреля	Лириды
4	3-8 мая	Эта Аквариды
5	4-16 июня	Ариетиды
6	8-16 августа	Персеиды
7	19-25 октября	Ориониды
8	11-16 декабря	Геминиды

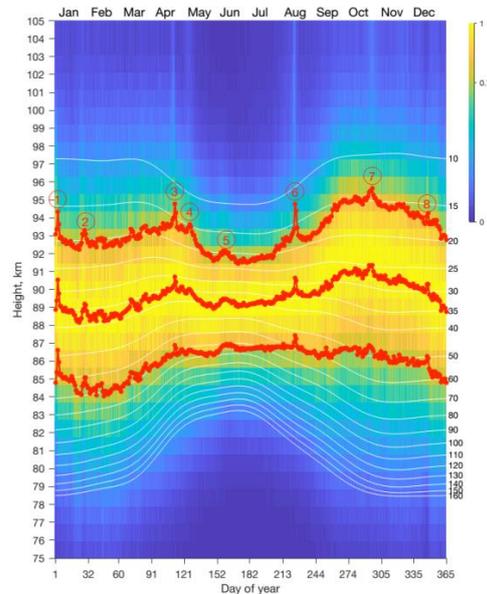


Рисунок 1.2.3.1.1 — Распределение высот метеорных эхо. Красные кривые на графике показывают медиану и квантили ежедневных значений. Цифрами от 1 до 8 обозначены метеорные потоки, перечисленные в таблице 1.2.3.1.1. Белые кривые показывают уровни постоянной плотности атмосферы (в 10^{-10} г/см³), рассчитанные по модели NRLMSIS-00 (Picone et al., 2002)

1.2.3.2. Соотношение между частотой зеркальных и незеркальных отражений

Во время некоторых потоков больший процент следов обнаруживается на высоте более 95 км. Было проведено сравнение процента долгоживущих НЗ эхо на двух высотах, 89-91 км и 95-105 км. Результат для 13 августа 2018 г. (поток Персеиды) показан на рисунке 1.2.3.2.1. В этот день было получено всего 1330 отражений. Видно, что с высот 95-105 км было получено значительно больше НЗ отражений (290 или 22%), чем с высот 89-91 км (7%).

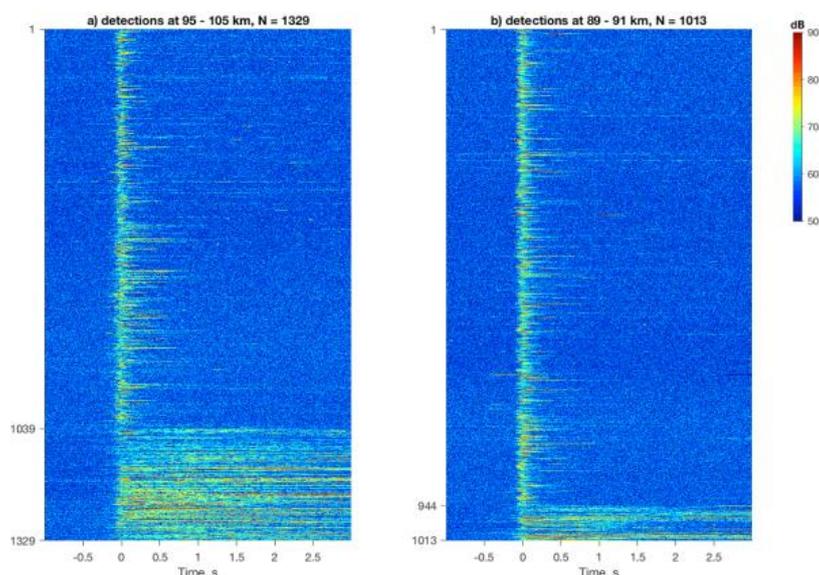


Рисунок 1.2.3.2.1 — Мощность (цвет) и количество метеорных радиоэхо (ось y), полученных 13 августа 2018 г., в зависимости от их длительности (ось x): (а) высота 95-105 км; (б) высота 89-91 км.

Всего было проанализировано около 10^7 эхо-сигналов, и около $4 \cdot 10^5$ из них были идентифицированы как НЗ. Усредненный за 10 лет суточный процент радиоэхо, идентифицированных как НЗ, представлен на рисунке 1.2.3.2.2. Цифры 1-8 указывают на метеорные потоки, выделенные в распределении высот метеорных эхосигналов и представленные в таблице 1.2.3.1.1. Обычно около 3% обнаружений приходится на НЗ, но во время некоторых потоков, процентное содержание НЗ заметно выше: до 10%.

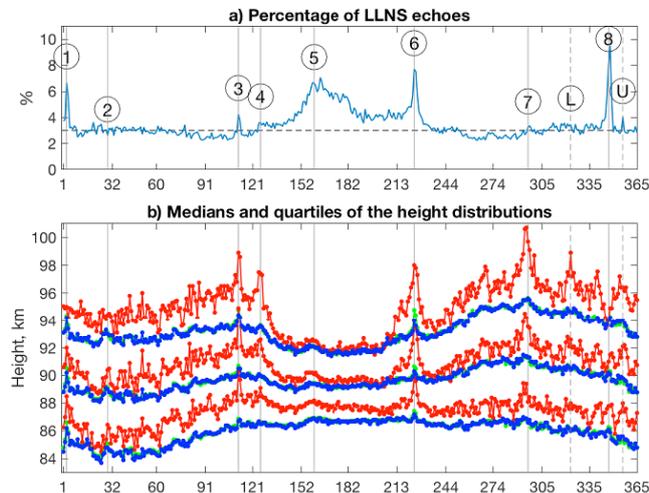


Рисунок 1.2.3.2.2 — Процент (а) и высота (б) обнаружений НЗ эхо по дням года.

Проведенный анализ показал, что НЗ эхо обычно составляют около 3% всех метеорных радиоэхо, тогда как в пиках некоторых метеорных потоков процент НЗ существенно больше, до 7–10%. Кроме того, НЗ отражения обнаруживаются на 1–2 км, а во время определенных потоков на 4–5 км, выше фоновых отражений.

Долгоживущие НЗ эхо от метеорных следов в высоких широтах можно качественно объяснить наличием заряженной пыли, образующейся из метеорного материала, погруженного в турбулентный поток (турбулентность метрового диапазона). Альтернативным механизмом может быть неустойчивость, которая возникает из-за того, что заряженные частицы метеорной пыли движутся вниз под действием силы тяжести, перемещаясь относительно фоновой плазмы. Это относительное движение приводит к диссипативной неустойчивости. Эта неустойчивость требует относительно крупных (порядка 40 нм) аэрозольных частиц. Независимо от конкретного механизма, турбулентности или неустойчивости, можно считать, что аэрозольные частицы вдоль траекторий крупных метеоров являются основным фактором, ответственным за неоднородности электронной плотности метрового масштаба. Эти частицы могут возникать из-за фрагментации и горения крупных метеороидов. Еще одна важная роль аэрозольных частиц заключается в том, что они замедляют диффузию, так что неоднородности электронной плотности затухают за более длительное время, образуя долгоживущие радиоэхо.

Полученные результаты (а) представляют новую методику выделения метеорных потоков на фоне спорадических высыпаний, (б) объясняют физические механизмы появления долгоживущих НЗ отражений от ионизованных метеорных следов в условиях высокоширотной ионосферы.

1.3. Развитие численной модели распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы

1.3.1 Постановка задачи

Высокоширотная ионосфера является наиболее сложной и нерегулярной областью ионосферы. Пик электронной концентрации находится на высотах ионосферной F-области (~250 км), где процессы рекомбинации происходят относительно медленно. Образование плазменных неоднородностей на этих высотах контролируется магнитосферной динамикой (в основном, электрическим полем магнитосферной конвекции), количеством поступающей солнечной радиации, выпадениями магнитосферных частиц, а также зависит от параметров нейтральной компоненты термосферы. Состояние F-области оказывает определяющее влияние на качество коротковолновой радиосвязи. Эмпирические ионосферные модели недостаточно хорошо описывают полярную ионосферу из-за малого количества пунктов наблюдений с помощью ионозондов. В этой связи для оперативной диагностики условий в полярной ионосфере актуальным остается развитие численных моделей, основанных на математическом описании соответствующих физических механизмов. Математическое моделирование позволяет также провести численный эксперимент и выделить влияние одного из входных параметров при неизменности других.

В 2020 г. проводились работы по усовершенствованию 3-мерной численной модели F-области полярной ионосферы, входными параметрами которой являются характеристики солнечного ветра, получаемые с патрульного спутника, значения солнечного зенитного угла и уровни солнечной и геомагнитной активности. Были проанализированы систематические изменения крупномасштабных ионосферных неоднородностей в зависимости от источника ионизации и выявлен механизм образования полярного пика.

1.3.2 Блок-схема модели

Входными параметрами модели являются: вертикальная (B_z) и азимутальная (B_y) компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), скорость солнечного ветра, день года и универсальное время (этими параметрами определяется зенитный угол Солнца), индексы солнечной и геомагнитной активности. Выходные параметры: высотные профили электронной концентрации N_e в диапазоне высот 130-600 км в узлах сетки, покрывающей полярную область (широта $>50^\circ$), 2-мерные карты распределения максимума $N_e(max)$. Модель состоит из двух взаимосвязанных блоков. В конвективном блоке, рассчитываются распределение электрического поля магнитосферной конвекции в проекции на 2-мерную ионосферную оболочку, и траектории дрейфа плазменных трубок под действием электрического поля, совпадающих с эквипотенциалами. На траектории конвекции также влияет электрическое поле коротации, возникающее вследствие суточного вращения ионосферы вместе с Землей. Распределения ионосферного электрического потенциала аппроксимируются аналитическими функциями, что значительно уменьшает время счета. В ионосферном блоке на каждом шаге по времени внутри конвектирующей трубки решаются непрерывности уравнение для иона атомарного кислорода и уравнение фотохимического равновесия для обобщенного иона. Блок-схема модели представлена на рисунке 1.3.2.1.

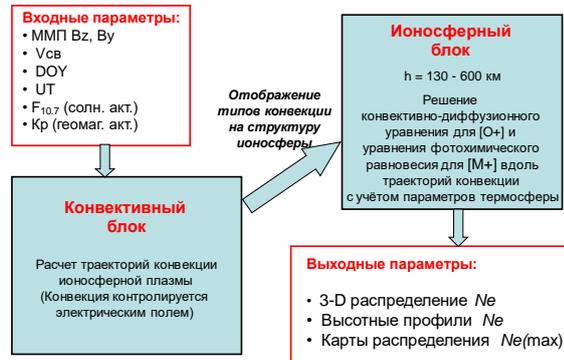


Рисунок 1.3.2.1 — Блок-схема модели.

1.3.3 Зависимость от солнечного зенитного угла: новая интерпретация формирования полярного пика

Основными источниками ионизации в F области являются солнечное УФ излучение и высыпания авроральных заряженных частиц. Для ионизации, обусловленной высыпающимися частицами, имеются статистические модели, основанные на спутниковых наблюдениях. В модели полярной ионосферы авроральная проводимость рассчитывается по модели [Hardy et al., 1987], в которой по данным измерений потоков высыпающихся частиц спутниками DMSP, представлены таблицы коэффициентов и формулы, позволяющие вычислить, в частности, интегральную по высоте холловскую и педерсеновскую проводимости при различных уровнях геомагнитной активности (Kp индекс). На рисунке 1.3.3.1 представлены распределения проводимости при различных условиях.

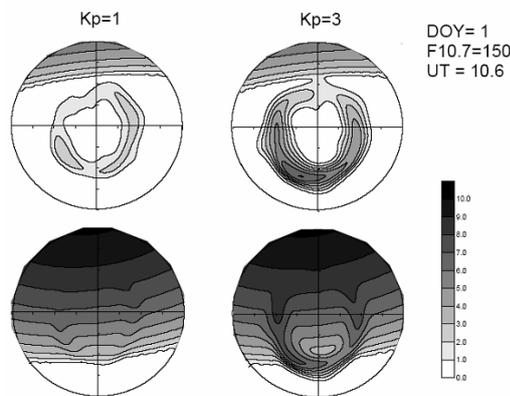


Рисунок 1.3.3.1 — Распределение проводимости в высокоширотной области в зимнее (вверху) и июньское (внизу) солнцестояние, при геомагнитной активности Kp=1 (слева) и Kp=3 (справа), UT=10.6, F10.7= 150. Шкала интенсивности дана в единицах См.

Под влиянием регулярных вариаций солнечного зенитного угла (сезонных и суточных) происходят большие изменения величины электронной концентрации Ne , т.к. изменяется положение солнечного терминатора и относительная площадь освещенной и неосвещенной частей ионосферы (рисунок 1.3.3.2). В структуре изолиний $Ne(max)$ существенными являются следующие особенности: (1) В области наиболее освещенной УФ излучением ось симметрии для изолиний проходит приблизительно по меридиану 14 MLT. В этом проявляется эффект запаздывания диффузионного отклика плазменной трубки на достижение минимального зенитного угла в процессе коротации. (2) В основании языка ионизации формируется замкнутая область полярного пика $Ne(max)$, в котором $Ne(max)$ превышают даже значения на низкоширотной границе освещенной

области. Данную структуру формируют плазменные трубки, накопившие ионизацию в дневной ионосфере, но более высоких широтах, когда влияние магнитосферного электрического поля, начинающего уклонять плазменные трубки от чистой коротации, становится значительным. Таким образом, эта структура не является полярным пиком, причиной образования которого принято считать высыпания мягких электронов (100–200 эВ) в области дневного каспа, как с точки зрения механизма формирования, так и с точки зрения ее локализации только в послеполуденные часы. По физическому механизму формирования подобная полярному пику структура может рассматриваться как пик языка ионизации.

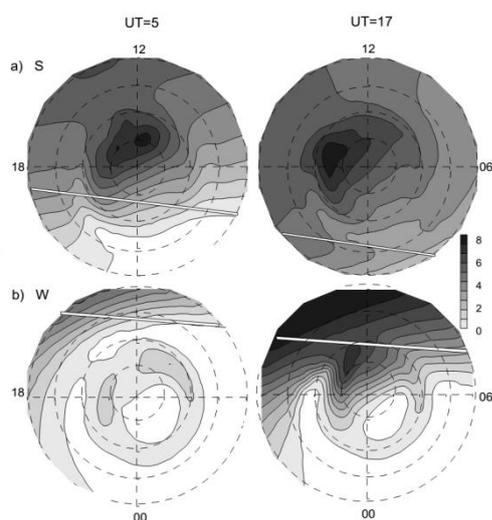


Рисунок 1.3.3.2 — Распределение $NmF2 \cdot 10^5 \text{ см}^3$ в координатах MLat-MLT для UT = 5 (слева) и UT = 17 (справа) летом, DOY = 180 (а) и зимой, DOY = 360 (б). Другие входные параметры: ММП $B_z = B_y = 0$ нТл, $V_{sw} = 350$ км/с, $K_p = 0$, $F10.7 = 150$ sfu. Центром каждого графика является магнитный полюс, нижнеширотная граница на 50 MLat. Проекция терминатора показана прямой белой линией.

1.4 Развитие ГИС «Аврора-Арктика» и моделей ионосферы для нее, методов дистанционной диагностики

В 2020 г продолжено наполнение и развития ГИС. Реализовано добавление в БД полных данных со спутника DMSP (Спектры: 121,6 нм, 130,4 нм, 135,6 нм, LBH S, LBH L) в потоковом режиме квазиреального времени и визуализация в растровом виде за период 01.01.01 – по настоящее время. Также добавлены данные Российского сегмента когерентных радаров декаметрового диапазона (<http://sdrus.iszf.irk.ru/>) и данные сети ИНТЕРМАГНЕТ (<https://www.intermagnet.org/>) по арктической зоне.

Отдельное направление в системе занимает работа по добавлению моделей прогноза состояния ионосферы. До 2020 г была реализована модель границ аврорального овала Старкова (1994), которая в качестве входного параметра использует геомагнитный индекс авроральной электроструи AL. Оценка индекса AL производится на основе часовых усредненных данных солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, измеряемых спутником DSCOVR в реальном времени (Petrukovich, 2006). Прогноз дается на период 2 часа, и обновляется каждый час. В 2020 г также реализована и тестируется Модель границ аврорального овала OVATION Prime, особенностями этой модели являются отсутствие необходимости использования авроральных индексов, а также возможность создания прогнозов по отдельным составляющим авроральных явлений: двух типов рассеянного сияния (хаотическое движение электронов и ионов) и двух типов дискретного сияния (моноэнергетические пики и “broadband” ускорение). Работа по развитию пользовательского интерфейса для упрощения использования и расширения

возможностей индивидуальной настройки позволила реализовать в функционал управление слоями данных (наложение, прозрачность и прочее).

Суммирован и опубликован большой объем результатов по использованию спутниковых наблюдений авроральных свечений для целей диагностики ионосферы. Свечение эмиссий в многообразных авроральных структурах разных масштабов отображает информацию о мгновенных энергетических распределениях высыпающихся заряженных частиц, и, как следствие, информацию о мгновенных распределениях электронной концентрации N_e на разных высотах ионосферы и поперечных проводимостей Σ_p и Σ_h , интегрированных по высоте, благодаря которым магнитосферные токи замыкаются в толще ионосферы.

Результаты наблюдений с вытянутых орбит типа Молния за время экспозиции изображений \sim несколько десятков сек позволяют получать глобальную крупномасштабную картину свечения ВУФ-эмиссий электронного и протонного овалов целиком, отображающую их мгновенную локацию в пространстве и положения границ высыпаний протонов и электронов из магнитосферы с пространственным разрешением $\sim 50 \div 70$ км/пиксель. С полярных орбит до 1000 км возможно картографирование среднемасштабных ($\sim 5 \times 5$ км/пиксель) участков аврорального овала, а в отдельных случаях до $\sim 1 \div 2$ км/пиксель при времени экспозиции изображения 0,1-0,2 с, что позволяет «видеть» структуры мелкомасштабной аворы.

