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

УДК 519 687 53.087 004.09 504.3.504.06

Номер государственной регистрации 122042500031-8

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук станиен-корреспондент РАН А.А. Петрукович 2022 г. екабря

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности

по теме:

МОНИТОРИНГ

FFWG-2022-0006

(промежуточный, этап 2022/1)

Научный руководитель

д-р .техн. наук

Е.А. Лупян

Москва

2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, Е.А.Лупян Зав отделом, (раздел 1-9, введение, докт. техн. наук заключение) Подпись, дата Ответственный исполнитель, Зав отделом, Е.А.Лупян to 15,12 докт. техн. наук (раздел 1,3,6-9) Подпись, дата Ответственный исполнитель, 15.12.22 Gas главный научный сотрудник, С.А. Барталев д.т.н., профессор Подпись, дата (раздел 2,8,9) Ответственный исполнитель, Д.М. Ермаков зав. отд., д.ф.-м.н. 15.12.2 (раздел 3,4,5,7) Подпись, дата Ответственный исполнитель, С.Н. Артеха зав.лаб., к.ф.-м.н. 15.12.202 (раздел 5) Подпись, дата Ответственный исполнитель, И.В. Полянский гл. конструктор проекта 5 10 0 (раздел 6) Подпись, дата Ответственный исполнитель, О.Ю. Лаврова ведущий научный сотрудник, a 5.12 202 (раздел 4,8) к.ф.-м.н. Подпись, дата

2

Исполнители отдела 56

ведущий научный сотрудник, к.т.н.

ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.

старший научный сотрудник, зав. лаб.,к.т.н.

старший научный сотрудник, зав. лаб.,к.т.н.

старший научный сотрудник, зав. лаб.,к.т.н.

старший научный сотрудник, зав.сектором, к.ф.-м.н. старший научный сотрудник, к.т.н.

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

старший научный сотрудник, д.т.н.

старший научный сотрудник, к.т.н.

старший научный сотрудник, к.т.н.

старший научный сотрудник, к.т.н.

старший научный сотрудник, к.т.н.

старший научный сотрудник, к.г.н.

старший научный сотрудник, к.с.-х.н.

научный сотрудник, к.ф.-M.H.

no 15. 12.202 (раздел 2,9) Подпись, дата .А. Мазуров a раздел 1,6) Подпись, дата В.Н. Пырков 5 15.12.22 (раздел 1)

Подпись, дата

Подпись, дата

Подпись, дата

Подпись, дата

Кодпись.

Подпись, дата

2

15.12.2022

15

15.12.2022

1

12 15

15.12.2022

202

15.12.2022

20

20

[j] . 12 20 22 Подпись, дата

15. 12. 2022

15.12.2022

12 2022

2.2022

15.12.20m

augus

И.В. Балашов 15.12.2022 (раздел 1)

> М.А. Бурцев (раздел 1,6)

В.А. Егоров

А.А. Прошин (раздел 1)

Д.Е. Плотников (раздел 2,7)

А.В. Кашницкий (раздел 1,7)

Ю.С. Крашенинникова (раздел 1)

П.Б. Руткевич (раздел 1,5)

Ф.В. Стыценко (раздел 2,9)

В.А. Толпин (раздел 1)

И.А. Уваров (раздел 1,3)

С.А. Хвостиков (раздел 2,9)

Н.В. Шабанов (раздел 2)

С.С. Шинкаренко (раздел 2)

В.О. Жарко (раздел 2,9) 15.12.22

Подпись, дата

научный сотрудник, к.т.н.

А.А. Златопольский 15.11. 2012 (раздел 1) Подпись, дата

Д.А. Кобец

научный сотрудник, к.т.н.

научный сотрудник, к.т.н.

младший научный сотрудник

главный специалист

главный специалист, к.ф.м.н.

ведущий специалист, д.т.н.

ведущий специалист, д.н.

ведущий специалист, к.т.н.

ведущий специалист

главный конструктор проекта

ведущий конструктор, к.х.н.

ведущий конструктор, к.т.н

Ведущий конструктор, к.г.н.

ведущий конструктор.

ведущий конструктор

ведущий инженер

ведущий инженер

15.12.2022 (раздел 1,8) Подпись, дата Т.С. Ховратович 15.12.2022 (раздел 2,9) Подпись, дата Т.С. Миклашевич 15.12.2022 (раздел 2) Подпись, дата А.Ю. Дегай 15. 12. 2.022 (раздел 1) Подпись, дата А.А. Козочкина 15.12. 202 (раздел 1,8) Подпись, дата Л.А. Ведешин 51222 1 (раздел 1,8) Подпись, дата А.А. Романов 1512.2 (раздел 1) Подпись, дата В.П. Саворский 100 15.12.202 (Раздел 1) Подпись, дата Г.С. Самиуллина 12 (раздел 1,8) Подпись, дата В.А. Скачков eech (раздел 1) Подпись, дата З.С. Белоконь 19 15 12 (раздел 1) Подпись, дата Д.В. Ершов ing/ 15.12.2022

неродиние, дата (раздел 2,9) Иолпись, дата Н.Н. Ладонина 15. 12. Асти (раздел 2) Подпись, дата В.В. Марченков

М/ 15.12.2022 Подпись, дата

15.12.2022 Подпись, дата

, дата

5-12.2022 Подпись, дата 2022 Подпись, дата

Ю.В. Артамонова (раздел 1)

(раздел 1)

(раздел 1)

О.Ю. Панова

П.А. Колбудаев (раздел 1)

ведущий инженер	My 15.12.2022	А.М. Матвеев (раздел 1)
ведущий инженер	Подпису, дата	М.В. Радченко (раздел 1)
ведущий инженер	Родпись, дата Posef - 15.12 2022	, Л.В. Романова (раздел 1)
ведущий инженер	Иодпись, дата	О.А. Суднева - (раздел 1)
инженер, к.т.н.	Подпись, дата	М.В. Андреев (раздел 1)
инженер	15. 12. 2022	А.А. Антошкин (раздел 1)
инженер	Подпись, дата Бос 15.12.2022	М.А. Богодухов (раздел 2)
инженер	Подпись, дата Энго 15. (2. 2022	А.А. Бриль (раздел 1,8)
инженер	Подинсь, дата Арг 15.12.2022	Е.В. Бушмелева (раздел 1)
инженер	Подпись, дата Ерт 15.12.2022	Е.Е. Волкова (раздел 1)
инженер	Подпись, дата В 15.12.2022	И.И. Ворушилов (раздел 2,9)
инженер	Подпись, дата Му 15. 12. 2.022	М.В. Врублевский (раздел 1)
инженер	9 Подпись, дата 15 12.2022	П.В. Денисов (раздел 1,9)
инженер	Подпись, дата <u>Вегалу 15.12.2022</u>	Д.С. Дианова (раздел 1,8)
инженер	HEALUHA 15.12.202	Е.С. Ёлкина (раздел 2)
инженер	Подпись, дата Дана 19.18.30.22	А.А. Иванова (раздел 2)
инженер	Подпись, дата Сруд 16.11. 2022	Р.И. Камбалина (раздел 1)
инженер	Подпись, дата <u>А. П. 15, 12, 2022</u>	А.М. Константинова (раздел 1)
инженер	Поднись, дата 15.12.2022	Д.В. Лозин (раздел 1,3,6)

Подпись, дата

15.12 Loz Подпись, дата 15.12. M22 Подпись, дата 12 Подпись, дата 0 15.12.2022 Подпись, дата 15.12.2022 Подпись, дата 15.12 2022 Подпись, дата 15. 12. 2022 В.М. Сидоренков Подпись, дата 15.12.2022 Подпись, дата 15.12.2022 uno Подпись, дата 15.12.2022 Подпись, дата 13 12. 202C Подпись, дата 15.12.2022 mist Подпись, дата 15.12.2022

Подпись, дата

Е.А. Стыценко (раздел 2,9) К.А. Трошко (раздел 1,9) В.Н. Черных (раздел 1)

Г.С. Моисеенко

А.Ю. Полецкая

(раздел 1,9)

Б.И. Рузаков

Б.П. Руткевич

И.А. Сайгин

(раздел 2,9)

К.С. Сенько

(раздел 1)

(раздел 2)

(раздел 1)

(раздел 1)

(раздел 1)

Д.Л. Пчеловодов (раздел 1)

О.Е. Степанченко (раздел 1)

Д.А. Юдин (раздел 1,8)

инженер

инженер

инженер

инженер

инженер

инженер

инженер

инженер, к.т.н.

инженер, к.г.н

инженер

техник

старший лаборант

старший лаборант

Исполнители отдела 51

главный научный сотрудник дн

ведущий научный сотрудник, д.н.

ведущий научный сотрудник, д.н.

ведущий научный сотрудник, д.н.

старший научный сотрудник, к.н.

старший научный сотрудник, к.н.

старший научный сотрудник

научный сотрудник, к.н.

младший научный сотрудник, к.н.

главный специалист

Подпись, дата Acu Подпись дата a Подпись, дата a

Подпись, дата U Подпись, дата u

Подпись, дата Illa Подпись, дата

0 D Подпись, дата

luck Подпись, дата an

Подпись, дата

2

В.Е. Захаров (раздел 5.2.4)

Н.М. Астафьева (раздел 5.2.2)

Е.Б. Кудашев (разделы 5.2.1)

О.Г. Онищенко (раздел 5.2.2)

А.А. Гусев (раздел 5.4)

Г.В. Левина (раздел 5.2.3)

С.Л. Шалимов (раздел 5.1.1,5.1.2)

Н.Н. Зольникова (раздел 5.2.4)

Л.А. Михайловская (раздел 5.2.2)

Н.И. Каленова (раздел 5.2.1)

Исполнители отдела 55

главный научный сотрудник, д.н.

ведущий научный сотрудник, к.н.

ведущий научный сотрудник, к.н.

ведущий научный сотрудник, к.н.

старший научный сотрудник, д.н.

старший научный сотрудник, к.н.

научный сотрудник

научный сотрудник

научный сотрудник

научный сотрудник

научный сотрудник, к.н.

научный сотрудник, к.н.



Подпись, дата (раздел 4,8)

младший научный сотрудник	<u>Чирал</u> 15.12.22 Подпись, дата	Е.В. Краюшкин (раздел 4)
главный специалист	Подпись, дата	2. Н.Ю. Комарова (раздел 3,8)
главный специалист	<u>А</u> Подпись, дата	М.Ю. Русаков (раздел 4)
ведущий программист	<u>75: 72, 22</u> Подпись, дата	С.А. Втюрин (раздел 3,4,5)
ведущий математик	Alen 15.12.22 Подпись, дата	А.Б. Селунский (раздел 3,4,5)
ведущий математик	Подпись, дата	А.В. Тюрин (раздел 3)
ведущий инженер	<u>Авси/ 15.12.2022</u> Подпись, дата	Е.В. Афанасьева (раздел 3)
ведущий инженер	<u>15.12.22</u> Подпись, дата	А.А. Горшков (раздел 3,4,5)
ведущий инженер	Подпись, дата	М.А. Кузнецова (раздел 3)
ведущий инженер	<u> Лину - 15,12,22</u> Подпись, дата	Т.В. Ликучева (раздел 8)
ведущий инженер	Силу 15. 12. 22 Подпись, дата	М.Т. Смирнов (раздел 7)
ведущий инженер	15.12, 2022 Подпись, дата	Ю.В. Соколова (раздел 3)
инженер	<i>Ям</i> 15.121. 221 Подпись, дата	Т.С. Арищенко (раздел 8)
инженер	ДЕЩ 15.12.2022 Подпись, дата	Д.А. Елизаров (раздел 4)
инженер	Каланд 15.12.22. Иодпись, дата	Н.А. Калашникова (раздел 8)
инженер	Инер 15.12.22 Подпись, дата	Н.А. Князев (раздел 4,8)
инженер.	<u>Казер</u> 15.12.22 Подпись, дата	А.Ю. Баданов (раздел 3,5)

электроник

<u>15.12.22</u>В.С. Антонов дата (раздел 4) tus Подпись, дата

техник

<u>Ин</u> *15. 12. 2022* Е.М. Марцинкевич Подпись, дата (раздел 7) <u>15. 12. 22</u> А.В. Суров Подпись, дата (раздел 7)

техник

Исполнители отдела 57

зав отдела, д.н.

главный научный сотрудник, д.н.

ведущий научный сотрудник, к.н.

старший научный сотрудник, к.н.

старший научный сотрудник, к.н.

старший научный сотрудник, к.н.

старший научный сотрудник, к.н.

научный сотрудник

научный сотрудник

научный сотрудник

младший научный сотрудник

младший научный сотрудник

младший научный сотрудник

главный конструктор проекта

главный конструктор проекта

главный специалист

Г.А. Аванесов 5.12.2022(раздел 6) Подпись, дата Н.Н. Брысин IS. 12. 2022 (раздел 6) Подпись, дата С.В. Воронков 1 2.22 (раздел 6) Подпись, дата Жуков Б.С. **22**(раздел 6) Подпись, дата Т.В. Кондратьева hoved 10 2022 (раздел 6) Подпись, дата А.В. Никитин S.12.2022(раздел 6) Подпись, дата А.Н. Василейская ABaci 15.12.2022 (раздел 6) Подпись, дата П.С. Сметанин 15.12.2022 (раздел 6) Подпись, дата Н.А. Строилов 15.12.2012 (раздел 6) Подпись, да Е.В. Белинская **22**(раздел 6) Подпись, дат С.А. Прохорова **27**(раздел 6) Подпись, дата Я.Д. Эльяшев 2022 (раздел 6) Подпись, дата В.М. Муравьев Bellypa (раздел 6) Подпись, дата 15.12.22

Подпись,

дата

15.12.2022

7

М.И. Куделин (раздел 6)

Р.В. Бессонов

2. 2072(раздел 6)

17 Подпись, дата

Подпись, дата

А.В. Бережков (раздел 6)

А.А. Крупин главный специалист (раздел 6) 17 Подпись, дата В.Ю. Белов ведущий конструктор 12. 2022 (раздел 6) Подпись, дата А.А. Дроздов ведущий конструктор 0 14 12.22 (раздел 6) Подпись, дата Е.А. Соловьева R am (раздел 6) 15.12.2022 ведущий конструктор Подпись, дата Э.А. Суханова 15.12.2012 (раздел 6) ведущий конструктор Подпись, дата Е.В. Коломеец ведущий инженер 15.12.2022 (раздел 6) 1 Подпись, дата Е.Б. Краснопевцева ведущий инженер Spacecci 22 (раздел 6) Подпись В.А. Шамис ведущий программист 1542 ZZ (раздел 6) Подпись, дата А.А. Курячая конструктор <u>S.12.202</u>2(раздел 6) Подпись, дата Л.М. Суворова конструктор <u>5.12.2022</u> (раздел 6) бдпись, дата В.Д. Устинов конструктор S-12, 2022 (раздел 6) Подпись, да Н.Г. Ширшова конструктор 2022(раздел 6) Подпись, дата Е.В. Ядвичук конструктор <u>15.12.22</u> (раздел 6) Подпись, дата Н.Ф. Абрамов инженер 5. 12. 20 22 (раздел 6) Подпись, дата Е.А.Базина инженер 17.2072 (раздел) Подпись, дата инженер А.В. Гусева The 15.12.22 (раздел 6) Подпись, дата А.А Кобелева. (раздел 6) инженер Подпись, дата

С.А. Корольков (раздел 6) Подпись, дата

А.В.Лагутин 7/5/2.22

Подпись, дата К.П. Любченко

<u>15-12.22</u>(раздел 6) how Подпись, дата

Н.А.Сливко 5-12-20-22 (раздел)

Подпись, дата Т.А. Суворова Ŵ 11 [7.22(раздел 6) Подпись, дата Ю.П. Теремок

Подпись, дата

Hover <u>5.12.2022</u>(раздел 6) Подпись, дата

М.В. Ваваев <u>15.52.22(раздел 6)</u> Подпись, дата

А.С. Лискив 15.12.22 (раздел 6)

Д.И. Хорохорин (раздел 6)

Подпись, дата В.И. Панферов 15.12.2 2 (раздел 6) Подпись, дата

И.В. Кондратьев à 5.12.22 (раздел 6) Подпись, дата

техник

профиля 8 разряда

станочник широкого

инженер

инженер

инженер

инженер

инженер

инженер

программист

программист

программист

Исполнители отдела Ц90

специалист

А.В. Корнеева (раздел 7) 15.12.22 Rophee Подпись, дата

Е.А. Лупян Som 22 12 19 Подпись, дата

нормоконтролер

РЕФЕРАТ

Отчёт 240 стр., 132 рис., 22 табл., 153 источника.

НАСТОЯЩИЙ ОТЧЁТ ПОСВЯЩЁН ОПИСАНИЮ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ, ПОЛУЧЕННЫХ В 2022 ГОДУ В РАМКАХ ТЕМЫ «МОНИТОРИНГ» (№ FFWG-2022-0006), ВЫПОЛНЯЮЩЕЙСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ ИНСТИТУТОМ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОТЧЁТЕ ПРИВОДЯТСЯ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУК. В РАБОТ. ЗАПЛАНИРОВАННЫХ HA 2022 ГОД ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ: «МОНИТОРИНГ-ТЕХНОЛОГИИ», «МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА», «МОНИТОРИНГ-«МОНИТОРИНГА-ОКЕАН», «МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА», КЛИМАТ», «МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ», «МОНИТОРИНГ-ВАЛИДАЦИЯ» «МОНИТОРИНГ-ИНФРАСТРУКТУРА».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ, ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ, ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ, КЛИМАТА, БИОСФЕРЫ И ОКЕАНА, АРХИВЫ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ РАБОТЫ СО СВЕРХБОЛЬШИМИ АРХИВАМИ ДАННЫХ.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ2
РЕФЕРАТ
СОДЕРЖАНИЕ16
ВВЕДЕНИЕ
РАЗДЕЛ 1 МОНИТОРИНГ-ТЕХНОЛОГИИ
Введение
1.1 Развитие подходов к организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач24
1.1.1 Анализ опыта развития технологий построения ИСДМ в 21 веке и оценка перспектив их развития24
1.1.2 Оценка возможностей совместного использования данных спутниковых систем РФ и КНР для решения задач действующих и перспективных информационных систем дистанционного мониторинга
1.1.3 Организация автоматического сбора данных КА серии FY-3 (КНР) и их усвоения в архивы ЦКП
1.1.4 Рассмотрение возможности использования слабонаправленных антенн для транспондеров в системах мониторинга подвижных объектов
1.1.5 Анализ возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга объектов
1.2 Создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования
1.2.1 Развитие подходов использование возможностей информационных систем семейства ВЕГА, для решения региональных задач дистанционного мониторинга сх. земель
1.2.2 Первые результаты использования технологии контроля данных статистических данных о сх. землях на основе методов дистанционного мониторинга
1.2.3 Развитие возможностей сервиса Вега для оценки состояния посевов и особенности развития культур в сезоне 2021–2022 гг
1.2.5 Алгоритм автоматической фильтрации облачных данных для решения задач объектного дистанционного мониторинга42
1.3 Поддержка и развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений в том числе решения междисциплинарных задач (в настоящее время возможности ЦКП «ИКИ- Мониторинг» используют около 100 научных организаций и университетов, расположенных практически на всей территории России)
1.3.1 Текущие задачи ЦКП и их актуальность
1.3.2 Структура и технические возможности ЦКП и их развитие в 2022 году
1.3.3 Архивы спутниковых данных и их наполнение в 2022 году
1.3.4 Основные информационные продукты, предоставляемые ЦКП
1.3.5 УНУ «Вега-Science» и развитие её в 2022 году
1.3.6 Научные и прикладные информационные системы, использовавшие возможности ЦКП в 2022 году

СОДЕРЖАНИЕ

1.3.7 Пользователи ЦКП54
1.3.8 Научные проекты, выполняемые с использованием возможностей ЦКП «ИКИ- Мониторинг» в 2022 году
1.3.9 Основные публикации, при подготовке которых были использованы возможности ШКП
1.3.10 Анализ текущих особенностей и возможных направлений развития ЦКП «ИКИ- Мониторинг» 56
Заключение 57
РАЗЛЕЛ 2 МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА 59
Ввеление 59
2.1 Развитие научных основ и методов обработки временных рядов мультисенсорных данных ДЗЗ различного пространственного и временного разрешения для обеспечения долговременного мониторинга наземных экосистем
2.1.1 Метод выделения покрытых лесом территорий России на основе данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения60
2.1.2 Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса
2.1.3 Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса
2.2 Развитие методов обработки данных ДЗЗ для получения устойчивых нормализованных наборов и долговременных рядов данных для изучения наземных экосистем
2.2.1 Метод фенологической нормализации временных рядов данных ДЗЗ70
2.2.2 Метод оценки относительной полноты леса
2.3 Развитие методов дистанционного мониторинга динамики наземных экосистем с использованием физических и эколого-математических моделей
2.3.1 Разработка алгоритма разделения индекса листовой поверхности (LAI) между верхним и нижним ярусами лесов
2.4 Формирование и анализ многолетних рядов наблюдений наземных экосистем для исследования глобальных изменений, решения задач рационального природопользования и устойчивого развития
2.4.1 Спутниковый мониторинг опустынивания на юге европейской России в 2019– 2020 годах
2.4.2 Спутниковые наблюдения задымлений от тростниковых пожаров на Нижней Волге
2.4.3 Оценка транспортной доступности лесных ресурсов
2.4.4 Оценка влияния типа лесной растительности и сезона пожара на степень постпожарных повреждений с использованием технологии оценки гибели леса на основе данных об интенсивности горения пожаров
2.4.5 Развитие методов спутникового картографирования тридцатилетней динамики пахотных земель регионов России на основе временных серий данных Landsat101
Заключение

РАЗДЕЛ 3 МОНИТОРИНГ-КЛИМАТ	106
Введение	106
3.1 Развитие методов количественных исследований процессов переноса скрытого т и тепломассообмена в системе глобальной циркуляции атмосферы Земли на синоптических и климатически значимых масштабах, в том числе, для изучени климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Зем	тепла я или106
3.1.1 Детектирование атмосферных рек по данным спутникового радиотепловиден для анализа региональных климатических изменений и процессов формиров экстремальных погодных условий	ния ания 106
3.2 Развитие методов дистанционной диагностики процессов, протекающих в криос Земли, в том числе исследование сезонной и многолетней динамики северной полярной шапки, анализ состояния пресноводных акваторий в период ледостав определение характеристик замерзающих водно-болотных угодий для изучения климатических и экологических изменений арктических и субарктических территорий.	фере а, я 109
3.2.1 Анализ гидрологических изменений, происходящих в Арктике, по данным спутниковой микроволновой радиометрии	109
3.2.2 Влияние загрязнённости морского льда на ошибки в определении сплочённо в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии	сти 114
3.3 Развитие методов диагностики крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений	122
3.3.1 Возможности предсказания наводнений на крупных реках по радиометричес микроволновым измерениям из космоса	жим 122
3.3.2 Метод оперативной оценки площадей гибели лесов от пожаров	123
3.3.3 Развитие возможностей системы VSV и её использование для анализа извержений вулканов Камчатки и Курил в 2021 год	126
Заключение	127
РАЗДЕЛ 4 МОНИТОРИНГ-ОКЕАН	128
Введение	128
4.1 Исследования нелинейной динамики морского волнения методами спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга морских акваторий	128
4.1.1 Развитие аппаратно-программных средств дистанционной диагностики параметров и динамики морского волнения	128
4.2 Разработка научных основ совместного использования новейших микроволновы оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морск акваторий, включая арктические регионы	іх и сих 131
4.2.1 Применение комплексного использования радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров высокого пространственного разрешения для оценки загрязнения Левантийского бассейна в результате аварийного разлива нефти г. Банияс (Сирия)	ı 131
4.3 Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оце параметров процессов в верхнем слое океана и в приводном слое атмосферы	енки 134
4.3.1 Спутниковый радиолокационный мониторинг ледяного покрова в Керченско проливе	ом 134
Заключение	135

РАЗДЕЛ 5 МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА136
Введение
5.1 Разработка научных основ и методов анализа временных серий спутниковых многосенсорных наблюдений исследований и мониторинга атмосферных явлений136
5.1.1 Волновые возмущения нижней и верхней ионосферы во время тропического циклона Faxai 2019 г136
5.1.2 Об аномальных амплитудах ветра в нижней ионосфере136
5.1.3 Построение длинных рядов глобальной циркуляции водяного пара в атмосфере по данным SSMIS
5.2 Развитие моделей и методов анализа данных для мониторинга и прогноза состояния атмосферы, в том числе мощных вихревых структур с учётом ветровых потоков, фазовых переходов влаги, атмосферного электричества, вариаций космических лучей
5.2.1 Модели и методы скалярной волновой фильтрации полей пристеночных турбулентных пульсаций давления141
5.2.2 Грозовая активность и вихревые структуры в атмосфере
5.2.3 Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов142
5.2.4 Малопараметрическая нелинейная модель тропических циклонов как платформа для численного моделирования влияния глобального потепления на морские перевозки
5.2.5 Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга и диагностики параметров тропических циклонов
5.3 Разработка новых методов обработки данных дистанционных наблюдений в ИК и видимом диапазоне и лидарных наблюдений облачности
5.3.1 Способы моделирования рассеивающего объекта в задачах зондирования атмосферы одночастотным лидаром обратного рассеяния147
5.4 Исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов148
5.5 Развитие методик решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы по данным ДЗЗ с использованием нейронных сетей149
5.5.1 Реализация процедуры восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2-2 в сервисе «Вега-Science»149
Заключение
РАЗДЕЛ 6 МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ154
Введение
6.1 Развитие методов построения, управления и калибровки перспективных российских приборов наблюдения Земли154
6.1.1 Повышение точности географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ, установленного на борту космического аппарата «Метеор-М» № 2-2154
6.1.2 Оценка точности продуктов, полученных в результате атмосферной коррекции данных приборов серии КМСС («Метеор-М» № 2 и «Метеор-М» № 2-2) для решения задач оперативного мониторинга растительного покрова

6.1.3 Развитие методов построения, управления и калибровки перспективных съёмочных систем и систем технического зрения космического базирования на примере оптимизации параметров системы наблюдения искусственных объектов в космическом пространстве
6.1.4 Разработка методов перспективных систем наблюдения Земли из космоса, в интересах распознавания образов искусственных объектов и сооружений167
6.2 Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса, в том числе потоковой обработки
6.2.1 Адаптация алгоритма восстановления интенсивности осадков к радиометрическим измерениям прибора МТВЗА-ГЯ
6.2.2 Адаптация алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными MCУ-MP
6.2.3 Организация автоматической обработки низкоуровневых данных КА «Канопус- В» в центрах НИЦ «Планета»187
6.2.5 Коррекция привязки данных МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2
6.2.6 Модернизация программного комплекса оперативной обработки данных КА «Арктика-М» № 1
Заключение192
РАЗДЕЛ 7 ВАЛИДАЦИЯ193
Введение
7.1 Валидация разрабатываемых методов и подходов обработки и анализа спутниковых данных, в том числе на основе проведения подспутниковых наблюдений
7.1.1 Создание опорных выборок на больших территориях с помощью краудсорсинга193
7.1.2 Разработка инструмента экспертной валидации растровых карт в системе «Вега- Science»
7.2 Алгоритм приведения измеренных с высоким спектральным разрешением микроволновых спектров собственного микроволнового излучения атмосферы в нестационарных состояниях к единому моменту времени
7.3 Валидация спутниковых алгоритмов определения значений мутности и концентрации взвешенного вещества на основе квазисинхронных подспутниковых натурных измерений
7.4 Определение трехмерной структуры вихревых диполей на основе спутниковых данных и измерений in-situ203
7.5 Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи
Заключение
РАЗДЕЛ 8 МОНИТОРИНГ-ИНФРАСТРУКТУРА
Введение
8.1 Проведение ежегодной международной конференции и выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://conf.rse.geosmis.ru/)
8.1.1 Проведение ежегодной международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://conf.rse.geosmis.ru/)207

8.1.2 Выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://conf.rse.geosmis.ru/)
8.2 Проведение научных семинаров и школ-конференций по фундаментальным проблемам ДЗЗ из космоса
8.2.1 Проведение ежегодной Всероссийской научной школы-конференции молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса (http://conf.rse.geosmis.ru/)
8.2.2 Проведение Всероссийского семинара «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=814)
8.3 Проведение работ по подготовке и повышению квалификации кадров на базе Научно-образовательного центра ИКИ РАН. В том числе:
8.3.1 Участие в проведении дней «открытых дверей» и экскурсий в ИКИ РАН, а также научно-образовательных лекций для школьников, студентов и аспирантов в части представления возможностей направления «Дистанционного зондирования и исследования Земли из космоса»
8.3.2 Проведение конкурсов работ молодых учёных, работающих в области дистанционного мониторинга Земли, природных и антропогенных сред
8.3.3 Научно-методическое обеспечение работ базовых кафедр ИКИ РАН и образовательных курсов, проводимых специалистами ИКИ РАН, по направлению «Дистанционного зондирования и исследования Земли из космоса»210
Заключение
РАЗДЕЛ 9 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИКИ РАН211
9.1 Спутниковый мониторинг динамики углерода в лесах России
9.2 Технология контроля данных сельскохозяйственной микропереписи 2021 года об использовании сельскохозяйственных угодий на основе средств спутникового мониторинга
РАЗДЕЛ 10 ГРАНТЫ
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ПУБЛИКАЦИИ

введение

В Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в рамках государственного задания (Часть 2 Государственные работы) проводятся фундаментальные и прикладные исследования планеты Земля. Научно-исследовательские (НИР) и опытно-конструкторские работы (ОКР) проводятся в соответствие со следующими направлениями, указанными в Программе фундаментальных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период 2021–2030 гг., утверждённой распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р.