Разработан модернизированный вариант проекта функциональной блок-схемы оценки состояния фактической фоновой спектральной обстановки и электродинамической обстановки полярной ионосферы на основе наблюдений авроральных свечений, в который добавлены блоки расчетов глобальных и локальных карт энергетических характеристик высыпающихся частиц по данным распределений интенсивности измеряемых эмиссий и их отношений, а также расчет и картирование электронной концентрации, потока энергии и средней энергии, и поперечных проводимостей ионосферы по данным полей распределений энергетических характеристик частиц, полученных на основе распределений интенсивности эмиссий. Особенный интерес представляет наблюдение высыпаний электронов в разных ракурсах с разных позиций одновременно.

Орбитальная методика авроральной диагностики ионосферы позволит в ближайшем будущем приблизиться к пониманию того, как формируются локальные условия в возмущенной полярной ионосфере, приводящие к сцинтилляциям сигналов во время геомагнитных возмущений, почему сцинтилляции в одних и тех же условиях возникают в одних авроральных структурах (или их фрагментах) и не возникают (либо возникают более слабые) в других соседних с ними. Предполагается что методика будет отлажена на двух перспективных космических аппаратах Метеор-МП и Зонд при проведении экспериментов, связанных с рядом геофизических научных и прикладных задач. Их запуск планируется в 2025 г.

Кроме того, выполнены работы по развитию оригинальных прикладных моделей ионосферы:

- Разработана глобальная медианная модель F2-слоя ионосферы для определения высоты максимума (h_mF2) и критической частоты (максимальной концентрации электронов N_{me}) F2-слоя ионосферы Земли. Планируется её регистрация как РИД в 2021 году.
- Разработан алгоритм расчёта положения крупномасштабных неоднородностей высокоширотной модели ионосферы и их параметров для различных гелиогеофизических условий.
- Создан алгоритм расчета оптимальных условий для прецизионных одновременных наблюдений авроральных структур в основных эмиссиях ($\lambda 630,0$ нм [OI], $\lambda 427,8$ нм (N 2^+), и $\lambda 486,1$ нм (H β) с разных ракурсов с двух разновысотных орбит. Цель: получение изображений эмиссий в F и E – слоях ионосферы, и их использование для 3D реконструкций распределений интенсивности эмиссий, и вычисления на их основе объемных дифференциальных распределений потоков электронов и проводимости Холла и Педерсена, определяемых ими.

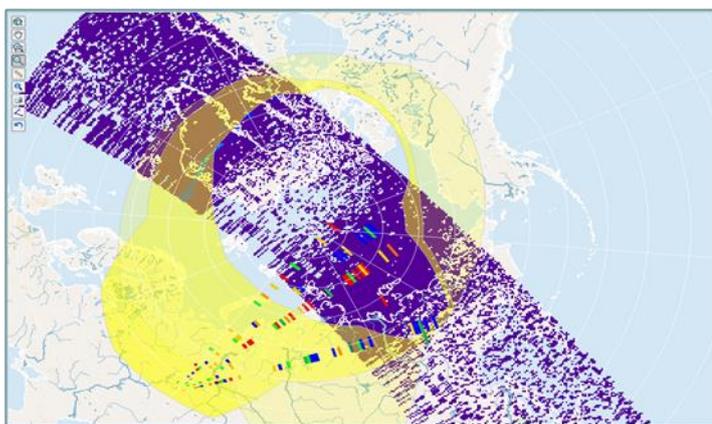


Рисунок 1.4.1 — Модель Ovation Prime аврорального овала, когерентный радар декаметрового диапазона и DMSP-18 SSUSI 135.6 нм, 01.01.2018, 00.00 UTC.

Заключение

Изменения плотности ПТ и широтного положения экваториальных границ области, занимаемой ПТ, контролируются развитием бури и в значительной степени суббуревой активностью. В том случае, когда пик AL индекса не совпадает с пиком SYM-H, максимум плотностей тока достигается во время интенсификации суббури. Средние плотности ПТ во время бури достигают 3–4 $\mu\text{A}/\text{m}^2$, тогда как уровень в невозмущенном состоянии они составляют 0.1–0.2 $\mu\text{A}/\text{m}^2$. Смещение области ПТ к экватору коррелирует с интенсивностью бури и следует изменению как SYM-H, так и AL индексов. Минимальная широта экваториальных границ ПТ ограничена 50° MLat. Крупномасштабные ПТ состоят из мелкомасштабных нитевидных структур с высокой плотностью тока, которые всегда присутствуют в наблюдениях SWARM. Мелкомасштабные (>10 км) токи с плотностью до 100 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ появляются в периоды общего повышения плотности в главную фазу бури во время активации суббури. Они связаны с авроральными дугами и событиями локального пересоединения.

На большой статистике измерений метеорного радара было проведено исследование высокоширотных «незеркальных» (не перпендикулярных лучу) радио отражений от ионизированных метеорных следов с целью выявления физических механизмов образования долгоживущих незеркальных отражений и связанной с такими следами локальной ионизацией. На этой основе разработаны новые методы выделения метеорных потоков на фоне спорадических метеоров. Показано, что аэрозольные частицы вдоль траекторий крупных метеоров являются основным фактором, ответственным за неоднородности электронной плотности метрового масштаба. Эти частицы могут возникать из-за фрагментации и горения крупных метеороидов. Еще одна важная роль аэрозольных частиц заключается в том, что они замедляют диффузию, так что неоднородности электронной плотности затухают за более длительное время, образуя долгоживущие радиоэхо.

В развитие численной модели распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы на основе «численных экспериментов» были проанализированы систематические изменения крупномасштабных ионосферных неоднородностей в зависимости от источника ионизации и выявлен механизм образования полярного пика. Показано, что для формирования структуры, подобной полярному пику, высыпания малоэнергичных электронов в области дневного каспа не является необходимым условием. Структура образуется под действием исключительно конвективных движений, связанных с магнитосферным электрическим полем.

В развитие ГИС «Аврора-Арктика» произведено расширение базы данных новыми параметрами, созданы и адаптированы новые модели.

ГЛАВА 2 Применение методов машинного обучения и глубокого обучения для обработки и анализа больших массивов астрономических данных в задачах наблюдательной астрофизики

Введение

Направление 2 ("Космос-Д-Астрофизика") темы "Космос-Д" посвящено вопросам, связанным с разработкой и совершенствованием научных основ, методов, технологий и систем работы с большими данными для решения научных задач интеллектуального анализа больших данных в наблюдательной астрофизике. В настоящей главе отчета представлены основные результаты работ по данному направлению, полученные по следующим разделам плана работ ИКИ РАН на 2020 год:

- Разработка и применение алгоритмов машинного обучения для детектирования, кросс-отождествления и классификации астрономических объектов в многоволновых данных современных цифровых обзоров неба.
- Развитие методов машинного обучения для прогнозирования красных смещений внегалактических объектов по данным фотометрии неба в различных спектральных диапазонах.
- Развитие методов классификации астрономических данных методами глубокого обучения в условия ограниченной разметки
- Развитие перспективных алгоритмов машинного обучения с подкреплением в задачах комбинаторной оптимизации и определения чувствительности к воздействию применительно к задачам астрономических исследований

Результаты, полученные по данным направлениям, описаны в разделах 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 настоящей главы. Подробно полученные в данном направлении результаты изложены в следующих научных публикациях [4, 22–28], а также представлены в рамках 3-х устных докладов на международной конференции "HEA-2020" [19,20] и научной конференции "Программирование и вычислительная математика" памяти Н.П.Трифорова [21].

2.1 Разработка и применение алгоритмов машинного обучения для детектирования, кросс-отождествления и классификации астрономических объектов в многоволновых данных современных цифровых обзоров неба

13 июля 2019 года была запущена российская национальная космическая обсерватория «Спектр-РГ» («Спектр-Рентген-Гамма») с двумя рентгеновскими телескопами на борту: eROSITA и телескопом ART-XC им.М.В.Павлинского). Главной задачей обсерватории «Спектр-РГ» является 4-х летний рентгеновский обзор всего неба с беспрецедентной чувствительностью. 8 декабря 2019 года обсерватория начала сканирование неба в режиме обзора, в июне 2020 года выполнила первый обзор неба, а в середине декабря 2020 года закончила второй обзор неба в рентгеновских лучах. Разработка и применение алгоритмов интеллектуального анализа на основе машинного и глубокого обучения к многоволновым данным по более чем миллиону рентгеновских источников SRG, ключевым образом влияет на качество научных результатов в ходе данной космической миссии. По этому направлению, основные усилия в 2020 году были направлены на совершенствование системы SRGz (создаваемой в отделе Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН) для интеллектуального анализа данных обсерватории Спектр-РГ (в первую очередь - телескопа eROSITA). SRGz принимая на вход каталоги рентгеновских источников (полученных стандартными программами обработки рентгеновских данных обсерватории «Спектр-РГ»), производит каталоги оптических отождествлений (компаньонов) рентгеновских источников с доступными данными об астрономических объектах в широком диапазоне ЭМ-спектра, и что более важно, --- с классификацией каждого объекта на основе многоволновых фотометрических данных и

измерением космологических красных смещений (photo-z) до внегалактических источников.

В SRGz (см. рисунок 2.2.1), данные по каждому рентгеновскому источнику из каталога eROSITA последовательно проходят через три основных блока: модуль кросс-отождествления астрономических объектов, модуль классификации и модуль измерений фотометрических красных смещений (для квазаров и галактик).

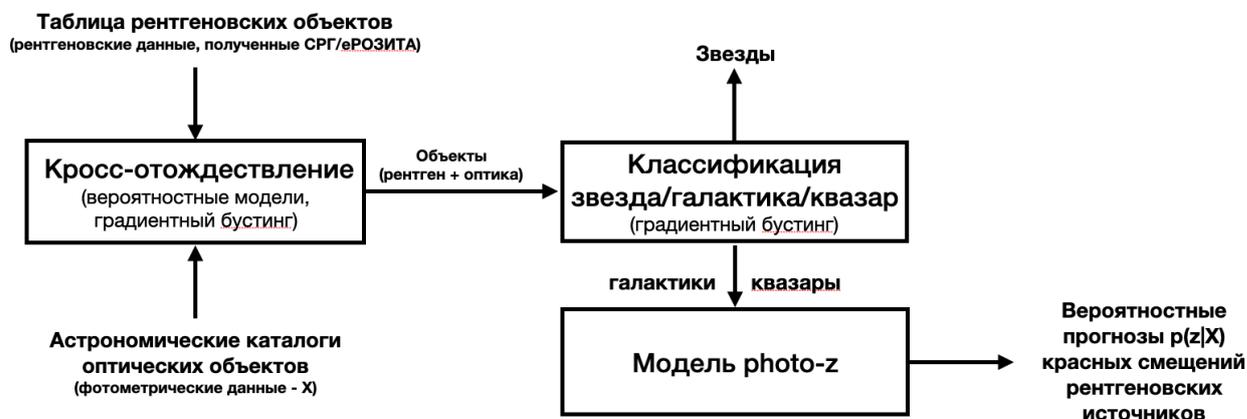


Рисунок 2.1.1 — Схема работы системы SRGz.

Значительная часть работ по теме “Космос-Д-Астрофизика” в 2020 году была посвящена исследованию и разработке алгоритмов машинного обучения для всех модулей системы SRGz и апробации системы SRGz в задаче отбора далеких квазаров. В частности, были разработаны методы оптического отождествления рентгеновских источников eROSITA на основе пространственной и фотометрической информации из 5-х больших современных фотометрических обзоров неба (DESI Legacy Imaging Survey, Pan-STARRS, SDSS, WISE, GAIA), разработаны методы классификации рентгеновских источников по схеме звезда/галактика/квазар. Высокая точность работы, как построенных моделей машинного обучения, так и всего трубопровода SRGz для задачи отбора далеких квазаров $z > 3$ была подтверждена специально выполненными спектральными наблюдениями отобранных системой SRGz мишеней на российских телескопах [1]. Современное состояние алгоритмов SRGz по данным 5 обзоров и результаты апробации работы системы в обзоре неба SRG/eROSITA были представлены А.В.Мещеряковым в рамках устного доклада на конференции Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2020 [18].

2.2 Развитие методов машинного обучения для прогнозирования красных смещений внегалактических объектов по данным фотометрии неба в различных спектральных диапазонах

Еще одним направлением исследований, в рамках которого был достигнут значительный прогресс по теме “Космос-Д-Астрофизика” стало усовершенствование моделей измерения фотометрических красных смещений (photo-z) для точечных рентгеновских источников. Точные прогнозы красных смещений (расстояний) до квазаров и галактик на основе их фотометрических признаков (photo-z) важны для построения карты крупномасштабной структуры Вселенной в рамках рентгеновского обзора всего неба проводимого национальной космической обсерваторией SRG/eRosita. В 2020 году мы исследовали модели машинного обучения на основе случайных лесов для построения вероятностных прогнозов photo-z рентгеновских источников. Развиваемый нами вероятностный алгоритм измерения фотометрических красных смещений квазаров и галактик на основе случайного леса деревьев решений схематично показан на рисунке 2.2.2.

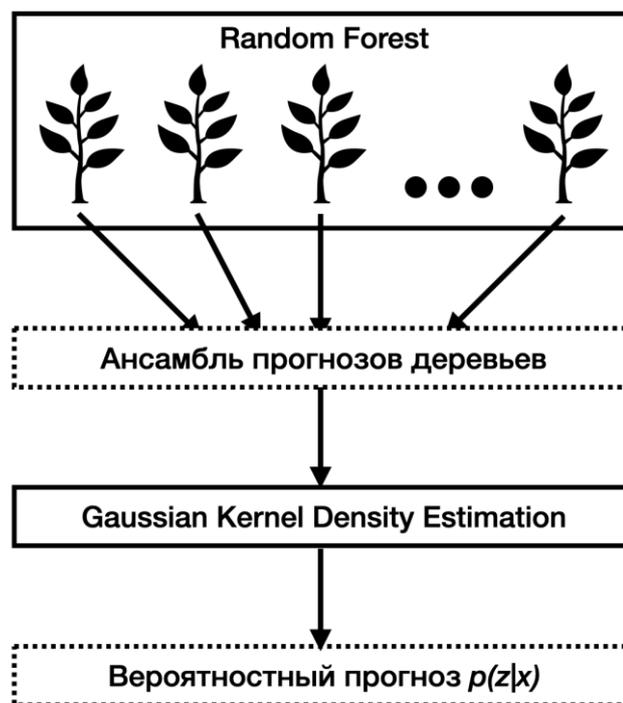


Рисунок 2.2.2 — Схема модели вероятностных прогнозов photo-z на основе алгоритма случайного леса.

Опираясь на данные из 4-х современных астрономических обзоров неба в оптическом и ИК-диапазонах (SDSS, Pan-STARRS, DESI Legacy Imaging Survey, WISE), и обширную обучающую выборку (~580000 объектов из спектрального каталога SDSS) мы получили модели, обладающие точностью photo-z, для рентгеновских объектов значительно превосходящие лучшие модели известные в литературе (проводилось сравнений прогнозов photo-z полученных различными моделями при слепом тесте на рентгеновских источниках из стандартной внегалактической области Stripe82X). В Таблице 2.2.1 показаны результаты предложенных нами моделей в сравнениях с результатами лучших моделей из литературы на двух метриках качества прогнозов photo-z: нормализованное абсолютное отклонение NMAD и доля катастрофических выбросов $n(>0.15)$.

Таблица 2.2.1 — Сравнение точности предложенных нами моделей photo-z для рентгеновских источников в поле Stripe82X на данных различных фотометрических обзоров с точностью моделей photo-z доступных в литературе

Model	<i>NMAD</i>	$n_{>0.15}$
SDSS + WISE	0.047	0.119
Pan-STARRS + WISE	0.056	0.152
Pan-STARRS + DESI LIS + WISE	0.045	0.115
DESI LIS + WISE	0.072	0.176
SDSS + Pan-STARRS + DESI LIS + WISE	0.034	0.088
Template model (Ananna et al. 2017)	0.065	0.170
Neural network (Brescia et al. 2019)	0.066	0.156

Отличное качество предложенных моделей photo-z рентгеновских источников, построенных на данных 4-х фотометрических обзоров, иллюстрирует диаграмма рассеяния (спектральное красное смещение -- фотометрическое красное смещение),

построенная для рентгеновских объектов с измеренным спектральным красным смещением в области Stripe82X.

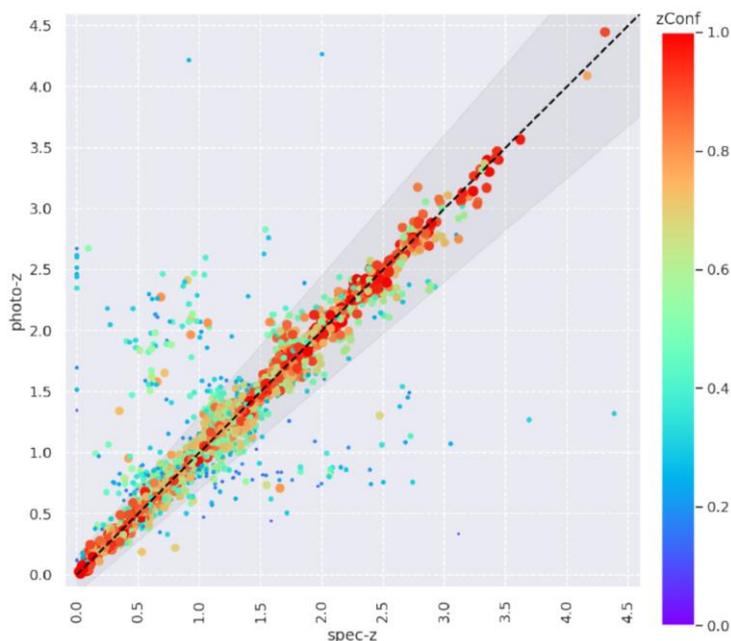


Рисунок 2.2.3 — Диаграмма рассеяния для прогнозов лучшей модели photo-z рентгеновских источников в области Stripe82X, Цвет точек отражает надежность прогноза (zConf), которая вычисляется алгоритмом. Точки за пределами серой области на графике считаются катастрофическими выбросами.

Достигнутый нами в 2020 году значительный прогресс в области разработки алгоритмов измерения фотометрических красных смещений рентгеновских источников был представлен в рамках устного доклада на конференции “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2020” [19] и конференции "Программирование и вычислительная математика" памяти Н.П. Трифонова [20], а также в ряде публикаций [5,21,22].

2.3 Развитие методов классификации астрономических данных методами глубокого обучения в условия ограниченной разметки

Морфологическая классификация галактик является важной частью исследований эволюции галактик, но при этом сложна для полностью автоматической параметризации. Будущие небесные обзоры (такие как EUCLID) будут содержать в себе изображения более миллиарда галактик. Аннотация морфологической информацией осуществляется людьми путем визуальной классификации изображений, это означает, что в больших проектах требуются либо значительные денежные затраты (в случае коммерческих краудсорсинговых решений по типу MTurk или Toloka), либо большое количество добровольцев (в случае волонтерских проектов помощи научным исследованиям, таких как Galaxy Zoo). Любая ручная разметка в какой-то момент перестает масштабироваться под растущий объем данных.

На сегодня существуют гибридные решения, объединяющие машинное обучение и человеческую разметку, они позволяют существенно ускорить процесс морфологической классификации галактик. Например, SOTA решение (Beck. et al 2018) достигает точности 93,1% в задаче наличия у галактики структуры (вопрос верхнего уровня дерева классификации Galaxy Zoo 2), используя при этом 0,93 миллиона действий разметки, при увеличении действий разметки до 2,3 миллионов, точность растет до 95,7%. Однако предложенный подход не может быть масштабирован под объем будущих обзоров. Для обеспечения постоянной высокой точности требуются существенные усилия людей на всех этапах разметки данных. Нашей целью является создание быстрых и точных методов

машинной морфологической классификации с ограниченным использованием человеческой разметки, которые были бы способны масштабироваться под современный объем данных.

В 2020 году в рамках исследований по теме “Космос-Д-Астрофизика” была предложена модель морфологической классификации галактик, основанная на активном обучении глубокой нейронной сети соревновательного автокодировщика. Предложенный подход использует как размеченные, так и неразмеченные данные при обучении (semi-supervised). Для задачи наличия у галактики структуры мы достигаем точности модели Beck, 93,1% на тестовой выборке, используя всего 0,86 миллиона действий разметки. Важным преимуществом предложенной модели является то, что полученный результат масштабируется для любого количества изображений галактик, не требуя дополнительных усилий по разметке.

Работы по данному направлению исследований “Космос-Д-Астрофизика” были представлены в ряде публикаций [23-25].

2.4. Развитие перспективных алгоритмов инкрементального моделирования и машинного обучения с подкреплением применительно к задачам астрономических исследований

Еще одним направлением исследований в 2020 году в рамках темы “Космос-Д-Астрофизика” стало развитие перспективных алгоритмов машинного обучения в рамках исследования подходов:

- инкрементального моделирования (uplift modelling) и
- обучения с подкреплением (Reinforcement Learning).

В будущем планируется адаптация разработанных подходов для задач астрофизических исследований, связанных с автоматическим анализом больших массивов данных.

Инкрементальное моделирование это область машинного обучения, в которой исследуются и разрабатываются модели для определения чувствительности объектов целевой выборки к некоторому воздействию, при решении выбранной прогностической задачи (как правило, задачи классификации). В качестве примеров постановок задач такого рода (не из астрофизики), можно упомянуть задачу определения влияния на выздоровление пациента от приема выбранного лекарства (в медицине) или задачу определения чувствительности клиентов к телефонным звонкам из колл-центра при покупках товаров в интернет-магазине (в маркетинге). Общая цель инкрементального моделирования состоит в построении модели эффективного расходования некоторого затратного воздействия по отношению к объектам выборки для улучшения прогнозирования некоторого свойства. Подобные задачи все чаще возникают в астрофизике, когда необходимо определить в автоматическом режиме, приведут ли дополнительные наблюдения астрономического объекта (требующие как правило существенных затрат времени на телескопе) к улучшению астрономической классификации объекта. Решение этой задачи позволит более эффективно использовать ограниченный ресурс детальных астрономических наблюдений для массовой классификации объектов в обзорах неба, в частности объектов рентгеновского обзора неба Спектр-РГ.

В 2020 году были проведены сравнительные исследования точности различных моделей инкрементального моделирования на открытых наборах данных. Подробнее всего был исследован алгоритм инкрементального моделирования, основанный на ансамблях деревьев решений (с применением статистического теста при выборе оптимального разбиения в uplift-дереве). Было начато исследование нейросетевых алгоритмов в задачах инкрементального моделирования. По результатам работы в этом направлении в 2020 году подготовлена публикация [10]. В дальнейшем мы планируем адаптировать разработанные модели инкрементального моделирования для астрономической предметной области и таким образом, способствовать более

оптимальному распределению ресурсов телескопов оптической поддержки в рамках реализации проекта Спектр-РГ.

Другим направлением исследований в 2020 году в рамках темы “Космос-Д-Астрофизика” стало развитие перспективных подходов комбинаторной оптимизации на базе алгоритмов обучения с подкреплением. Одним из приложений подобных алгоритмов в астрофизике является задача кросс-отождествления источников в плотных звездных полях в условиях наличия информации об объектах из множества каталогов неба. Обилие числа возможных вариантов кросс-отождествления объекта в данных различных наблюдений затрудняет использование стандартных алгоритмов и приводит к необходимости решения задачи комбинаторной оптимизации, схожей с задачей поиска оптимального маршрута на графе. Алгоритмы обучения с подкреплением могут стать более вычислительно эффективной заменой классических “точных” методов решения задач оптимизации маршрутов, таких как динамическое и целочисленное программирование, а также эвристических методов.

В 2020 году исследовались алгоритмы глубокого обучения с подкреплением для решения задач оптимизации маршрутов, основанные на механизмах внимания (attention, self-attention) и алгоритмах reinforce with baseline и Actor-Critic. Для обучения и тестирования алгоритмов была разработана среда моделирования, которая может быть использована для решения задач кросс-отождествления астрономических объектов. Проведены эксперименты по прямому сравнению выбранных алгоритмов обучения с подкреплением с результатами классических методов (OR Tools, некоторые эвристики). По результатам работы в этом направлении в 2020 году подготовлена публикация [27]

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Космос-Д-Астрофизика» проводились в соответствии с утвержденным планом. Из наиболее значимых результатов, полученных по данному направлению, следует отметить следующие:

- Разработка моделей кросс-отождествления и классификации рентгеновских источников в обзоре неба Спектр-РГ для системы SRGz, успешная апробация системы SRGz для поиска далеких рентгеновских квазаров.
- Разработка высокоточных алгоритмов измерения фотометрических красных смещений рентгеновских источников значительно превосходящих точность подобных моделей известных в литературе.
- Разработка нейросетевых алгоритмов на базе соревновательных автокодировщиков для морфологической классификации оптических изображений галактик, задействующих минимальное количество человеческих усилий по разметке изображений.
- Исследование алгоритмов машинного обучения для решения задач инкрементального моделирования и комбинаторной оптимизации, для применения к широкому классу задач перспективных астрономических исследований

Материалы, изложенные в данной главе, позволяют считать, что все работы по направлению «Космос-Д-Астрофизика» выполнены в полном объеме.

ГЛАВА 3 Разработка новых методов и подходов организации хранения и параллельной обработки сверхбольших объемов данных для решения задач анализа долговременных наблюдений в интересах ведения мониторинга и изучения различных процессов и явлений

Введение

В настоящей главе содержится описание направления работ по разработке новых методов и подходов к организации хранения и параллельной обработки сверхбольших объемов данных для решения задач анализа долговременных наблюдений в интересах ведения мониторинга и изучения различных процессов и явлений.

Во многих задачах, связанных с обработкой и визуализацией пространственных, в первую очередь, спутниковых, данных, значительный выигрыш организации работы с ними дает блочный (тайловый) подход. Он заключается в том, что информация передается компьютерам, на которых ведется визуализация, анализ и/или обработка, в виде некоторых блоков (тайлов, гранул), на которые равномерно разбита вся зона интереса, покрытая данными. Такой подход, в том числе, позволяет:

- эффективно распараллеливать процесс обработки и анализа данных по значительным территориям;
- повысить эффективность кэширования данных в тех случаях, когда один и тот же фрагмент используется несколько раз, в том числе разными пользователями;
- понизить нагрузку на централизованные ресурсы, включая каналы связи, за счет того, что компьютеры, ведущие обработку и анализ данных, получают возможность кэширования данных в своих локальных архивах, а задачи решаются с использованием только собственных ресурсов;

В настоящее время такой подход используют практически все системы, обеспечивающие массовый доступ пользователей к различным пространственным данным. При этом основным вариантом его реализации является использование заранее подготовленных архивов спутниковых данных, в которых все данные представлены в виде блоков по фиксированным пространственным разбиениям. Такой вариант хорошо подходит, когда нужно оперировать с относительно статическим и однородным набором данных, для которых может быть выбрана единая схема пространственного разбиения. Поэтому подобные подходы успешно используются в системах, оперирующих ограниченным набором готовых (статических) информационных продуктов.

В то же время для обработки и визуализации спутниковых данных по большим территориям, особенно за длительный период времени, с использованием информации различных систем наблюдения, такой подход во многих случаях трудно реализуем, что связано со следующими основными причинами:

- оптимальные схемы организации хранения данных систем, обладающих различным разрешением и схемами наблюдения, как правило, существенно отличаются, что не позволяет выбрать такую единую схему хранения, которая была бы одинаково эффективна для работы с разными типами данных;
- перевод существующих сверхбольших архивов спутниковых данных к единому пространственному разбиению, а уж тем более, к их набору, требует очень значительных ресурсов.

В то же время в подавляющем числе случаев, когда стоит задача обработки и анализа информации по большим территориям, использование регулярных пространственных разбиений является практически неизбежным. Как вариант, на каждый из вычислительных узлов передаются все сцены исходных данных, которые хотя бы частично захватывают область обрабатываемого им блока, а формирование данных по этому блоку производится уже на самом вычислительном узле. При этом в рамках проведения конкретной процедуры обработки могут быть необходимы не все каналы исходных данных и не обязательно в исходном разрешении. Все это приводит к тому, что

на вычислительные узлы передаются значительные избыточные объемы информации, что делает такой вариант неэффективным. Кроме того, использование такого варианта приводит к существенному усложнению самой процедуры обработки данных.

Для того, чтобы использовать все основные преимущества блочного доступа к данным и избежать излишних накладных расходов, в 2019 году в рамках работ по данному направлению был предложен новый подход, основанный на динамическом формировании блоков данных для их обработки и визуализации. Тогда же была начата разработка обеспечивающей этот подход технологии. В 2020 году активно велись работы по совершенствованию этой технологии, а также по внедрению ее при решении реальных задач обработки и визуализации спутниковых данных по большим территориям. Помимо этого, большое внимание было уделено разработке методики выбора оптимальных параметров пространственного разбиения, которое было бы максимально эффективным для проведения конкретного типа обработки.

В настоящей главе отчета описывается актуальное состояние технологии, обеспечивающей динамическое блочное представление данных системам распределенной параллельной обработки спутниковых данных. В следующем пункте настоящего раздела представлены работы, которые велись в 2020 году в данном направлении, по разработке новых инструментов, предназначенных для обеспечения эффективного бесперебойного доступа к данным долговременных архивов. В частности, кратко описана задача разработки тайловых картографических web-интерфейсов, которые, по сути, будут использовать аналог технологии динамического блочного доступа применительно к задачам визуализации спутниковых данных. Заключительный пункт раздела посвящен использованию новых подходов в работе центра коллективного пользования спутниковыми данными ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Полученные в рамках работ 2020 года результаты по данному направлению изложены в следующих публикациях [6-8, 11-17].

3.1. Разработка технологии динамического блочного представления спутниковых данных системам распределенной обработки

3.1.1 Краткие сведения о реализации технологии

Представленная технология реализует новый подход для организации эффективной параллельной обработки разнородных спутниковых данных по большим территориям на основе использования механизма динамического блочного доступа. Особенно актуально применение этого подхода, когда в рамках одной процедуры необходимо совместно анализировать различные типы спутниковой информации. Разработанная технология позволяет предоставлять вычислительным узлам только ту информацию, которая необходима для получения результатов по заданному для него набору блоков данных (кластеру данных), причем в таком представлении (проекция, разрешение, набор каналов), которое было бы оптимальным для проведения конкретной процедуры обработки. При этом динамическое формирование данных по блокам позволяет избежать дорогостоящей процедуры предобработки архивов.

Реализация технологии базируется на использовании технической и программной инфраструктуры ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Архивы центра разработаны и поддерживаются на основе технологии построения сверхбольших распределенных архивов разнородных спутниковых данных UNISAT. Подсистемы обработки данных реализованы на базе технологии распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных, которая позволяет в полностью автоматическом режиме вести обработку на практически неограниченном числе вычислительных узлов. В рамках этой технологии за управление процессом обработки отвечают выделенные серверы диспетчеризации, на которых формируются задания для обработки на вычислительных узлах. При этом на самих вычислительных узлах устанавливается стандартное программное обеспечение,

разработанное в ИКИ РАН или являющееся свободно распространяемым, позволяющее выполнять широкий спектр различных типов обработки. Каждое задание содержит описание действий, которые необходимо произвести над набором данных и информацию о местонахождении обрабатываемых файлов данных. Освободившиеся вычислительные узлы в соответствии с централизованно определяемыми приоритетами получают на сервере диспетчеризации очередное задание на обработку, выполняют его, а результаты передают на серверы архивации спутниковых данных, указанные в задании на обработку. Для управления и контроля за всеми автоматически выполняемыми процедурами также используются разработанные в ИКИ РАН программные решения.

Обработка больших массивов спутниковых данных требует весьма значительных вычислительных ресурсов, высокопроизводительных систем хранения и каналов передачи данных. Поэтому задачи минимизации накладных расходов и повышения эффективности при реализации механизма динамического блочного доступа выходят на первый план. Поэтому основным принципом построения таких сервисов является реализация процедур выборки конкретных данных с помощью вычислительных ресурсов, «максимально близких» (в сетевом смысле) к конкретным системам хранения данных. При этом для минимизации сетевого трафика может также быть предусмотрена возможность работы с различными буферами, обеспечивающими кеширование информации. Также при подготовке данных по блокам предпочтительнее использовать прямой доступ к файлам, позволяющий вычитывать только необходимое подмножество данных из них.

На рисунке 3.1.1.1 приведена принципиальная схема организации обработки с использованием динамического блочного доступа к данным. Сервера диспетчеризации отвечают за формирование заданий на обработку данных. В рамках этой операции сначала в соответствии с конфигурацией конкретной процедуры обработки запрашивается информация о данных (в общем случае различных типов), которые должны быть обработаны. Затем формируются запросы к сервису подготовки данных по блокам заданного разбиения, в которых содержится вся необходимая информация о местонахождении данных. После этого сами запросы в многопоточном режиме направляются на сервер переадресации запросов и балансировки нагрузки. На этом сервере устанавливается специально разработанный демон, позволяющий переадресовать запросы на соответствующие локальные или удаленные сервера подготовки данных.

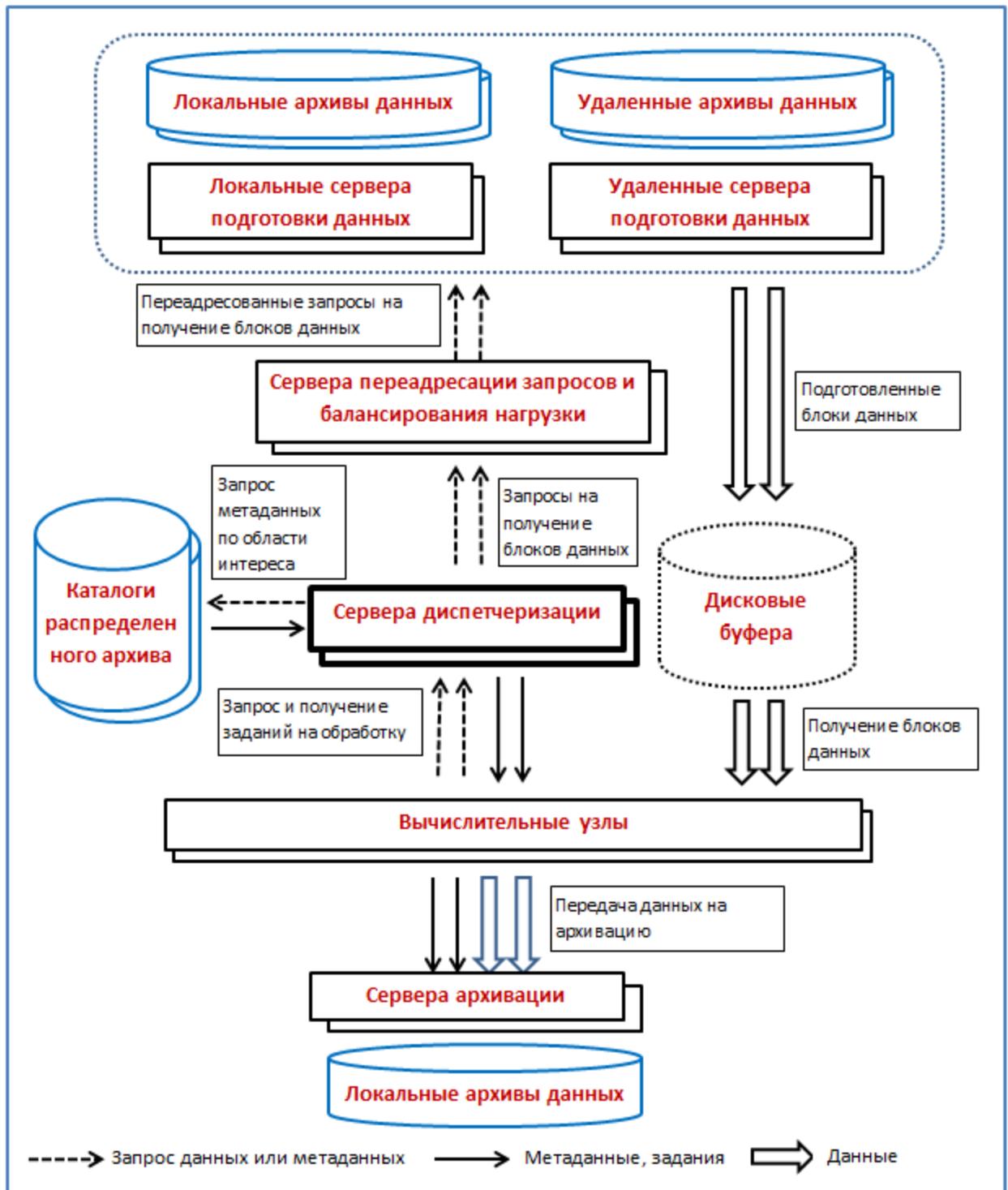


Рисунок 3.1.1.1 — Принципиальная схема организации обработки на основе динамического блочного доступа к данным.