№ п/п	Направление фундаментальных исследований	Номер направления в «Программе»
1	Информационно-вычислительные системы и среды в науке и образовании	1.1.8
2	Алгоритмы и программные системы в космическом мониторинге Земли и экологии	1.1.7.6
3	Океанология	1.5.8
4	Науки об атмосфере, климатология	1.5.9
5	География, геоэкология и рациональное природопользование	1.5.10
6	Водные ресурсы, гидрология суши	1.5.11
7	Изучение и прогнозирование катастрофических явлений (землетрясения, извержения вулканов, цунами); оценки сейсмической, вулканической и цунами опасности	1.5.1.6
8	Акустика, в том числе нелинейная, акустоэлектроника, акустооптика	1.3.6.5

Работы ведутся в рамках темы «Мониторинг» — Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности (гос. регистрация № 122042500031-8).

Тема «Мониторинг» посвящена разработке научных основ, методов и технологий спутникового мониторинга для планеты Земля, а также исследованиям различных процессов, происходящих на нашей планете, с помощью современных методов дистанционного зондирования. В рамках темы проводятся исследования в следующих основных направлениях:

- «Мониторинг-Технологии» Развитие системы коллективной работы со сверхбольшими долговременными архивами спутниковых данных и результатов их обработки.
- «Мониторинг-Биосфера» Методы спутникового мониторинга наземных компонент биосферы для исследования глобальных изменений, а также взаимодействия человека и природы.
- «Мониторинг-Климат» Использование методов и данных ДЗЗ, для изучения климата процессов и опасных природных явлений.
- «Мониторинг-Океан» Использование методов и данных ДЗЗ для изучения и контроля состояния системы океан – атмосфера, в том числе опасных явлений на поверхности океана
- «Мониторинг-Атмосфера» Исследование атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли.
- «Мониторинг-Эффект» Разработка новых методов и средств спутниковых наблюдений Земли.
- «Мониторинг-Валидация» Развитие новых подходов проведения валидации алгоритмов и методов обработки спутниковых данных.

 «Мониторинг-Инфраструктура» — Проведение научных мероприятий, образовательная и издательская деятельность в области развития научных основ и методов использования технологий ДЗЗ для решения научных задач

Настоящий отчёт посвящён описанию основных результатов работ, полученных в рамках данных направлений в 2022 г., которые выполнялись в соответствие с планом научных работ ИКИ РАН. Результаты, полученные по каждому из этих направлений, представлены в соответствующих разделах настоящего отчёта.

РАЗДЕЛ 1 МОНИТОРИНГ-ТЕХНОЛОГИИ

Введение

В настоящей главе отчёта представлены основные результаты, полученные в рамках работ по направлению «Мониторинг-Технологии», определённых в плане НИР ИКИ РАН на 2021–2023 гг.:

- Развитие подходов организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач
- Создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования
- Поддержка и развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений, в том числе решения междисциплинарных задач

Подробно полученные в данном направлении результаты изложены в следующих научных публикациях [3, 10–12, 16, 17, 22–24, 26, 28, 35, 59, 61, 63, 67, 77, 79, 83, 84, 86–88, 90, 92, 96, 98, 103, 109–111, 130, 132, 140, 142, 150, 151].

1.1 Развитие подходов к организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач

1.1.1 Анализ опыта развития технологий построения ИСДМ в 21 веке и оценка перспектив их развития

В рамках работ по теме «Мониторинг» в 2022 г. был проведён анализ вопросов, связанных с развитием технологий построения информационных систем дистанционного, в первую очередь спутникового мониторинга (ИСДМ). Такие системы создаются обычно для решения задач постоянного мониторинга тех или иных объектов и явлений в конкретной области деятельности или исследований. Основными особенностями ИСДМ в первую очередь являются:

- направленность на получение информации о некоторой группе объектов, процессов, и явлений, важных для контроля и управления тем или иным направлением деятельности и/или территорией
- необходимость постоянного получения, обработки и анализа данных дистанционных наблюдений и результатов их обработки совместно с другими видами информации;
- предоставление информации, в том числе оперативное, для анализа и управления контролируемыми процессами и объектами;
- наличие методической (а в ряде случаев и организационной) основы использования получаемой в системе информации для наблюдения, контроля и/или исследования тех или иных объектов, явлений и процессов.

Быстрое развитие методов, технологий и систем спутникового наблюдения Земли, которое происходило в 21 веке, существенно расширило круг задач, для которых они используются. Это фактически позволило начать массово создавать, внедрять и использовать различные ИСДМ. К настоящему времени в России уже насчитывается несколько десятков действующих специализированных, отраслевых и региональных систем. Нельзя не отметить, что ИСДМ сегодня фактически являются основными потребителями данных дистанционного зондирования и информационных продуктов, получаемых на их основе. Это, в частности, обусловлено тем, что ИСДМ:

 обеспечивают постоянное продолжительное (многолетнее) потребление различных видов информации, получаемых на основе данных ДЗЗ;

- рассчитаны на регулярное обновление информации и заинтересованы в получении не отдельных наборов данных, а их потоков;
- во многих случаях заинтересованы в активном использовании исторических данных, что обеспечивает достаточно массовое использование уже накопленных архивов данных ДЗЗ;
- обычно постоянно развиваются, расширяя круг задач и состав используемых для их решения информационных продуктов и данных ДЗЗ.

Следует также учитывать, что опыт последних лет показывает, что постоянно создаются новые ИСДМ, ориентированные на новые области применения и задачи. Все это сделало необходимым создание специальных информационных технологий, ориентированных на разработку, внедрение и поддержку ИСДМ. Такие технологии начали формироваться в нашей стране ещё в начале 21 века, когда начали активно создаваться и внедряться современные ИСДМ. В прошедшее двадцатилетие эти технологии активно развивались в различных организациях (в том числе и в ИКИ РАН). Также развивались и подходы организации использования данных ДЗЗ. Поэтому целесообразно было проанализировать опыт накопленный на различных этапах этого развития, в том числе для того чтобы определить дальнейшие перспективы данного направления. Данный анализ был выполнен на создания и развития подобных технологий, который накоплен в ИКИ РАН, и использования их при создании, внедрении и поддержке различных ИСДМ, в том числе на примере создания и постоянного совершенствования информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). Данная система была ведена в промышленную эксплуатацию в 2005 г. и, по мере совершенствования спутниковых систем ДЗЗ и технологий работы с ними, практически непрерывно развивалась. Поэтому в настоящее время она является одной из самых высокотехнологичных ИСДМ в нашей стране. Имеющийся в ИКИ РАН опыт поддержки и развития ИСДМ позволил также рассмотреть вопросы, связанные с возможностью использования обсуждаемых технологий не только для создания, но и для непрерывного развития подобных систем в течении длительного времени.

Также был проведен анализ имеющихся в настоящее время возможностей построения ИСДМ, в том числе имеющаяся в России инфраструктура, обеспечивающая возможности создания и поддержки ИСДМ, к которой, в первую очередь, следует отнести Единую территориально распределённую информационную систему ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ), в том числе систему центров НИЦ «Планета», а также центр коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Проведённый анализ позволил не только оценить основные текущие возможности технологий и систем ориентированных на построения, внедрение и поддержку ИСДМ, но и сформулировать перспективные направления их развития. Одними из основных таких направлений можно считать:

- разработку подходов, программной и технической инфраструктуры для создания среды разработки и поддержки ИСДМ, которая могла бы однотипно и с минимальными затратами создавать, внедрять и поддерживать современные ИСДМ;
- разработка методов, стандартов и унифицированного программного обеспечения для реализации эффективного взаимодействие различных ИСДМ, которое должно максимально облегчит не только обмен отдельными видами информацией между различными ИСДМ, прозрачного но И возможности использования информационных сервисов работы (включая обработку) с данными ИХ предоставляемых различными ИСДМ.

1.1.2 Оценка возможностей совместного использования данных спутниковых систем РФ и КНР для решения задач действующих и перспективных информационных систем дистанционного мониторинга

Развитие современных спутниковых систем ДЗЗ и улучшение качества поставляемых ими данных существенно расширило круг возможных применений технологий дистанционного зондирования Земли и решаемых с их использованием задач, а также привело к бурному развитию информационных систем дистанционного мониторинга (ИСДМ). Спектр данных, используемых в таких системах, весьма широк, но в основном сфокусирован на западных, т.е. американских и европейских данных. Данные же космических систем КНР по ряду причин остаются крайне слабо охваченными и, как правило, выпадают из рассмотрения. Однако же, в активе КНР имеется крупная, очень динамично развивающаяся спутниковая группировка ДЗЗ, в которой представлены практически все типы КА и полезных нагрузок, применяющихся сегодня для решения задач мониторинга. Поэтому для эффективного развития различных ИСДМ и технологий их построения бесспорно актуальным является рассмотрение вопроса возможности сотрудничества РФ и КНР в данной области.

На сегодняшний день РФ обладает действующей и постепенно развивающейся гражданской орбитальной спутниковой группировкой (ОГ) ДЗЗ. Несмотря на то, что с количественной точки зрения она находится на достаточно серьёзном мировом уровне (перечень действующих в настоящее время КА составе ОГ приведён в таблице 1.1.2.1), с качественной точки зрения ситуация менее оптимистична. Так, в составе отечественной группировки ДЗЗ полностью отсутствуют радиолокационные космические аппараты (КА), крайне необходимые для решения задач всепогодного мониторинга поверхности океана и суши, особенно в Арктическом регионе. Кроме того, информативность и качество данных, отечественной группировки, несмотря на наличие уникальных систем наблюдения, таких как «Метеор-М»/КМСС и «Арктика-М», уступают аналогичным параметрам зарубежных КА ДЗЗ в ИСДМ является отсутствие промышленно функционирующих систем потоковой подготовки базовых информационных продуктов достаточного уровня качества, которые используются в ИСДМ, как основа для дальнейшего анализа и обработки.

Тип КА	Количество
«Метеор-М» № 2	1
«Метеор-М» № 2-2	1
«Канопус-В»	5
«Электро-Л»	2
«Арктика-М»	1
Итого	10

Таблица 1.1.2.1 — Перечень действующих КА ДЗЗ в составе отечественной ОГ

Несмотря на имеющиеся проблемы с данными из собственных источников, в РФ активно развиваются методы и технологии работы с данными ДЗЗ. Созданы и развиваются новые, уникальные алгоритмы обработки данных и подходы к полностью автоматизированной распределённой работе со спутниковой информацией, в т.ч. для построения современных ИСДМ. В рамках данных разработок также активно развиваются технологии автоматической потоковой обработки данных. Многие из российских разработок в данной области не уступают лучшим зарубежным аналогам.

Основные возможности КНР

КНР обладает крупной, динамично развивающейся спутниковой группировкой Д33, в которой представлены практически все типы КА и приборов, использующихся для решения задач мониторинга. Так, КНР располагает системами оптического наблюдения в видимом и ИК-диапазонах с разрешением от низкого до высокодетального, микроволновыми зондировщиками, детекторами малых газовых составляющих, радиолокаторами С, Х и L-диапазонов и т.д. Фактически, КНР на сегодня имеет функциональные аналоги практически всех наиболее востребованных современными ИСДМ систем США и ЕС. Список основных КА Д33 группировки КНР приведён в таблице 1.1.2.2.

Таблица 1.1.2.2 — Перечень действующих КА ДЗЗ в составе ОГ КНР, информация с		
которых потенциально востребована различными ИСДМ		
	74	

Тип КА	Количество
FY-2	2
FY-3	3
FY-4	2
Gaofen-1, 6	3
Gaofen-3	2
Gaofen-5	2
CBERS-4A	1
Итого	15

Таблица 1.1.2.3 — Сравнение объединённых возможностей обсуждаемых ОГ ДЗЗ КНР и РФ с объединёнными возможностями аналогичной ОГ США и ЕС

Тип / название серии КА	Число	Тип / название серии КА	Число							
(КНР, РФ)	действующих	(США, ЕС)	действующих							
	КА		КА							
Низкоорбитальные метеорологические КА										
5-е поколение										
«Метеор-М» № 2, № 2-2,	3	NOAA-18, -19, Metop	4							
FY-3C										
6-е поколение										
FY-3 (D, E)	2	Terra, Aqua, JPSS1 (NOAA20),	7							
		Suomi NPP, Sentinel-3								
Геостационарные метеоро.	логические КА									
FY-2, FY-4, «Электро-Л»	6	Himawari, GOES, Meteosat	7							
Высокоэллиптические мет	еорологические КА	L								
«Арктика-М»	1	-	-							
Природоресурсные оптиче	ские КА									
Gaofen-1, 6, CBERS-4A,	8	Sentinel-2, Landsat	5							
«Канопус-В»										
Радиолокационные КА	•									
Gaofen-3	2	Sentinel-1	1							
КА для контроля загрязне	ний атмосферы	•								
Gaofen-5	2	Sentinel-5P, Aura	2							
Итого	24		26							

В то же время, насколько можно судить по открытым источникам, в части систем обработки данных для автоматизированного построения различных информационных продуктов и систем распределённого распространения данных КНР пока уступает

системам, реализованным в США и ЕС. Хотя КНР активно работает над максимально эффективным использованием потенциала собственной группировки для решения научных и прикладных задач, но, к сожалению, пока технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга в Китае не столь развиты, как в РФ, либо не являются общедоступными.

В то же время, объединённые возможности действующих гражданских КА ДЗЗ, в которых сегодня наиболее сильно заинтересованы функционирующие и развивающиеся ИСДМ, в основном сопоставимы с возможностями подобных систем США и ЕС. Это хорошо видно из данных, приведённых в таблице 1.1.2.3.

Следует, однако, учитывать то, что хотя формально состав объединённых наборов действующих КА КНР и РФ и США и ЕС сопоставим, качество информации, поступающей от КА США и ЕС, в основном несколько выше, чем качество аналогичной информации, поступающей сегодня от КА КНР и РФ. Однако, в настоящее время, значительное число проблем, связанных с более низким текущим качеством информации, во многом может быть парировано системами наземной обработки.

В то же время, массовое использование данных с КА КНР и РФ в современных ИСДМ на данный момент существенно ограничивается целым рядом проблем. К этим проблемам в первую очередь можно отнести следующее:

- Почти полное отсутствие внедрённых в массовое использование потоковых технологий доведения исходных данных до уровня базовых информационных продуктов (БИП) требуемого качества, которые впоследствии используются в различных ИСДМ при тематической, высокоуровневой обработке и анализе данных;
- Очень ограниченное число реализованных удобных, хорошо автоматизируемых схем доступа к архивам данных космических агентств и других крупных государственных организаций, также занимающихся приёмом и сбором спутниковой информации;
- Отсутствие регламентирующей основы, которая обеспечила бы действительно максимально простой, свободный доступ к государственным данным.

Именно эти недостатки существенно затрудняют массовое использование с данных КА КНР и РФ в современных ИСДМ, а в ряде случаев и делают это невозможным. То есть фактически сегодня складывается ситуация, когда даже имеющиеся технические возможности, реализованные в КА КНР и РФ, используются далеко не полностью. Также данные проблемы не позволяют во многих случаях просто заменить источники данных, использующиеся в действующих ИСДМ, с КА США и ЕС на КА КНР и РФ.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, в настоящее время актуальным становится вопрос о развитии возможностей орбитальных группировок КНР и РФ, в том числе в направлении развития технологий работы со спутниковой информацией для решения различных задач объективного мониторинга различных явлений, процессов и объектов. Такое развитие во многом должно быть направлено на совершенствование методов и инфраструктуры работы со спутниковой информацией для обеспечения функционирования действующих, а также создания И внедрения новых специализированных информационных систем дистанционного мониторинга для обеспечения устойчивости и безопасности действующих и создающихся ИСДМ за счёт снижения их зависимости от спутниковых систем США и ЕС. В настоящее время в КНР и РФ имеется вся необходимая техническая и технологическая основа для проведения подобных работ. Имеющиеся в КНР и РФ разработки, необходимые для развития данной области, фактически дополняют друг друга. Таким образом, целесообразно рассмотреть вопрос по координации и объединению усилий организаций и специалистов КНР и РФ в области развития методов и технологий создания и внедрения современных ИСДМ. Для

обеспечения такой координации и объединения оптимальным представляется развитие сотрудничества по следующим направлениям:

- 1. Обеспечение полностью автоматического взаимного доступа организаций и специалистов КНР и РФ к информации действующих спутниковых систем для включения её в действующие и создаваемые национальные ИСДМ;
- 2. Разработка и внедрение технологий и систем полностью автоматизированной обработки данных различных спутниковых систем для получения различных информационных продуктов, в первую очередь базовых;
- 3. Анализ возможности организации взаимодействия уже действующих в КНР и РФ специализированных ИСДМ, решающих сопоставимые задачи (например, гидрометеорологический мониторинг, мониторинг лесных и сельскохозяйственных ресурсов и т.д.);
- 4. Разработка и внедрение новых технологий и специализированных систем дистанционного мониторинга для обеспечения стран объективной информацией о процессах, происходящих на планете Земля без критической информационной зависимости от систем «западных» стран;
- 5. Организационная и техническая поддержка совместных работ специалистов КНР и РФ в области развития технологии и методов ДЗЗ для решения различных научных и научно-прикладных задач.

Реализацию мероприятий в рамках перечисленных направлений можно реализовывать как в рамках уже существующих межгосударственных соглашений и соглашений различных профильных ведомств и организаций, так и в рамках новых совместных инициатив. Со стороны РФ кажется целесообразным максимально активно развивать такое сотрудничество в рамках программ и проектов Министерства науки и высшего образования, Российской академии наук и Министерства природных ресурсов (в первую очередь Росгидромета). Именно в организациях РАН, Минобрнауки и МПР в последние десятилетия была создана значительная часть имеющихся в настоящее время в РФ методов, технологий и действующих специализированных информационных систем дистанционного мониторинга. Такая ситуация, видимо, связана с тем, что для реализации подобных работ необходимо иметь значительное число компетенций, не только связанных с созданием КА ДЗЗ, но и с предметными областями, в которых используются их возможности.

1.1.3 Организация автоматического сбора данных КА серии FY-3 (КНР) и их усвоения в архивы ЦКП

FengYun-3 (FY-3) — полярно-орбитальные метеорологические космические аппараты (КА) КНР на солнечно-синхронной орбите. Серия FY-3 на сегодня включает в себя пять КА, три из которых действуют. Программа FY, включающая в себя также геостационарные метеорологические KА, совместно управляется CMA (метеорологическое агентство КНР) и CNSA (национальное космическое управление КНР). В 2022 г. в рамках работ в центре коллективного пользования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» были организованы сбор, обработка и усвоение в архивы данных прибора MERSI-II, установленного на спутнике FY-3D. Прибор MERSI-II имеет 25 спектральных каналов в диапазоне от 0,4 до 12 мкм с пространственным разрешением в 250 (6 каналов) и 1000 метров (19 каналов) и полосу захвата 2900 км. По своим характеристикам прибор примерно соответствует прибору MODIS, установленному на KA TERRA и AQUA. Данные представляют собой сеансы, разбитые на фрагменты продолжительностью по пять минут, спектральные каналы и данные о геопривязке каналов сгруппированы по пространственному разрешению. Получение данных осуществляется с выделенного ftpсервера СМА, доступ к которому был предоставлен по отдельному запросу. Зона интереса, по которой собираются данные — вся территория России и прилегающие

территории. Так как в комплекте с данными не поставляется лёгких метаданных, содержащих информацию о пространственном покрытии сеанса, для определения и отсечения интересующих сеансов была реализована методика расчёта пространственного покрытия сеансов на основе орбитальных данных и упрощённой модели сенсора. Все сеансы, чьё покрытие пересекается с зоной интереса, и для которых на сервере есть полный комплект файлов, необходимый для дальнейшей обработки, автоматически скачиваются.

Скачанные данные, также автоматически, передаются на обработку для коррекции, аннотации и конвертации в формат, пригодный для усвоения в архивы ЦКП. В частности, в тепловых каналах прибора наблюдаются заметные шумовые эффекты, которые проявляются в виде полос вдоль направления сканирования. Для полноценной работы стандартных алгоритмов обработки, анализирующих текстуру снимков, данный эффект устраняется с помощью метода анализа гистограмм, после чего данные заносятся в архив, построенный на основе использования разработанной в ИКИ РАН технологии UNISAT. Пример работы алгоритма обработки приведён на рисунках 1.1.3.1., 1.1.3.2



Рисунок 1.1.3.1 — Исходное изображение тепловых каналов MERSI-II



Рисунок 1.1.3.2 — Скорректированное изображение тепловых каналов MERSI-II

Доступ к информации реализуется посредством спутникового сервиса «ВЕГА-Science» (http://sci-vega.ru) и целого ряда информационных систем, использующих возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг». При этом пользователям доступны не только исходные канальные данные, но также и различные тематические информационные продукты, динамически формируемые на основе обработки канальных данных, такие как: индексы растительности, изображения поверхности, льды и снег, дымы и облачность и другие. В перспективе планируется расширение списка доступных пользователям данных с других космических аппаратов серии FY-3.

1.1.4 Рассмотрение возможности использования слабонаправленных антенн для транспондеров в системах мониторинга подвижных объектов

Во всех системах мониторинга подвижных объектов позиционная информация является основой для комплексного анализа данных при принятии управленческих решений, в том числе для верификации сопутствующей отчётной информации. В настоящее время во многих информационных системах для получения позиционной информации используются данные Автоматической идентификационной системы АИС, (англ. AIS Automatic Identification System) и SAT AIS (спутниковый АИС).

Ранее в 2021 на примере позиционных данных в отраслевой системе мониторинга водных биологических ресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью промысловых судов (далее — OCM), показано, что при работе используемых в настоящее время транспондеров АИС, информация о положении зарегистрированных в системе мониторинга объектов становится доступной любой развитой спутниковой системе. Например, в спутниковой группировке Lemur (США) непрерывно функционирует более ста спутников АИС. Ранее было также показано, что анализ позиционной информации позволяет в значительной мере восстановить ежедневный вылов судна. Таким образом, усилия по обеспечению информационной безопасности в системе мониторинга подвижных объектов кардинально обесцениваются при использовании АИС в современной конфигурации.

Доступность сигналов транспондеров АИС для спутниковых приёмников объясняется использованием круговых всенаправленных антенн. В 2021 г. нами приведены оценки необходимой горизонтальной направленности передающей антенны транспондера, для существенного повышения защищённости позиционной информации от внешних спутниковых группировок. По вышеуказанным оценкам достаточно добиться расходимости в «горизонтальные» 0,2 радиана.

Геометрически направленность излучения антенны, обеспечивается например использованием конструкции Янга-Уда (волновой канал), имеющей характерные размеры длины волны. Для частот, используемых в АИС длина волны несколько меньше двух метров. В принципе установка слабонаправленных антенн габаритами порядка двух метров, весом менее ста килограмм и малой парусностью возможна на рыболовные суда длиной пятьдесят метров и более, которыми обеспечивается вылов более 90 % объёма морской рыбы в Российской Федерации.

Но, несомненно, желательно уменьшить габариты обсуждаемых антенн. Самый прямой путь уменьшения габаритов антенн это увеличение частоты транспондеров. Кроме этого необходимо рассмотреть возможность использование новых материалов и оптимизация геометрии передающей антенны транспондеров. В 2022 г. нами был проведен анализ литературы по данным двум направлениям.

В последние тридцать лет успешно используют метаматериалы в конструкциях малогабаритных слабонаправленных антенн. Под метаматериалами в контексте использования в антеннах понимают микроконструкции из объёмной или плоской последовательности повторяющихся ячеек из обычных материалов. С помощью метаматериалов моделируются требуемые свойства на длинах волн значительно превышающих размер составляющих ячеек. Для передающих антенн метаматериалы в большинстве случаев обеспечивают эффективные отрицательные диэлектрическую и магнитную проницаемости.

На основе анализа литературы можно сделать вывод, что ощутимое уменьшение размеров антенн достигается для антенн, окружённых метаматериалом или выполненных непосредственно из метаматериала, при этом минимально возможный размер антенны, с метаматериалом составляет $\lambda/50$. Однако необходимо отметить, что указанная выше оценка не учитывает размер экрана. Размер, которого в некоторых случаях на порядок больше размера антенны.