На каждом из серверов подготовки данных устанавливается стандартный сервис подготовки данных по заданной области (блоку или кластеру блоков). Реализованный демон позволяет гибко настраивать правила балансировки нагрузки на серверы подготовки данных. В частности, при распределении запросов они в приоритетном порядке направляются на серверы, на которых непосредственно располагаются требуемые данные. Также для каждого из серверов может быть указан его вес, в конечном итоге определяющий количество направляемых на него запросов. После получения всех требуемых данных в дисковый буфер производится формирование заданий для серверов обработки. Вычислительные узлы получают сформированные задания от сервера диспетчеризации, скачивают данные по заданным блокам разбиения из дискового буфера

и приступают к выполнению процедуры обработки. После завершения обработки результаты и описывающие их метаданные передаются на серверы архивации для занесения их в архивы центра.

Реализованная технология позволяет предоставлять для выполнения обработки в блочном виде любые, имеющиеся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг», спутниковые данные, для которых могут быть заданы следующие основные параметры: разбиение на блоки, проекция, разрешение, набор каналов. Гибкая система конфигурации позволяет легко задать набор необходимых для проведения обработки данных по заданной области интереса. Реализованный механизм кэширования позволяет при необходимости использовать подготовленные по блокам данные многократно.

3.1.2 Особенности организации блочной обработки данных по большим территориям

Как уже было отмечено выше, анализ данных по большим территориям может быть эффективно реализован только при организации параллельной обработки с использованием множества вычислительных узлов. В простейшем варианте, когда процедура обработки использует только операции с отдельными пикселями спутниковых изображений, для ее распараллеливания может быть использовано разбиение области интереса на непересекающиеся блоки данных. При этом оптимальное число блоков в их кластерах (набор блоков, передающихся для обработки на вычислительный узел) определяется в конечном итоге числом блоков заданного размера, которое конкретная процедура может обрабатывать в параллельном режиме на характерном вычислительном узле.

Однако во многих процедурах обработки используются не только данные в отдельных точках, но также и данные в соседних к ним областях. Например, такие данные необходимы для отсеечения теней от облаков, улучшения калибровки, интерполяции данных и дополнительной привязки данных по наблюдениям более высокого пространственного разрешения. В результате возникает необходимость в предоставлении для обработки не только данных по области, по которой будет получен результат обработки конкретного кластера, но и данных по требуемой буферной зоне. Это приводит к тому, что часть данных используется многократно. Иллюстрация этого приведена на рисунке 3.1.2.1. На нем красными контурами показаны области, по которым получается результат конкретного блока, черными – граница области, по которой для этого должны быть представлены данные (включая буфер). Штриховкой показаны участки данных, которые при обработке полной области интереса используются два и более раз.

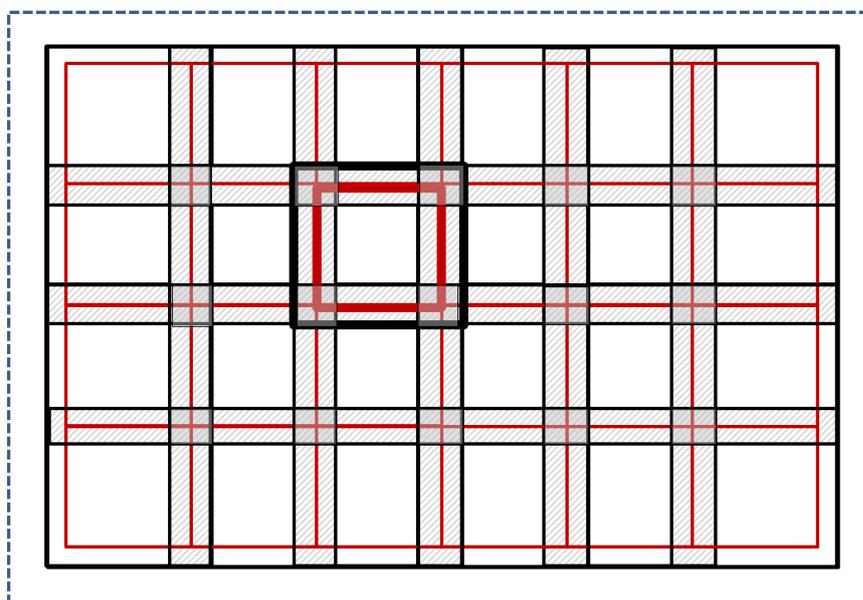


Рисунок 3.1.2.1 — Схема предоставления «буферных» данных для обработки.

Наиболее простым способом предоставления буферных данных является использование расширенных пересекающихся друг с другом блоков данных, т.е. блоков, включающих в себя необходимые «соседние» данные. Однако такой вариант приводит к дублированию подготовки и передачи по сети одних и тех же областей данных. В тех случаях, когда доля буферных данных значительна и необходимо получить данные из других информационных центров по каналам с ограниченной пропускной способностью, это может быть неприемлемым решением. Чтобы избежать этого, можно включать в состав кластера обработки дополнительные блоки, включающие в себя требуемую буферную зону. Далее при оценке оптимальных параметров разбиения мы будем рассматривать именно такой вариант. Пример формирования кластеров для обработки в таком случае приведен на рисунке 3.1.2.2. В то же время, следует учитывать, что в тех случаях, когда число блоков, которые покрывают буферную область, составляет значительную часть от числа блоков, входящих в кластер, передаваемый для обработки на вычислительный узел, возникают существенные накладные расходы, связанные с дублированием передачи данных из дискового буфера вычислительным узлам.

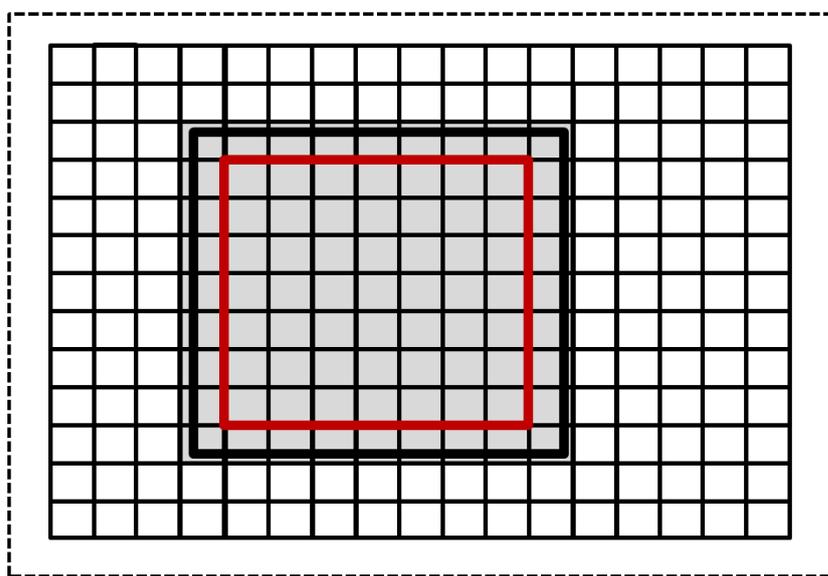


Рисунок 3.1.2.2 — Организации буферной зоны с использованием набора дополнительных блоков.

3.1.3 Выбор оптимальных разбиений на блоки и кластеры обработки

Для выбора оптимальных параметров разбиения обрабатываемой области на блоки и кластеры необходимо оценить зависимости временных затрат на проведение основных операций с данными от значения этих параметров. Весь процесс обработки можно поделить на два основных этапа: этап подготовки данных и этап обработки.

3.1.3.1. Этап подготовки

В рамках этапа подготовки данных серверы диспетчеризации производят запросы к каталогам распределенных архивов на получение требуемых метаданных. На основании этих метаданных формируются запросы на получение данных по блокам, после чего они направляются на сервер переадресации, который перенаправляет их на серверы подготовки данных. После получения всех требуемых блоков данных по области интереса в дисковый буфер на сервере диспетчеризации формируются задания для обработки на отдельных вычислительных узлах. Среди перечисленных операций существенных времени и ресурсов, как правило, требует только сам процесс подготовки (выборки) данных и передачи их по сети в дисковый буфер.

Серверы подготовки данных, как локальные, так и удаленные, одновременно используются для обеспечения данными разных процессов обработки. При этом скорость отдачи ими данных напрямую зависит от конкретных каналов связи и средней загруженности, как самих серверов, так и канала связи. Для упрощения в рамках рассматриваемой методики сервисы подготовки данных считаются фиксированным внешним фактором, поэтому зависимость времени подготовки блока от его размера $T_{prep}(a)$ для конкретной обработки может определяться либо на реальной конфигурации вычислительной системы, использующей для ее реализации, либо на имитационном стенде, учитывающем особенности использующей вычислительной среды.

3.1.3.2. Этап обработки

На этапе обработки вычислительные узлы получают из дискового буфера предназначенные для них наборы блоков (кластеры данных), выполняют собственно их обработку и передают результаты на сервера архивации. Время выполнения этих операций для одного вычислительного узла (задания) можно оценить по формуле:

$$T_{tproc}(a, p) = (p + 2)^2 * T_{get}(a) + p^2 * (T_{proc}(a) + T_{upl}(a)) \quad (1);$$

где

a – размер блока,

p – число блоков, входящих в кластер без учета буферной зоны,

$T_{get}(a)$ – среднее время скачивания блока по всем используемым типам данных на сервер обработки,

$T_{proc}(a)$ – среднее время обработки данных блока, включая чтение и запись данных,

$T_{upl}(a)$ – среднее время передачи блока на сервер архивации.

Зависимость функций $T_{get}(a)$, $T_{proc}(a)$, $T_{upl}(a)$ от размера блока a в общем случае не может быть описана аналитически, поэтому должна вычисляться экспериментальным путем для конкретной обработки.

Для оценки ограничений количества используемых вычислительных узлов необходимо оценить нагрузку на канал доступа к дисковому буферу и канал передачи данных на архивацию, которая создается при выполнении одного задания на обработку. Такая нагрузка может быть оценена следующим образом:

$$V_{tget}(a, p) = \frac{SourceUnitSize(a) * (p + 2)^2}{T_{tproc}(a, p)} \quad (2);$$

$$V_{tupl}(a, p) = \frac{ResultUnitSize(a) * p^2}{T_{tproc}(a, p)} \quad (3);$$

где

$V_{tget}(a, p)$ – средний трафик, создаваемый одним заданием на канал получения данных из дискового буфера,

$V_{tupl}(a, p)$ – средний трафик, создаваемый заданием на канал отдачи результатов обработки,

$SourceUnitSize(a)$ – средний объем всех типов исходных данных для блока размера a ,

$ResultUnitSize(a)$ – средний объем результатов, получаемых при обработке блока с размером a .

Важно отметить, что для равномерной нагрузки на сетевую инфраструктуру при проведении параллельной обработки на множестве вычислительных узлов, необходимо тем или иным образом разводить по времени выполнение операций по получению данных и возврату получаемых результатов различными вычислительными узлами.

3.1.3.3. Восстановление экспериментальных зависимостей времен различных процессов от размера блока данных

При экспериментальном восстановлении обсуждаемых зависимостей, для сокращения времени их оценки целесообразно определить разумные для конкретной реализации процедуры обработки размеры блоков. Для получения требуемых зависимостей в пределах выбранного диапазона значений обычно используется ряд значений размера блока с фиксированным шагом, от которого в конечном итоге зависит точность выбора оптимальных параметров, обеспечивающих минимизацию суммарного времени обработки.

Для того, чтобы избежать влияния на экспериментально восстанавливаемые зависимости неравномерности загрузки реальной вычислительной среды, в которой производится обработка, замеры скоростей выполнения различных операций и их зависимости от размеров блоков целесообразно проводить на специально созданном стенде. При проведении тестирования для каждого из анализируемых значений размера блока на сервере обработки производятся тестовые запуски различных процедур, в результате которых определяются следующие зависимости: $T_{get}(a)$, $T_{proc}(a)$, $T_{upl}(a)$. При этом оцениваются не времена выполнения отдельных заданий в рамках отдельных вычислительных потоков (с учетом того, что практически все вычислительные узлы центра являются многопроцессорными), а эффективные значения при выполнении обработки в многопоточковом режиме. Также при проведении тестирования оцениваются характерные значения $SourceUnitSize(a)$ и $ResultUnitSize(a)$, которые в дальнейшем используются для оценки среднего трафика, возникающего при обработке в используемой сетевой инфраструктуре с помощью выражений (2) и (3).

Оценку времени подготовки данных следует проводить с использованием реальных систем хранения. Поэтому зависимость времени подготовки данных $T_{prep}(a)$ мы исследовали на реальной инфраструктуре ведения сверхбольших распределенных архивов спутниковых данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Так как нагрузка на эту инфраструктуру может достаточно сильно меняться во времени, то для получения $T_{prep}(a)$ необходимо многократно провести запросы данных и получить средние значения для конкретных a .

3.1.3.4. Выбор оптимальных значений размеров блоков и кластеров

Рассмотрим вопрос выбора оптимального значения размера блока при обработке области данных площадью S . Фактически, мы должны минимизировать $T_{area}(S, a)$, которое в общем случае представляется выражением:

$$T_{area}(S, a) = \frac{S}{a^2} * \left(T_{prep}(a) + \frac{1}{p^2 * N} * \left((p+2)^2 * T_{get}(a) + p^2 * (T_{proc}(a) + T_{upl}(a)) \right) \right); \quad (4)$$

где кроме описанных выше параметров еще фигурирует параметр N – число используемых вычислительных узлов.

В общем случае, оптимальное число используемых вычислительных узлов также зависит от размера блока, это следует учитывать при решении полной оптимизационной задачи, направленной на определение размера блока a , при котором суммарное время обработки области площадью S будет минимально.

В то же время при решении поставленной задачи могут быть сделаны некоторые упрощения, которые помогут проанализировать особенности ее решения. Одно из таких упрощений связано с отказом от учета ограничений возможностей вычислительной сети и использования предположения, что оптимальным числом вычислительных узлов для конкретного разбиения, которое определяется параметрами a и p , является такое, при котором имеется возможность одновременного запуска обработки всех кластеров блоков,

на которые разбита область S . Для выполнения этого необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$N = \frac{S}{(p * a)^2} \quad (5)$$

В этом случае выражение (4) может быть преобразовано в вид:

$$T_{area}(S, a) = \frac{S}{a^2} * T_{prep}(a) + \left((p + 2)^2 * T_{get}(a) + p^2 * (T_{proc}(a) + T_{upl}(a)) \right) \quad (6)$$

Конечно, это выражение имеет некоторые ограничения, связанные, в том числе с тем, что физически N должно быть целым числом, однако, на наш взгляд, это несущественно понижает точность оценки. Используя эту зависимость можно решить оптимизационную задачу и определить значения размера блока a_{opt} и размера кластера p_{opt} , при которых суммарное время обработки области площадью S будет минимальным.

При этом при проведении оптимизации мы должны также учитывать различные ограничения, связанные, в частности, с возможностями используемой сетевой инфраструктуры. Поэтому мы должны минимизировать $T_{area}(S, a)$ с учетом интегрального пикового трафика, который может быть оценен путем умножения $V_{iget}(a, p(a))$, $V_{upl}(a, p(a))$ (см. выражения (2) и (3)) на число используемых вычислительных узлов. В принципе, эта задача численно может решаться и в самом общем виде, поскольку для конкретной обработки используемой сетевой и вычислительной инфраструктуры, а также системы хранения и доступа к архивам спутниковых данных, как было показано выше, могут быть экспериментально получены все необходимые для решения данной задачи зависимости.

Выражение (6) позволяет нам также проанализировать динамику временных затрат как в предельных случаях малых, так и больших a , при условии, что мы не рассматриваем ограничения, связанные с возможностями вычислительной сети. В этом случае, при больших a (в пределе, когда a равно размеру всей обрабатываемой области), $p=1$, поскольку в обрабатываемой области остается только один блок. Число вычислительных узлов, которые можно использовать в этом случае становится равным единице. Т.е. время обработки, которое в этом пределе необходимо для обработки всей области интереса становится равным времени обработки на одном вычислительном узле. При больших размерах обрабатываемой области это время может быть очень значительным. В то же время при малых a из-за того, что величина слагаемых, отвечающих за обработку данных при уменьшении a фактически стремится к 0 (это связано с тем, что скорость обработки малого объема данных на отдельном компьютере становится очень высокой), поэтому (6) фактически приобретает вид

$$T_{area}(S, a) = \frac{S}{a^2} * T_{prep}(a); \quad (7)$$

Важно отметить, что удельная на единицу объема скорость выполнения практически всех операций с данными катастрофически падает при сильном уменьшении размера блока a . В результате, несмотря на рост выделяемых вычислительных узлов, происходит рост интегрального времени обработки. Это отражает тот факт, что система архивации, обслуживающая обработку, не справляется с обеспечением данными вычислительных узлов. При проведении потоковой обработки множества областей заданного размера это приводит к тому, что увеличение числа вычислительных узлов целесообразно до тех пор, пока время подготовки данных не станет сопоставимым с временем их обработки. Дальнейшее увеличение числа вычислительных узлов приведет к неоправданному расходу ресурсов, так как при уменьшении размера кластера растет доля «буферных» блоков данных, передаваемых по сети и используемых в обработке. Таким образом, мы можем сделать предположение, что должны существовать некоторые оптимальные значения a и p , при которых интегральное время обработки заданной области S будет минимально. Этот минимум должен находиться в области значений a и p , в которой скорость обработки данных будет равна скорости подготовки данных. Т.е.

первый и второй члены в выражении (6) будут равны. Это соображение можно учитывать для оптимизации численного поиска оптимальных значений a и p .

Следует также учитывать, что на практике мы в основном сталкиваемся с задачей, в которой требуется найти оптимальные значения a и p для решения задачи с помощью имеющихся ресурсов. Т.е. необходимо найти оптимальное значение размера блока a при обработке заданной области S при фиксированном значении числа вычислительных узлов N , и в формулу (4) нужно подставить значения размера кластера p , вычисляемые по формуле:

$$p = \sqrt[2]{\frac{S}{N * a^2}}; \quad (8)$$

В этом случае выражение (4) принимает вид:

$$T_{area}(S, a) = \frac{S}{a^2} * T_{prep}(a) + \left(\sqrt[2]{\frac{S}{N * a^2}} + 2 \right)^2 * T_{get}(a) + \frac{S}{N * a^2} * (T_{proc}(a) + T_{upl}(a)); \quad (9)$$

Поскольку N в данном выражении является константой, то видно, что поиск минимального значения T_{area} фактически превращается в поиск минимума по единственному параметру a . Это, безусловно, упрощает процедуру решения задачи. Отметим, что после нахождения оптимального a оптимальное значение p вычисляется по формуле (8).

3.1.3.5. Пример расчета оптимального размера блока при выделении для обработки фиксированного числа вычислительных узлов

Для демонстрации данной ситуации была использована задача выбора оптимальных параметров пространственного разбиения на блоки и кластеры данных для задачи радиометрической и геометрической коррекции данных прибора КМСС (спутники серии «Метеор-М»). В качестве допустимых значений блока были выбраны значения от 0,5 до 3 градусов с шагом 0,25 градуса. На рисунке 3.1.3.5.1 в виде графиков представлены выявленные по описываемой предлагаемой методике зависимости времени выполнения различных операций от размера блока, необходимые для выбора оптимальных параметров разбиения.



Рисунок 3.1.3.5.1 — Зависимости времени выполнения операций над блоком данных в секундах от размера блока в градусах.

Оценка оптимального размера блока проводилась для обработки участка площадью 40 на 40 градусов с одновременным использованием 10 вычислительных узлов. Для каждого из допустимых значений размера блока был выбран размер кластера данных, позволяющий проводить обработку с требуемым уровнем распараллеливания, после чего по представленной выше формуле было оценено интегральное время выполнения обработки. На основании полученной зависимости (см. рисунок 3.1.3.5.2) может быть

сделан вывод, что для проведения обработки оптимальным размером блока a является 2 градуса, которому соответствует размер кластера $p=7$.

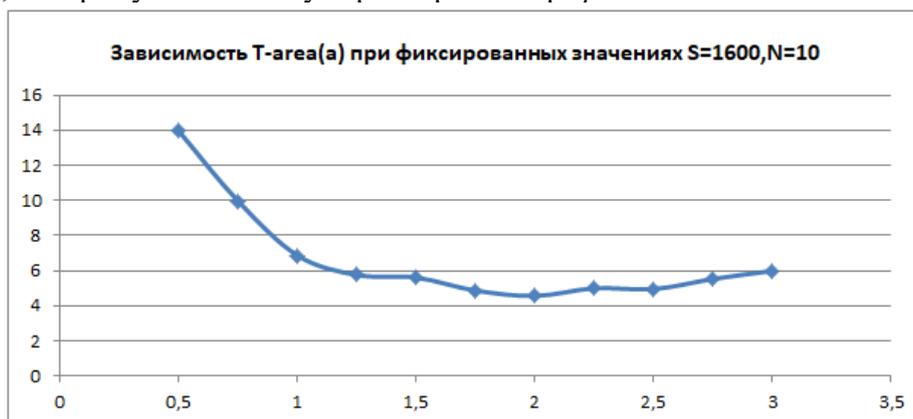


Рисунок 3.1.3.5.2 — Оценка времени обработки заданного объема данных в часах на 10 вычислительных узлах в зависимости от размера блока в градусах.

3.2. Разработка новых инструментов для работы с данными архивов долговременных наблюдений ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

3.2.1 Применение тайловой схемы доступа к картам в интерфейсах, построенных по технологии GEOSMIS

В научных и прикладных системах дистанционного мониторинга, разрабатываемых в ИКИ РАН, предоставляется доступ к достаточно большим архивам спутниковых данных различного пространственного разрешения и размеров, специализированной картографии и тематическим продуктам, в том числе, к данным и возможностям ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Для создания этих систем была использована технология GEOSMIS, представляющая собой программный комплекс для построения интерфейсов работы с пространственной информацией в системах дистанционного мониторинга, включающий в себя картографический веб-сервис SMISWMS. Эта технология позволяет одновременно просматривать любые из описанных выше тематических данных на карте, при этом количество включённых картографических слоёв может достигать нескольких десятков. Эксперт, работая в картографическом веб-интерфейсе, в силу специфики решаемых задач постоянно переключается из одной зоны интереса в другую. Изменяя координаты карты, ему приходится достаточно долго ждать для каждого слоя данных картинку, формирующуюся на сервере по его зоне интереса, что создаёт некоторые неудобства. Долгое ожидание формирования слоёв обусловлено тем, что карта, во-первых, готовится сразу под всю область экрана пользователя, а, во-вторых, карта строится «на лету» под произвольно выбранный диапазон координат. Для решения проблемы времени ожидания данных в системах дистанционного мониторинга может быть успешно применен подход с тайловой (блочной) схемой доступа, на сегодняшний день широко используемой в различных картографических службах и приложениях и обеспечивающей более «динамичную» и быструю загрузку карт.

Тайловый доступ подразумевает собой асинхронный запрос данных небольшими блоками по существующей регулярной сетке (по умолчанию размер тайла - 256x256 пикселей). При таком типе запроса данные на сервере формируются не под всю область интереса, а только под один тайл, что сильно уменьшает время подготовки данных, а при использовании пула серверов обеспечивает более быстрое получение всех тайлов под область интереса, а значит и саму визуализацию данных. Также при тайловой схеме используется фиксированный набор масштабных уровней, что позволяет ограничить вариацию разрешений карты, с которой работает пользователь, а значит и количество

запросов к серверу. При изменении масштабного уровня пользователь никогда не видит пустую карту, а видит тайлы предыдущего уровня и асинхронно подгружающиеся новые тайлы, что делает его работу более удобной. Для ряда данных, которые редко меняются или совсем не меняются со временем и не вычисляются «на лету», например картографии или многолетней спутниковой подложки, можно использовать подход со статическими тайлами, при котором данные не готовятся на сервере, а запрашиваются с сервера по номеру в регулярной сетке как заранее подготовленные картинки. Запрос статических тайлов является более легковесным и обрабатывает еще быстрее, чем для динамических, при этом изображения кэшируются в браузере и больше не перезапрашиваются. Кэширование динамических тайлов в браузере организовать сложнее, так как они формируются посредством sgi-запроса, но для них применим подход с кэшированием на сервере по номеру тайла в регулярной сетке.

Таким образом, запросы данных, которые могут использоваться в картографических веб-интерфейсах систем дистанционного мониторинга, можно разделить на три типа:

- ImageWMS (изображение под всю область интереса, формирующееся через Web Map Service);
- TileWMS (изображение, формирующееся через Web Map Service под один тайл);
- Tile(xyz) (готовое изображение, получаемое с сервера по номеру тайла в регулярной сетке).

До недавнего времени технология GEOSMIS позволяла работать только с одним типом запроса растровых данных – ImageWMS, что приводило к неудобствам, описанным выше. В связи с этим было принято решение доработать программный комплекс и расширить его функционал, чтобы он обеспечивал работу картографического интерфейса с использованием всех трех типов запросов. Для этого потребовалось доработать модуль работы с картографическими данными smismap, используемый в программном комплексе GEOSMIS.

В настоящее время доступно достаточно много картографических JavaScript библиотек с открытым исходным кодом, обеспечивающих работу по тайловой схеме. На первом этапе работ было принято решение выбрать наиболее подходящую для задач спутникового мониторинга и интегрировать ее в программный комплекс GEOSMIS, расширив необходимым функционалом. Были изучены наиболее популярные библиотеки: OpenLayers.js и Leaflet.js. Выбор был сделан в пользу Leaflet.js как ведущей и широко используемой библиотеки для создания карт с большим набором дополнительных плагинов и легко наследуемых и расширяющихся классов компонент.

Чтобы не менять взаимодействие объекта карты с другими компонентами картографического интерфейса, были проведены следующие работы по интеграции новой библиотеки в программный комплекс GEOSMIS:

1. Был взят используемый в GEOSMIS класс карты smisMap и документация к нему, выделены все внешние методы и свойства класса.
2. Исследован класс карты Map библиотеки Leaflet.js, расширен необходимыми свойствами и методами.
3. То же самое было проделано с классами других компонент (точка, полигон, кнопки управления и т.д.)
4. Необходимая функциональность, не поддерживаемая по умолчанию в классах библиотеки Leaflet.js, была реализована с помощью использования дополнительных плагинов и написания новых.
5. Был собран и протестирован прототип картографического интерфейса с использованием нового модуля smismap в рамках проекта «Вега-Лес».

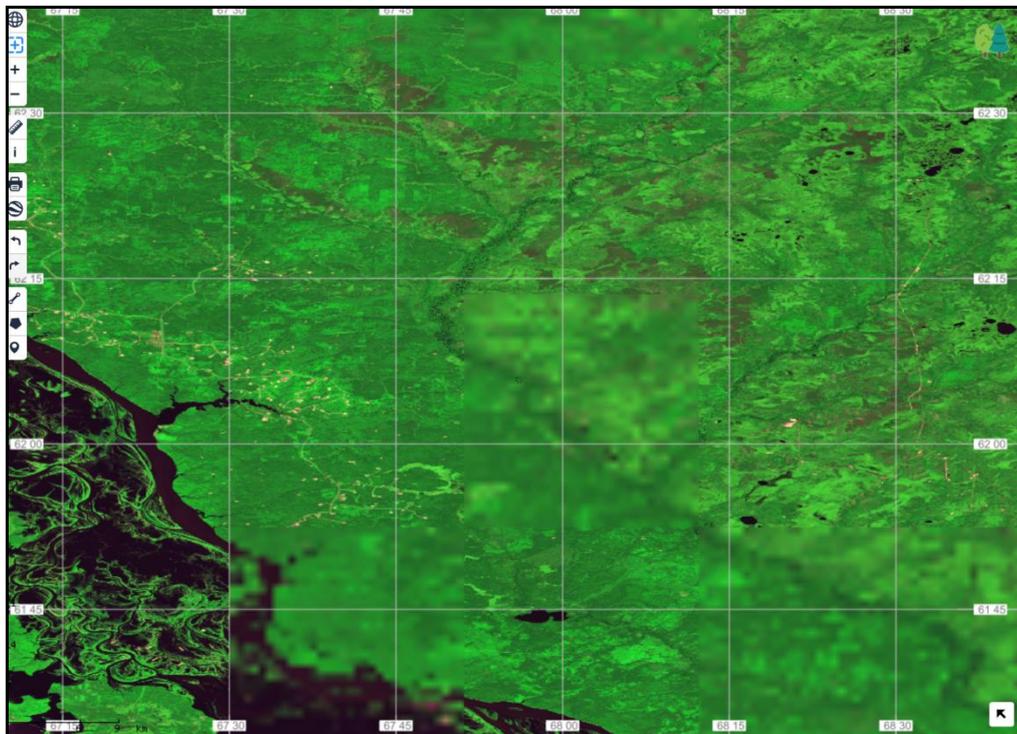


Рисунок 3.2.1.1 — Прототип картографического интерфейса проекта «Вега-Лес» (асинхронная загрузка тайлов).

В процессе тестирования прототипа нового картографического интерфейса было обнаружено, что при одновременной работе с большим количеством слоев карты, формируемых только посредством TileWMS, возникают сложности с числом cgi-запросов на рисование в браузере, что является неоптимальным с точки зрения производительности и при этом скорость работы отчасти зависит от оперативной памяти компьютера пользователя. При этом, как говорилось выше, использование только статических тайлов Tile(xyz) для систем спутникового мониторинга, работающих с большим объёмом постоянно обновляющихся данных, которые часто формируются «на лету», невозможно. Поэтому было принято решение рисовать динамическими тайлами только «тяжеловесные» обновляющиеся данные и выбрать следующее разделение картографических слоев на типы запросов. Сводная информация приведена в таблице 3.2.1.1.

Таблица 3.2.1.1 — Разбиение картографических слоев на типы запросов.

TileWMS	Tile(xyz)	ImageWMS
Спутниковые данные и данные их анализа	Редко меняющаяся картография	Специализированная картография
Непрозрачные слои карты	Многолетние композитные изображения	Векторные слои

Также в процессе тестирования выяснилось, что самым распространённым действием пользователя является перемещение из одной зоны интереса в другую. В связи с этим был реализован механизм дополнительного кеширования, а именно механизм подготовки тайлов на сервере с запасом по зоне интереса и их дальнейшее кеширование. Для этого в запрос на рисование передаются дополнительные параметры: диапазон тайлов для текущей зоны интереса и номер тайла в регулярной сетке, по которому тайл кешируется на сервере.

3.2.2 Использование облачных ресурсов Google Cloud Storage и их интеграция с ресурсами ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

На сегодня всё большее значение при работе со сверхбольшими архивами данных приобретают облачные решения с поддержкой объектных протоколов хранения и доступа семейства S3. Раньше подобные решения обеспечивали только распределённое хранение, но были достаточно неудобны для организации прямого доступа к данным в сочетании с онлайн-анализом и обработкой. В 2015-2016 ИКИ РАН совместно с ВЦ ДВО РАН был разработан прототип системы распределённого хранения данных ДЗЗ с применением высокопроизводительной платформы OpenStack Swift и проведена оценка его эффективности относительно используемых в настоящее время методов и технологий хранения данных на примере системы «Вега-Дальний Восток». На тот момент использование объектных хранилищ на базе OpenStack Swift, S3 и подобных не имело преимуществ перед традиционными методами хранения и представления данных для обработки и визуализации. Несмотря на все плюсы таких решений, в том числе распределённость, масштабируемость, устойчивость к отказам аппаратуры и возможность доступа к данным через RestFUL-сервисы, основным минусом была их Posix-несовместимость. Это приводило к тому, что при любой операции доступа к данным приходилось читать весь файл целиком, что резко увеличивало накладные расходы. Использование надстроек над OpenStack Swift, эмулирующих Posix-совместимую файловую систему, частично решило данную проблему, но накладные расходы и быстродействие всё равно оставались неудовлетворительными.

Сейчас же, благодаря адаптации форматов хранения спутниковых данных под облачные решения (например, см. Cloud-optimized GeoTIFF), а также развитию библиотек работы с данными, таких как GDAL, стало возможным использовать объектные облачные хранилища с тем же уровнем удобства и гибкости, что и традиционные средства хранения. Кроме того, на текущий момент существует несколько открытых источников данных ДЗЗ, развёрнутых такими компаниями, как Google и Amazon, обеспечивающими доступ к огромным, многотерабайтным массивам информации, которые невозможно получить для локального доступа. Для примера, по ряду оценок, объём данных КА семейства Landsat и Sentinel, предоставляемый Google Cloud Storage, составляет около 50 Пб. В последние несколько лет появились API к хранилищам такого стандарта, а также специальные формы организации данных, обеспечивающие возможность прямого доступа к требуемым фрагментам файлов данных без скачивания их целиком. Эти факторы сделали возможной прозрачную интеграцию хранилищ S3 с архивами ЦКП «ИКИ-Мониторинг» на базе технологии UNISAT для доступа к внешним данным.

Наиболее крупными и интересными представителями облачных систем, хранящих данные ДЗЗ, на сегодня являются Amazon (AWS) и Google Cloud Storage (GCS). Для пробной интеграции были выбраны ресурсы Google Cloud Storage, так как они предоставляют широкий спектр открытых, бесплатных данных, в том числе данные КА Landsat и Sentinel-2 с охватом на весь мир с момента начала работы этих миссий. Подробнее с доступными данными можно ознакомиться здесь: <https://cloud.google.com/storage/docs/public-datasets>. Данные, предоставляемые AWS, как правило, являются платными, как минимум за сетевой трафик.

Интеграция ресурсов GCS с ресурсами ЦКП «ИКИ-Мониторинг» предполагает решение двух задач:

- Получение метаданных о наполнении удалённого хранилища;
- Отображение и работа с данными из удалённого хранилища GCS средствами ЦКП.

Для решения этих задач были рассмотрены две возможные схемы – синхронная и асинхронная. Обе схемы имеют свои преимущества и недостатки.

Синхронная схема предполагает прямые запросы метаданных к каталогу GCS из интерфейсов доступа ЦКП посредством API на базе SQL-подобной библиотеки BigQuery.

Запросы на отображение данных также идут напрямую к GCS. Такая реализация взаимодействия наиболее прозрачна и проста в реализации с программной точки зрения. Кроме того, такая схема гарантированно обеспечивает получение наиболее оперативной информации о состоянии удалённого каталога данных. К минусам её можно отнести невысокую скорость поиска, что критично для веб-приложений, а также непрозрачную схему тарификации поиска по каталогу Google с использованием BigQuery. Несмотря на то, что сами данные бесплатны, существуют ограничения на объём бесплатного трафика в процессе поиска через BigQuery. Схема реализации синхронной схемы приведена на рисунке 3.2.2.1.