Кроме этого следует отметить, что до сих пор для многих схем построения антенн из метаматериалов, не удалось воспроизвести теоретически полученные характеристики на практике.

В литературе также не удалось найти описания конструкции метаматериалов для частот ниже гигагерц. Вопрос для уменьшения частот состоит в том, как меняется диэлектрическая проницаемость составляющих материалов при понижении частоты электрического поля, что требует дополнительного исследования.

В целом можно отметить, что основные успехи в развитии конструкций малогабаритных слабонаправленных антенн связаны с увеличением КПД.

В настоящее время существенного продвижения в улучшении направленности антенн на основе метаматериаллов не отмечено.

В отношении оптимизация геометрии в литературе указывают соотношение $2\pi a/\lambda = 0,6$ для предельно достижимого минимального размера *a* антенных устройств, реализованных на обычных материалах (для длины волны 2м характерный размер менее полуметра). Но такие размеры заведомо не обеспечивают наших, пусть и невысоких требований по направленности. Сравнение предлагаемых конструкций показывает, что характерный размер, обеспечивающий требуемую направленность антенны, составляет $D = 5\lambda/2$.

В литературе отмечается, что КПД и диаграммы направленности важны прилегающие к антенне конструкции (особенно металлические), поэтому считаем, что для оптимизации геометрии необходимо провести моделирование с измерениями направленности на частоте нескольких ГГц с учётом масштабирования и меньших затрат при меньших габаритах на моделирование формы антенны, её возможной многоэтажности и окружающих экранов.

В силу проведённого анализа и вышесказанного, поэтому основным направлением решения проблемы информационной безопасности позиционных данных является кардинальное организационное увеличения рабочей частоты транспондеров.

1.1.5 Анализ возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга объектов

В 2022 г. была продолжена начатая в предыдущем году работа по анализу возможности использования данных низкого пространственного разрешения при мониторинге объектов на основе осреднённых в их границах характеристик. Для этого изучалось влияние пространственного разрешения данных ДЗЗ на средние значения вегетационного индекса NDVI в границах сельскохозяйственных полей в зависимости от их площади.

Использовались три набора данных, полученных на основе информации с приборов MODIS, KMCC и MSI с пространственным разрешением 250, 60 и 10 м/пиксель соответственно. Для каждого набора использован временной ряд восстановленных ежедневных безоблачных изображений. Использована достаточно представительная выборка полей из базы системы «Bera-Science» (http://sci-vega.ru), включающая более 20 тысяч объектов в нескольких удалённых друг от друга регионах России. Для каждого поля из выборки было рассчитано среднее значение индекса NDVI за каждую дату по каждому набору данных. Был проведён корреляционный анализ полученных за одинаковый отрезок времени значений среднего индекса NDVI на поле по разным наборам данных. Анализировалось влияние площади полей на изменение коэффициента корреляции Пирсона между значениями по разным наборам данных. Также были проведены дополнительные исследования о том, как изменяются значения коэффициента корреляции Пирсона между разными регионами, при изменении шага группировки полей по площади, при учёте различного диапазона недель года, с учётом и без учёта неоднородных полей, до и после коррекции значений индекса NDVI между наборами.

Результаты анализа при учёте всего сезона вегетации показали общую высокую согласованность: даже для полей с размером менее 10 га значения коэффициента корреляции Пирсона превысило 0,75 для пар КМСС-MSI и MODIS-MSI и 0,85 для пары MODIS-KMCC. Однако было выявлено, что коэффициент корреляции Пирсона существенно падает при анализе данных в отдельные периоды года: в начале сезона в паре MODIS-MSI для полей площадью менее 2,5 га до 0,45, площадью от 2,5 га до 5 га — до 0,58. Далее минимальное за период значение равномерно растёт с увеличением полей и при площадях более 15 га уже для всех недель составляет более 0,82. Другие факторы (регион, коррекция значений, шаг группировки по площади, неоднородность) имели незначительное влияние.



Рисунок 1.1.5.1 — Графики изменения коэффициента корреляции Пирсона в парах MSI-MODIS (A) и MSI-KMSS (B) независимо в каждую неделю года для каждой группы площадей полей. Линии разного цвета соответствуют указанному в легенде диапазону площадей (от, до). На рисунке 1.1.5.1.С гистограмма количества полей в каждом диапазоне

Чтобы равномерно оценить зависимость корреляции в каждой группе площадей от того, за какой период были получены измерения, был построен график, приведённый на рисунке 1.1.5.1. На нем независимо для каждой недели года построена зависимость коэффициента корреляции Пирсона для каждой группы площадей поля. При расчёте каждой точки отбирались только значения в определённую неделю года и только для одной группы полей. На рисунке 1.1.5.1А — для пары MODIS-MSI, на рисунке 1.1.5.1В — для пары KMSS-MSI. По оси ординат — значения коэффициента корреляции Пирсона. По

оси абсцисс — недели года. Как видно из графика, для полей с небольшой площадью корреляция в начале и конце сезона существенно ниже, чем в середине. Такое снижение корреляции для тех же групп полей по сравнению с другими периодами объясняется тем, что в начале года происходит распашка мелких полей, которые на данных низкого пространственного разрешения неразличимы. Однако при изучении всего сезона вегетации в анализ попадают и более поздние даты, когда значения внутри поля сравнимы с окружением, что приводит к сопоставимым значениям между наборами с разным пространственным разрешением. Основные значения коэффициента корреляции Пирсона за разные периоды в зависимости от площади полей приведены в таблице 1.1.5.1.

Коэффициент	Пары	Диапазон площадей [от; до], га											
корреляции Пирсона		[0; 2,5]	[2,5; 5]	[5; 10]	[10; 15]	[15; 22]	[22; 30]	[30; 40]	[40; 55]	[55; 75]	[75; 100]	[100; 200]	[200; 999]
Минимальный за период	MSI – MODIS	0.43	0.58	0.68	0.78	0.82	0.88	0.90	0.92	0.93	0.94	0.94	0.95
вегетации	MSI – KMSS	0.42	0.59	0.64	0.71	0.72	0.77	0.79	0.82	0.84	0.89	0.89	0.92
Средний за период с 15-ю	MSI – MODIS	0.75	0.80	0.83	0.86	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97
по 35-ю неделю	MSI – KMSS	0.76	0.81	0.83	0.85	0.86	0.88	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.94
Средний за период с 10-й	MSI – MODIS	0.61	0.70	0.82	0.87	0.88	0.91	0.92	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97
по 40-ю неделю	MSI – KMSS	0.66	0.69	0.82	0.87	0.87	0.90	0.90	0.92	0.93	0.94	0.94	0.95

Таблица 1.1.5.1 — Значения коэффициента корреляции Пирсона в парах MSI – MODIS и MSI – KMSS в зависимости от площади полей

Таким образом, можно сделать основные выводы исследования о пригодности использования наборов данных с разным пространственным разрешением при мониторинге объектов. Для полей площадью более 10–15 га ход среднего индекса NDVI имеет схожие тренды по данным с пространственным разрешением 250, 60 и 10 м/пиксель. Для полей меньшего размера присутствуют большие различия в период наименьших значений индекса NDVI, соответствующих распашке. Точный критерий пригодности данных с низким пространственным разрешением для анализа объектов определённой площади зависит от задачи и используемого периода года, при этом необходимо ориентироваться на представленные в таблице 1.1.5.1 и на графиках на рисунке 1.1.5.1 значения.

1.2 Создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования

1.2.1 Развитие подходов использование возможностей информационных систем семейства ВЕГА, для решения региональных задач дистанционного мониторинга с.-х. земель

Непрерывное развитие систем семейства ВЕГА позволяет обеспечивать растущие различных пользователей, включая региональные потребности органы агропромышленного комплекса (АПК). Реализованные в настоящее время в системе подходы к обработке данных спутникового мониторинга эффективно используются для получения различных количественных И качественных характеристик сельскохозяйственных земель.

В 2022 г. работы по картографированию, анализу использования и состояния сельскохозяйственных земель с применением возможностей сервиса ВЕГА выполнялись в

интересах министерств сельского хозяйства следующих областей: Московской, Калужской, Пензенской, Иркутской, Амурской.



Рисунок 1.2.1.1 — Примеры результатов, полученных с использованием системы ВЕГА по территории Московской области в 2022 г.: *а* — слой культур; *б* — фрагмент слоя, иллюстрирующего долю площади земельных участков, введённых в оборот в 2021 г.; *в* — слой ареалов произрастания борщевика Сосновского, г — фрагмент слоя земельных участков сельскохозяйственного назначения с подозрениями на нецелевое использование (красным цветом показаны земельные участки сельхозназначения, чёрной штриховкой — участки нецелевого использования)

На базе системы решались следующие актуальные задачи анализа состояния сельскохозяйственных земель:

- оценка используемости сельскохозяйственных угодий;
- картографирование рабочих участков пашни, занятых однородной сельскохозяйственной растительностью;
- распознавание выращиваемых культур или групп культур (рисунок 1.2.1.1*a*), проверка сведений о культурах, заявленных сельхозтоваропроизводителями;
- оперативный мониторинг состояния посевов, включая оценку их потенциальной продуктивности и анализ гибели посевов на отдельных полях;
- ретроспективный и оперативный анализ эффективности мероприятий по вводу неиспользуемой пашни в оборот (рисунок 1.2.1.16);
- картографирование ареалов зарастания сельскохозяйственных угодий древеснокустарниковой растительностью;
- картографирование ареалов современного произрастания борщевика Сосновского (рисунок 1.2.1.1*в*);
- оперативный мониторинг эффективности мероприятий по борьбе с борщевиком Сосновского;
- картографирование изменения ареалов произрастания борщевика Сосновского за несколько лет;
- картографирование нецелевого использования земель сельскохозяйственного назначения (рисунок 1.2.1.1*г*).

Решение такого широкого круга задач в области АПК обеспечивается благодаря комплексному использованию следующих возможностей системы ВЕГА:

- онлайн-доступ к архивным и оперативным спутниковым данным и производным продуктам, включая безоблачные или малооблачные композитные изображения различной детальности, сформированные за различные интервалы времени. В частности, одними из наиболее востребованных для решения задач АПК стали ежемесячные композиты Sentinel-2, формируемые и регулярно актуализируемые с 2019 г.;
- онлайн-доступ к различным готовым тематическим продуктам, регулярно получаемым на основе данных дистанционного зондирования Земли (карты пахотных земель и групп культур);
- доступ к различным инструментам интерактивной и автоматизированной обработки и анализа спутниковых данных (векторный редактор, цветовой синтез изображений, в том числе разновременных, классификация, как попиксельная, так и объектно-ориентированная, сегментация, алгебра изображений, расчёт статистики по объектам с визуализацией результатов в виде карт и графиков и др.).

По результатам проводимых работ по использованию возможностей системы «Вега» постоянно проводится совершенствование инструментов и методик анализа данных позволяющих расширять возможности системы для решения различных научных задач в области развития технологий и систем мониторинга состояния сельскохозяйственных земель и посевов.

1.2.2 Первые результаты использования технологии контроля данных статистических данных о с.-х. землях на основе методов дистанционного мониторинга

В августе 2021 г. Федеральной службой государственной статистики (Росстат) проводилась сельскохозяйственная микроперепись (СХМП) — выборочное федеральное статистическое наблюдение в отношении отдельных объектов сельскохозяйственной переписи на основе выборки не менее 30 % объектов сельскохозяйственной переписи, проводимое не позднее чем через пять лет после очередной сельскохозяйственной переписи (последняя сельхозперепись проводилась в 2016 г.).

В 2020 г. с целью перехода на новый уровень верификации, получаемой в рамках СХМП статистической информации, совместно ИКИ РАН и ООО «ИКИЗ» была разработана Технология контроля данных сельскохозяйственной микропереписи с использованием средств спутникового мониторинга (ТКДСМ). ТКДСМ призвана обеспечить контроль данных о площадях следующих видов сельскохозяйственных угодий:

- пашни, в том числе общей посевной площади;
- залежи;
- сенокосов и пастбищ

на уровне муниципальных районов и субъектов Российской Федерации. В ТКДСМ использовались подходы к обработке спутниковых данных, развиваемых в ИКИ РАН, в том числе в рамках темы мониторинг. Для реализации технологии также использовались возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

В 2020 г. была проведена апробация технологии контроля по более, чем 100 пилотным районам, в 2021 г. возможности ТКДСМ использовались Росстатом непосредственно при проведении СХМП по всем районам страны (в которых проводилась микроперепись), а в 2022 г. — при подведении окончательных итогов СХМП.

На рисунке 1.2.2.1 приведена информация о площадях сельскохозяйственных угодий, полученная по результатам проведения СХПМ и спутникового мониторинга, в разрезе федеральных округов и страны в целом



Рисунок 1.2.2.1 — Площади сельскохозяйственных угодий по данным СХМП и спутникового мониторинга

Как видно из рисунка 1.2.2.1, в целом по стране наиболее существенные расхождения площадей наблюдаются для сенокосов и пастбищ (площадь по данным ДЗЗ выше на 49,2 %) и залежи (данные СХМП превышают данные Д33 на 16,3 %). Эти расхождения во многом обусловлены неоднозначностью определений этих видов угодий, используемых при проведении СХМП. Так, например, под сенокосами подразумеваются сельскохозяйственные угодья, систематически используемые под сенокошение, в то время как пастбища — это сельхозугодия, которые не только систематически используются для выпаса животных, но и земельные участки, пригодные для пастьбы скота. При этом критерии пригодности участков для выпаса скота в определении не установлены. Под залежью подразумеваются земельные участки, которые ранее использовались под пашню и более 1 года (начиная с осени 2019 г.) не используются под посевы сельхозкультур и не подготовлены под пар. При этом в определении не указано, насколько давно такой участок мог использоваться под пашню. Установление этого срока важно, поскольку технологии спутникового мониторинга обеспечивают возможность получения информации об использовании пахотных земель вплоть до середины 1980-х гг. по всей территории страны.

Наименьшие расхождения между данными СХМП и Д33 наблюдаются по пашне (СХМП меньше Д33 на 3 %) и посевной площади (СХМП больше на 4,3 %). Ниже приведены результаты анализа по этим категориям земель для районов, в которых

площадь таких земель по данным СХМП превышала 50 тыс. га. По площади пашни данные спутниковых наблюдений подтвердили результаты микропереписи в 84 % районов из 705, по общей посевной площади — в 93 % районов из 617 (в рамках ТКДСМ данные СХМП считаются подтверждёнными, если их расхождение с данными Д33 не превышает 10 % по площади пашни и 15 % — по общей посевной площади) (рисунок 1.2.2.2).



Рисунок 1.2.2.2 — Статус районов по расхождению значений площади пашни и общей посевной площади, полученных по данным спутниковых наблюдений и данным СХМП (приведены районы с площадью заданной категории земель более >50 тыс. га данным СХМП)

Важно отметить, что на этапе подведения итогов СХМП в том числе с использованием ТКДСМ Территориальными органами государственной статистики было внесено исправлений в данные о площади пашни более, чем по 1300 районам, а об общей посевной площади — более, чем по 1000 районам. Но даже после всех внесённых корректировок остались районы с подозрением на некорректность сведений, собранных в рамках СХМП. Например, в ходе совместного анализа статистической информации и картографических материалов, полученных на базе ТКДСМ, выявлено, что в ряде районов по данным СХМП площадь пашни превышает данные спутникового мониторинга из-за вероятного учёта в площади пашни площади в том числе неиспользуемой пашни (в то время как в рамках СХМП в качестве пашни должны учитываться только те сельхозугодия, которые систематически обрабатываются и используются под посевы сельскохозяйственных культур, включая посевы многолетних трав, а также чистые пары). В отдельных районах площадь пашни по данным СХМП превышает данные спутниковых наблюдений из-за возможного двойного учёта площадей (за земли, переданные в аренду, отчитался и собственник, и арендатор этих земель, в то время как по методике проведения СХМП отчитаться должен был только арендатор),

- Проведённая за период 2020–2022 гг. работа в целом показала следующее:
- разработан независимый инструмент подтверждения статистических данных ТКДСМ;
- разработанный инструмент позволяет выявлять районы, статистические данные по которым требуют проведения дополнительной проверки;

- разработанный инструмент способствует повышению качества собираемой статистической информации за счёт проведения уточнения статданных по районам с выявленными подозрениями;
- имеющаяся в настоящее время версия технологии контроля готова к использованию при проведении последующих сельскохозяйственных переписей, а также ежегодных федеральных статистических наблюдений в отношении таких категорий сельхозземель, как пашня и общая посевная площадь.

1.2.3 Развитие возможностей сервиса Вега для оценки состояния посевов и особенности развития культур в сезоне 2021–2022 гг.

В 2022 г. продолжены работы по развитию возможностей дистанционной оценки состояния посевов с использованием сервиса Вега. В частности, разработан инструмент формирования карт отклонения пиковых значений NDVI озимых и яровых анализируемого года от максимальных значений индекса этих культур за отдельные годы (ранее такие карты формировались только относительно среднемноголетних максимумов). Ввиду наличия во многих субъектах высокой положительной корреляции NDVImax озимых с урожайностью озимых зерновых культур и NDVImax яровых с урожайностью яровых зерновых, такие карты могут быть использованы для заблаговременной предварительной оценки потенциальной продуктивности посевов. Разработанный инструмент применён для оценки состояния посевов в сезоне 2021-2022 гг.

Согласно данным Минсельхоза России, 2022 год стал рекордным по валовому сбору зерновых и зернобобовых культур (на 1 декабря он составил 156,2 млн т), значительно превысив предыдущие рекорды (2017 г. — 135,5 млн т, 2020 г. — 133,4 млн т).

Дистанционное наблюдение показало, что в большинстве районов субъектов федеральных округов России — лидеров по производству озимых зерновых культур (ЮФО, ЦФО, ПФО, СКФО) NDVImax озимых превышал среднемноголетние максимумы, превышал или был сопоставим с максимумами наиболее урожайных за последнее пятилетие периодов (в ЮФО и СКФО — 2017 г., в ЦФО и ПФО — 2020 г.) (рисунок 1.2.3.1).



Рисунок 1.2.3.1 — Порайонные отклонения NDVImax озимых культур 2022 г. от среднемноголетних максимумов индекса и NDVImax 2020 и 2017 гг.

Таким образом, можно сказать, что данные спутниковых наблюдений подтверждают сообщения о достижении рекордного урожая зерновых и зернобобовых культур в России в 2022 г. в части озимых зерновых культур.

В отличие от озимых культур данные дистанционного мониторинга показывают более разнородную картину состояния яровых культур под урожай 2022 г. (рисунок 1.2.3.2).

В подавляющем количестве основных зернопроизводящих районов ЦФО NDVImax яровых 2022 г. находился на сопоставимом уровне с показателями 2020 г. (в этот год в ЦФО

получена максимальная за последние 5 лет урожайность яровых зерновых и зернобобовых). Лишь в отдельных районах NDVImax яровых 2022 г. отклонялся в отрицательную или в положительную сторону от показателей 2020 г. Таким образом, согласно данным спутниковых наблюдений, в целом по ЦФО урожайность яровых зерновых и зернобобовых оценивается на уровне, близком к максимальному за последние 5 лет.



Рисунок 1.2.3.2 — Порайонные отклонения NDVImax яровых культур 2022 г. от среднемноголетних значений и значений NDVImax последних 5 лет: *а* — Европейская; *б* — Азиатская части России

В большинстве районов ПФО NDVImax яровых 2022 г. находился на близком уровне с пиковыми значениям индекса 2017 и 2020 гг. (за последние 5 лет в эти годы здесь была получена наибольшая урожайность яровых зерновых и зернобобовых). При этом в большинстве южных и восточных районов округа отмечается отклонение значений NDVImax яровых 2022 г. в положительную сторону от значений 2020 г., а в Саратовской области — ещё и от значений 2017 г. Исходя из этого по данным спутникового мониторинга потенциальная урожайность яровых зерновых и зернобобовых в ПФО (особенно в его южной и восточной частях) также оценивается на уровне, близком к рекордному за последнее пятилетие.

Во многих зернопроизводящих районах СФО NDVImax яровых 2022 г. находился на уровне, близком к NDVImax предшествующих лет. При этом значения вегетационного индекса существенно отклонялись в отрицательную сторону от значений всех предыдущих лет на юге Омской области и на западе Алтайского края. То есть по данным спутниковых наблюдений в СФО урожайность яровых зерновых и зернобобовых в целом оценивается на среднем за последние годы уровне, а в юго-западной части округа — на более низком уровне.

В значительном количестве районов Краснодарского края, Ростовской области и юга Волгоградской области NDVImax яровых 2022 г. отклонялся в отрицательную сторону от NDVImax 2017, 2019, 2020 и 2021 гг. (годы, в которые в ЮФО наблюдались более высокие значения урожайности яровых зерновых и зернобобовых культур) и был в целом сопоставим с NDVImax 2018 г. (за последние 5 лет в этом году здесь наблюдалась минимальная урожайность яровых зерновых и зернобобовых). В северной части Волгоградской области NDVImax яровых 2022 г. отклонялся в положительную сторону от максимумов индекса 2017–2020 гг. и был близок к показателям 2021 г. В связи с этим по данным спутниковых наблюдений близкая к рекордной урожайность яровых зерновых и зернобобовых прогнозируется только в северной части ЮФО.

В большинстве районов УФО NDVImax яровых 2022 г. был на сопоставимом уровне с NDVImax рекордного за последние 5 лет по урожайности 2017 г. Таким образом, в УФО потенциальная урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур оценивается по спутниковым данным на уровне рекордной за последние годы.

Во многих районах СКФО NDVImax яровых 2022 г. отклонялся от максимальных значений индекса предыдущих лет (том числе 2021 и 2017 гг., в которые в среднем по округу была зафиксирована наибольшая урожайность яровых зерновых и зернобобовых) в отрицательную сторону. То есть по данным спутникового мониторинга урожайность яровых зерновых и зернобобовых в СКФО в 2022 г. оценивается не на самом высоком уровне.

Ввиду большого разнообразия условий выращивания яровых зерновых и зернобобовых культур в России сделать однозначный вывод о подтверждении данными спутниковых наблюдений сообщения о достижении рекордного урожая этой группы культур в 2022 г. затруднительно. Несмотря на то, что в одних районах (например, в Ростовской области, на юге Омской области и др.) по данным спутниковых наблюдений потенциальная урожайность яровых зерновых и зернобобовых оценивается не на самом высоком за последние 5 лет уровне, в других районах (например, в Саратовской, Курганской областях и др.) она, напротив, оценивается на уровне рекордной.

1.2.5 Алгоритм автоматической фильтрации облачных данных для решения задач объектного дистанционного мониторинга

Для задач мониторинга и изучения различных природных и антропогенных объектов в 2020-2021 годах велась разработка специальной технологии, реализующей автоматический расчёт различных характеристик таких объектов на основе спутниковых данных. Данная технология применяется для мониторинга объектов, представляющих собой «однородные» участки, для которых необходимо рассчитывать осреднённые по их

площади характеристики. Такими объектами могут быть сельскохозяйственные поля, участки однородного леса, водные объекты и т.д. Созданная технология также позволяет на основе рассчитанных значений строить временные ряды характеристик объектов, анализируя которые можно делать вывод об их состоянии. Одной из проблем при построении временных рядов является фильтрация шумов. Под шумами понимаются значения характеристик, рассчитанные по спутниковым изображениям, на которых над объектами явно наблюдается облачность. При этом использование стандартных средств фильтрации облачности, а именно «попиксельного» анализа маски облачности, не всегда эффективно из-за недостаточных точностей масок. В 2022 г. был разработан алгоритм, который позволил формировать автоматически очищенные от шумов ряды характеристик объектов при низком качестве фильтрации облачности. Данный алгоритм основан на фильтрации по проценту площади, занятой облачностью в окрестности объекта на спутниковом изображении. конкретном Он представляет собой следующую последовательность шагов:

- для исследуемого объекта и сцены спутниковых данных формируется маска облачности (это может быть стандартная маска облачности, предоставляемая поставщиками спутниковых данных, или результат детектирования облачности в пикселе любым другим способом);
- по сформированной маске рассчитывается процент площади, занятой облачностью в окрестности анализируемого объекта.
- если процент площади, занятой облачностью, превышает значение выбранного порога, то считается, что выбранная сцена не пригодна для дальнейшего расчёта, и она не используется для формирования ряда характеристик наблюдаемого объекта.

Были проведены работы по нахождению оптимального порога облачности, при котором предлагаемый алгоритм давал бы наилучший результат, т.е. было бы минимальным значение суммарной ошибки, состоящей из ошибок первого и второго рода. В рассматриваемом случае к ошибкам первого рода относятся облачные сцены, оставшиеся после фильтрации в ряду наблюдений, а к ошибкам второго рода — пропуски (не включение в ряд) сцен, на которых непосредственно над объектом нет облачности. Оптимальное значение порога рассчитывается по формуле 1:

$$\varepsilon^* = \arg\min_{\varepsilon} \left(\frac{N_e(\varepsilon) + N_m(\varepsilon)}{N} \right),\tag{1}$$

где: N_e — количество лишних (extra) облачных изображений, попавших в выборку после фильтрации, N_m — количество пропущенных (missed) в результате фильтрации безоблачных изображений, N — размер выборки.

В качестве выборки были взяты наборы данных для ряда объектов (18 штук), расположенных на географически разных территориях и наблюдаемых в период с 2013 по 2021 г. Анализ показал, что для всех объектов независимо от размера окрестности наблюдается диапазон значений порога облачности (10–20%), при котором обеспечиваются низкие значения суммарной ошибки (рисунок 1.2.5.1). И в качестве оптимального значения порога облачности может быть взято значение из полученного диапазона.

Для тех случаев, когда стандартные маски имеют значительные ошибки и не могут использоваться для расчёта процента площади, занятой облачностью, применяется специально реализованный алгоритм детектирования облаков в пикселе. Алгоритм основан на значениях коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в голубом канале *Rblue* (456—523 и 450—510 мкм для MSI (Sentinel-2) и OLI (Landsat-8) соответственно) и нормализованного разностного индекса снега NDSI, вычисляемого с помощью значений КСЯ в зелёном канале (542—577 и 530–590 мкм для MSI (Sentinel-2) и OLI (Landsat-8) соответственно) и КСЯ в SWIR канале (1565–1655 и 1570–1650 мкм для MSI (Sentinel-2) и

OLI (Landsat-8) соответственно). Если значение КСЯ в голубом канале ниже выбранного порога, то пиксель относится к безоблачному, в противном случае он считается «потенциально облачным». При этом если в «потенциально облачном» пикселе значение индекса снега NDSI не превышает заданный порог, то пиксель считается облачным, иначе он относится к снежному покрову.