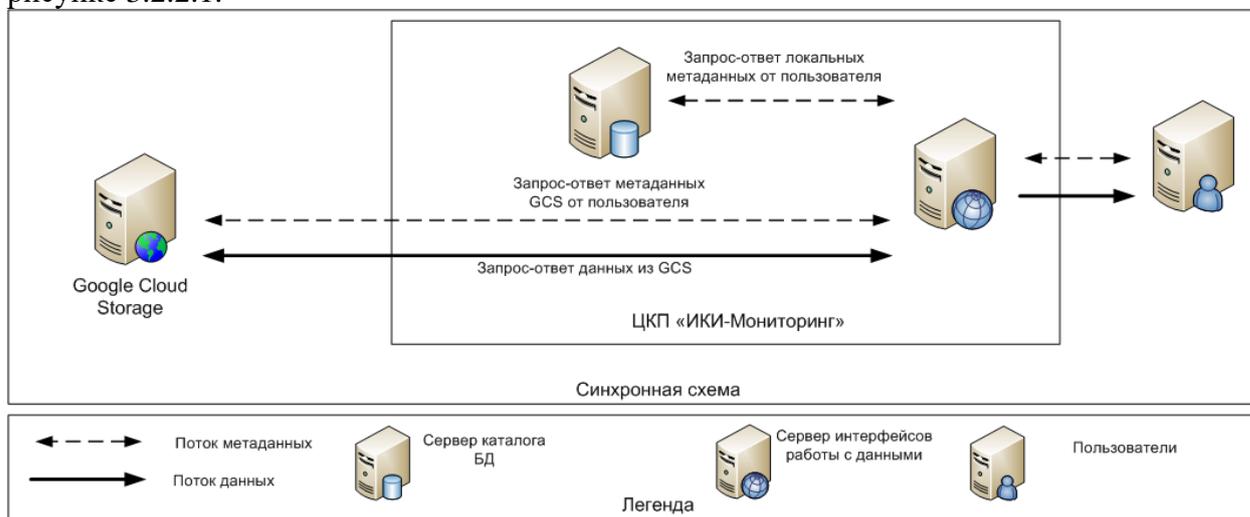


Рисунок 3.2.2.1 — Синхронная схема интеграции.

Асинхронная схема предполагает регулярную выгрузку полного каталога метаданных GCS с последующим усвоением в локальные каталоги ЦКП формата Unisat. После этого все запросы метаданных работают только с локальными БД, запросы на отображение данных идут напрямую к GCS. Такая реализация взаимодействия обеспечивает необходимый, такой же, как у локальных данных, уровень быстродействия при поиске информации, но неизбежно приводит к тому, что в определённые моменты времени часть данных из GCS не будет доступна через ресурсы ЦКП. Схема реализации синхронной схемы приведена на рисунке 3.2.2.2.

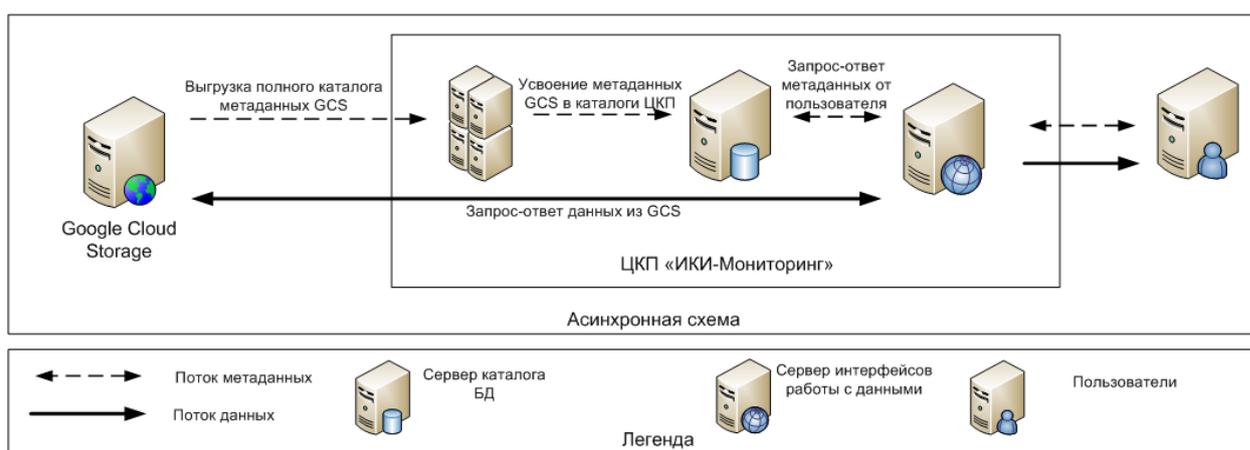


Рисунок 3.2.2.2 — Асинхронная схема интеграции.

Результаты сопоставления возможных схем интеграции приведены в таблице 3.2.2.1.

Таблица 3.2.2.1 — Сопоставление схем интеграции.

Синхронная схема	Асинхронная схема
Проще в реализации	Сложнее в реализации
Выше оперативность доступных данных	Неизбежны расхождения между реально доступными данными в GCS и известными нам
Не требует дополнительных программно-аппаратных ресурсов	Требуются дополнительные ресурсы для получения, конвертации и усвоения метаданных в локальные архивы
Хуже быстродействие получения метаданных по запросу в интерфейсе	Лучше быстродействие получения метаданных по запросу в интерфейсе

Основным фактором, влияющим на выбор схемы взаимодействия, в данном случае является быстродействие получения метаданных, как наиболее критичное для использования веб-приложения. При прямом запросе метаданных из GCS посредством BigQuery скорость выполнения запроса может составлять порядка 10–15 секунд, что становится неприемлемым. Поэтому асинхронная схема, даже несмотря на большую сложность реализации, выглядит предпочтительнее.

Для реализации асинхронной схемы была разработана и реализована механика конвертации и усвоения метаданных в каталоги ЦКП «ИКИ-Мониторинг». В её рамках регулярно скачивается полный индексный файл, фильтруется на предмет изменений по сравнению с прошлым состоянием, изменения конвертируются в формат Unisat и заносятся в каталог.

Также в рамках работ была протестирована возможность отображения данных из GCS в картографических интерфейсах информационных систем на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с использованием средств библиотеки GDAL с поддержкой формата Cloud-Optimized GeoTIFF и драйверов прямой работы с хранилищами стандарта S3 (драйвер vsicurl). На текущий момент ведётся доработка и адаптация модулей картографических интерфейсов для штатной работы с такими данными, в том числе их онлайн-обработки и анализа совместно с локальными данными, хранящимися в архивах ЦКП.

Таким образом, текущие результаты работ показывают, что интеграция систем ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с Google Cloud Storage технически реализуема и может обеспечить полную функциональность работы с данными, предоставляемую системами ЦКП. Это позволит получить беспрецедентный охват данными и существенно расширить возможности научных и прикладных информационных систем на базе ЦКП по проведению глобальных исследований. Полноценная реализация интеграции ожидается весной следующего, 2021 года.

3.2.3 Построение отказоустойчивых узлов доступа к данным ДЗЗ в системах мониторинга

В настоящее время в ИКИ РАН создано и эксплуатируется большое количество информационных сервисов, обеспечивающих работу с данными ДЗЗ. Сервисы обеспечивают данными не только проведение научных исследований различными коллективами и институтами, но и решение достаточно критичных прикладных задач на регулярной основе, таких как мониторинг пожаров и угроз, возникающих от них,

мониторинг пепловых выбросов вулканов и другие. Отказы в работоспособности сервисов, включая работу процессов пополнения данных, при решении таких задач могут привести к негативным последствиям. Поэтому, задача обеспечения отказоустойчивости разрабатываемых сервисов является в настоящее время одной из приоритетных при разработке конкретных систем спутникового мониторинга.



Рисунок 3.2.3.1 — Схема традиционной информационной системы предоставления данных.

Традиционно ИС, предоставляющие пользователям доступ к данным ДЗЗ, состоят из двух основных компонент (см. рисунок 3.2.3.1.): web-сервера с расположенными на нём интерфейсами, а также сервера хранения данных (СХД) с находящейся на нём СУБД. Несмотря на то, что некоторые сбои могут быть исправлены в течение относительно непродолжительного промежутка времени при отказе любой из компонент системы пользователь какое-то время не сможет получить доступ к интересующим его актуальным данным ДЗЗ, что крайне нежелательно для многих систем оперативного мониторинга.

Основными и наиболее часто встречающимися нештатными ситуациями на вычислительных узлах, поддерживающих работоспособность сервисов доступа к данным ДЗЗ, приводящими к отказам при работе являются:

- выход из строя любого из серверов ИС;
- сбои в работе БД, например, ошибки доступа или даже потеря части данных;
- ошибки при запросах к интерфейсам предоставления данных;
- перегрузка БД или web-сервера запросами.

Для предотвращения наступления большинства из указанного списка ситуаций подходит дублирование узлов и/или входящих в эти узлы компонент, чтобы выход из строя одного из них не влиял на работу системы в целом. Для этого была разработана схема построения отказоустойчивой системы, в которой несколько узлов предоставления данных связываются по сети при помощи специального web-сервера Nginx. Этот сервер контролирует доступность узлов и отсутствие ошибок получения результата пользователем совместно с использованием утилиты ProxySQL, которая выполняет аналогичные функции для СУБД MySQL/MariaDB. Использование обоих механизмов позволяет значительно повысить общий уровень защиты ИС от падения в результате сбоев, так как дублирование только одной из двух основных входящих компонент – web-сервера или СУБД – всё равно сохраняет достаточно высокую вероятность появления сбойных ситуаций.

Реализованная схема также позволяет заметно уменьшить приходящуюся на узлы нагрузку, что немаловажно для систем, функционирующих в условиях большого количества одновременно работающих пользователей.



Рисунок 3.2.3.2 — Схема построения отказоустойчивой ИС предоставления данных.

На рисунке 3.2.3.2. приводится схема кластера доступа к данным ДЗЗ, построенного с использованием представленных технологий в ходе реализации системы работы с данными ДЗЗ в интересах ОАО «РЖД». Он состоит из двух узлов – основного и резервного, работающих в паре, при осуществлении доступа через единый интерфейс, на котором настроен web-сервер Nginx, выполняющий несколько основных функций:

- распределение всех поступающих запросов равномерно или согласно определённой весовой зависимости на входящие в кластер узлы;
- контроль доступа к этим узлам с их автоматическим отключением при появлении ошибок получения данных пользователями.

Для отказоустойчивой работы серверов баз данных используется механизм репликации, при котором производится тиражирование изменений данных с главного сервера БД на одном или нескольких зависимых серверах, далее главный сервер будем называть мастером, а зависимые – репликами. При этом все внесённые на мастер сервере изменения повторяются на репликах, но не наоборот, что является одной из причин необходимости выполнения всех запросов на изменение данных исключительно на мастере. Внесение изменений на репликах, в свою очередь, помимо расхождения данных на разных БД дополнительно порождает ситуацию возможного возникновения конфликта с пришедшими с мастера данными, из-за чего процесс репликации полностью нарушается. Репликация даёт:

- производительность и масштабируемость – один сервер может не справляться с нагрузкой, вызываемой большим количеством одновременных операций чтения и записи. Дополнительно стоит отметить, что требующие длительного времени выполнения SQL-запросы можно выполнять на одной из реплик без серьёзного влияния на скорость всей ИС;
- отказоустойчивость – в случае отказа реплики, все запросы можно переключить на мастер, и, наоборот, с последующей сменой ролей в паре мастер-реплика;

- резервирование данных – можно периодически безопасно останавливать реплику для создания резервных копий данных, что невозможно при функционировании только мастера.

Утилита Proxysql является достаточно гибким инструментом для настройки балансировки SQL-запросов между группой БД, которая выполняет по сути те же функции, что и Nginx, а именно:

- распределение всех входящих SQL-запросов равномерно или согласно определённым правилам на включённые в кластер БД;
- контроль доступа к БД с их автоматическим отключением при появлении ошибок доступа.

В рамках настройки этой утилиты производится определение серверов БД, их групп, а также списка MySQL-пользователей, которые имеют права доступа, запросы которых будут проходить через Proxysql. Также необходимо определить правила распределения SQL-запросов. При этом важно отметить, что запросы распределяются не по конкретным ранее заданным серверам, а по указанным для них группам (*hostgroup*). Также есть возможность задать несколько групп БД, например, группа БД для операций чтения и группа БД для операций записи, что определяется правами соответствующих группам пользователей и правилами распределения запросов для этих пользователей. Это важный момент при построении отказоустойчивых схем, включающих репликацию, что позволяет избежать основного конфликта между репликой и мастером.

Для повышения отказоустойчивости, конечно же, применяются не только программные, но и специальные аппаратные средства, такие как RAID-массивов, источников бесперебойного питания и др.

Разработанный подход позволяет реализовывать информационные узлы, обеспечивающие бесперебойную работу сервисов предоставления данных при целом ряде отказов как оборудования, так и системного или прикладного программного обеспечения.

3.2.4 Взаимная интеграция сервисов данных распределённых систем спутникового мониторинга

В настоящее время существует достаточно большое количество систем работы со спутниковыми данными, осуществляющими накопление, базовую и тематическую обработку данных ДЗЗ для решения различных задач. Для экономии вычислительных мощностей, и, в частности, во избежание дублирования хранения одних и тех же данных в разных системах в ИКИ РАН используется сервисная модель для работы с данными (рисунок 3.2.4.1.), что позволяет работать с данными одной системы в нескольких внешних через сервисы предоставления доступа. Такие сервисы, в том числе, обеспечивают анализ данных и формирование требующихся производных (тематических) продуктов на лету. По такой сервисной модели функционирует, в частности, Объединенная система работы со спутниковыми данными ФГБУ "НИЦ "Планета", установленная на узлах распределенной сети центров приема спутниковой информации Росгидромета, и сервисы ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Система обеспечивает через сервисы работу со спутниковыми данными внешних систем, таких как ИСДМ-Рослесхоз и других.

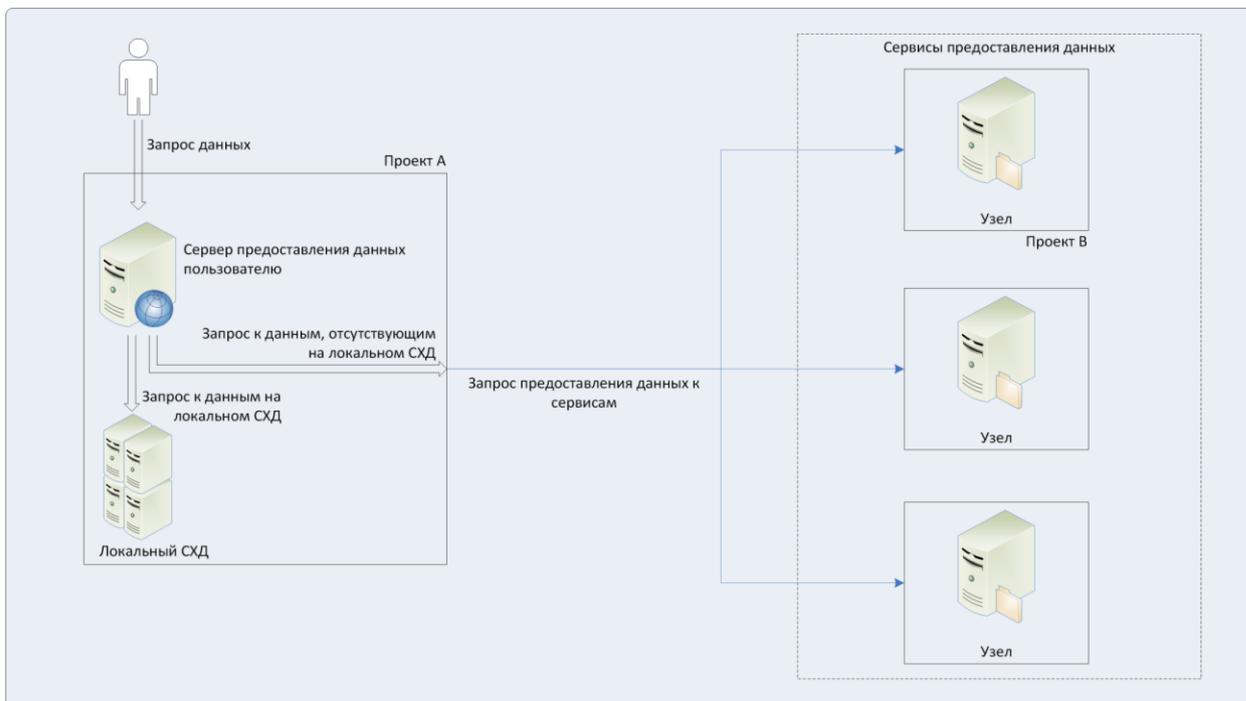


Рисунок 3.2.4.1 — Схема построения сервисной модели предоставления данных пользователям.

Обязательным условием предоставления сервисов во внешние системы является ограничение и учет доступа к ним - аутентификация запросов и авторизация пользователей. При этом система-поставщик сервиса данных не должна хранить все сведения о пользователях внешних систем, что являлось бы нарушением условий хранения приватной информации.

С учётом всех требований в ИКИ РАН была разработана универсальная схема взаимной интеграции web-сервисов данных распределённых систем. Она основана на использовании возможностей web-сервера Apache и интегрированного с ним специального программного обеспечения, которые в связке позволяют обеспечить безопасный доступ и контроль за предоставляемыми сервисам данными.

Сервисную схему предоставления данных можно разделить на 2 основные составные части:

- проект А – сервис, непосредственно предоставляющий данные пользователю, а также обладающий всей требуемой для аутентификации и авторизации информацией. Для связи с другими сервисами-поставщиками данных на web-сервере обычно используется обратный прокси-сервер, который перенаправляет запросы во внешние системы и возвращает результат пользователю;
- проект В – система-поставщик сервиса данных, который обеспечивает проект А данными, которые на нём отсутствуют. В нём присутствует собственная система аутентификации и авторизации, которая предотвращает получение данных сторонними неавторизованными пользователями.

При этом их системы ограничения прав доступа пользователям разные и проект В, как и было указано ранее, не может хранить в себе данные пользователей проекта А.

Одним из способов реализации сервисной схемы предоставления данных является механизм OAuth2. В его основе лежит простая логика, в рамках которой после перенаправления запроса пользователя с web-интерфейса на сервис поставщика данных, последний запрашивает у проекта А, как у поставщика авторизации, информацию о правах пользователя для осуществления его доступа к определённым данным с последующим выделением пользователю токена аутентификации. Однако у такой схемы есть ряд недостатков, среди которых основным является необходимость осуществления дополнительных запросов, в которых может передаваться большой объём данных в случае наличия у пользователя специфических прав доступа. К подобным ограничениям

относится, например, доступная для него область интереса, которая обычно хранится в виде сложных полигонов в формате WKT. Очевидно, что передача такой информации может в определённых случаях существенно увеличивать время, требуемое для возврата результата.

В ИКИ РАН была предложена альтернативная схема (рисунок 3.2.4.2.), в рамках которой для доступа к информации поставщика данных происходит модификация исходного запроса, чтобы он мог в дальнейшем беспрепятственно проходить процедуру аутентификации и авторизации. При этом для каждого импортирующего данные проекта создаётся выделенный пользователь, что позволяет ограничить предоставляемые сервисом ресурсы и продукты, а также осуществлять их контроль. В случае наличия у пользователей проекта А нестандартных ограничений, которые упоминались ранее, в системе-поставщике сервиса данных могут быть созданы дополнительные пользователи, что позволяет избежать накладных расходов на передачу большого объема информации. При этом исходные запросы пользователей к web-интерфейсу должны быть модифицированы таким образом, чтобы они проходили процедуру проверки пользователя и его прав у поставщика данных без передачи конфиденциальной информации, за исключением факта наличия дополнительных ограничений и их типа.

Для осуществления этого необходимо внести изменения в стандартную процедуру аутентификации и авторизации на web-сервере сервиса предоставления данных пользователю в процессе проксирования запроса во внешнюю систему. Дополнительный модуль `mod_perl` (`mod_perl2`) для web-сервера `apache` позволяет перехватывать управление определёнными этапами обработки запроса и осуществить их посредством специально написанного ПО на языке Perl.

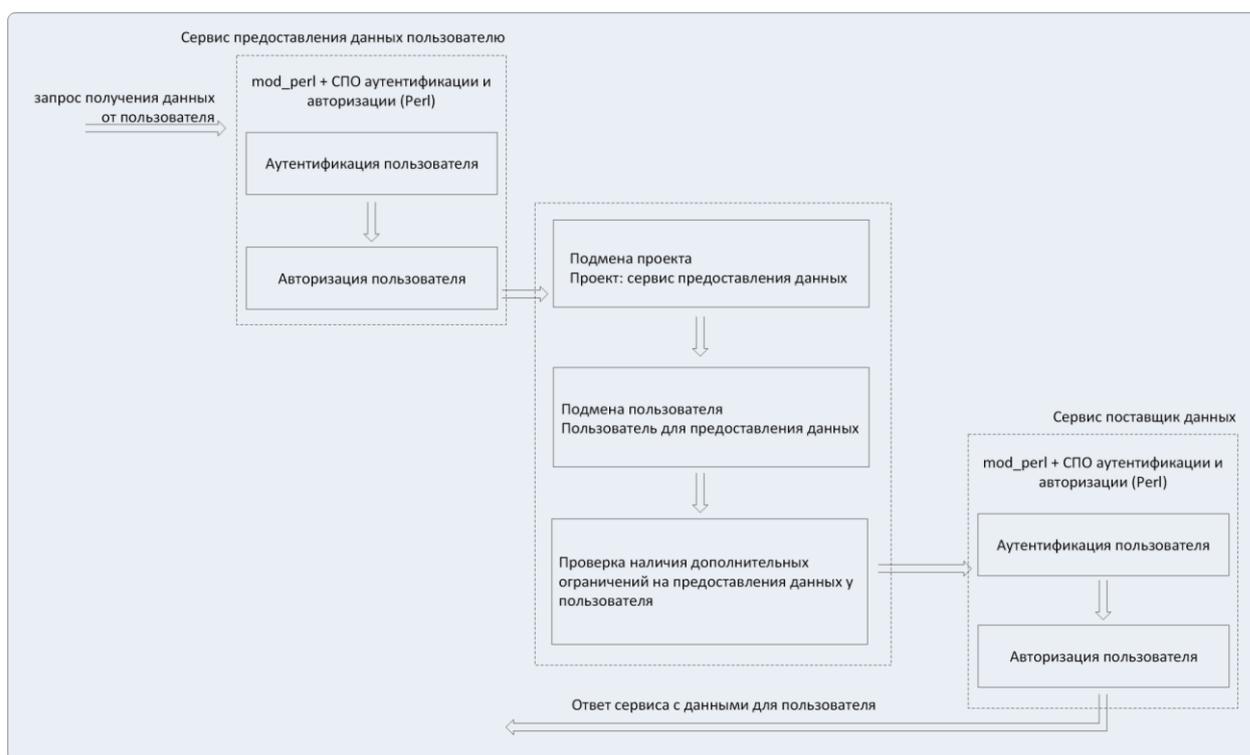


Рисунок 3.2.4.2 — Схема взаимной интеграции сервисов распределенных систем мониторинга.

Таким образом, непосредственно в процессе осуществления проверки подлинности пользователя и его прав, становится возможным осуществить следующее:

- подменить имеющегося пользователя на пользователя, который выделен для проекта А в системе предоставления сервису данных для осуществления экспорта;

- подменить информацию о сервисе предоставления данных пользователю на информацию о проекте В;
- осуществить дополнительную проверку всех возможных имеющихся ограничений доступа к данным для пользователя, например, области интереса, типа предоставляемого продукта или актуальность предоставляемых данных.

В результате осуществления этой последовательности действий запрос, пришедший от проекта А к системе-поставщику сервиса данных, будет аутентифицироваться и авторизоваться в рамках его системы контроля доступа под выделенным пользователем для экспорта данных во внешние системы.

Предложенная схема позволяет без ограничений реализовать сервисную модель предоставления данных пользователям без передачи приватной информации и существенных накладных расходов на дополнительные запросы и отправку большого объема информации.

3.2.5 Развитие инструментов графического анализа рядов данных в системах семейства «Созвездие-Вега»

3.2.5.1. Перевод клиентской части на технологию модульной разработки и компиляции

Система графического анализа рядов данных была переведена на использование фреймворка Svelte. Это позволило уменьшить объем работы, производимой на клиентской стороне приложения, за счет сокращения манипуляций JavaScript с объектной моделью HTML-страницы. Вместо этого Svelte заблаговременно генерирует страницу и фрагменты кода, который при интерактивной работе точно обновляет структуру страницы, и оптимизирует быстродействие.

Использование фреймворка позволило значительно улучшить структурирование кода с разделением функциональных, оформительских и описательных составляющих, что нашло использование в интерфейсах графического анализа рядов данных для нескольких различных информационных систем таким образом, что минимизируется дублирование кода между разными системами, но обеспечивается сборка итогового кода из разработанных модулей.

Реализована возможность работы графического интерфейса в различных режимах:

- анализируется заданный пользователем произвольный период времени: от нескольких часов до нескольких лет (см. рисунок 3.2.5.1.1);
- анализируется несколько аналогичных периодов времени (например, сутки или год) с возможностью сравнения динамики этих периодов.

Инструменты графического анализа данных были реализованы в ряде информационных систем. Примеры таких инструментов приведены ниже на рисунках 3.2.5.1.1, 3.2.5.1.2, 3.2.5.1.3.

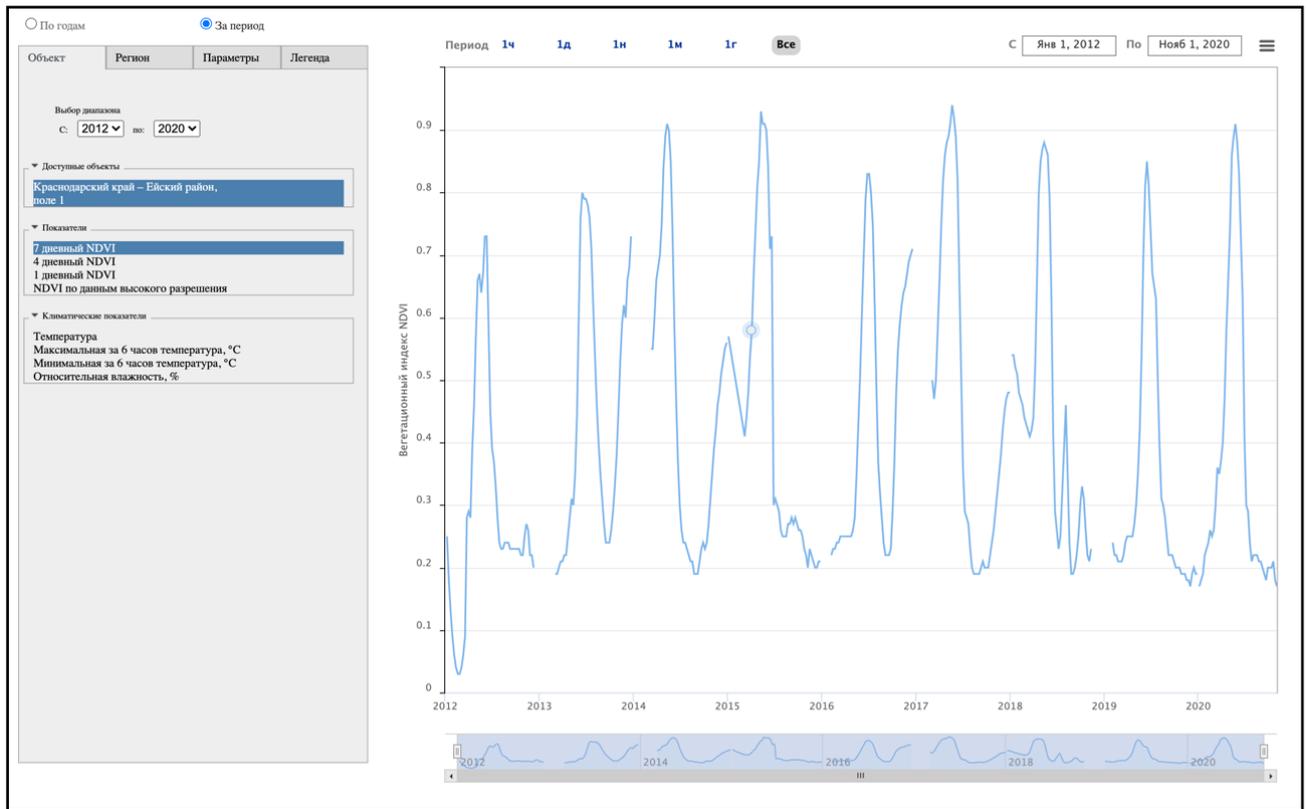


Рисунок 3.2.5.1.1 — Непрерывное представление временного ряда в проекте “ВЕГА Science”.

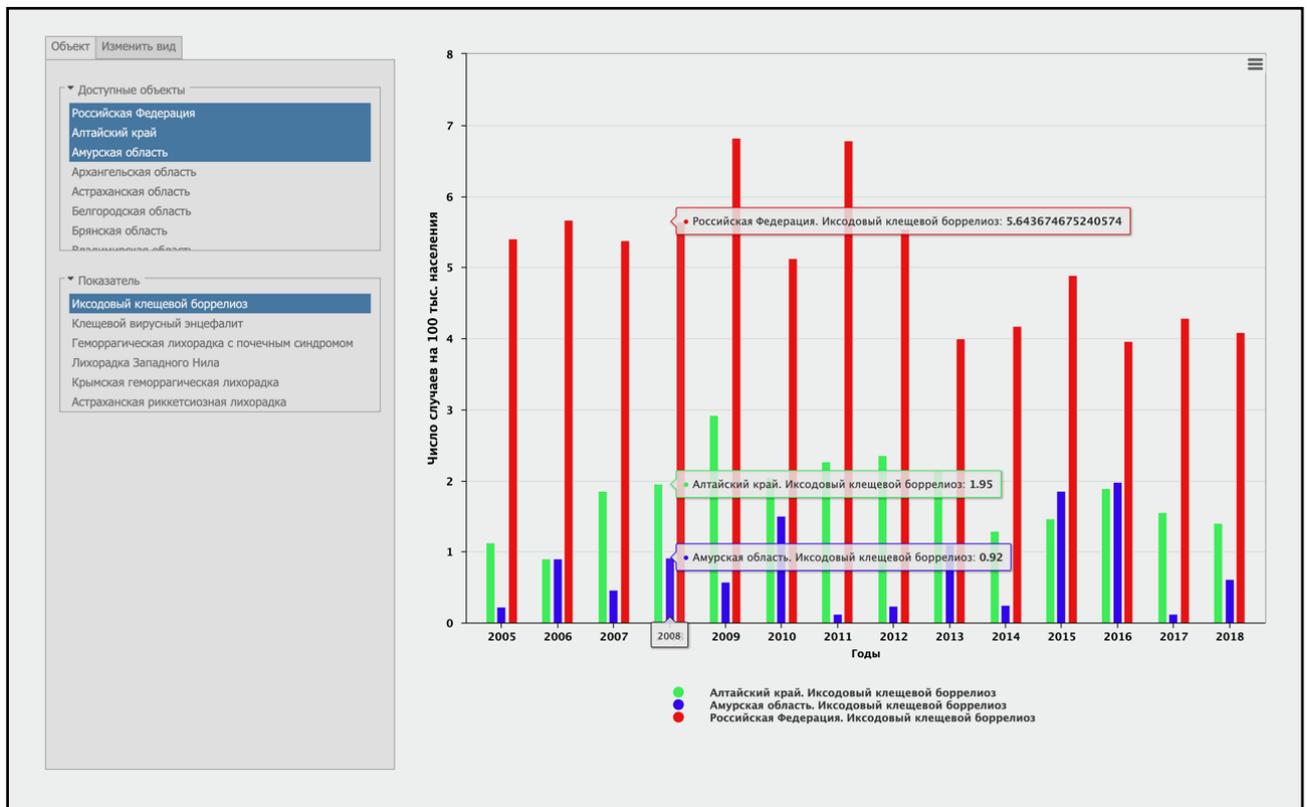


Рисунок 3.2.5.1.2 — Анализ многолетней динамики заболеваемости опасными инфекциями.

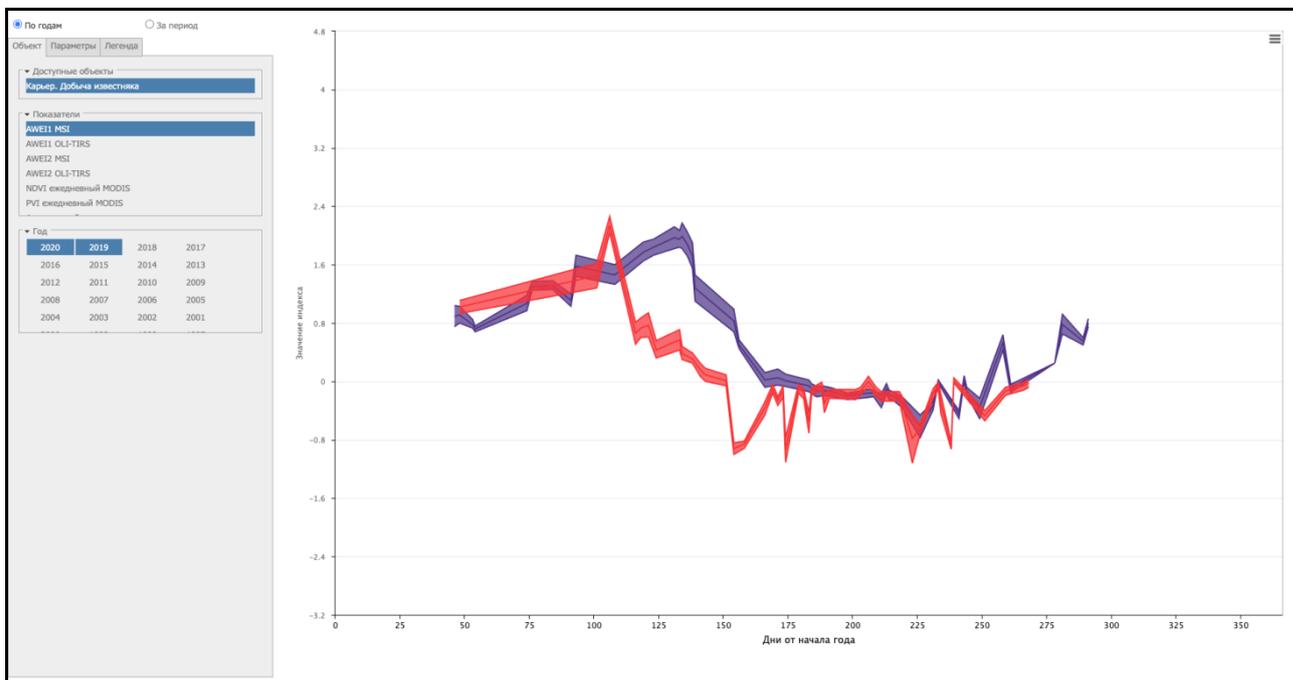


Рисунок 3.2.5.1.3 — Анализ динамики эвапотранспирации с демонстрацией интервала возможной ошибки при мониторинге объектов наблюдения

3.2.5.2. Переход к централизованному формированию метаинформации необходимой в графическом интерфейсе

Внедрение единой базы данных и интерфейса для управления набором наблюдаемых величин позволило систематизировать настройку интерфейсов графического анализа данных всех информационных систем с учетом их сходств и различий. Кроме того, это:

- сделало доступным настройку интерфейсов всем администраторам, не ограничиваясь разработчиками;
- позволило выработать единые правила обмена данными;
- повысило оперативность модификации метаданных;
- обеспечило автоматизированное конфигурирование интерфейсов графического анализа.