Рисунок 1.2.5.1 — Функция суммарной ошибки от порога облачности, построенная для объектов, расположенных в географических зонах, в которых процент облачных дней в году: *a* — 50 %, *б* — менее 20 %. Ряды сформированы на основе анализа данных наблюдений прибора MSI



Рисунок 1.2.5.2 — Временные ряды со значениями характеристики объекта (оранжевый цвет — очищенные вручную ряды, синий цвет — ряды на различных этапах фильтрации): *a* — до фильтрации; *б* — после «маскирования» по стандартной маске облачности; *в* — после фильтрации выбросов для «маскированных» данных; *г* — после фильтрации «маскированных» данных по порогу облачности с помощью алгоритма по NDSI

На рисунке 1.2.5.2 приведён пример применения разработанного алгоритма фильтрации для одного из исследуемых объектов. В качестве размера окрестности был взят размер, равный четырём характерным размерам объекта, а значение порога облачности выбрано равным 15 %. На рисунках представлены очищенные вручную ряды характеристик объектов (оранжевый цвет), сформированные на основе данных коллекции Sentinel 2 без атмосферной коррекции, совместно с рядами характеристик, полученных на различных этапах фильтрации (синий цвет).

Фильтрация выбросов проводилась путём расчёта верхней границы доверительного интервала значений характеристики внутри скользящего окна и затем отбрасыванием всех значений, превосходящих эту границу.

В таблице 1.2.5.1 приведены значения суммарной ошибки, полученные в результате применения двух способов фильтрации для трёх объектов, расположенных в зонах с разным количеством облачных дней в году.

Объект	Кол-во изображений	Фильтрация выбросов	Фильтрация по порогу
1	344	44 %	17 %
2	394	29 %	11 %
3	129	28 %	12 %

Таблица 1.2.5.1 — Значения суммарной ошибки, рассчитанные по результатам использования различных видов фильтрации.

1.3 Поддержка и развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений в том числе решения междисциплинарных задач (в настоящее время возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг» используют около 100 научных организаций и университетов, расположенных практически на всей территории России)

1.3.1 Текущие задачи ЦКП и их актуальность

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие спутниковых систем дистанционного зондирования Земли. При этом наблюдается взрывной рост объёмов спутниковых данных, появляются новые, более совершенные приборы, растёт качество данных. Расширяется область применения данных дистанционного зондирования Земли, которые в настоящее время широко используются для решения самых разных исследовательских и прикладных задач, связанных с мониторингом природной среды и антропогенных объектов. Все это, в свою очередь, приводит к существенному возрастанию требований, предъявляемых к системам, обеспечивающим работу со спутниковой информацией.

Сложившаяся ситуация потребовала разработки принципиально новых подходов и методов организации работы со спутниковыми данными, которые должны обеспечить эффективную работу с большими объёмами постоянно обновляющейся информации. Создание таких подходов и методов сегодня привело фактически к разработке новых технологий построения информационных систем, ориентированных на организацию эффективной работы со спутниковыми данными для решения различных научных и прикладных задач. Такие технологии сегодня позволяют не только обеспечить пользователям доступ к интересующим их спутниковым данным, но и предоставить им разнообразные инструменты и сервисы для их обработки и анализа на базе использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов коллективного пользования. Это позволяет при реализации различных научных и прикладных проектов во многих случаях избежать необходимости создания дорогостоящих программно-аппаратных комплексов для хранения, обработки и анализа информации и существенно понижает расходы как на создание, так и на эксплуатацию специализированных информационных систем дистанционного мониторинга.

Именно на базе таких подходов и технологий в 2012 г. был создан центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды «ЦКП ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/). Основной целью создания ЦКП было развитие принципиально новой инфраструктуры для работы с данными ДЗЗ, предназначенной для решения различных научных и прикладных задач и обеспечивающей не только доступ к многолетним постоянно пополняющимся архивам спутниковых данных, но и возможность их обработки и анализа.

Со времени создания центра коллективного пользования актуальность описанного выше подхода только возросла. На текущий момент основными задачами ЦКП «ИКИ-Мониторинг» являются дальнейшее совершенствование технологий работы со спутниковыми данными в интересах самых различных научных и прикладных проектов, включая междисциплинарные, и предоставление пользователям доступа к постоянно растущим архивам спутниковых данных с использованием постоянно расширяющегося набора инструментов для их обработки и анализа.

1.3.2 Структура и технические возможности ЦКП и их развитие в 2022 году

ЦКП «ИКИ-Мониторинг» построен на основе использования технологий и базового программного обеспечения, разработанных в отделе «Технологии спутникового мониторинга» ИКИ РАН (http://smiswww.iki.rssi.ru/). Одним из важнейших преимуществ используемых технологий является практически полная автоматизация всех процессов по сбору, архивации, обработке и предоставлению пользователям спутниковым данных. За решение основных технических задач отвечают представленные ниже программные подсистемы.

<u>Подсистема сбора данных</u> предназначена для получения из различных источников как исходных спутниковых данных, так и различных информационных продуктов, полученных на основе их обработки, а также предварительной подготовки данных для архивации. Основным достоинством реализованной подсистемы является полная автоматизация процессов получения и предварительной обработки спутниковых данных.

<u>Подсистема архивации данных</u> отвечает за архивацию спутниковых данных и продуктов, полученных на основе их обработки, а также за предоставление доступа к метаданным и данным в архивах на уровне программных интерфейсов. Работа с архивами ЦКП «ИКИ-Мониторинг» реализована на основе использования унифицированной технологии ведения сверхбольших распределённых архивов спутниковых данных UNISAT. Ключевыми её преимуществами являются реализация механизма «виртуальных информационных продуктов», т.е. продуктов, которые динамически в режиме реального времени формируются по запросу пользователя на основе обработки имеющейся в архивах информации, а также гибкая поддержка инструментов для удалённого анализа и обработки данных.

Подсистема обработки данных предназначена для проведения потоковой обработки поступающих в архивы новых данных, а также для построения различных информационных продуктов, получаемых на основе обработки уже имеющихся в архивах данных. Программная реализация основана на использовании разработанной в ИКИ РАН технологии и соответствующего ей программного обеспечения, функционал которого постоянно расширяется добавлением модулей, отвечающих за новые типы обработки. Для эффективного управления работой многих десятков серверов обработки данных, входящих в состав программно-аппаратного комплекса ЦКП «ИКИ-Мониторинг» была разработана и внедрена технология организации распределённой многопотоковой обработки спутниковых данных.

Подсистема обеспечения доступа к данным реализует три основных функциональных блока:

- спутниковый информационный сервис «Вега-Science» (http://sci-vega.ru), обеспечивающий для удалённых пользователей интерактивный доступ к архивам данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг», а также проведение их обработки и анализа;
- программные интерфейсы для доступа к данным из тематических информационных систем;
- программный шлюз, позволяющий предоставлять доступ к данным, физически располагаемым во внешних архивах спутниковых данных.

Для построения многофункциональных картографических веб-интерфейсов используется разработанная в ИКИ РАН технология GeoSmis. Она предназначена для создания картографических веб-интерфейсов, обеспечивающих доступ к сверхбольшим распределённым архивам спутниковых данных, а также к инструментам для их анализа и обработки. Для получения интерактивных инструментов анализа данных, таких как динамические отчётные формы, гистограммы и графики, используются также возможности BI-технологий (Business Intelligence).

Подсистема управления контроля предназначена обеспечения и для бесперебойного функционирования центра коллективного пользования, включая различные территориально распределённые блоки, входящие в его состав. Она, в частности, позволяет автоматически детектировать сбои и неполадки в работе различных компонент программно-аппаратного комплекса ЦКП «ИКИ-Мониторинга» и эффективно отслеживать процесс их устранения. Для интеграции всех программных инструментов подсистемы была разработана специализированная система документирования и контроля проектов (СДКП).

В работе комплекса активно используется различное свободно-распространяемое программное обеспечение. В частности, в качестве СУБД используется MySQL или MariaDB, для ряда задач также используются решения на базе PostgreSQL, в качестве HTTP-сервера — Apache/nginx, а для обработки спутниковых изображений активно применяются такие программные пакеты, как GDAL/OGR, GRASS GIS, Proj, Imager, а также специализированные пакеты для обработки спутниковых данных — SeaDAS, SNAP, OpenCV и др.

В 2022 г. были продолжены работы по совершенствованию используемых нами для задач ведения долговременных архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» технологий и программного обеспечения. В частности, были модернизированы программные компоненты, отвечающие за бесперебойное функционирование распределённого файлового хранилища, реализованного на основе стандартного для UNIX-систем протокола NFS. Также был внесён ряд изменений в программное обеспечение, отвечающее за получение информации из каталогов распределённых архивов, что позволило в ряде случаев существенно ускорить эту операцию. Активно развивались инструменты для контроля поступления в архивы широкого спектра различных типов спутниковой информации как из внешних центров данных, так и с приёмных станций организаций, которые участвуют в работе ЦКП «ИКИ-Мониторинг». В частности, реализован специализированный служебный интерфейс, позволяющий не только отслеживать ошибки или задержки поступления данных и реакцию на них специалистов, но и получать различную статистическую информацию по ним.

Функционирование ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в настоящее время обеспечивает сложный программно-аппаратный комплекс, состоящий более чем из 140 серверов различного назначения, работающих под управлением операционных систем семейств UNIX и Windows. Для хранения файлов спутниковых данных используется 30 UNIX-серверов и 5 специализированных систем хранения (NAS), а для обработки спутниковых данных, включая динамическое формирование требуемых для интерфейсов

информационных продуктов — более 100 физических и виртуальных Windows- и UNIXсерверов. Остальной парк серверов функционирует под операционной системой UNIX и обеспечивает решение задач по сбору, архивации, доступу к данным, управлению процессами обработки и обеспечению бесперебойной работы комплекса.

В 2022 г. было введено в строй 8 серверов различного назначения, а также расширена дисковая система хранения, суммарная дисковая ёмкость, доступная для хранения данных в настоящее время составляет около 8,5 Пбайт.

1.3.3 Архивы спутниковых данных и их наполнение в 2022 году

В настоящее время архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» содержат данные более чем 50 различных приборов наблюдения, получаемых с более чем 55 российских и зарубежных спутников ДЗЗ. Постоянно расширяется зона интересов, по которой в центре осуществляется сбор и архивация данных, которая по большей части зависит от интересов проектов, использующих возможности центра. Благодаря сотрудничеству ИКИ РАН и «НИЦ «Планета» пользователи центра имеют возможность работы с глобальными покрытиями данных, получаемых некоторыми российскими системами наблюдений. Кроме этого, также реализован доступ к некоторым из данных, содержащихся в архивах ЕТРИС ДЗЗ. Область покрытия данными спутников Landsat и Sentinel, имеющимися в архивах центра, в настоящее время составляет около 30 % площади поверхности земли. В эту область входит вся Северная Евразия, включая арктические территории, приграничные моря России, а также ряд регионов в Африке, Азии, Северной и Южной Америке. Существенно, что в архивах центра в настоящее время накоплены достаточно длинные ряды данных. Например, архивы данных спутников серии Landsat начинаются с марта 1984 г.

В 2022 г. в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» поступило более 1 Пбайт новых спутниковых данных. Было реализовано поступление данных китайского КА FY-3D, а также существенно увеличено поступление данных КА серии «Канопус-В», принимаемых в центрах НИЦ «Планета», за счёт автоматизации их первичной обработки. Кроме того, был накоплен архив данных прибора VIIRS КА Suomi NPP и результатов их обработки и организовано его оперативное пополнение на всю территорию России с 2013 г. по настоящее время. Также в этом году была доработана схема поступления данных прибора МСУ-ГС-ВЭ, установленного на российском гидрометеорологическом спутнике «Арктика-М».

В 2022 г. была проведена ревизия и оптимизация архивов данных высокого и среднего разрешений. Были удалены дублирующиеся данные, данные неактуальных версий обработки и данные с предельными значениями покрытия облачностью. Кроме того, была пересмотрена политика сбора данных в сторону её ужесточения с точки зрения максимально допустимого покрытия облачностью, что также несколько снизило объёмы получаемых данных». В результате суммарный объем архивов спутниковых данных, доступных пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг» увеличился только на 300 Гб и достиг 5,6 Пбайт. При этом ежедневно в архивы поступает около 3 Тбайт новых данных. Информация о составе архивов спутниковых данных, доступных пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг», по состоянию на 13.12.2022 приведена в таблицах 1.3.3.1 и 1.3.3.2. Детальная информация о наличии данных в архивах может быть получена по ссылке <u>http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6</u>.

Все вышеупомянутые данные доступны в режиме непосредственного доступа в информационной системе «Bera-Science» (sci-vega.ru). Также в рамках функционирования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ведутся различные архивы промежуточных спутниковых данных, используемых для формирования доступных пользователям информационных продуктов.

В архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» также содержатся метеоданные NCEP/NCAR по всему земному шару, получаемые из Национального центра атмосферных

исследований NCAR (https://ncar.ucar.edu/) с 2000 г. по настоящее время. В состав метеоданных входят данные реанализа на регулярной сетке с шагом 0,5° (ds093.0/ds094.0) и данные прогноза на регулярной сетке с шагом 1° (ds335.0).

Тип данных	Кол-во	Размер, Гбайт
Данные геостационарных спутников	16 305	4 975
Данные радиолокационных спутников	1 767 193	791 069
Данные низкого разрешения (>1 км)	6 325 619	9 053
Данные среднего разрешения (100 м – 1 км)	10 026 570	386 066
Данные высокого разрешения (<100 м)	19 801 956	4 172 278

Таблица 1.3.3.1 — Статистика наличия данных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Таблица 1.3.3.2 — Статистика наличия данных в архивах НИЦ «Планета»

Тип данных	Кол-во	Размер, Гбайт
Данные геостационарных спутников	1 866 462	41 006
Данные низкого разрешения (>1 км)	1 422 793	24 507
Данные среднего разрешения (100 м – 1 км)	11 677 170	321 367
Данные высокого разрешения (<100м)	2 122 592	190 997

1.3.4 Основные информационные продукты, предоставляемые ЦКП

Архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в основном содержат поканальные данные спутниковых приборов наблюдения уровня обработки L1B, а именно прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекцию. При этом на основе реализованного в рамках технологии UNISAT механизма доступа к виртуальным продуктам, пользователи получаются доступ к широкому спектру различных информационных продуктов, динамически формируемых по запросу пользователей на основе физически имеющихся в архивах данных. Это позволяет избежать хранения огромных объёмов данных, радикально уменьшить нагрузку на систему обработки спутниковых данных, а также обеспечить высокую степень гибкости и масштабируемости системы доступа, так как для добавления нового виртуального продукта достаточно определить правила его формирования. В настоящее время число реализованных вариантов получения таких виртуальных продуктов превышает 550 и постоянно возрастает, что позволяет эффективно решать самые разные научные и прикладные задачи. При этом один и тот же тематический информационный продукт, зачастую, может быть получен по целому ряду различных приборов наблюдения. Ниже, для примера, приведён сокращённый список виртуальных продуктов, реализованных для данных высокого разрешения (данные серий спутников Sentinel-2, Landsat, «Метеор-М», «Ресурс-П», «Канопус-В» и др.):

- поверхность,
- паншарпенинг,
- растительность (red, nir, swir),
- тепловые аномалии,
- естественный синтез,
- дымы и облачность,
- льды и снег,
- пожарный синтез,
- NDVI,
- маска облачности,
- водные объекты,

– SST (Sea Surface Temperature) и др.

Отметим, что динамическое формирование некоторых тематических информационных продуктов бывает нецелесообразным и, в первую очередь, это связано с тем, что для их получения необходимы значительные вычислительные ресурсы, что привело бы к большим временным задержкам. В этих случаях, задача их получения возлагается на автоматизированную систему обработки спутниковых данных, а получаемые информационные продукты физически заносятся в архив. Ниже перечислены некоторые из таких продуктов, как правило, характеризующиеся уровнем обработки L2 или выше:

- различные безоблачные композитные изображения, ориентированные на развитие методов анализа многовременных наборов данных;
- концентрация SO2. и других газов в атмосфере;
- SST (по данным некоторых из приборов наблюдения);
- льды и снег (по данным некоторых из приборов наблюдения);
- индекс хлорофилла;
- температура земной поверхности по данным спутников серии Sentinel-3;
- практически все композитные информационные продукты по большой территории, в частности, характеризующие состояние сельскохозяйственных угодий, лесных массивов, состава снежного покрова и др.

В 2022 г. состав доступных пользователям информационных продуктов был расширен за счёт добавления данных, получаемых с Китайского КА FY-3D. Кроме того, были существенно улучшены продукты по детектированию тепловых аномалий по данным приора МСУ-МР КА серии «Метеор-М».

Также были реализованы процессы обработки и получения продуктов на основе коротковолнового вегетационного индекса (SWVI) для определения площадей, пройденных огнём, и последствий лесных пожаров.

В 2022 г. было также реализовано в архивы поступление целого ряда новых композитных информационных продуктов, основные из которых приведены ниже:

- новая улучшенная версия ежедневных интерполированных композитов отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, а также индекса NDVI по данным приборов КМСС;
- новые типы безоблачных композитных изображений по данным MSI/Sentinel-2: ежегодные за сезон вегетации (с 1 мая по 31 сентября), ежемесячные, сезонные и «снежные» (с 1 января по 31 марта)
- новая улучшенная версия еженедельных композитов NDVI и отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном диапазоне по данным VIIRS/Suomi NPP.

1.3.5 УНУ «Вега-Science» и развитие её в 2022 году

«Вега-Science» (http://sci-vega.ru/) — уникальная научная установка, входящая в состав Центра коллективного пользования ЦКП «ИКИ-Мониторинг», предназначенного для решения научных задач изучения и мониторинга окружающей среды с использованием методов и технологий спутникового дистанционного зондирования. «Вега-Science» предоставляет распределённый доступ к многолетним ежедневно пополняющимся архивам спутниковых данных и получаемым на их основе различным информационным продуктам, в первую очередь ориентированным на изучение и анализ состояния растительного покрова. «Вега-Science» также предоставляет пользователям возможности по проведению удалённой обработки и анализа спутниковых данных и

результатов их обработки с использованием вычислительных ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

В основу сервиса положены многолетние архивы спутниковых данных и получаемые на их основе информационные продукты, характеризующие состоянии растительного покрова Северной Евразии, включая Россию и близлежащие страны. По любому району этой территории в архивах имеются данные с начала двадцать первого столетия. Важнейшим преимуществом реализованного сервиса является поддержка широкого спектра инструментов для обработки и анализа данных в режиме, приближенном к реальному времени.

В 2020 были проведены работы по усовершенствованию многофункционального картографического веб-интерфейса, использующего тайловый подход к отображению данных с использованием библиотеки Leaflet. В частности, был существенно расширен список поддерживаемых в интерфейсе географических проекций. Кроме этого проводились работы по оптимизации реализованного программного обеспечения, что позволило существенно повысить скорость работы интерфейса.

Также в 2022 г. были продолжены работы по совершенствованию реализованных в системе интерактивных инструментов для анализа и обработки спутниковых данных в режиме «онлайн». Кроме этого был существенно переработан блок получения временных серий данных, получаемых по длинным рядам спутниковых наблюдений, что позволило на порядок повысить скорость его работы.

1.3.6 Научные и прикладные информационные системы, использовавшие возможности ЦКП в 2022 году

На основе предоставляемых ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ресурсов по доступу и обработке спутниковых данных в 2021 г. функционировало более 15 различных специализированных систем научных проектов, в частности:

- Информационная система «Аврора-Арктика» (http://dev.aurora.geosmis.ru/), разработанная в ИКИ РАН и введённая в опытную эксплуатацию в 2017 г. Система ориентирована на работу с данными наблюдений ионосферы Земли, полученных со спутников серии DMSP, показателей наблюдения солнечного ветра по данным NOAA, метеорологических данных, а также данных спутниковых наблюдений в оптическом диапазоне, полученных различными системами (MODIS, AVHRR и др.) и прогностической информацией о границах аврорального овала.
- Для распределённой работы с данными, получаемыми различными научными миссиями, связанными с исследованием Марса, в 2017 г. с использованием технических и технологических возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в ИКИ РАН была создана специализированная информационная система ARES — Analysis, Research and Exploration Service. При построении системы использовались методы и схемы работы со сверхбольшими архивами данных, использующиеся в ЦКП «ИКИ Мониторинг». Это позволит применить существующие наработки и подходы для работы с пространственными данными дистанционного зондирования Земли и их анализа для организации эффективной работы с данными действующих и перспективных научных миссий по исследованию Марса.
- Информационная система VEGA-GEOGLAM (http://vega.geoglam.ru/), разрабатываемая в рамках проекта SIGMA. Целью системы является обеспечение инструментами анализа данных дистанционных наблюдений участников международного проекта SIGMA, ориентированного на разработку методов и технологий дистанционного сельскохозяйственного мониторинга, в интересах создания проектов связанных с развитием методов и технологий глобальной системы мониторинга сельского хозяйства.

- Информационная система «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» VolSatView (http://volcanoes.smislab.ru/). Основной задачей системы является обеспечение специалистов-вулканологов оперативными спутниковыми данными и различными информационными продуктами, получаемыми на основе их обработки, для мониторинга и изучения вулканической активности Камчатки и Курил.
- Спутниковый сервис See The Sea (STS, http://ocean.smislab.ru/) информационная система, ориентированная на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана. Особое внимание в системе уделяется возможностям работы с данными спутниковой радиолокации. Система призвана обеспечить специалистам, работающим в области исследования Мирового океана, возможность одновременной работы с различными видами спутниковой информации и удобный инструментарий, позволяющий проводить её комплексный анализ и др.
- Информационная система «Вега-Лес» (http://forest.geosmis.ru), предназначенная для обеспечения оперативного доступа к непрерывно обновляемому многолетнему архиву данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемым на их основе тематическим информационным продуктам, инструментам автоматизированной обработки, анализа и синтеза различной информации для решения задач комплексного мониторинга лесов России;
- Информационная система EcoSatMS (http://suvo.geosmis.ru/), предназначенная, в первую очередь, для дистанционного мониторинга трансграничных вод и регулярного мониторинга показателей вегетационных индексов и развития с.-х. культур по территории Узбекистана, а также некоторым территориям соседних стран. Имея широкий функционал, система предоставляет инструменты для работы со спутниковыми данными различного разрешения и позволяет решать актуальные для Узбекистана задачи
- Действующий прототип центрального информационного узла ИАС «Углерод-Э» (http://carbon.geosmis.ru), созданный в рамках выполнения важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) по мониторингу бюджета и пулов углерода в наземных экосистемах России.

В 2022 г. на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» были продолжены работы по развитию и применению технологии контроля данных сельскохозяйственной микропереписи (ТКДСМ, информационный сервер по адресу <u>http://agrocensus21.geosmis.ru/</u>). В рамках работ решались следующие задачи:

- обеспечение работы Росстата, в том числе его территориальных органов, со всеми возможностями ТКДСМ на этапе подведения итогов сельскохозяйственной микропереписи 2021 г., включая доступ к архивам спутниковых данных ДЗЗ и результатам их обработки, к инструментам анализа спутниковых данных, к инструментам сравнительного анализа данных статистики и спутникового мониторинга;
- обеспечение предоставления информации по запросам территориальных органов Росстата для проведения сравнительного анализа данных текущей сельскохозяйственной статистики, пилотного обследования, микропереписи и результатов спутникового мониторинга;
- реализация Регламента использования ТКДСМ на этапе подведения итогов СХМП, включая в том числе корректировку данных сельхозмикропереписи и данных спутникового мониторинга при необходимости, а также формирование заключений о проведении сравнительного анализа данных СХМП и Д33;
- совершенствование возможностей и данных ТКДСМ в соответствии с запросами Росстата и его территориальных органов, включая актуализацию

картографического обеспечения ТКДСМ (актуализацию слоя границ муниципальных образований субъектов Российской Федерации, в пределах которых агрегируются сведения о площадях различных видов угодий, интеграцию внешних картографических источников) и актуализацию аналитических форм (добавление форм, в которых порайонные сведения о площадях различных видов угодий рассчитаны по актуализированным границам муниципальных образований, корректировка формул для расчёта расхождений данных статистики и данных спутникового мониторинга, изменение порядка отображения районов со значительными расхождениями данных).

ЦКП «ИКИ-Мониторинг» также используется для проведения разработок методов обработки и анализа спутниковых данных, многие из которых впоследствии внедряются в различные прикладные информационные системы дистанционного мониторинга. В 2021 г. такие разработки, в частности, внедрялись в системы:

- Информационную систему дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ-Рослесхоз (http://www.pushkino.aviales.ru), предназначенную для сбора информации о пожарах по всей территории России, сбора информации о состоянии окружающей среды, подготовки информационных продуктов для анализа пожарной обстановки и последствий пожаров и оперативного распространения накопленной информации.
- Отраслевую информационную систему мониторинга Федерального агентства рыбного хозяйства (ОСМ Росрыболовства) (http://osm.smislab.ru/), ориентированную на получение информации о деятельности промысловых судов. В настоящее время ОСМ обеспечивает мониторинг российских и иностранных судов, ведущих промысел в экономической зоне России, а также российских судов, находящихся на промысле в различных районах мирового океана. ОСМ обеспечивает контроль нескольких тысяч судов, из которых около 2000 судов обычно находятся на промысле. По числу судов, находящихся под контролем, система является самой крупной в мире.
- Объединённую систему работы с данными региональных центров ФГБУ «НИЦ «Планета» (http://moscow.planeta.smislab.ru) — сложный, комплексный инструмент работы с данными, позволяющий решать задачи гидрометеорологического мониторинга, мониторинга чрезвычайных ситуаций И многие другие исключительно за счёт ресурсов и инструментов обработки и анализа данных самой системы, доступных через веб. На сегодняшний день система представляет собой распределённую, модульную веб-ГИС, совмещённую со сверхбольшими архивами данных ДЗЗ прямого доступа, обеспечивающую онлайн-сервисы данных лля ЦКП «ИКИ-Мониторинг» И большого количества прикладных информационных систем, являясь одним из основных источников оперативной спутниковой информации в России;
- Информационную систему «Вега-Приморье» (http://primorsky.geosmis.ru/), разработанную и поддерживаемую АНО «Общество дикой природы», ООО «ИКИЗ» и ИКИ РАН для ведения комплексного космического мониторинга лесов Приморского края с целью обеспечения максимально полного использования их ресурсно-экологического потенциала, повышения эффективности их охраны, защиты и использования, сохранения уникального биологического разнообразия лесной флоры и фауны.

1.3.7 Пользователи ЦКП

В 2022 г. возможностями ЦКП «ИКИ-Мониторинг» пользовались более 120 организаций (<u>http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=7</u>). При этом новыми пользователями ЦКП стали 10 организаций:

- 1. ФГБУН «Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук» (ИТПЗ РАН), Москва;
- 2. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО), Санкт-Петербург;
- 3. ФГБУН Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН (ОФИЦ УрО РАН), Оренбург;
- Филиал ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» «Центр лесной пиролонгии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизводства лесов» (Филиал ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии»), Красноярск;
- 5. ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр СО РАН» (ТюмНЦ СО РАН), Тюмень;
- 6. ФГБУН «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» ДО РАН (ФНЦ биоразнообразия ДО РАН), Владивосток;
- 7. Отделение по Ставропольскому краю Южного главного управления Центрального банка Российской Федерации, Ставрополь;
- 8. ФГБУН Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (ДФИЦ РАН), г. Махачкала, Дагестан;
- 9. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), Новосибирск;

Государственное научное учреждение «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси» (ИЭБ НАНБ), г. Минск, Беларусь.

1.3.8 Научные проекты, выполняемые с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в 2022 году

В 2022 г. возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг» использовались для решения задач 14 проектов, поддерживаемых Российским научным фондом, Российским фондом фундаментальных исследований и Министерством образования и науки:

- РНФ 21-77-00018, Закономерности динамики состояния ландшафтов речных пойм зоны недостаточного увлажнения в условиях гидрологических и климатических изменений, Руководитель: Шинкаренко С.С., канд. с.-х. наук, 2021–2023 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (Конкурс МК-2021) МК-4903.2021.1.5, Разработка метода автоматического детектирования постпожарных повреждений леса на основе данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения и создание исследовательской базы данных повреждений лесов пожарами на территории России с 2001 по 2022 г., Руководитель: Кашницкий А.В., канд. техн. наук, 2021–2022 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- РНФ 019-77-30015, Разработка методов и технологии комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для развития системы национального мониторинга бюджета углерода лесов России в условиях

глобальных изменений климата, Руководитель: Барталев С.А., д-р техн. наук, 2019–2022 гг., Головная организация — Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН;

- РНФ 19-71-20035, Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН Чёрное море» и её интеграция с программно-аппаратным комплексом ЦКП «ИКИ-Мониторинг», Руководитель: Агошков В.И., д-р физ.-мат. наук, 2019–2022 гг., Головная организация Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук;
- ΡΗΦ _ 19-75-20088, Создание опирающейся на данные дистанционного зондирования Земли методологии анализа И прогнозирования влияния климатических и экологических факторов на заболеваемость природно-очаговыми инфекциями, Руководитель: Малеев В.В., д-р мед. наук, 2019–2022 гг., Головная организация — Центральный научно-исследовательский институт эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека;
- РНФ 19-77-20060, Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования, Руководитель: Лаврова О.Ю, канд. физ.-мат. наук, 2019–2022 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- РНФ 19-74-20185, Научные основы учёта, оценки экологического состояния, климатогенной роли и пожарной опасности антропогенно изменённых торфяных болот на основе спутниковых и наземных данных, Руководитель: Сирин А.А., д-р биол. наук, 2019–2022 гг., Головная организация Институт лесоведения Российской академии наук;
- РФФИ 19-35-60007, Пространственно-временные закономерности динамики состояния аридных пастбищных ландшафтов на основе анализа спектрально-отражательных свойств, Руководитель: Шинкаренко С.С., канд. с.-х. наук, 2019–2022 гг., Головная организация Институт космических исследований Российской академии наук;
- Минобрнауки 122042500019-6, Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера, Руководитель: Прошин А.А., канд. техн. наук, 2019–2023 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- Тема «Мониторинг» № 122042500031-8, Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности, Руководитель: Лупян Е.А., д-р техн. наук, 2003– 2023 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- Программа Erasmus+ проект 598838-EPP-1-EL-EPPKA2-CBHE-JP:, GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology/SUFOGIS (ГИС и дистанционное зондирование для устойчивого лесного хозяйства и экологии), Руководитель: Гитас Я., проф., д-р наук, 2018–2022 гг., Головная организация — Университет имени Аристотеля в Салониках;
- Проект МАИ 05.607.21.0308, Разработка принципов построения многоспутниковой системы дистанционного зондирования Земли на базе созвездия малых космических аппаратов с созданием прототипов программно-аппаратных решений в интересах автоматизированного мониторинга Арктики и трассы Северного морского пути, Год начала проекта 2020, Головная организация МАИ;
- Бюджетный проект 0336-2019-0002, Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах, Руководитель: Башкуев Ю.Б., проф., Год начала проекта

2019, Головная организация — Институт физического материаловедения СО РАН (ИФМ СО РАН)

Бюджетный проект АААА-А17-117011810038-7, Эволюция, функционирование и эколого-биогеохимическая роль почв Байкальского региона в условиях аридизации и опустынивания, разработка методов управления их продукционными процессами, Руководитель: Бадмаев Н.Б., д-р биол. наук, Год начала проекта 2019, Головная организация — Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (ИОЭБ СО РАН).

За предшествующие годы с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» было выполнено 60 научных проектов. С полным списком проектов можно ознакомиться на сайте ЦКП (http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=5).

1.3.9 Основные публикации, при подготовке которых были использованы возможности ЦКП

По имеющимся у нас данным на текущий момент опубликовано уже более 740 результатов работ, которые выполнялись с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Из них 87 статей были опубликованы в 2022 г. С полным списком статей можно ознакомиться на сайте ЦКП (http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=4).

1.3.10 Анализ текущих особенностей и возможных направлений развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

1.3.10.1 Текущие особенности развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

За последние пять лет суммарный объем данных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» возрос более чем в три раза, что потребовало соответствующего наращивания используемых для обработки и хранения спутниковых вычислительных ресурсов. Также радикально возросло количество различных типов спутниковых данных и информационных продуктов, получаемых на их основе, а также инструментов для их анализа и обработки. Постоянно ведутся работы по расширению доступного пользователям функционала и удобства в его использовании и стабильности работы сервисов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Совершенствуются технологии и программное обеспечение, отвечающие за реализацию всех этапов работы со спутниковыми данными, включая их сбор, архивацию, обработку и предоставление пользователям. Стремительно возрастающая сложность системы предъявляет все возрастающие требования к организации подсистемы контроля бесперебойной работы программно-аппаратного комплекса. Поэтому особое внимание также уделяется совершенствованию программного обеспечения, позволяющего в автоматическом режиме максимально оперативно и точно диагностировать самые разные неполадки в работе системы для своевременного их устранения.

Однако, несмотря на достигнутые высокие результаты, дальнейшее развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинг» за счёт возможностей одной организации связано с рядом определённых сложностей и проблем. Стремительное развитие спутниковых систем ДЗЗ приводит к экспоненциальному росту объёмов, поступающих в архивы спутниковых данных, для хранения и обработки которых требуется все больше дорогостоящее оборудование. Поэтому ограниченность материальных ресурсов в перспективе не позволит нам обеспечить работу со всеми новыми типами спутниковых данных. Кроме того, для максимально надёжного хранения данных и повышения скорости доступа к ним необходимо их дублирование на независимых площадках. Также сказывается ограниченность численности задействованного в разработке и развитии центра персонала. Силами одного коллектива, даже при наличии сотрудничества с другими организациями,

проблематично наращивать возможности центра настолько быстро, чтобы в полной мере реализовать потенциал данных, получаемых с современных спутниковых систем ДЗЗ. Значительных людских ресурсов требует также поддержка бесперебойного функционирования постоянно растущего парка оборудования и программных систем.

Немаловажным также является то, что размещение всего оборудования на одной площадке приводит к тому, что в случае серьёзного сбоя с оборудованием или сетью, предоставляемые ЦКП «ИКИ-Мониторинг» сервисы окажутся полностью недоступными. Также стоит отметить, что несмотря на постоянное развитие компьютерных сетей, скорость передачи данных по сети по-прежнему ограничивает возможности по работе с объёмными спутниковыми данными, особенно для территориально удалённых региональных центров. В настоящее время коллектив разработчиков ЦКП «ИКИ-Мониторинг» сотрудничает с большим количеством научных организаций разного профиля, однако этого недостаточно для полноценного развития функциональных возможностей центра во всех тематических сферах применения данных ДЗЗ.

1.3.10.2 Возможные перспективные направления развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Практически единственным решением складывающейся проблемы является развитие полноценно распределённой структуры ЦКП «ИКИ-Мониторинг», в рамках которой функционировали бы специализированные информационные узлы ЦКП на площадках организаций-партнёров. Эти узлы одновременно выполняли бы как специфичные для поддерживающей их организации задачи (образовательные, исследовательские, инфраструктурные, какие-либо другие), так и полноценно входили бы в состав ЦКП и участвовали в решении всех его задач, в том числе по повышению надёжности сервисов и доступности данных, особенно продуктов сложной обработки.

На текущий момент ведётся работа по организации подобных узлов с рядом организаций, в числе которых — Московский авиационный институт (МАИ), с которым ведутся работы по реализации ряда образовательных и исследовательских программ.

Ещё одним направлением развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг», с развитием современных облачных технологий хранения и предоставления данных становящимся всё более и более актуальным, является организация взаимодействия с внешними центрами данных для прямого обмена данными по протоколам семейства S3. На сегодня форматы хранения данных позволяют организовать их предоставление из облачных хранилищ прозрачным образом, практически аналогичным работе с локальными хранилищами. Более того, такой подход позволяет в полной мере реализовать не только поиск и просмотр удалённых данных, но и все возможности по их обработке, в том числе интерактивной, проводящейся средствами веб-интерфейсов. Такой подход, в частности, применяется сервисами Google Cloud Storage и Amazon Web Services, предоставляющими данные ряда открытых систем ДЗЗ. Аналогичные работы ведутся и Роскосмосом в рамках модернизации Геопортала Роскосмоса.

Реализация и полномасштабное применение таких методов позволит серьёзно уменьшить нагрузку на инфраструктуру хранения ЦКП за счёт использования внешних ресурсов, а также уменьшить время, за которое данные из внешних центров становятся доступными для сервисов ЦКП.

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Мониторинг-Технологии» проводились в полном соответствии с утверждённым планом. В их рамках решены задачи, получены и опубликованы значимые результаты по следующим основным направлениям:

- развитие подходов организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач;
- создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования;
- поддержка и развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений, в том числе решения междисциплинарных задач;

При этом одними из наиболее значимых результатов, полученных в рамках данного направления, стали поддержка и развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинга», в том числе за счёт внедрения в него новых подходов и методов обработки и анализа данных.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Технологии» в 2022 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 2 МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА

Введение

Раздел «Мониторинг-Биосфера» отражает результаты исследований и разработок, направленных на развитие методов дистанционного мониторинга растительного покрова. Непрерывное воздействие природных и антропогенных факторов определяет изменчивость растительного покрова, одного из главных компонентов биосферы планеты. Оптимальное управления природными ресурсами, подержания устойчивости наземных экосистем и сохранение биоразнообразия в условиях изменения климата являются задачами, определяющими потребность в регулярном мониторинге характеристик растительного покрова.

Разрабатываемые в настоящее время методы и технологии мониторинга состояния и динамики растительности отличаются высоким уровнем автоматизации обработки спутниковых данных, универсальностью по отношению к внешним условиям спутниковой съёмки, адаптивностью к локальным характеристикам и условиям, возможностью переносимости на протяжённые территории и использованием временных рядов данных наблюдений взамен единичных сцен. Современные исследования, касающиеся мониторинга деструктивных явлений, предполагают не только их фиксацию, но и определение степени воздействия и факторов на неё влияющих, которые могут быть связаны как с внешними условиями (сезонность, температура и влажность), так и с собственными характеристиками растительного покрова. Построение методов оценки структурных и биофизических параметров растительности основано использовании съёмки в совокупности с имеющимися данных космической физическими И эмпирическими моделями.

Выполненные исследования в области дистанционного мониторинга растительности в отчётный период были сконцентрированы на следующих основных направлениях:

- развитие научных основ и методов обработки временных рядов мультисенсорных данных ДЗЗ различного пространственного и временного разрешения для обеспечения долговременного мониторинга наземных экосистем;
- развитие методов обработки данных ДЗЗ для получения устойчивых нормализованных наборов и долговременных рядов данных для изучения наземных экосистема;
- развитие методов дистанционного мониторинга динамики наземных экосистем с использованием физических и эколого-математических моделей;
- формирование и анализ многолетних рядов наблюдений наземных экосистем для исследования глобальных изменений, решения задач рационального природопользования и устойчивого развития.

Подробно полученные в данном направлении результаты изложены в следующих научных публикациях [1, 2, 19, 20, 29, 36, 64, 85, 100, 101, 105–107, 131, 133, 136, 138, 141, 144].

2.1 Развитие научных основ и методов обработки временных рядов мультисенсорных данных ДЗЗ различного пространственного и временного разрешения для обеспечения долговременного мониторинга наземных экосистем

2.1.1 Метод выделения покрытых лесом территорий России на основе данных Д33 высокого пространственного разрешения

Процессы усыхания и деградации древесной растительности, вызванные различными природными и антропогенными факторами, оказывают существенное экосистемы. деструктивное воздействие на лесные Оценка экономических и экологических последствий усыханий и деградации лесов требует своевременного получения полной и объективной информации. Поскольку леса России занимают огромные территории, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников являются незаменимым инструментом для получения оценок такого рода на уровне страны. Выполненные ранее исследования показали возможность использования полученных в зимний период данных ДЗЗ для оценки усыханий вечнозелёных лесных экосистем. Был предложен метод детектирования усыханий вечнозелёных лесов на территории России по данным MODIS и показана возможность использования данных летнего периода для оценки усыханий лесов при отсутствии развитого напочвенного растительного покрова.

В рамках выполненных работ был предложен метод детектирования непирогенных (т.е. не связанных с пожарами) изменений лесов, основанный на использовании спутниковых данных, полученных как в зимний период времени, наиболее эффективных для выявления изменений хвойных вечнозеленых лесов, так и в летний период, пригодных для исследования листопадных лесов. Метод основан на использовании данных спутниковых наблюдений, полученных спутниковой системой Terra/Aqua-MODIS в красном, ближнем инфракрасном (ИК), и среднем ИК спектральных диапазонах, и построенных на их основе индексах. В частности, использовались вегетационные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и SWVI (Short Wave Vegetation Index), а также их разновременные версии RdNDVI и RdSWVI, рассчитываемые следующим образом:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}, \qquad SWVI = \frac{R_{nir} - R_{sswir}}{R_{nir} + R_{sswir}}$$

$$RdNDVI = \frac{NDVI_{pre} - NDVI_{post}}{\sqrt{NDVI_{pre} + 1}}, \qquad RdSWVI = \frac{SWVI_{pre} - SWVI_{post}}{\sqrt{SWVI_{pre} + 1}}$$
(2.1.1.1)

где R_{nir} , R_{red} и R_{swir} — значения коэффициента отражения в ближнем ИК, красном и в среднем ИК диапазонах спектра соответственно; NDVI_{pre} SWVI_{pre} и NDVI_{post} SWVI_{post} — значения вегетационных индексов, соответственно, до и после деструктивного воздействия.

Выполненные ранее исследования позволили установить взаимосвязь между показателем средневзвешенной категории состояния насаждений (СКС) и вегетационными индексами RdNDVI и RdSWVI, рассчитанными на основе спутниковых данных, полученных в зимний и летний периоды соответственно. В рамках предложенного метода в качестве источника спутниковых данных были использованы композитные изображения, построенные за летний и зимний периоды по данным прибора MODIS с 2001 по 2021гг. Общая схема метода представлена на рисунке 2.1.1.

Предварительная обработка спутниковых данных включала взаимную нормализацию спутниковых изображений в красной и ближней ИК областях спектра для зимних композитных изображений, а также в ближней и средней ИК областях спектра для

летних композитных изображений. Нормализация изображений включала приведение гистограмм композитных изображений к гистограмме изображения эталонного года, в качестве которого был выбран 2001 г. Представленный на рисунке 2.1.1.2 пример демонстрирует приведение максимума гистограммы к максимуму опорного изображения, что позволяет снизить вероятность ложных выявлений изменений лесного покрова, связанных с межгодовыми колебаниями спектральных свойств и недостатками композитных изображений.



Рисунок 2.1.1.1 — Общая схема метода детектирования непирогенных изменений лесов



Рисунок 2.1.1.2 — Гистограммы КСЯ в ближней ИК-области спектра (×10000) для зимнего композитного изображения за 2006 год до и после коррекции

На основе прошедших предварительную обработку композитных изображений строились ежегодные изображения индексов NDVI и SWVI на основе которых были рассчитаны разностные индексы RdNDVI и RdSWVI, причем в качестве опорных данных, отражающих состояние леса до непирогенных изменений, использовались композитные изображения за 2001 г. Временные серии вегетационных индексов RdNDVI и RdSWVI за 2002–2021 гг., полученные по зимним и летним данным соответственно, в дальнейшем пересчитывались в значения показателя СКС на основе ранее установленных эмпирических уравнений связи. Таким образом были получены ежегодные тематические

изображения со значениями показателя СКС в период 2002–2021 гг., для которых проводилась пороговая фильтрация с отсечением пикселов, не удовлетворяющих условию СКС > 3,5, что позволяет рассматривать только участки с сильными изменениями отражательных свойств, соответствующих усыхающим и погибшим лесам, согласно принятым в лесном хозяйстве градациям СКС.

Для исключения из рассмотрения участков, не относящихся к лесу, а также для разделения на хвойные вечнозеленые и листопадные леса использовалась карта наземных экосистем, разработанная в ИКИ РАН. Так как процессы дефолиации и дехромации хвойных вечнозелёных насаждений оказывают основное влияние на изменения отражательных характеристик лесов, измеряемых в зимний период при наличии снежного покрова, для данных лесов были использованы оценки СКС, основанные на зимних композитных изображениях MODIS. Для остальных лесов использовались результаты, полученные на основе летних данных.

Для фильтрации случайных изменений отражательных свойств, которые могут быть связаны как с недостатком изображений, так и природными факторами, такими как различия во влажности снежного покрова, засухи в отдельные годы, аномальные осадки и др., выявленные изменения проверялись на устойчивость и в рассмотрении оставались только участки для которых детектирование подтверждалось на протяжении как минимум трёх последующих лет, при этом в качестве года появления изменений фиксировалась дата первого его детектирования.



Рисунок 2.1.1.3 — Карта непирогенных изменений лесов за период 2002–2021 гг.

Поскольку изменения лесного покрова могут быть вызваны, в том числе, вырубками и пожарами, была проведена фильтрация полученной карты с исключением участков с вырубками и пожарами. Для фильтрации пожаров были использованы результаты детектирования пройденных огнём площадей, полученных по данным MODIS с пространственным разрешением 230 м. Область вероятных пирогенных изменений также расширялась с применением буферной зоны с использованием плавающего окна размером 7×7 пикселей. Для фильтрации вероятных вырубок были использованы данные проекта Global Forest Change с учётом допущения, что участки нарушения лесного покрова, выявленные в рамках указанного проекта, соответствуют преимущественно значительным изменениям отражательных свойств, характерных для пожаров и вырубок.

В дальнейшем могут быть использованы более надёжные результаты картографирования вырубок.

Предложенный метод позволил получить информационный продукт в виде карты непирогенных изменений лесов за период 2002–2021 гг. для всей территории России (рисунок 2.1.1.3). Всего за указанный период выявлено 11 831 тыс. га непирогенных изменений в темнохвойных, светлохвойных, лиственных и лиственничных лесах, а среднее многолетнее значение составило 592 тыс. га в год.



Рисунок 2.1.1.4 — Оценка масштабов непирогенных изменений лесов России в разрезе основных групп древесных пород за 2002–2021 гг.

Использование карты наземных экосистем для анализа полученных результатов позволило установить, что в структуре непирогенных изменений, ожидаемо доминируют хвойные листопадные леса, занимающие наибольшую площадь (рисунок 2.1.1.4). Кроме того, значительные площади изменений наблюдаются для светлохвойных и темнохвойных лесов России. Предложенный метод позволяет поводить регулярные оценки непирогенных изменений лесов на территории страны и открывает возможность учёта данного фактора при исследовании динамики растительного покрова страны, бюджета углерода и других задач.

2.1.2 Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса

Активное развитие в последние годы получают методы автоматизированной обработки данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения (10–30 м), что в перспективе может значительно повысить пространственную детальность результатов картографирования растительного покрова на национальном уровне. Ранее были получены композитные изображения, полученные в летний и зимний периоды 2020 г. для всей территории России с пространственным разрешением 30 м, основанные на данных Sentinel-2. Изображения включали красный, ближний и средний ИК-каналы для летних данных, а также красный и ближний ИК каналы для зимних. Такого рода данные имеют существенные преимущества, выраженные в значительном улучшении пространственной детальности по сравнению с данными среднего пространственного разрешения (рисунок 2.1.2.1). Стоит также отметить и ограничения, связанные с использованием данных высокого пространственного разрешения, относительно низкую периодичность

съемки, необходимость получения более детальной опорной выборки в задачах классификации, а также многократное увеличением объёма хранения данных и требующихся вычислительных мощностей.

В рамках работ отчётного периода был предложен метод картографирования покрытых лесом территорий на основе данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения. Общая схема метода представлена на рисунке 2.1.2.2. В качестве исходных данных для формирования эталонов различных классов и обучения классификатора была использована опорная выборка, использовавшаяся ранее для построения карты наземных экосистем с пространственным разрешением 230 м. Выборка была разделена на набор лесных и нелесных классов, при этом возникала необходимость дополнительной внутренней неоднородностью пикселов фильтрации, вызванная MODIS при использовании данных с более высоким пространственным разрешением. На первом этапе фильтрации из выборки исключались пикселы, соответствующие участкам изменений в лесах на основе продукта Global Forest Change, пахотным землям и классам городской инфраструктуры на основе карты GlobeLand30. Также было выполнено удаление граничных пикселей с помощью морфологической операции эрозии скользящим окном 3×3 пикселя, исходя из предположения, что смешанные пикселы, в которых присутствуют несколько классов растительности, с большей вероятностью расположены на границах различных классов. Далее была выполнена статистическая фильтрация, в рамках которой двумерное пространство композитных изображений разбивалось на отдельные ячейки регулярной сети с последующей оценкой для каждого класса (i) и спектрального диапазона (*j*) среднего (M_{ij}) и среднеквадратического отклонения (σ_{ij}) значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ). Значение каждого пиксела проверялось на принадлежность к интервалам ($M_{ij} - 1,5\sigma_{ij}, M_{ij} + 1,5\sigma_{ij}$), а пикселы, не удовлетворяющие данным условиям, исключались из опорной выборки.



Рисунок 2.1.2.1 — Сравнение композитных изображений MODIS (a) и Sentinel-2 (б) за 2020 г.

Полученная опорная выборка использовалась в дальнейшем для классификации с применением алгоритма LAGMA. Алгоритм LAGMA позволяет разбивать всю исследуемую территорию на отдельные ячейки регулярной сети, для каждого узла которой формируется локальная выборка для всех классов с дальнейшей независимой классификацией внутри каждой ячейки. Результат классификации сравнивался с поданной на вход классификатора опорной выборкой для последующей фильтрации последней, состоящей в исключении пикселов, для которых результат классификации не характеризуется принадлежностью к тому же классу. Такого рода фильтрация выполнялась с использованием трёх последовательных итераций. Из полученного результата также исключались пикселы, относящиеся к пахотным землям и урбанизированным территориям на основе использования упомянутых выше продуктов. Все лесные классы в дальнейшем были объединены для получения карты покрытых лесом территорий.



Рисунок 2.1.2.2 — Общая схема метода картографирования покрытых лесом территорий с разрешением 30 м



Рисунок 2.1.2.3 — Выделение лесных территорий на основе карты наземных экосистем, полученной по данным MODIS с разрешением 230 м (б) и на основе предложенного метода с разрешением 30 м (в). В качестве подложки использовано зимнее композитное изображение, полученное на основе данных Sentinel-2 (а)



Рисунок 2.1.2.4 — Карта покрытых лесом территорий России с пространственным разрешением 30 м

На основе описанного выше метода была построена карта покрытых лесом территорий за 2020 г. Сравнение с маской лесных классов, полученной на основе карты наземных экосистем за 2020 г/ по данным MODIS (рисунок 2.1.2.3), демонстрирует более детальное выделение лесных территорий, в частности значительное повышение точности выделения границ, а также возможность выявления относительно небольших участков леса, занимающих незначительные доли в рамках пикселя с разрешением 230 м. К недостаткам полученных результатов можно отнести ошибки, возникающие на территориях с непродолжительным периодом наличия снежного покрова или его полным отсутствием, что требует дальнейшего развития методики получения зимних композитных изображений, либо отдельного выявления таких территорий с последующим применением специализированной методики картографирования покрытых лесом территорий.

Полученная карта (рисунок 2.1.2.4) позволяет получить более детальную информацию о лесных ресурсах России и может быть использована в различных задачах мониторинга растительного покрова. Развитием предложенного метода может стать возможность картографирования различных классов земного покрова и породного состава, что потребует получения большего количества композитных изображений в течение сезона, более детально отражающих вегетационную динамику растительности.

2.1.3 Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса

Большая часть лесостепной и степной зоны распахана, что привело к интенсификации водной и ветровой эрозии почв, масштабного проявления пыльных бурь. Одной из ключевых причин развития процессов деградации агроландшафтов является сокращение площади лесов: за последние полтора столетия лесистость чернозёмной зоны России снизилась с 30–40 до 5–15 %. Противостоять негативным явлениям призваны защитные лесные насаждения (ЗЛН), массово создававшиеся в 1950–1970 гг. ЗЛН способствуют снижению интенсивности водной эрозии, дефляции, испарения, повышают плодородие почв и урожайность сельскохозяйственных культур, связывают углерод, имеют высокую рекреационную ценность и способствуют повышению биоразнообразия агроландшафтов. В то же время значительная часть ЗЛН находится в бесхозном состоянии, землепользователи неохотно включают их в границы земельных участков. Полезащитные лесные полосы (ПЗЛП) располагаются на землях сельскохозяйственного назначения, не входят в Государственный лесной фонд и не проходят регулярной инвентаризации.

Для анализа состояния лесов широко применяются данные дистанционного зондирования Земли. Тем не менее инвентаризация ЗЛН по данным ДЗЗ затруднена, поскольку требует использования спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, так как ЗЛН в основном представлены в виде полос и лент шириной до 50–60 м. Наибольшая сложность возникает при дешифрировании ПЗЛП, ширина которых часто не превышает 12–15 м. По этой причине большинство спутниковых информационных продуктов, характеризующих типы земного покрова, не отражают наличие ПЗЛП и других протяженных ЗЛН.

Проводимые исследования состояния ПЗЛП опираются преимущественно на визуальное дешифрирование изображений сверхвысокого пространственного разрешения, в том числе находящихся в открытом доступе (например, сервис Google Earth), картографические материалы, либо на результаты наземной съёмки с помощью GNSSприёмников. Построение технологий регулярного мониторинга состояния ЗЛН на подобных данных практически не реализуемо, а визуальное дешифрирование спутниковых изображений трудоёмко. Целью исследований являлась разработка подхода для картографирования ЗЛН по материалам спутниковой съёмки КА Sentinel-2 с использованием разносезонных спутниковых изображений, получаемых как в течение вегетационного сезона, так и в зимнее время при наличии снежного покрова на земной поверхности.

На спутниковых изображениях обрабатываемые пахотные земли наиболее сильно контрастируют с ЗЛН после вспашки, созревания культур или уборки. Окружающая естественная травянистая растительность может быть отделена от ЗЛН по данным ДЗЗ в период, когда её вегетационный период завершён, но деревья остаются в облиственном состоянии. Также выделение ЗЛН возможно по зимним изображениям снежного покрова, поскольку поля и травянистая растительность в этот период будут скрыты под снегом.