3.2.5.3. Переход к централизованному формированию метаинформации, необходимой в графическом интерфейсе

Значительный рост вычислительных возможностей современных персональных компьютеров и совершенствование браузеров позволяет производить на компьютере пользователя вычисления, не загружая сервер.

Расчет производных показателей мониторинга объектов наблюдения по формулам реализован на клиентской стороне. Клиент-серверный обмен ограничивается передачей исходных данных. Так же на клиентской стороне рассчитывается стандартное отклонение (Рис. 3.2.5.3.).

3.3. Использование новых подходов при построении ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

В 2020 году активно велись работы по внедрению технологии динамического блочного представления спутниковых данных системам распределённой обработки. В настоящий момент данная схема уже опробована при создании различных процедур потоковой обработки данных и показала свою эффективность. В частности,

рассматриваемая технология была успешно апробирована при реализации процедур проведения радиометрической и геометрической коррекции данных спутников серии «Метеор-М» с использованием данных спутников Terra, Aqua и Landsat-8. Это позволило существенно упростить реализацию самих процедур, а также в несколько раз сократить время этапа подготовки данных для обработки. При этом использование разработанной в рамках рассматриваемой технологии методики позволило осуществлять выбор оптимальных параметров разбиения регионов, по которым проводится обработка, на блоки и их кластеры для достижения минимального суммарного времени, необходимого для ее выполнения.

Также в 2020 году подход, основанный на динамическом формировании блоков данных по заданным пространственным разбиениям, был успешно применен для реализации тайловых web-интерфейсов для доступа к данным архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Актуальность именно такого подхода для формирования тайлов спутниковых изображений связана с тем, что архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» содержат широкий спектр самых различных типов спутниковых данных. При этом ежедневно в эти архивы поступает более 3 терабайт новых данных. Поэтому реализуемый в большинстве систем массового доступа пользователей к спутниковым данным вариант с использованием заранее подготовленных тайловых архивов в данном случае оказался неприемлемым. В то же время новый подход позволяет производить визуализацию спутниковых изображений не только в одной фиксированной проекции, как это обычно делается, а в любой из списка поддерживаемых. Использование описываемого нового подхода потребовало существенной модернизации технологии GEOSMIS, используемой в ИКИ РАН для построения картографических web-интерфейсов для доступа к спутниковым данным ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Заключение

Представленные в настоящей главе результаты показывают, что по направлению «Разработка новых методов и подходов организации хранения и параллельной обработки сверхбольших объемов данных для решения задач анализа долговременных наблюдений в интересах ведения мониторинга и изучения различных процессов и явлений» проведенные работы соответствуют установленной в плане работ ИКИ РАН на 2020 год тематике. Таким образом, работы выполнены полностью в соответствии с планом.

При этом получены следующие основные результаты:

- Разработана технология динамического блочного представления спутниковых данных системам распределенной обработки, которая позволяет оперировать с данными сверхбольших распределенных архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг»
- Разработан целый ряд различных инструментов, предназначенных для эффективной работы интерфейсов и систем, обеспечивающих доступ пользователей к архивам данных долговременных наблюдений.
- Подход, основанный на динамическом формировании блоков спутниковых данных в заданных пространственных разбиениях, был успешно использован как при реализации реальных процедур обработки, так и для построения тайлового web-интерфейса для доступа к данным архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Таким образом, можно считать, что работы по данному направлению темы в 2020 году полностью выполнены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный отчет по теме «Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера» (№ 0024-2019-0014) показывает, что в соответствии с планом ИКИ РАН на 2020 год они велись по следующим основным направлениям:

- Развитие комплекса взаимосвязанных и дополняющих друг друга физико-математических моделей для диагностики и прогнозирования состояния высокоширотной ионосферы в северном и южном полушариях, которые электродинамически связаны между собой через область средних широт. Разработки общей модели взаимодействия в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосферная нейтральная атмосфера Земли. Развитие ГИС «Аврора-Арктика»;
- Применение методов машинного обучения и глубокого обучения для обработки и анализа больших массивов астрономических данных в задачах наблюдательной астрофизики;
- Разработка новых методов и подходов организации хранения и параллельной обработки сверхбольших объемов данных для решения задач анализа долговременных наблюдений в интересах ведения мониторинга и изучения различных процессов и явлений.

В рамках данной тематики опубликовано в 2020 году 27 работ, из них 8 в рецензируемых изданиях, входящих в Scopus и WoS (плановый показатель 4).

Таким образом, можно считать, что поставленные в плане задачи на 2020 год в рамках данной темы полностью решены.

ПУБЛИКАЦИИ

Опубликовано – 34 работы, из них:

- в зарубежных изданиях – 3
- книг – 0
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах – 7
- статьи в сборниках материалов конференций – 0
- материалы конференции - 7
- доклады, тезисы – 17
- публикаций по грантам РФФИ – 0
- в соавторстве с зарубежными авторами – 2
- статьи в WOS и Scopus – 8 (из них в печати —1)
- статьи в WOS и Scopus (Q1, Q2) – 4
- статьи в WOS и Scopus (Q3, Q4) – 4
- статьи без DOI - 2

Публикации в зарубежных изданиях

1. *Lukianova R., Kozlovsky A., Lester M.* Signatures of meteor showers and sporadics inferred from the height distribution of meteor echoes // *Planetary and Space Science*, Vol.189, 104981, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104981>. 2020. **WoS/Scopus Q2**
2. *Kozlovsky A., Lukianova R., Lester M.* Occurrence and altitude of the long-lived nonspecular meteor trails during meteor showers at high latitudes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 125, e2019JA027746, <https://doi.org/10.1029/2019JA027746>. 2020. **WoS/Scopus Q1**
3. *Lukianova R.* Swarm field-aligned currents during a severe magnetic storm of September 2017 // *Annales Geophysicae*, Vol. 38, p. 191–206, <https://doi.org/10.5194/angeo-38-191-2020>, 2020. **WoS/Scopus Q1**

Публикации в отечественных научных рецензируемых изданиях

4. *Dodin A., Meshcheryakov A., Belvedersky M., Burenin R.A., Gilfanov M. R., Medvedev P.S., Sazonov S.Yu., Khorunzhev G.A., Sunyaev R.A., Potanin S.A., Shatsky N.I., Belinski A.A., Atapin K.E., Burlak M.A., Egorov O.V., Tatarnikov A.M., Postnov K.A.* Optical Spectroscopy of SRG/eROSITA Objects with 2.5-m Telescope at the Caucasus Mountain Observatory of the SAI MSU // *Astronomy Letters*, Volume 46, Issue 7, p.429-438, DOI: [10.1134/S106377372007004X](https://doi.org/10.1134/S106377372007004X) **WoS/Scopus Q2**
5. *Лукьянова Р.Ю.* Экстремальные продольные токи во время магнитных бурь 24-го солнечного цикла: март 2015 г. и сентябрь 2017 г. // *Космические исследования*, Т. 58(2), с. 89-102. 2020. **WoS/Scopus Q3**
6. *Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Матвеев А.М., Руткевич Б.П.* Технология динамического блочного представления спутниковых данных системам распределенной обработки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. – в печати (**SCOPUS**)
7. *Proshin A.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Loupian E.A., Radchenko M.V., Sychugov I.G.* “IKI-Monitoring” shared use center support and development — possible solutions // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. Vol. 17. No. 6. P. 51-55. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-6-51-55](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-51-55). (**SCOPUS**)

8. *Proshin A.A., Matveev A.M., Kashnitskiy A.V., Bourtsev M.A.* Satellite data efficient processing with dynamic block archive access // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. Vol. 17. No. 6. P. 56-60. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-56-60. (SCOPUS)
9. *Лукьянова Р.Ю.* Численная модель распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. Вып. 674, с. 234-238. 2020. (РИНЦ)
10. *Кузьмин А.К.* Фоновые условия и влияние различных световых факторов на изображения распределений интенсивности авроральных эмиссий, получаемых с орбит космических аппаратов // *Вопросы электромеханики*, Т. 175, №2, 2020 14-41. (РИНЦ)

Материалы конференций

11. *Прошин А.А., Матвеев А.М., Кашицкий А.В.* Организация динамического блочного доступа к данным в архивах для проведения их эффективной обработки // *Материалы VI Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли"*. 29 сентября - 2 октября 2020. Красноярск, 2020. С. 114-117.
12. *Прошин А.А., Лупян Е.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Матвеев А.М.* Технология динамического блочного доступа к данным в архивах для проведения их эффективной параллельной обработки // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 97. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
13. *Балашов И.В., Бурцев М.А., Прошин А.А., Лебединская Д.И.* Использование облачных ресурсов Google Cloud Storage и их интеграция с ресурсами ЦКП "ИКИ-Мониторинг" // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 65. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
14. *Балашов И.В., Сычугов И.Г., Прошин А.А.* Взаимная интеграция сервисов данных распределенных систем спутникового мониторинга // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 67. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
15. *Балашов И.В., Сычугов И.Г., Прошин А.А.* Построение отказоустойчивых узлов доступа к данным ДЗЗ в системах мониторинга // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 68. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
16. *Константинова А.М., Балашов И.В., Толпин В.А.* Возможности применения тайловой схемы доступа к картам в интерфейсах, построенных по технологии GEOSMIS // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 83. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
17. *Марченков В.В., Уваров И.А.* Развитие инструментов графического анализа рядов данных в системах семейства "Созвездие-Вега" // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 91. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.

Тезисы, доклады, циркуляры

18. *Лукьянова Р.Ю.* Численная модель распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы // *VI Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»* СПб., ВКА им. А.Ф.

- Можайского, 16-18 сентября 2020.- устный доклад
19. *Мещераков А.В.* "Отождествления, классификация и измерение красных смещений рентгеновских источников при помощи системы SRGz" Всероссийская конференция ", Научная конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2020)", устный доклад
 20. *Борисов В.Д.* Построение фотометрических моделей для системы SRGz // Научная конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2020)", устный доклад
 21. *Мещераков А. В.* Вероятностные прогнозы фотометрических красных смещений астрономических объектов в рентгеновских обзорах неба с использованием методов машинного обучения // конференция "Программирование и вычислительная математика" памяти Н.П.Трифонов, устный доклад (2020)
 22. *Мещераков А.В., Борисов В.Д., Герасимов С.В.* Вероятностные прогнозы фотометрических красных смещений астрономических объектов в рентгеновских обзорах неба с использованием методов машинного обучения // Программирование и вычислительная математика - 2020, тезисы докладов.
 23. *Borisov V., Meshcheryakov A., Gerasimov S.* [Probabilistic photo-z machine learning models for X-ray sky surveys](#) // ADASS-2020, WoS Proceedings (in press)
 24. *Meshcheryakov A., Soroka A., Gerasimov S.* [«Morphological classification of astronomical images with limited labelling»](#) // ADASS-2020, WoS Proceedings (in press)
 25. *Мещераков А.В., Сорока А.Г., Герасимов С.В.* Классификация астрономических данных без разметки // Ломоносовские чтения - 2020, тезисы докладов.
 26. *Мещераков А.В., Сорока А.Г., Герасимов С.В.* Использование semi-supervised подхода на основе соревновательных автокодировщиков для ускорения разметки данных в задаче классификации астрономических изображений // Тихоновские чтения - 2020, тезисы докладов.
 27. *Мещераков А.В., Полевой А.В., Герасимов С.В.* Исследование алгоритмов инкрементального моделирования // Тихоновские чтения - 2020, тезисы докладов.
 28. *Мещераков А.В., Селякин А.С., Герасимов С.В.* Применение обучения с подкреплением для оптимизации маршрутов // Тихоновские чтения - 2020, тезисы докладов.
 29. *Мингалева И.В., Суворова З.В., Мерзлый А.М., Талалаев А.Б., Тихонов В.В., Янаков А.Т., Мингалева В.С.* Расчеты зон засветки однокачковыми лучевыми траекториями радиоволн КВ-диапазона для передатчиков, расположенных на средних широтах // Сборник тезисов докладов 15-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». 10-14 февраля 2020, Москва. ИКИ РАН. С. 280. (<https://plasma2020.cosmos.ru>)
 30. *Мингалева И.В., Мерзлый А.М., Талалаев А.Б., Устименко Л.Г., Тихонов В.В., Янаков А.Т., Сахаров Я.А., Суворова З.В.* Мониторинг ионосферы с помощью радиотрасс, проходящих на высоких и средних широтах // Сборник тезисов докладов 15-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». 10-14 февраля 2020, Москва. ИКИ РАН. С. 279. (<https://plasma2020.cosmos.ru>)
 31. *Мингалева И.В., Суворова З.В., Мерзлый А.М., Талалаев А.Б., Тихонов В.В., Янаков А.Т., Мингалева В.С.* Анализ зон засветки однокачковыми лучевыми траекториями для передатчиков в КВ-диапазоне и обеспечение радиосвязи в Арктическом регионе // Abstracts of the 43rd Annual Seminar on Physics of auroral phenomena, Apatity. 10-13 March 2020. Preprint PGI 20-01-140. Apatity: PGI. 2020. P.57.
 32. *Мерзлый А.М., Талалаев А.Б., Устименко Л.Г., Тихонов В.В., Янаков А.Т., Сахаров Я.А., Мингалева И.В., Суворова З.В.* Организация радиотрасс Тверь-Ловозеро и Ловозеро-Земля Франца Иосифа // Abstracts of the 43rd Annual Seminar on Physics of auroral phenomena, Apatity, 10-13 March 2020. Preprint PGI 20-01-140. Apatity: PGI. 2020. P.57.
 33. *Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Мерзлый А.М., Петрукович А.А., Крученицкий Г.М., Баньщикова М.А.* Орбитальная оптическая авроральная диагностика состояния полярной ионосферы, как часть системного контроля космической погоды // 15-я Конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Москва. ИКИ РАН. 10-14 февраля 2020. Тезисы

докладов. С. 314.

34. Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Мерзлый А.М., Петрукович А.А., Крученицкий Г.М., Баныщикова М.А. Орбитальная оптическая авроральная диагностика состояния полярной ионосферы, как часть системного контроля космической погоды // 8-я конференция Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли. АО Корпорации ВНИИЭМ. 2020. Тезисы докладов. С.44-45.

Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учеными

1. Lukianova R., Kozlovsky A., Lester M. Signatures of meteor showers and sporadics inferred from the height distribution of meteor echoes // Planetary and Space Science, Vol.189, 104981, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104981>. 2020. **WoS/Scopus Q2**
2. Kozlovsky A., Lukianova R., Lester M. Occurrence and altitude of the long-lived nonspecular meteor trails during meteor showers at high latitudes // Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol. 125, e2019JA027746, <https://doi.org/10.1029/2019JA027746>. 2020. **WoS/Scopus Q1**

Публикации, подготовленные по теме «Космос-Д», в рецензируемых изданиях.

1. Lukianova R., Kozlovsky A., Lester M. Signatures of meteor showers and sporadics inferred from the height distribution of meteor echoes // Planetary and Space Science, Vol.189, 104981, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104981>. 2020. **WoS/Scopus Q2**
2. Kozlovsky A., Lukianova R., Lester M. Occurrence and altitude of the long-lived nonspecular meteor trails during meteor showers at high latitudes // Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol. 125, e2019JA027746, <https://doi.org/10.1029/2019JA027746>. 2020. **WoS/Scopus Q1**
3. Lukianova R. Swarm field-aligned currents during a severe magnetic storm of September 2017 // Annales Geophysicae, Vol. 38, p. 191–206, <https://doi.org/10.5194/angeo-38-191-2020>, 2020. **WoS/Scopus Q1**
4. Dodin A., Meshcheryakov A., Belvedersky M., Burenin R.A., Gilfanov M. R., Medvedev P.S., Sazonov S.Yu., Khorunzhev G.A., Sunyaev R.A., Potanin S.A., Shatsky N.I., Belinski A.A., Atapin K.E., Burlak M.A., Egorov O.V., Tatarnikov A.M., Postnov K.A. Optical Spectroscopy of SRG/eROSITA Objects with 2.5-m Telescope at the Caucasus Mountain Observatory of the SAI MSU // Astronomy Letters, Volume 46, Issue 7, p.429-438, DOI: [10.1134/S106377372007004X](https://doi.org/10.1134/S106377372007004X) **WoS/Scopus Q2**
5. Лукьянова Р.Ю. Экстремальные продольные токи во время магнитных бурь 24-го солнечного цикла: март 2015 г. и сентябрь 2017 г. // Космические исследования, Т. 58(2), с. 89-102. 2020. **WoS/Scopus Q3**
6. Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Матвеев А.М., Руткевич Б.П. Технология динамического блочного представления спутниковых данных системам распределенной обработки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. – в печати (**SCOPUS**)
7. Proshin A.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Loupian E.A., Radchenko M.V., Sychugov I.G. “IKI-Monitoring” shared use center support and development — possible solutions // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. Vol. 17. No. 6. P. 51-55. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-6-51-55](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-51-55). (**SCOPUS**)
8. Proshin A.A., Matveev A.M., Kashnitskiy A.V., Bourtsev M.A. Satellite data efficient processing with dynamic block archive access // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. Vol. 17. No. 6. P. 56-60. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-6-56-60](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-56-60). (**SCOPUS**)

9. Лукьянова Р.Ю. Численная модель распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. Вып. 674, с. 234-238. 2020. **РИНЦ**
10. Кузьмин А.К. Фоновые условия и влияние различных световых факторов на изображения распределений интенсивности авроральных эмиссий, получаемых с орбит космических аппаратов // *Вопросы электромеханики*, т. 175, №2, 2020 14-41.