Рисунок 2.1.3.1 – Схема расчёта индекса BSFI для картографирования по разновременным спутниковым изображениям защитных лесных насаждений

Поскольку состояние пахотных земель зависит от севооборотов, то разделить древесно-кустарниковую растительность (ДКР), пашни и естественный травостой по одномоментному спутниковому изображению на основе значений спектрально-яркостных признаков в фиксированный момент времени затруднительно. А по спутниковым изображениям, полученным в зимний период при наличии снежного покрова на земной поверхности, к ДКР могут быть отнесены поля с неубранными пожнивными остатками или урожаем, возвышающиеся над снегом объекты, к примеру, дороги на насыпях. Таким образом, с учётом вышеизложенных предпосылок, разделение ДКР, сельскохозяйственных культур и естественной травянистой растительности может быть основано на комплексном использовании разновременных спутниковых изображений, полученных как при наличии снежного покрова, так и в вегетационный период. При этом по данным разновременных измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова за пределами зимнего сезона целесообразно получение композитного изображения на основе минимизации значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI за период спутниковых наблюдений. При анализе временной серии данных с минимизацией NDVI возрастает вероятность включения в композитное изображение пикселей, относящихся к убранным или вспаханным полям, естественной растительности. При этом, соответствующие высохшей ДКР минимизированные значения NDVI будут существенно превышать характерные величины данного показателя ДЛЯ сельскохозяйственных культур В начале или конце вегетационного периода, открытой почвы, антропогенных и водных объектов. В то же время, снежный покров, маскированный кронами ДКР, будет менее выражен на зимних

спутниковых изображениях: значения нормализованного разностного индекса снега NDSI и альбедо в видимом и ближнем ИК диапазонах будут ниже.

Чем больше разница между показателями минимизированного NDVI и NDSI или альбедо снежного покрова, тем больше проявляется влияние древесной растительности и, следовательно, имеется больше оснований для отнесения соответствующих территорий к покрытым ДКР. Альбедо может принимать значения от 0 до 1, а NDVI и NDSI — от -1 до +1. Использование нормализованной разницы NDVI и альбедо (или NDSI) позволяет получить новый индекс, значения которого также будут лежать в диапазоне от -1 до 1, при этом предварительная фильтрация отрицательных значений NDVI, позволяет исключить из анализа водные и непокрытые снегом антропогенные объекты. Схема расчёта предложенного индекса BSFI (Bi-Season Forest Index) показана на рисунке 2.1.3.1.



Рисунок 2.1.3.2 – Средние значения BSFI, альбедо, минимального NDVI и NDSI для разных категорий земель (а, по вертикальной оси значения указанных показателей) и сопоставление проективного покрытия леса и значений BSFI

В качестве региона исследований выбраны 15 правобережных районов Саратовской области общей площадью 3,6 млн га, расположенные в подзоне южных и типичных чернозёмов. Исследование основано на спутниковых данных Sentinel-2 уровня обработки L2A (BOA — Bottom of atmosphere), прошедших атмосферную коррекцию и радиометрическую калибровку. Выбор указанных данных обусловлен наилучшем пространственным разрешением среди находящихся в открытом доступе данных. В результате были рассчитаны значения BSFI на основе разницы NDVI и альбедо, а также NDVI и NDSI — BSFI (NDSI). Преимуществом вычисления BSFI на основе альбедо, а не NDSI является более высокое пространственное разрешение, так как для расчёта NDSI требуется коротковолновый ИК-канал разрешения 20 м. Для проверки результатов

картографирования ЗЛН по предложенному алгоритму использовались данные типов земного покрова за 2020 г. GLC30 разрешения 30 м, ESRI разрешения 10 м, ESA разрешения 10 м, продукт проективного покрытия леса Global Forest Change (GFC) v. 1.8. Также выполнено экспертное дешифрирование ЗЛН и границ сельскохозяйственных земель на территории исследований по данным сверхвысокого разрешения Google Earth. Леса и ЗЛН выделены в 10 районах, сельскохозяйственные земли — в 15 районах региона исследований. Статистические данные приводятся согласно Национальному атласу почв РФ.

На первом этапе для векторных объектов, созданных на основе визуального дешифрирования данных сверхвысокого разрешения, были определены средние значения BSFI и показателей, на основе которых он рассчитывается (рисунок 2.1.3.2). Леса характеризуются наибольшими значениями минимизированных за вегетационный сезон NDVI и минимальными значениями альбедо зимой. Индекс NDSI лесов имеет значительно большие значения, чем альбедо, поэтому подходит в меньшей степени. Значения BSFI на основе альбедо в лесах в 2–3 раза превышают BSFI на основе NDSI, при том, что сельскохозяйственные земли и антропогенные объекты оба показателя отделяют примерно одинаково.

Кросс-валидация результатов картографирования лесных насаждений на основе экспертного дешифрирования, использования индекса BSFI и информационных продуктов ESA и GFC20 показала общую точность 96, 94 и 95 % соответственно. Высокое значение общей точности обусловлено большими площадями, которые не заняты лесом и правильно были отнесены к нелесным по обоим наборам данных. Producer's accuracy при выделении леса по данным BSFI составила 91 %, по данным ESA — 62 %, по данным GFC20 — 76 %. User's ассигасу по данным BSFI равна 75 %, ESA — 54 %, GFC20 — 73 %. Таким образом, предложенный подход намного точнее позволяет идентифицировать лесные насаждения по сравнению с GFC20 при сопоставимом уровне ложного выделения покрытых древесной растительностью территорий.



Рисунок 2.1.3.3 – Фрагменты карт ЗЛН по разным данным: экспертное дешифрирование (*a*), BSFI (*б*), GFC (*b*), GFC20 (*c*); спутниковое изображение Sentinel-2 от 4 сентября 2020 г.

Разработанный подход не ограничивается использованием данных Sentinel-2 для картографирования ПЗЛП. Перспективным направлением является идентификация лесов на основе BSFI в малолесных регионах по данным Landsat. Наличие почти полувекового архива миссии Landsat позволяет провести ретроспективный анализ динамики лесопокрытой площади, в том числе за счёт создания ЗЛН, вырубок, пожаров и других факторов деградации лесов. Кроме анализа непосредственно данных BSFI возможно их включение в композитные многоканальные изображения для последующей их автоматизированной обработки. На рисунке 2.1.3.3 показан пример выделения полезащитных лесных полос на основе BSFI.

Сопоставление данных BSFI и GFC показало тесную связь между проективным покрытием древесной растительности и значениями индекса. В дальнейшем возможно определение проективного покрытия древесной растительности и преобладающих пород по данным BSFI при наличии набора данных для соответствующей калибровки.

В каждом регионе в зависимости от почвенно-климатических условий отличается породный состав, конструкция и ширина ЗЛН. Поэтому необходимо проведение дальнейших работ по оценке точности выделения ЗЛН на основе BSFI и определение значений индекса, соответствующих лесопокрытой площади. Ограничивающим фактором для таких работ в настоящее время является доступность точно выделенных границ полей и ЗЛН, по которым можно было бы проводить оценку точности. В качестве альтернативы векторным границам полей для оценки защищённости пашни могут выступать растровые маски пахотных земель разного пространственного разрешения, например, GLC, ESRI и др. В регионах, где снежный покров не устойчив, выделение ЗЛН может быть основано на композитах минимальных значений NDVI, что требует проведения дополнительных исследований.

2.2 Развитие методов обработки данных ДЗЗ для получения устойчивых нормализованных наборов и долговременных рядов данных для изучения наземных экосистем

2.2.1 Метод фенологической нормализации временных рядов данных ДЗЗ

На основе данных высокого временного разрешения разработан метод многолетних фенологической нормализации рядов спутниковых наблюдений. Фенологические фазы развития растений зависят от географического расположения объекта и климатических особенностей среды, могут сильно варьироваться для одного и того же типа растительного покрова при разных метеорологических условиях (температурный режим, объем атмосферных осадков, начало снеготаяние и т.д.), а точность определения зависит от наличия данных, свободных от влияния снежного и облачного покрова. При этом многие задачи ДЗЗ, включающие в себя классификацию и мониторинг состояния растительного покрова, основаны на анализе временной динамики спектральных характеристик и определении особенностей сезонного развития растений. Разработанный метод направлен на совмещение межгодовых фенологических фаз при различной продолжительности вегетационного периода.

В качестве исходных данных используются восстановленные многолетние изображения ежедневные бесснежные композитные AQUA/TERRA MODIS пространственного разрешения 230 м для красного и ближнего инфракрасного спектральных каналов. На рисунке 2.2.1.1 приведены этапы формирования используемого набора данных. Предварительная обработка включает в себя формирование масок облачного покрова на основе данных в красном, ближнем инфракрасном, голубом и коротковолновом спектральных диапазонах. Информация о геометрии наблюдения позволяет фильтровать измерения, полученные при некорректных условиях съёмки, и формировать области расположения теней от облаков. Пространственный гистограммный анализ позволяет уточнять границы классов искажённых объектов в масках облачного

покрова. Маски содержат набор классов, позволяющих фильтровать снежный покров, различные типы облачности, атмосферную дымку и некорректные наблюдения.

После фильтрации недостоверных наблюдений из отдельных сеансов наблюдения формируются ежедневные композитные изображения. При этом происходит дополнительный анализ данных в скользящем временном окне на основе локального статистического анализа значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) различных классов наблюдаемых объектов.

Подготовка данных включает в себя заполнение пропусков в сформированных композитных изображениях. Коррекция изображений основана на анализе и восстановлении временных рядов методом полиномиальной интерполяции в скользящем окне переменного размера. При этом формируется непрерывный гладкий набор данных высокого временного разрешения, позволяющий отслеживать быстрые изменения в состоянии растительного покрова и определять наступление фенологических фаз с высокой точностью.



Рисунок 2.2.1.1 – Логическая схема формирования восстановленных многолетних ежедневных бесснежных композитных изображений AQUA/TERRA MODIS





нормализация временных рядов

На рисунке 2.2.1.2 приведены восстановленные временные ряды наблюдений за разные годы для одной точки, принадлежащей лесному типу растительного покрова. На

примере видно, что в разные годы даты начала наблюдения варьируют в пределах от 99 дня года в 2016 г., до 165 дня года в 2008, даты окончания наблюдения от 231 дня года в 2008 до 286 дня в 2020, а период наблюдения от 65 дней в 2008 г. до 165 в 2020 г. При этом значения спектральных характеристик и вегетационных индексов, полученных в одной фенологической фазе развития растения, также будут сильно отличаться.На рисунке 2.2.1.3 изображено фенологическое совмещение временных рядов, состоящее из 17 разновременных срезов, нормированных на длину вегетационного периода. При этом первый фенологический срез соответствует началу вегетации SOS (Start Of Season), последний — окончанию вегетационного сезона EOS (End Of Season), а середина временного ряда соответствует максимуму вегетации MAX. Логическая схема алгоритма создания разновременных фенологических срезов представлена на рисунке 2.2.1.4.



Рисунок 2.2.1.4 — Логическая схема создания разновременных фенологических срезов временных рядов

Метод фенологической нормализации временных рядов направлен на создание разновременных композитных изображений, каждое из которых содержит значения, соответствующее определённой фенологической фазе. При этом влияние межгодовых вариаций сводится к минимуму. Для этого на первом этапе ежегодно определяются значения максимума вегетации maxNDVI, и весенние и осенние минимумы LminNDVI и RminNDVI. Для нерастительных объектов с нетипичной годовой динамикой значений КСЯ так же определяются весенние и осенние максимумы LmaxNDVI.



Рисунок 2.2.1.5 — Восстановленные ежедневные временные ряды наблюдений за разные годы (смена класса растительного покрова)



Рисунок 2.2.1.6 — Фенологическая нормализация временных рядов (смена класса растительного покрова)

Многолетняя статистика значений экстремумов может отражать как естественную изменчивость наступления фенологических фаз и условий начала и окончания периода
наблюдений в году (см. рисунок 2.2.1.3), так и ситуации смены класса растительного покрова вследствие таких явлений как пожары, вырубки, заболачивание и т.д. (рисунок 2.2.1.5).На рисунке 2.2.1.5 видно, что в промежуток между 2008 и 2012 г. вследствие пожара участок, принадлежащий изображённому лесному покрову, оказался повреждён, и в 2012 г. характерной сезонной динамики для растительного покрова не наблюдается. Максимум вегетации в два раза ниже, чем в 2004 и 2008 г., а значения NDVI ни в один день 2012 года не достигает значений LminNDVI и RminNDVI для 2004 и 2008 лет. После происходит постепенное восстановление повреждённой лесной территории и, возможно, изменение класса растительного покрова. В такой ситуации фенологическая нормализация временных рядов может привести к потере информации за 2012 г., и размытию различий между разными растительными сообществами. Поэтому второй этап (см. рисунок 2.2.1.4) метода фенологического совмещения временных рядов включает в себя дифференциацию случаев межгодовой изменчивости фенологических характеристик и ситуаций смены класса растительного покрова.

Сезонные экстремумы за период наблюдения с 2001 по 2022 г. позволяют оценить стабильность класса растительности: среднее значение максимума NDVI за 22 года maxNDVI и величину стандартного отклонения D(maxNDVI). Для стабильных классов определяются медианные значение весеннего и осеннего многолетнего минимума medianLmin и medianRmin. Если величина стандартного отклонения D(maxNDVI) превышает 5 % от maxNDVI, предполагается смена класса и наличие двух многолетних весенних и осенних экстремумов, соответствующих разным классам растительного покрова. Минимумы для объектов с высокой межгодовой вариацией downLmin, upLmin, downRmin, upRmin определяются методом "k-средних".

Многолетние экстремумы используются как ключевые точки для масштабирования временных рядов и нормирования их на одну величину:

$$Step_{L} = \frac{(Day_{maxNDVI} - Day_{LminNDVI})}{N}$$

$$Step_{R} = \frac{(Day_{RminNDVI} - Day_{maxNDVI})}{N}$$

$$R_{n} = \begin{cases} R_{SOS+n \cdot StepL} & \text{при } n < N \\ R_{MAX+n \cdot StepR} & \text{при } n \geq N \end{cases}$$

$$(2.2.1.1)$$

где Day_i — порядковый номер дня года во временном ряду для фенологической фазы *i*; *StepL* — параметр масштабирования слева от максимума вегетации; *StepR* — параметр масштабирования справа от максимума вегетации; *N* — параметр дробления временного ряда; (2*N*+1) — число фенологических срезов; *n* — порядковый номер композита в нормализованном наборе данных.

На основе описанного метода был создан многолетний массив сезонных экстремумов, определены многолетние экстремумы и для 2021 г. сформирован набор из девяти фенологических композитов на территорию РФ, содержащих информацию о значениях яркостей в красном и ближнем инфракрасном спектральных каналах и датах наступления фенологических фаз.

Каждый фенологический срез соответствует определённому этапу развития растений, и можно оценить пространственное распределение дат наступления фенологических фаз (рисунок 2.2.1.7). На больших территориях сезонное развитие растений происходит неравномерно. Оно зависит от климата, рельефа, выпадения и таяния снежного покрова. Длина вегетационного сезона сокращается при продвижении от юга к северу страны, при этом одни и те же типы растительного покрова могут произрастать в разных условиях.



Рисунок 2.2.1.7 — Пространственное распределение дат наступления фенологических фаз для 2021 г. на территории России: *a* — 1/9 фенологический срез, соответствующий SOS; *б* — 3/9 фенологический срез; *в* — 5/9 фенологический срез, соответствующий MAX; *г* — 9/9 фенологический срез, соответствующий EOS

B таблице 2.2.1.1 приведены средние даты и величины стандартного распределения, соответствующие некоторым фенологическим композитам. Для первого из девяти построенных композитов, условно обозначенного в нормализованном наборе данных как 1/9 ширина распределения даты наступления фазы SOS наибольшая (см. таблицу 2.2.1.1), так как на нее сильнее всего влияют географо-климатические условия и наличие облачного покрова, так как от облачности зависит наличие данных и начало периода наблюдений в конкретном вегетационном сезоне (см. рисунок 2.2.1.7*a*). На рисунке 2.2.1.76 приведён третий композит, соответствующий достижению половины амплитуды значений NDVI на этапе роста растения. К середине сезона различия сглаживаются. Рисунок 2.2.1.7в соответствует максимуму вегетации, и разброс дат для этой фазы ниже, чем для SOS и EOS. На даты наступления фазы EOS (рисунок 2.2.1.7*г*) в большой степени влияет установление постоянного снежного покрова.

Номер композита	Фенологическая фаза	Средняя дата	Стандартное отклонение
1/9	SOS	127	32
3/9	1/2 maxNDVI	155	22
5/9	maxMAX	198	19
7/9	1/2 maxNDVI	244	20
9/9	EOS	276	22

T C 0 0 1 1	1 17					~
1 and 1 1 1 1	I — /Іаты	COOTBETCTRVIC	лшие пазнов	пеменным	KOMHOZUTHLIM	изорражениям
1 аблица 2.2.1.1	г дагы,	coorderendyic	лщие pasnor	pemennibim	KOWIIIOJIIIIDIWI	nsoopanennim

Гистограмма дат для 3/9 композита (рисунок 2.2.18*a*) приведена на рисунке 2.2.1.8*6*. Видно, что основная часть наблюдений распределена равномерно между 135-м и 165-м днями. На рисунке 2.2.1.8*в* представлен композит для 135-го дня года, а на рисунке 2.2.1.8*г* для 165-го дня года в RGB синтезе RED-NIR-RED. Эти даты в равной степени участвуют в создании фенологического композита, однако можно видеть, насколько сильно они различаются между собой. На 135-й день на северо-восточной части России ещё лежит снег, когда как на 165-й день, растительность на многих территорий уже давно миновали фазу SOS, и достигла максимума вегетации (жёлтый цвет на рисунке 2.2.1.7*в*).



Рисунок 2.2.1.8 — Сравнение фенологического среза и ежедневных данных. RGB синтез: RED-NIR-RED: *a* — 3/9 фенологический срез; *б* — гистограмма распределения дат для 3/9 фенологического среза; *в* — однодневный композит для 135-го дня года; *г* — однодневный композит для 165-го дня года

При этом заполнение композита соответствует более поздней дате наблюдения, а растительные группы находятся в одном состоянии сезонного развития. Это можно проиллюстрировать, если соотнести распределение значений NDVI для фенологического среза и соответствующих дат (рисунок 2.2.1.9).

Значения NDVI, полученные основе фенологического 3/9на среза (рисунок 2.2.1.9а) демонстрируют более равномерное распределение значений, чем для однодневных композитов (рисунки 2.2.1.96 и в), и отображают не географо-климатические вариации, а вариации значений NDVI для разных типов растительного покрова. На рисунке 2.2.1.9г приведено сравнение гистограмм для 135-го дня года, и соответствующих точек фенологического среза. Распределение значений для фенологического среза заметно уже, чем для 135-го дня. При этом видно, что часть территории на 135-го день только вышла из-под снега. Аналогичное сравнение для 165-го дня приведено на рисунке 165. Гистограмма однодневного композита шире, чем для фенологического композита, и смещена в область высоких значений NDVI. Любой однодневный композит, или построенный за определённый фиксированный временной промежуток, на большой территории будет содержать территории, находящиеся на разных этапах фенологического развития. Это можно увидеть на рисунке 2.2.1.10.

На рисунках 2.2.1.10*а* и б проиллюстрировано «движение» гистограмм распределения значений NDVI фенологических срезов по временной оси. На рисунке 2.2.1.10*а* приведены весенне-летние срезы, соответствующие периоду роста значений NDVI, на рисунке 2.2.1.10*б* осенние срезы, соответствующие периоду падения значений NDVI. Для демонстрации последовательного движения пика распределения значений от минимального NDVI к максимуму, а затем обратно к осеннему минимуму вегетационного индекса, ось абсцисс на рисунке 2.2.1.10*б* зеркально отображена.



Рисунок 2.2.1.9 — Сравнение фенологического среза и ежедневных данных, NDVI: *а* — 3/9 фенологический срез; б — 135-й день года; *в* — 165-й день года; *г* — гистограмма значений NDVI для фенологического среза и 135-го дня года; д — гистограмма значений NDVI для фенологического среза и 165-го дня года



Рисунок 2.2.1.10 — Сравнение гистограмм распределения значений NDVI для набора фенологических срезов и ежедневных композитов, соответствующих датам с наибольшей частотой значений разновременных композитных изображений: *а* — фенологические срезы 1/9, 3/9, 5/9; *б* — фенологические срезы 7/9 и 9/9; *в* — однодневные композиты за 135-й, 165-й, 195-й дни года; *г* — однодневные композиты за 255-й и 285-й дни года

На рисунках 2.2.1.10*в* и *г* представлены гистограммы для однодневных изображений, соответствующих средним значениям дат разновременных композитов (см. таблицу 2.2.1.1). Видно, что «движение» распределений для однодневных срезов смазанное, распределения более широкие и содержат несколько пиков.

Таким образом, многолетние восстановленные ряды наблюдений, позволяют отслеживать ежедневную динамику сезонного развития растений, определять даты наступления различных фенологических фаз И формировать разновременные изображения, соответствующие определённому этапу развития растений. Разработанный метод совмещения межгодовых вариаций развития растений и нормирования временных рядов при различной продолжительности вегетационного периода учитывает ситуации смены класса растительного покрова. Полученные фенологические срезы, представленные значениями КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах, отличаются высоким заполнением и пространственной однородностью. Распределение значений КСЯ для фенологических срезов уже, чем для однодневных восстановленных срезов и классических осреднённых композитов и содержат однородные внутригодовые состояния различных типов растительного покрова.

2.2.2 Метод оценки относительной полноты леса

За отчётный период был разработан метод дистанционной оценки относительной полноты лесов, традиционно измеряемой в рамках проводимых на местности лесоинвентаризационных обследований. Необходимость оценки данной характеристики вызвана, с одной стороны, устареванием накопленной информации об относительной полноте лесов страны, и, с другой стороны, её использованием при моделировании запасов стволовой древесины и оценке углеродного бюджета лесов. Восстановление относительной полноты лесов по данным ДЗЗ имеет ряд преимуществ по сравнению с её наземным измерением. Относительную полноту можно получать регулярно, практически без участия человека и одновременно охватывая протяжённые территории.

Относительная полнота — одна из характеристик горизонтальной структуры древесного полога, определяющая степень занятости площади стволовой массой. С помощью относительной полноты характеризуют хозяйственную ценность лесов: чем выше относительная полнота, тем больше запас древесины на единице площади. Относительная полнота вычисляется как отношение абсолютной полноты древостоя к показателю абсолютной полноты эталонного (нормального) древостоя для определённой породы, возраста и бонитета, взятого из соответствующих таблиц хода роста и продуктивности насаждений. Абсолютная полнота древостоя равна сумме поперечных сечений стволов на высоте 1,3 м в 1 м² на 1 га. Следовательно, относительная полнота выражаются в процентах или долях единицы.

На основе имеющихся опорных данных был проведён анализ связи относительной полноты с КСЯ (коэффициентами спектральной яркости) в различных каналах и показано, что наилучшую связь со значениями относительной полноты и другими характеристиками горизонтальной структуры древесного полога имеют данные, полученные в зимнее время с наличием снежного покрова на земной поверхности. Данный факт вызван увеличением различий между стволами и кронами деревьев и подстилающей поверхностью в зимний период и, одновременно, уменьшением внутриклассовых различий между разными типами подстилающей поверхности из-за наличия снежного покрова. Однако зависимость между КСЯ земной поверхности и относительной полнотой имеет нелинейный характер. Для низких значений относительной полноты характерен большой разброс в значениях КСЯ, а при полноте более 0,7 КСЯ перестаёт быть чувствительным к дальнейшему изменению относительной полноты (происходит насыщение).

Относительную полноту по определению можно представить в виде произведения двух множителей:

$$RS \stackrel{\text{\tiny def}}{=} \frac{\sum_{i=1}^{n} \pi d_{i}^{2}}{\sum_{i=1}^{n_{rs}^{opt}} \pi d_{j}^{2}} = \frac{n}{n_{rs}^{opt}} (\frac{\bar{d}}{d_{opt}})^{2},$$

где первый множитель $\frac{n}{n_{rs}^{opt}}$ характеризует пространственную плотность относительно максимально плотного насаждения в данных условиях произрастания, для данной преобладающей породы и возраста, а второй множитель $(\frac{\bar{d}}{d_{opt}})^2$ описывает запас насаждения по отношению к запасу нормального насаждения. Поэтому использования только данных спутниковой съёмки в зимнее время, характеризующих отношение долей пикселя занятых стволами и кронами деревьев и снегом, для определения относительной полноты недостаточно.

Для выбора оптимальной модели оценки полноты на основе данных спутниковых измерений рассмотрено влияние возраста, преобладающей породы и условий произрастания на зависимость относительной полноты от КСЯ (рисунок 2.2.2.1). Исследование проводилось с использованием выборки размером около 99 тысяч пикселей спутниковых данных MODIS, расположенных случайным образом на территории страны для которых имелись данные об относительной полноте.

На рисунке 2.2.2.1*а* приведены графики зависимости среднего значения КСЯ от относительной полноты для насаждений четырех разных доминирующих пород. При росте относительной полноты снижаются средние значения КСЯ. Для некоторых пород, например, для лиственных насаждений и ели, кривые, описывающие динамику КСЯ, очень близки, а для некоторых (лиственницы и сосны) – существенно отличаются. Заметим, что при стремлении к максимальной полноте большинство графиков выходит на плато по КСЯ, которое соответствует минимально возможным значениям КСЯ для насаждения данной преобладающей породы.



Рисунок 2.2.2.1 — Зависимость среднего значения КСЯ в красном канале зимнего композита MODIS от относительной полноты а) для разных типов преобладающих пород б) для насаждений разных бонитетов б) для насаждений разного класса возраста

Рисунок 2.2.2.16 оценки влияния условий произрастания, в данном случае бонитета на зависимость между относительной полнотой и КСЯ в красном области спектра. Для высоких бонитетов кривые практически совпадают и при этом зависимость достаточно слабая, так как в диапазоне изменения полноты значения КСЯ меняются слабо. Насаждения с низким бонитетом имеют гораздо более высокий коэффициент корреляции между КСЯ и относительной полнотой, что говорит о более сильной связи.

На рисунке 2.2.2.1*в* представлены зависимости между относительно полнотой и КСЯ земной поверхности с наличием снежного покрова для насаждений разных классов возрастов. Кривые практически совпадают, что говорит о том, что данный фактор можно исключить из рассмотрения при построении зависимостей между КСЯ земной поверхности и относительной полноты. Следовательно, для восстановления зависимости между КСЯ спутниковых данных и полнотой необходимо учитывать лишь тип преобладающей породы и условия произрастания.

На основе проведённого исследования в качестве признаков для построения регрессионной зависимости выбран следующий набор спутниковых данных:

- 1. Ежегодные композитные изображения, полученные усреднением значений яркости ежедневных значений данных MODIS при наличии снежного покрова на земной поверхности в красном и ближнем ИК спектральных диапазонах (каналы b1, b2). Данный тип данных характеризует наблюдаемую поверхность с точки зрения структуры и наличия древесного полога;
- 2. Ежегодные композитные изображения, полученные максимизацией ежедневных значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI в течение вегетационного сезона в семи спектральных диапазонах (каналы b1-b7) съёмки прибора MODIS в видимой, ближней ИК и средней ИК областях. Данный тип данных характеризует тип леса или земного покрова наблюдаемого участка земной поверхности.

При построении композитных изображений исходные ежедневные данные проходят несколько этапов предварительной обработки, включающие маскирование облачного и снежного покрова, маскирование теневых участков, заполнение пропусков в данных, сглаживание результирующих временных рядов данных. Для компенсации влияния факторов межгодовой вариабельности высоты и состояния снежного покрова композитные изображения покрытой снегом земной поверхности проходят дополнительную процедуру взаимной радиометрической нормализации.

Опорная выборка относительной полноты лесов строится на основе данных лесной таксации (ЛТ) на уровне выделов. Для построения выборки данные ЛТ подвергаются ряду фильтров для выявления наиболее достоверных и согласованных со спутниковыми измерениями участков. На первом этапе выполняется проверка взаимной согласованности основных характеристик лесов, доступных в материалах ЛТ на уровне таксационных выделов, с использованием моделей хода роста насаждений по запасу. Затем по зимним данным Sentinel-2 высокого пространственного разрешения выделы проверяются на яркостных характеристик. Полученные данные однородность также проходят дополнительную фильтрацию на основе информации об участках нарушений лесного покрова за период с 2000 года по данным проекта Global Forest Change и спутникового мониторинга лесных пожаров, а также экспертного анализа. На заключительном этапе обработки дополнительно применяется фильтрация граничных пикселей. В результате строится маска пикселей пространственного разрешения, соответствующего данным MODIS, для каждого пикселя которой рассчитывается значение относительной полноты на основе растеризованных с высоким разрешением повыдельных материалов ЛТ с учётом площади леса в пикселе данных. Полученная пространственно-распределённая опорная выборка используется для настройки параметров регрессии и восстановления значений относительной полноты (рисунок 2.2.2.2).

В качестве метода восстановления зависимости между признаками и целевой переменной выбран алгоритм множественной непараметрической регрессии Random Forest. Алгоритм заключается в построении множества решающих деревьев, а итоговая регрессионная оценка является усреднением их оценок. Регрессионная зависимость восстанавливается между значениями обучающей пространственно распределенной по территории страны выборки относительной полноты и соответствующими им значениями набора КСЯ, описывающего состояние земной поверхности за 2010 год. Для настройки регрессионной модели использовалось примерно 16,4 % исходной опорной выборки, что составляет 10 млн. пикселей, которые выбирались случайным образом равномерно на всей территории страны.

В ходе работ по настройке и оптимизации модели регрессии было отмечено, что исходная обучающая выборка имеет неравномерное распределения по относительной полноте (рисунок 2.2.2.3), что может влиять точность настройки модели. Модель Random

Forest включает в себя два источника случайности, один из которых выбор подвыборки пикселей для построения конкретного дерева. Так как доминирующие по частоте значения обучающей выборки имеют большую вероятность быть выбранными и используемыми при построении деревьев, чем менее представительные, итоговая оценка будет сдвигаться в сторону более частых значений относительной полноты. В частности, поэтому одной из особенностей работы алгоритма, отмечаемой при использовании Random Forest, является уменьшение диапазона выходных значений регрессии.



Рисунок 2.2.2.2 — Пространственное распределение опорной выборки относительной полноты на территории страны



Рисунок 2.2.2.3 — Сравнение сглаженной гистограммы распределения значений опорной выборки и гистограммы распределения значений относительной полноты лесов

Одним из решений вопроса обучения на неравномерно распределённой выборке является её балансировка, то есть разбиение исходного диапазона значений относительной полноты на интервалы с заданным шагом и использование при обучении равного числа элементов из каждого интервала. Такой подход позволяет более точно настроить метод оценки регрессии на всем интервале значений оценивания и увеличить точность модели, что подтверждается проведёнными экспериментами. Балансировка модели для предложенной задачи более предпочтительна, чем посткоррекция оценок, так как плотность распределения обучающей выборки существенно отличается от прогнозируемого распределения полноты на территории страны, так как больших площадей труднодоступных лесов нет достоверных данных об относительной полноте (рисунок 2.2.2.3).

Настройка модели регрессии проходила в несколько этапов для компенсации неравномерного пространственного распределения обучающей выборки. На первом этапе на основе указанного выше набора признаков и сбалансированной обучающей выборки восстанавливалась карта предварительных значений относительной полноты (точность настройки модели 0,64 ($R^2(OOB)$). Затем на втором этапе исходная обучающая выборка была дополнена результатами оценок относительной полноты в тех местах, где обучающая выборка отсутствовала. На заключительном этапе настройки регрессионной модели вместе со скорректированной опорной выборкой и описанного выше набора КСЯ в качестве дополнительных признаков использовались пространственные координаты пикселей. Проведённые эксперименты показали, что итоговая точность настройки модели составила 0,78 ($R^2(OOB)$).

На основе упомянутой ранее исходной опорной выборки вычислена точность оценки относительной полноты (MSE), которая составила 0.11 в значениях относительной полноты, что меньше, чем порог точности таксации полноты на основе спутниковых данных, заложенный в лесоустроительных инструкциях.

В результате применения настроенной регрессионной модели к временному ряду спутниковых данных MODIS и маскирования непокрытых лесом территорий восстановлен временной ряд цифровых карт относительной полноты с 2001 по 2021 гг. (рисунок 2.2.2.4).

Предложенный метод позволяет поводить регулярные оценки относительной полноты на территории страны и открывает возможность непрерывного наблюдения за процессами, происходящими в лесах в течение продолжительного времени.



Рисунок 2.2.2.4 — Пример цифровой карты относительной полноты лесов

Предложенный метод позволяет поводить регулярные оценки относительной полноты на территории страны и открывает возможность непрерывного наблюдения за процессами, происходящими в лесах в течение продолжительного времени.

2.3 Развитие методов дистанционного мониторинга динамики наземных экосистем с использованием физических и эколого-математических моделей

2.3.1 Разработка алгоритма разделения индекса листовой поверхности (LAI) между верхним и нижним ярусами лесов

Вертикальная структура леса существенно влияет на ключевые процессы обмена энергии и углерода между атмосферой и растительным покровом. В предыдущий отчетный период был разработан алгоритм разделения индекса листовой поверхности (LAI) между верхним и нижним ярусами растительного покрова. Рассчитанный продукт ИКИ MODIS LAI включает в себя оценку LAI верхнего и нижнего ярусов (LAI^C, LAI^U соответственно) и проективного покрытия крон (f). Были получены карты LAI верхнего и нижнего ярусов и начата работа по валидации продукта. В данный отчетный период проведённая работа касалась 1) улучшения полуэмпирической модели оценки LAI по ярусам лесов и 2) сравнения получаемых карт LAI с наземными измерениями и имеющимися альтернативными LAI продуктами по данным ДЗЗ.

Улучшение полуэмпирической модели разделения LAI

На предыдущем отчётном периоде было выведено полуэмпирическое уравнение разделения LAI по ярусам леса:

$$LAI^{C}(f) = -\frac{1}{k} ln (1-f),$$

$$LAI^{U}(f) = \rho LAI^{C}(f)[1-f]^{\gamma},$$

$$LAI^{T}(f) = \frac{1}{k} ln(1-f) \{1 + \rho [1-f]^{\gamma}\},$$

(2.3.1.1)

где LAI^{C} , LAI^{U} , LAI^{T} это значения LAI верхнего яруса (крон деревьев), нижнего яруса и полное LAI леса; f – проективное покрытие крон. Триплет {k, ρ , γ } — это свободные параметры уравнения. Территория исследования была разделена на три области в соответствии типом леса (DNF/ENF/DBF) согласно карте преобладающих пород леса ИКИ РАН для которых система уравнений выше решалась независимо. Под рассматриваемыми типами леса понимались классы: ENF — Evergreen Needleleaf Forest (вечнозелёные хвойные леса), DNF — Decidous Needleleaf Forest (листопадные хвойные леса), DBF-Decidous Broadleaf Forests (листопадные лиственные леса). Используя продукты индекса листовой поверхности ИКИ LAI и проективного покрытия древесного полога ИКИ ТСС, решение методом наименьших квадратов получено системы нелинейных уравнений (2.3.1.1) относительно искомых параметров. Итоговые значения параметров приведены в таблице 2.3.1.1. С помощью вычесленных значений параметров были рассчитаны итоговые карты LAI^C, LAI^U и f.

Таблица 2.3.1.1 — Итоговые значения параметров уравнения разделения LAI по ярусам в зависимости от типа леса (DNF/ENF/DBF)

Параметр/ класс LC	DNF	ENF	DBF
k	0,40	0,45	0,52
ρ	3,0	1,2	1,8
γ	2,5	1,2	1,6

Валидация продукта ИКИ MODIS LAI

Основной трудностью оценки точности продукта ИКИ LAI является крайне малое количество наземных измерений LAI для лесов России, не только по ярусам, но даже общего значения LAI. Весьма неточной является оценка типичного LAI для разных преобладающих пород леса. Поэтому для оценки точности ИКИ LAI была применена следующая стратегия. Во-первых, проведено сравнение продукта ИКИ LAI с глобальным NASA MODIS LAI продуктом, который строится на основе базового алгоритма, который позднее был оптимизирован для лесов России. NASA MODIS LAI продукт неоднократно валидировался научным сообществом и ключевые работы по оценке его точности приведены в таблице 2.3.2.1. На основе более чем двадцатилетней работы по валидации точность NASA MODIS LAI продукта в среднем оценивается в 20 %. В указанных в таблице 2.3.2.1 работах отмечено, что продукт дает оценку именно полного LAI, которая включает оценку для нижнего полога. В разреженных лесах продукт LAI^T может сильно переоценивать LAI^C крон.

Покрытие	Классы леса	Описание	Ссылка
Глобально	Bce	Многоуровневая оценка точности с	Yan et al., 2016. Evaluation of
		использованием наземных данных с	MODIS LAI/FPAR Product
		54 участков в Европе и 3 глобальных	Collection 6. Part 2: Validation
		ДЗЗ продуктов: CYCLOPES, GEO1 и	and Intercomparison
		GLASS и метеорологических данных	
		(температура и осадки)	
Глобально	Bce	Произведено детальное сравнение с	Garrigues et al. 2008. Validation
		независимыми глобальными ДЗЗ LAI	and intercomparison of global
		продуктами GLOBCARBON и	leaf area index products derived
		CYCLOPES, а также ECOCLIMAP	from remote sensing data
		климатологией	
Северная	ENF,	Валидация по 10 участкам проекта	Cohen et al. 2006. MODIS Land
Америка	DBF	BigFoot. Произведены детальные	Cover and LAI Collection 4
		измерения на площадках 5×5 км и	Product Quality Across Nine
		масштабирование точечных данных к	Sites in the Western Hemisphere
		разрешению спутниковых данных	
Восточная	DNF	Валидация по восточной Сибири на	Kobayashi et al. 2010. A satellite
Сибирь		основе спутникового продукта LAI ^C , а	based method for monitoring
		также валидация по участку станции	seasonality in the overstory leaf
		Спасская Падь (под Якутском)	area index of Siberian larch forest
Финляндия	ENF	Валидация по участку елового леса в	Wang et al. 2004. Evaluation of
		районе г. Roukolahti (Финляндия)	the MODIS LAI algorithm at a
			coniferous forest site in Finland

Таблица 2.3.1.2 — Ключевые исследования по валидации NASA MODIS (MOD15) LAI^T на глобальном уровне

Проведено попиксельное сравнение NASA MODIS LAI (MCD15A2H, версия 6.1) и ИКИ MODIS LAI продуктов. Данные LAI были усреднены за вегетационный перод (июнь-июль-август) 2010 г. На рисунке 2.3.1.1. представлены карты двух продуктов, гистограммы разницы и статистики сопоставления продуктов. Анализ проведен отдельно для трех типов леса. Пространсвенное распределение продуктов схоже, но не идентично. Например, в NASA MODIS LAI четко выражен широтный градиент LAI в восточной Сибири, в то время как в ИКИ LAI он значительно менее заметен. Для всех трех типов леса ИКИ LAI имеет более высокие средние значения, но для большинства пикселов разница незначительна. Наибольшее отличие наблюдается для DNF, так как именно для него модельные данные были значительно изменены. R^2 имеет умеренный диапазон

вариаций (0,44–0,56) и умеренное значение RMSE (0,79–0,88). Уравнение линейной регрессии наиболее блико к 1:1 в случае ENF, и наиболее сильно отколняется для DBF. Последнее возможно возникает из-за того, что для DBF значения листового индекса наиболее высоки, оценка LAI зашумлена и методы сезонной интерполции ИКИ LAI приводят к нелинейному расхождению значений продуктов. В целом на уровне страны различие между продуктами составляет не более чем 20 %. Ввиду того, что продукты близки как по построению (алгоритм рассчета и входные данные), а также по самим значения LAI^T оценка точности MCD15A2H LAI^T может быт перенесена на продукт ИКИ MODIS LAI^T.



Рисунок 2.3.1.1 — Сравнение оценок полного LAI леса (LAI^T) по данным продуктов ИКИ MODIS LAI (набор данных 1) и NASA MODIS MCD15A2H (набор данных 2) по территории лесов России. Данные были усреднены за вегетационный период (июнь-июль-август) 2010 г. Пространственное распределение данных показано на панелях (а), (б). Красными кружками выделены позиции станций, где проводились наземные измерения LAI по ярусам леса (рисунки 2.3.1.3, 2.3.1.4). Данные представлены в проекции Albers с разрешением 230м. Белым показаны участки суши не занимаемые лесом (тундра, луга, с/х и т.п.). Гистограммы разности данных приведены на панелях (в, д), ниже приведены статистики линейной регрессии между продуктами

Было проведено сравнение продуктов ИКИ MODIS LAI и MCD15A2H с LAIC, продуктом японского института RIGC/JAMSTEC. RIGC LAIC строится на основе данных SPOT-VGT и радиометрических индексах, использующих оптические и SWIR каналы. Для проведения сравнения все три источника данных были приведены к единому пространственно-временному формату: область сравнения — восточная Сибирь,

проекция — GEOGRPHIC на разрешении 1/112°, сравниваемая статистика — среднее значение по выборке в течение вегетационного периода 2010 г. Сравнение проводилось только для верхнего яруса, так как данные RIGC LAIC имеют только эту компоненту. По этой причине данные MCD12A2H были обработаны алгоритмом ИКИ для разделения LAI по ярусам. Результаты сравнения представлены на рисунке 2.3.1.2.



Рисунок 2.3.1.2 — Сравнение оценок LAI верхнего яруса леса (LAI^C) по данным продуктов ИКИ LAI (набор данных 1) и NASA MODIS MCD15A2H (набор данных 2) and RIGC LAI (набор данных 3) для Восточной Сибири. Данные усреднены за период июнь-август 2010 г. Пространственное распределение LAI^C показано на панелях (а)–(в). Белым показаны участки не занимаемые лесом (тундра, луга, с/х и т.п.) Сравнение гистограмм распределения LAI^C по продуктам показано на панели (г), а гистограммы разности данных между различными продуктами показаны на панели (д)

Сопоставим пространственное распределение LAIC у трёх продуктов. В целом они схожи, однако MCD15A2H продукт имеет более резко выраженные широтные градиенты LAIC. Этот эффект отражается на гистограммах (панель (д)): MCD15A2H ещё более занижает минимальные значения, но количество высоких значений спадает медленнее. Если рассмотреть разницу продуктов по всей территории лесов восточной Сибири то продукты в целом согласованы, хотя MCD15A2H имеет более высокое отклонение (0,28) чем ИКИ LAIC (0,2) от RIGC LAIC. Все три продукта имеют умеренную корреляцию

между собой, но (ожидаемо) ИКИ LAIC и MCD15A2H LAIC имеют лучшее соответствие, так как рассчитаны схожими алгоритмами со схожими входными данными

Была выполнена валидация продукта ИКИ MODIS LAI на основе наземных измерений по двум тестовым участкам, в районе г. Якутск и на Кольском полуострове. Результаты валидации на тестовом участке в районе Якутска представлены на рисунке 2.3.1.3. Приведены сезонные профили как полного LAI леса (LAIT) так и компонент (LAIC и LAIU) продукта ИКИ LAI. Разбивка на компоненты произведена тем же алгоритмом, но применённым не к сезонным средним, а к 7-дневным композитным данным ИКИ MODIS LAI. В целом ИКИ MODIS LAIC достаточно хорошо отслеживает динамику наземных измерений LAIC по всем трём площадкам (а)–(в). На станции Спасская Падь были проведены в 2019 г. более детальные измерения, которые включают оценку LAI нижнего яруса, она хорошо ложиться на спутниковую оценку по данным MODIS (панель (г)). Линейная регрессия наземных и спутниковых оценок компонент LAI имеет R2 = 0,73 и RMSE = 0,50, что является очень хорошим показателем для данного типа измерений.



Рисунок 2.3.1.3 — Валидация продукта ИКИ LAI (LAI^T, LAI^C и LAI^U — полное LAI, LAI верхнего и нижнего ярусов леса, соответственно) с наземными измерениями на трёх станциях вблизи г. Якутск: Молотцовская (62.25°N, 130.9112583°E), Нелегер (62.31416667°N, 129.4975°E) и Спасская Падь (62.255°N, 129.6188°E). Доминирующая порода леса на всех станциях — лиственница.

Наземные измерения производились в 2000 г. на первых двух станциях и в 2000/2019 гг. на последней. Затемненные интервалы на графиках выделяют периоды когда MODIS данные имеют дефекты (полосы с заниженным КСЯ). На панелях (а)–(г) приведены сезонные профили данных, а на панели (д) показана фазовая диаграмма сравнения для все данных. Ниже приведены статистики линейной регрессии между данными ИКИ LAI и наземными измерениями

Важной особенностью данного сравнения является то, что модель продемонстрировала способность воспроизвести различия в сезонном ходе LAI между верхним и нижним ярусами. Сезонный профиль верхнего яруса имеет обычную форму перевёрнутой чаши. Однако в сезонном ходе для нижнего яруса возникает провал в пике сезона (рисунок 2.3.1.4). Причина этого падения LAI в том, что к середине сезона лес из проективное покрытие верхнего яруса достигает максимума, что приводит к недостаточному доступу света к нижнему ярусу и понижению LAI нижнего яруса.



Рисунок 2.3.1.4 — Эффект «провала сезонного профиля нижнего яруса» наблюдаемый в независимых исследованиях. Панель (а) показывает наземные измерения сезонного профиля NDVI нижнего яруса (полые кружки) и LAI верхнего яруса (заполненные кружки) на станции Subheric в Финляндии. В то время как сезонный профиль LAI верхнего яруса демонстрирует типичную кривую (перевёрнутая чаша), NDVI нижнего яруса имеет провал в период пика сезона. Данные взяты из работы *Rautiainen M., Mõttus M., Heiskanen J., Akujärvi A.,Majasalmi T., Stenberg P.* Seasonal reflectance dynamics of common understory types in a Northern European boreal forest. Remote Sens // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. Р. 3020–3028. Панель (б) показывает MODIS NDVI и наземные измерения NDVI сезонного профиля нижнего яруса на станции Hyytiälä в Финляндии. Данные взяты из работы *Pisek J., Rautiainen M., Heiskanen J., Mottus M.* Retrieval of seasonal dynamics of forest understory reflectance in a Northern European boreal forest from MODIS BRDF data // Remote Sensing Environment. 2012. V. 117. P. 464–468

На рисунке 2.3.1.5 приведены результаты валидация продукта ИКИ LAI на участке с разреженным лесом на Кольском полуострове. Особенностью данного участка является то, что влияние нижнего яруса значительно для данного леса. Спутниковая оценка предоставляет полное LAI леса, в то время как наземные измерения, как правило, нацелены на верхний ярус. Измерения проективного покрытия крон проводились с помощью БПЛА (беспилотных летательных аппаратов — UAV), расчёт производился методами фотограмметрии. Пространственное покрытие измерений UAV составило 120 пикселей MODIS, что позволяет рассчитать надёжные статистики. Для UAV измерений проективное покрытие крон рассчитано на основе используемой модели. Сравниваемые фрагменты данных ИКИ MODIS LAI^T, LAI^C, UAV LAI^C, ИКИ MODIS f and UAV f показаны на рисунке 2.3.1.5. Детального простанствееного соответствия ИКИ LAI и UAV LAI не наблюдается, тем не менее присутствует четкий градиент с северо-запада на юго-восток, соответствующий повышению плотности как LAI, так и проективного покрытия при переходе от еловых к березовым породам леса. Важно, что гистограммы для MODIS и UAV данных как в случае LAI^C так и проективного покрытия имеют хорошее соответвие и средние значения разности состаляют -0,14 для LAI^C и 2,57 % для прективного покрытия.



Рисунок 2.3.1.5 — Результаты валидации продукта ИКИ LAI (LAI^C и f — LAI верхнего яруса леса и проективного покрытия крон, соответственно) с наземными измерениями на Кольском полуострове (67,573223–67,540376° с.ш., 33,947955–34,022029° в.д.) Беспилотные измерения (UAV) проективного покрытия крон проводились 18–20 июня 2019 г. Тип растительности — смешенный лес, берёзово-еловый на юго-востоке и еловоберёзовый на северо-западе. Композитный продукт ИКИ LAI за период 18–25 июня 2019 г. был использован для валидации. Все данные были перепроецированы в проекцию UTM (WGS-1984, зона 36N на разрешении 230 м). Панели (a)-(д) показывают карты ИКИ LAI^T, LAI^C, UAV LAI^C, ИКИ f и UAV f, соответственно. На панели (e) представлено сравнение гистограмм LAI^C по данным ИКИ и UAV. Панель (ж) показывает сравнение оценкок проективного покрытия на основе тех же данных. Результаты регрессии LAI^C так и f для обоих источников данных приведены ниже

2.4 Формирование и анализ многолетних рядов наблюдений наземных экосистем для исследования глобальных изменений, решения задач рационального природопользования и устойчивого развития

2.4.1 Спутниковый мониторинг опустынивания на юге европейской России в 2019–2020 годах

В 2020 г. на юге европейской части России из-за засухи и неконтролируемого роста поголовья овец и коз катастрофически интенсифицировались процессы опустынивания пастбищ, что привело к росту площади подвижных песков и других земель, лишённых растительного покрова. Следствием этого стали масштабные пыльные бури,

наблюдавшиеся осенью 2020 г., в результате которых в октябре 2020 г. площадь покрытых песком пастбищ в Астраханской области, Калмыкии, Дагестане и Ставропольском крае превысила 1,5 млн га. В 2021 г. ситуация относительно стабилизировалась, тем не менее, площади открытых песков и дефлированных территорий всё ещё превышали 250–300 тыс. га, также в первом полугодии отмечались и пыльные бури. В 2022 г. сохранялся риск увеличения площадей лишённых растительного покрова пастбищных земель в регионе. Данное исследование является продолжением работ по спутниковому мониторингу процессов опустынивания на юге России.

Целью работы является определение закономерностей динамики площадей открытых песков и дефлированных территорий в период интенсификации процессов опустынивания 2019–2022 гг. в Северо-Западном Прикаспии под влиянием природных и антропогенных факторов с использованием данных Landsat.

В качестве источника данных выбраны спутниковые изображения с КА Landsat-8 и -9 за период 2019–2022 г. (рисунок 2.4.1.1), когда площадь опустынивания резко увеличилась по сравнению с периодом до 2019 г.



Рисунок 2.4.1.1 — Спутниковые изображения массивов подвижных песков на пастбищах Калмыкии: (a) — 23.06.2019; (б) — 09.06.2020; (в) — 30.07.2021; (г) — 31.05.2022

Данные Landsat имеют пространственное разрешение 30 м, что позволяет точнее определять границы очагов подвижных песков по сравнению с использованием изображений, получаемых спутниковыми системами MODIS и VIIRS. Спутниковые изображения Landsat второго уровня обработки, прошедшие радиометрическую калибровку и коррекцию атмосферных искажений, использовались для расчёта NDVI. Далее выполнялась совместная классификация изображений, включающих значения NDVI и коэффициента спектральной яркости в красном диапазоне длин волн. Подобный подход ранее уже показал достаточную точность выделения открытых песков.

На каждый год использовалось пять спутниковых изображений (тайлы 169028, 169029, 170027, 170028, 170029). Выбирались даты снимков по возможности близкие к максимуму вегетации в мае и первой половине июня. Поскольку даты спутниковой съёмки в пределах года могли отличаться, то сначала выполнялась классификация каждого изображения по отдельности, а затем составлялся результирующий растр на всю территорию исследований. Площадь опустынивания в 2022 г. показана на рисунке 2.4.1.2.



Рисунок 2.4.1.2 — Площади открытых песков и дефлированных земель на 2022 г.: I — границы регионов, II — границы районов, III — ООПТ, IV — соры и солончаки, V — водоёмы, VI — участки без растительного покрова

В июне 2019 г. в регионе исследований отмечено 232,6 тыс га опустыненных пастбищных земель (таблица 2.4.1.1). Из-за начавшегося осенью этого года и продолжающегося в 2020 г. засушливого периода, самозарастание песков было незначительным. Весенняя засуха 2020 г. и чрезмерный выпас домашнего скота привели к росту площадей опустынивания примерно на 70 %. Наиболее сильный в относительном выражении рост опустынивания земель был характерен для Дагестана и Ставропольского края (на 46 и 31 % соответственно), при том что до 2019 г. ситуация с деградацией пастбищ здесь была благополучной. В июне площадь открытых песков составляла 390 тыс. га, к концу сентября она увеличилась примерно до 700-800 тыс. га, а к середине октября масштабные пыльные бури привели к засыпанию пастбищ песком. В итоге на конец 2020 г. площадь открытых песков составляла не менее 1,4 млн га. До августа большая часть опустыненных пастбищ была расположена на границе Калмыкии и Астраханской области, но уже в сентябре из-за сильных юго-восточных ветров и вызванных ими эоловых процессов многократно увеличилась площадь подвижных песков на севере Дагестана и Ставропольского края. Засухи и перевыпас домашнего скота привели к практически полному отсутствию растительной ветоши на пастбищах, итогом стало прекращение в 2020 и 2021 гг. регулярных ранее степных пожаров.

Derror	Площадь, тыс. га / %				
Гегион	2019	2020	2021	2022	
Астраханская область	96,4 / 41,4	135,3 / 34,6	101,1 / 29,3	30,8 / 17,0	
Республика Дагестан	20,1 / 8,6	49,5 / 12,7	44,7 / 13,0	27,2 / 15,0	
Республика Калмыкия	104,6 / 45,0	179,2 / 45,9	170 / 49,3	100,9 / 55,7	
Ставропольский край	11,5 / 5,0	26,6 / 6,8	28,9 / 8,4	22,4 / 12,3	
Всего	232,6 / 100	390,6 / 100	344,6 / 100	181,3 / 100	

Таблица 2.4.1.1 — Динамика площадей открытых песков и дефлированных территорий в 2019-2022 гг.

Весна 2022 г. в Калмыкии и Астраханской области характеризуется засухой, аналогичной 2020 г., а на севере Дагестана и Ставропольского края более сильной. Это привело к угнетению пастбищной растительности. Существенное снижение поголовья домашнего скота в период 2021–2022 гг. позволило избежать последствий перевыпаса в условиях весенней засухи 2022 г., которые наблюдались в регионе в 2020 г. Тем не менее, очень высокие температуры августа и практически полное отсутствие осадков в этом месяце привели к пыльным бурям в период 18–28 августа (рисунок 2.4.1.3), особенно сильным на севере Ставропольского края и Дагестана. Это может повлечь очередной рост площадей подвижных песков и дефлированных пастбищ. По этим причинам необходимо продолжение мониторинга процессов опустынивания на юге России. Проведение фитомелиоративных работ по закреплению подвижных песков способно существенно сократить площади открытых песков.



Рисунок 2.4.1.3 — Спутниковые изображения пыльной бури на юге европейской России 22 августа 2022 г.: (а) — MODIS Aqua; (б) — Sentinel-2B, красный контур — местоположение фрагмента спутникового изображения Sentinel-2

Проведённые исследования показали стабилизацию процессов опустынивания в Северо-Западном Прикаспии в 2022 г. по сравнению с 2020–2021 гг. Тем не менее на юге Калмыкии, севере Дагестана и северо-востоке Ставропольского края ситуация остаётся опасной, что подтверждается пыльными бурями в августе 2022 г. Необходимо продолжение мониторинга состояния пастбищ в регионе и своевременное реагирование на рост угрозы необратимого опустынивания путем регулирования пастбищных нагрузок и фитомелиорации.

2.4.2 Спутниковые наблюдения задымлений от тростниковых пожаров на Нижней Волге

Ландшафтные пожары являются важным фактором динамики состояния экосистем, условий жизни населения, а также источниками выбросов в атмосферу парниковых газов. В нашей стране огромное внимание уделяется проблеме лесных пожаров, в том числе, вопросам их мониторинга. Ежегодно огонь проходит миллионы гектаров лесов, а дым от лесных пожаров накрывает на порядок большие площади. В то же время в наземных экосистемах степной и пустынной зоны природные пожары являются регулярным явлением как в зональных, так и в интразональных пойменных ландшафтах. Практически ежегодно отмечаются факты задымления городов юга России из-за сжигания пожнивных остатков в их окрестностях. При этом из-за небольшого объёма сгорающей биомассы задымление от травяных палов выражено намного меньше по сравнению с верховыми лесными и торфяными пожарами. Исключением являются тростниковые пожары в поймах и дельтах южных рек, например, Волги в её нижнем течении.

Ежегодный прирост растительной массы тростниковых зарослей в дельте Волги может достигать 5–7 т/га сухого вещества. При многолетнем накоплении мортмассы могут происходить очень крупные пожары площадью 10–20 тыс. га и более. Также нередко отмечаются ежегодные возгорания на одних и тех же участках с последующим восстановлением тростниковой растительности после весенних пожаров в течение вегетационного сезона.



Рисунок 2.4.2.1 — Спутниковые изображения дымовых шлейфов на Нижней Волге: MODIS Terra, 11.10.2021, 11:35 (a), MODIS Aqua, 11.10.2021, 13:25 (б), TROPOMI Sentinel 5p UV Aerosol Index, 11.10.2021, 12:35 (в), TROPOMI Sentinel 5p концентрация CO (моль/м²), 11.10.2021, 12:35 (г); время UTC+3; красная линия — государственная граница РФ

Как правило, в дельте Волги от задымлений воздуха страдают населённые пункты в радиусе 100–150 км от очага горения. Но в отдельных случаях складываются условия, когда дымовой шлейф распространяется на намного протяжённые расстояния. Так, 11 октября 2021 г. наблюдался шлейф рекордной протяжённости почти в 700 км и площадью более 50 тыс. км²: от восточной части дельты Волги (с. Курмангазы (Ганюшкино) в Атырауской обл. Казахстана) до центральной части Ростовской обл. Дым был зафиксирован метеостанцией в Волгограде на расстоянии почти в 500 км от

источника (рисунок 2.4.2.1). Ранее дымовые шлейфы протяжённостью до 150–200 км фиксировались в сентябре-октябре 2015 и 2019 гг. При этом очаги горения были расположены также в восточной части дельты в Атырауской обл. или в авандельте. За период 2001–2020 гг. в дельте Волги выгорело около 80 % территории, из которых почти половина горела три и более раз. Ежегодно здесь отмечается более тысячи пожаров средней площадью 150–200 га. Тем не менее, дымовые шлейфы протяжённостью в несколько сотен километров отмечаются редко.

Целью работы является анализ условий многолетних и сезонных особенностей горения в дельте Волги с использованием спутниковых изображений MODIS, TROPOMI, данных детектирования активного горения (тепловых аномалий) FIRMS. Исследование основано на архиве данных детектирования активного горения по данным MODIS. Очаги активного горения охватывают пройденную огнем территорию лишь частично. По этой причине определение выгоревших площадей на каждую дату основывалось на создании полигонов Вороного вокруг каждого очага горения внутри границы пожара, которая было выделена визуально по данным Sentinel-2 и Landsat-7, 8. На основе атрибутивных данных очагов активного горения были получены значения FRP (Fire radiative power) и величина разрешения пикселей MODIS и VIIRS (scan и track — размеры пикселей в километрах по долготе и широте соответственно). Анализ тенденций многолетней и сезонной динамики выполнялся по данным MODIS (разрешение 1000 м), для анализа распространения пожара в 2021 г. использовались также данные VIIRS (разрешение 375 м). Сенсор MODIS имеет разрешение около 1 км в тепловых каналах при съёмке в надир, при отклонении от надира разрешение снижается. Для компенсации влияния различных размеров пикселей на измерения величины FRP, а также для обеспечения сопоставимости этой величины по данным MODIS и VIIRS было проведено нормирование FRP на площадь пикселя с получением показателя FRPS. Многолетняя динамика FRPS анализировалась по данным MODIS.



Рисуно 2.4.2.2 — Многолетняя динамика количества очагов активного горения MODIS по диапазонам FRPS (широкие столбцы — весна, узкие — лето – осень) (а); среднемноголетнее количество очагов активного горения MODIS по диапазонам FRPS и среднемноголетние значения FRPS по месяцам (б)

Интенсивность пожара может быть выражена через мощность потока энергии излучения FRP, данные о которой содержатся в составе информационных продуктов детектирования очагов активного горения. Этот показатель широко используется при анализе ландшафтных пожаров и их последствий. В дельте Волги около 85 % фиксируемых очагов горения имеют FRPS до 50 MBT (рисунок 2.4.2.2), максимальное значение 1,7 тыс. МВт было зафиксировано 2 октября 2010 г. Наибольшее задымление отмечается при больших площадях пожаров и высокой интенсивности горения растительности с высокой долей вегетирующих побегов. Для большинства пожаров с интенсивным выделением дыма характерно наличие очагов горения с FRPS более 500–1000 MBT/км². Например, 9 октября 2021 г. были отмечены очаги с FRPS 670 MBT/км², а в сентябре 2019 г. — 1500–1600 MBT/км².



Рисунок 2.4.2.3 — (а) связь FRPS и скорости ветра по данным MODIS за 2001–2021 гг.; (б) динамика выгоревшей площади за сутки, среднесуточной скорости ветра и среднесуточного FRPS исследуемого пожара в октябре 2021 г.

В весенние месяцы нередки пожары с FRPS более 1000 MBт, тем не менее в это время протяжённых дымовых шлейфов не возникает. В среднем в весенний период в дельте Волги интенсивность горения ниже, чем летом и осенью. Также отличается направление связи между скоростью ветра и FRPS: летом и осенью мощность горения максимальна при умеренном ветре скоростью до 5–6 м/с, в то время как влияние ветра на FRPS весенних пожаров не выражено (рисунок 2.4.2.3). При усилении ветра FRPS пожаров летом и осенью резко снижается. Предположительно это может быть связано с наличием зелёной растительности летом и в начале осени, для возгорания которой требуется большая температура и, следовательно, относительно длительное горение

ветоши, невозможное при быстром движении фронта пожара. При сильном ветре беглый огонь в меньшей степени повреждает зелёные побеги тростника, сгорает в основном мортмасса, выделяющая меньшее количество продуктов горения и водяного пара по сравнению с вегетирующей растительностью. Ранней весной вся растительная масса сухая, поэтому ветер способствует быстрому распространению фронта пожара.



Рисунок 2.4.2.4 — (а) многолетняя динамика суммы и среднего значения FRPS на тепловую аномалию по данным MODIS за 2001-2021 гг.; (б) сплошные линии — сумма FRPS, пунктир — средние значения FRPS) и среднегодовых расходов в створе Волгоградского гидроузла и максимальных уровней по гидрологическому посту в Астрахани

Горимость пойменных ландшафтов Нижней Волги, в том числе дельты, тесно связана с гидрологическими условиями. Установлено, что раннее, длительное и высокое половодье существенно снижает количество и площади пожаров не только в весенний период, но и летом и осенью. Величина FRPS пожаров также связана с гидрологическими условиями (рисунок 2.4.2.4). Коэффициент корреляции годовой суммы FRPS и среднего FRPS на один очаг активного горения со среднегодовыми расходами воды равен -0,73, а с максимальными уровнями половодья составил -0,76. При этом влияние максимальных уровней половодья наиболее выражено именно в летне-осенний период (r = -0.88 для суммы FRPS и -0,77 для среднего значения), весной же связь с уровнями воды отсутствует. Наибольшие задымления отмечались в 2015, 2019 и 2021 гг., когда и максимальные уровни половодья, и среднегодовые расходы имели наименьшие значения. Также эти годы характеризуются не только максимальными суммами FRPS, но и наибольшими значениями FRPS на один очаг активного горения: более 50 MBT/км². Это значение было достигнуто также осенью 2010 г., но общая сумма FRPS в тот год была намного ниже, что говорит о существенно меньшей площади горения. Это подтверждается и данными ранее опубликованных результатов исследований. Таким образом, можно констатировать, что условия для формирования протяжённых на сотни километров дымовых шлейфов складываются только в период летне-осенней межени

маловодных лет. Таким образом, гидрологические изменения последних лет, направленные на снижение уровней половодья, потенциально способны приводить к интенсификации пожаров, в том числе в летне-осенний период.



Рисунок 2.4.2.5 – Тепловые карты среднемноголетнего количества очагов активного горения в 10 км радиусе (слева) и среднемноголетних сумм FRPS (МВт/км²) очагов активного горения в 10 км радиусе (справа) за 2001-2021 гг. ; а, б — летние и осенние пожары, в, г — весенние пожары, д, е — все пожары

В условиях авандельты затруднено тушение пожаров, поскольку здесь отсутствуют дороги, движение противопожарных судов осложняется плотными зарослями водной растительности и малыми глубинами. По этим причинам огонь может практически беспрепятственно продвигаться до каспийского взморья. Для оценки пространственного распределения очагов активного горения в дельте Волги использовался реализованный в программной среде QGIS метод тепловых карт (карт интенсивности), показывающих плотность наблюдаемых точек в радиусе 10 км (рисунок 2.4.2.5). Также использовалось взвешивание по значениям FRPS, в этом случае рассчитывалось не количество точек в радиусе 10 км, а сумма их FRPS. Очаги активного горения достаточно равномерно распределены по дельте. Карта с взвешиванием по показателю FRP наглядно иллюстрирует расположение участков наибольшей интенсивности горения: передний край дельты и её восточная часть в Казахстане. При этом большая часть летних очагов горения расположена именно в Атырауской области Казахстана. Причины повышенной горимости этого участка преимущественно в летний период требуют дополнительного изучения.

2.4.3 Оценка транспортной доступности лесных ресурсов

Транспортная доступность лесных ресурсов является важным показателем при планировании и ведении лесохозяйственной деятельности. Большинство работ, посвящённых оценке транспортной доступности на основе спутниковых данных и продуктов их обработки, охватывают либо небольшие локальные участки, либо отдельные субъекты РФ и учитывают в основном информацию о дорожной сети. В рамках выполненных работ был предложен метод оценки транспортной доступности лесов, основанный на совместном анализе данных о транспортной сети, рельефе и лесных ресурсах, а также фактической информации о вырубках. Общая схема метода представлена на рисунке 2.4.3.1.



Рисунок 2.4.3.1 — Общая схема метода оценки транспортной доступности лесных ресурсов

Для выделения на территории России доступных и недоступных лесов была использована информация о расстоянии от пикселов, отнесённых к лесным классам по карте наземных экосистем России, до ближайших дорог. Данные о сети автомобильных дорог получены с открытого pecypca OpenStreetMap (OSM) (https://www.openstreetmap.org/). Для определения порога транспортной доступности были использованы данные о фактических вырубках лесов на территории России, полученные на основе данных продукта Global Forest Change за 2002–2018 гг., прошедших процедуру фильтрации изменений, вызванных пожарами. Полученная статистика о расстоянии от вырубок до ближайших дорог (рисунок 2.4.3.2) позволила выявить пороговое значение в 14 км, охватывающее 90 % площадей вырубок.

К потенциально доступным лесам были отнесены все лесные пикселы, расположенные в пределах буферной зоны размером 14 км вокруг автомобильных дорог по данным OSM. Дополнительно были учтены данные о рельефе, при этом леса, расположенные на территории с углом наклона поверхности более 30° были отнесены к

труднодоступным, для которых затруднено введение лесохозяйственной деятельности. В качестве информации о рельефе были использованы данные SRTM, на основе которых определялся угол наклона поверхности на основе алгоритма Zevenbergen-Thorne.

К достоинствам предложенного метода оценки транспортной доступности лесных ресурсов можно отнести относительную простоту, доступность используемых данных и возможность повторной обработки данных при появлении более актуальных картографических материалов. Применение метода позволило провести анализ транспортной доступности лесов на всей территории России (рисунок 2.4.3.3).



Рисунок 2.4.3.2 — Гистограмма расстояний от вырубок до ближайших автомобильных дорог



Рисунок 2.4.3.3 — Карта транспортной доступности лесов России

На большей части территории Сибири и Дальнего востока (республика Саха, Красноярский край, Хабаровский край, Магаданская обл. и др.) лесные земли в основном представлены труднодоступными лесами. Сложные условия на землях вечной мерзлоты, относительная низкая плотность населения и дорожной сети обусловили низкие показатели доступности лесов в данных регионах. Низкая транспортная доступность лесов характерна и для горных территорий (республика Тыва, Алтайский край и др.). Значительная часть европейской России представлена доступными лесами, что позволяет осуществлять лесохозяйственные мероприятия по использованию, охране и защите лесов Также были выполнены оценки доступности лесов в разрезе основных древесных пород (таблица 2.4.3.1), полученных на основе соответствующей карты, основанной на данных MODIS.

Древесная порода	Доля доступного леса, %
Сосна	70,0
Ель	56,9
Лиственница	27,2
Сибирский кедр	37,8
Берёза	74,1
Редины лиственницы	20,2
Хвойные леса	43,2
Лиственные леса	71,5
Все леса РФ	50,7

Таблица 2.4.3.1 — Доля доступных лесов по категориям пород

Наибольшую часть недоступных лесов составляют хвойные леса (около 300 млн га), при этом площадь недоступных лиственничных лесов составляет около 200 млн га (около 20 % всех лесов России). В целом доля доступных лесных ресурсов составляет около половины общей площади лесов России, при этом доля доступных лиственных лесов составляет около 73 %, хвойных лесов — 40 %.

2.4.4 Оценка влияния типа лесной растительности и сезона пожара на степень постпожарных повреждений с использованием технологии оценки гибели леса на основе данных об интенсивности горения пожаров

Разработанный метод оценки площадей погибших лесов на основе данных об интенсивности горения (см раздел 3.3.2) позволяет анализировать пространственновременные особенности постпожарных повреждений лесов России, включая тип лесного покрова. В качестве характеристики степени воздействия пожаров на леса может, в частности, использоваться показатель их летальности, определяемый как отношение площади погибших от воздействия огня лесов к общей площади, пройденной пожарами. На этапе 2022 г. в рамках темы «Мониторинг» был проведён анализ летальности пожаров, затронувших различные типы леса. Были проанализированы многолетние ряды данных о пожарах, полученных на основе данных прибора MODIS, накопленных в архивах ИКИ РАН. При этом основное внимание уделялось анализу межгодовых изменений летальности и изменения летальности пожаров в течение пожароопасного сезона. Краткие результаты такого анализа представлены в настоящем разделе.

Анализ сезонного хода летальности пожаров

Обработка данных о природных пожарах, действовавших на территории России с 2001 по 2022 год, позволила построить зависимости летальности пожаров в различных типах лесов от времени их возникновения в пожароопасном сезоне. Усреднённые за все анализируемые годы данные представлены на рисунке 2.4.4.1. На рисунке видно, что для всех типов лесов имеется ярко выделенный максимум летальности в июле месяце. При этом в разных типах леса наблюдается различная летальность. Для хвойных листопадных лесов она может достигать 50 %. При этом для разных основных типов леса графики представленные на рисунке 2.4.4.1 фактически подобны между собой.



Рисунок 2.4.4.1 — Среднемноголетнее сезонное распределение летальности пожаров в лесах России для разных типов растительности



Рисунок 2.4.4.2 — Среднемноголетнее сезонное распределение площади усыхающей и погибшей растительности в лесах России для разных типов

Исключение составляет только зависимость летальности для темнохвойных лесов. На этой зависимости достаточно значительные значения летальности возникают и в весенний период. В тоже время одним из объяснений данной особенности может быть то, что весенние пожары являются в основном низовыми, а в используемых рядах наблюдений в темнохвойных лесах может быть значительное число пропусков в детектировании таких пожаров. Это в свою очередь может приводить к завышению оценок летальности. В любом случае данный вопрос безусловно требует дополнительного изучения. Подобные особенности поведения летальности в комплексе с тем, что общая площадь пожаров в летний период также возрастает, приводит к росту средних значений площадей усыхающих и погибших лесов различных типов (рисунок 2.4.4.2). Особо следует отметить, что зависимости этих площадей от сезона ведут себя подобным образом для всех типов леса. И в этих зависимостях для темнохвойных лесов уже не наблюдается аномалий в весенний период. Это косвенно подтверждает корректности объяснения поведения графика летальности для данного типа леса.

Анализ многолетней динамики площадей погибших и усыхающих лесов различных типов

На основе предложенного метода были также оценены площади усыхающих и погибших лесов на территории РФ за период с 2001 по 2022 г. На рисунке 2.4.4.3 эти данные представлены для основных типов леса на территории страны. На представленном рисунке виден заметный тренд площадей погибших и усыхающих лесов только для хвойных листопадных лесов. В тоже время, необходимо обратить внимание, на то что вертикальная ось представленных графиков логарифмическая (выбор связан с необходимостью отразить на одном графике данные для разных типов лесов) и поэтому визуально тренды на графике слабо заметы. Для более детального анализа возможных трендов, в дальнейшем, как и в случае с анализом сезонных зависимостей, планируется перейти к детальному анализу межгодовой динамики летальности лесных пожаров на территории России.



Рисунок 2.4.4.3 — Динамика площади усыхающих и погибших лесов разных типов

2.4.5 Развитие методов спутникового картографирования тридцатилетней динамики пахотных земель регионов России на основе временных серий данных Landsat

В было рамках предыдущих исследований показано, ЧТО объектноориентированные подходы и непараметрическая классификация позволяют обеспечить региональное картографирование используемых пахотных земель регионов России на основе синтезированных временных серий спутниковых данных Landsat для различных сезонов вегетации. Последующее масштабирование указанных подходов С использованием распределённых вычислений на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» позволило расширить пространственный охват и увеличить глубину динамического картографирования. В частности, развитие в ИКИ РАН методов и технологий восстановления временных серий высокого временного разрешения для различных спутниковых систем с использованием весового подхода, пространственно-временного анализа и гармонической регрессии, позволило обеспечить построение сезонных спектрально-временных признаков распознавания пахотных земель в различные годы тридцатилетнего периода наблюдений.

Разработанная проведённых 2022 г. работ В рамках В технология картографирования используемых пахотных земель включает этап подготовки данных, этап параметризации классификатора и этап картографирования. На этапе подготовки данных происходит формирование многолетних рядов атмосферно-скорректированных наблюдений земной поверхности, полученных по данным программы Landsat за требуемый интервал времени. Далее, происходит исключение наблюдений, находящихся под влиянием мешающих факторов (облачность и тени от неё, снег, а также сбойные пиксели). На основе указанных выше технологий происходит восстановление пропущенных измерений и формирование месячных композитных изображений, а также производных признаков распознавания используемых пахотных земель для каждого из целевых сезонов мониторинга.

На следующем этапе для настройки и параметризации классификатора используется обучающая разметка для классов «используемая пашня» и «остальное», созданная экспертами путём фотоинтерпретации спутниковых снимков Sentinel-2 с использованием региональных геопространственных данных для эпохи 2019–2021 гг. Обученный классификатор затем переносился на другие эпохи с предварительной нормировкой распределения значений признаков к эпохе 2019 года.

На последнем этапе происходит автоматическое картографирование используемых пахотных земель для целевого интервала наблюдений с использованием нормализованных признаков и обученного классификатора с последующей экспертной оценкой результатов. Экспертная оценка полученной карты с привлечением архивных спутниковых снимков в картографическом интерфейсе системы «Вега» позволяет идентифицировать участки с ошибками распознавания обоих видов (пропуск цели и ложная тревога). Автоматический локализованный кластерный анализ позволяет сформировать и автоматически разметить кластеры, соответствующие ошибкам распознавания, позволяя минимизировать ошибки на соответствующих объектах земного покрова на следующих итерациях.





Рисунок 2.4.5.1 — Общая блок-схема технологии распознавания используемых пахотных земель на основе спутниковых данных Landsat для различных периодов наблюдений в интервале с 1986 по 2016 г.

Для автоматического распознавания земель с признаками распашки или сева сельскохозяйственных культур в течение трёхлетнего временного отрезка был использован непараметрический метод Random Forest, обученный на разметке пахотных земель 2019–2021 гг. При создании разметки было использовано следующее определение: пашня — участок земной поверхности, имеющий в течение трёх лет наблюдений признаки распашки, выращивания озимых и яровых сельскохозяйственных культур с минимальным размером не менее 30 метров, не находящийся под теплицами и другими объектами или сооружениями, препятствующими дистанционному наблюдению. Для обеспечения совместимости между разновременными наборами признаков, полученными по данным различных приборов программы Landsat, и для переноса обученного классификатора на исторические интервалы в рамках субъекта федерации использовалась нормализация функции распределения значений признаков. Пример результатов приведения восстановленных композитных изображений, полученных за исторические эпохи, к распределению за 2019 г. можно увидеть на рисунке 2.4.5.2.



Рисунок 2.4.5.2 — Разновременной синтез месячных восстановленных композитных изображений Landsat за 1986 г. (слева снизу), разновременной синтез нормализованных к 2019 г. изображений Landsat за 1986 г. (слева сверху), разновременной синтез изображений Landsat за 2019 г. (справа сверху), а также разметка для классов «пашня» и «всё остальное» за 2019 г. (справа снизу) на примере Белгородской области

В целях обеспечения регулярности разновременных оценок, тридцатилетний интервал наблюдений был разбит на шесть пятилетних страт, для каждой из которых была получена карта используемой в течение трёх лет пашни для следующих субъектов федерации: Московская, Белгородская и Калининградская области, а также республик Татарстан и Удмуртия. Анализ временной серии шести полученных карт позволил идентифицировать последний год использования пашни на уровне отдельных полей.



Рисунок 2.4.5.3 — Результаты динамического картографирования используемых пахотных земель Калининградской области с датой последнего года использования (вверху), динамика оценок различных категорий используемых земель (слева снизу), а также распределение площадей используемой пашни по дате последнего использования (справа внизу)

Сопоставление серии разновременных оценок площадей используемой пашни с данными Госкомстата СССР и Росстата, а также данных Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2006 и 2016 гг. по каждому региону подтвердило совпадение трендов, полученных по данным дистанционного зондирования Земли и из

статистических источников. Пример результатов анализа полученных разновременных карт используемой пашни на Калининградскую область, включая дату последнего использования полей и распределение площадей пашни по этой дате, а также сравнение оценок выявленных по данным дистанционного зондирования площадей с данными из различных статистических источников приведён на рисунке 2.4.5.3.

Заключение

Выполнение работ по теме «Мониторинг-Биосфера» проводилось в соответствии с утвержденным планом. В результате выполненных исследований и разработок в области методов обработки спутниковых для мониторинга растительного покрова получили развитие методы детектирования непирогенных изменений лесов на основе данных среднего пространственного разрешения и методы картографирования покрытой лесом площади и защитных лесополос на основе данных высокого пространственного разрешения. В рамках работ, направленных на восстановление биофизических параметров растительности, предложены метод фенологической нормализации временных рядов, метод оценки относительной полноты лесов и выполнена валидация разработанного ранее метода разложения индекса листовой поверхности по ярусам. На основе спутниковых данных проведен ряд работ, касающихся решения задач устойчивого развития наземных экосистем, таких как исследование опустынивания, анализ распространения задымлений от тростниковых пожаров, оценка транспортной доступности лесных ресурсов и изучение влияния типа лесной растительности и сезона пожара на степень повреждений леса. Для дистанционной оценки состояния и мониторинга сельскохозяйственной растительности разработан метод автоматизированного картографирования пахотных земель на основе данных высокого разрешения.

Научно-исследовательские работы по направлению «Мониторинг-Биосфера» выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ З МОНИТОРИНГ-КЛИМАТ

Введение

В настоящей главе отчёта представлены основные результаты, полученные в рамках работ по направлению «Мониторинг-Климат», определённых в плане НИР ИКИ РАН на 2021–2023 гг.

- Развитие методов количественных исследований процессов переноса скрытого тепла и тепломассобмена в системе глобальной циркуляции атмосферы Земли на синоптических и климатически значимых масштабах, в том числе, для изучения климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Земли;
- Развитие методов дистанционной диагностики процессов, протекающих в криосфере Земли, в том числе исследование сезонной и многолетней динамики северной полярной шапки, анализ состояния пресноводных акваторий в период ледостава, определение характеристик замерзающих водно-болотных угодий для изучения климатических и экологических изменений арктических и субарктических территорий;
- Развитие методов и подходов мониторинга крупномасштабных опасных природных антропогенных явлений.

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2022 г. результаты также изложены в следующих публикациях [4–7, 18, 21, 25, 27, 31, 37, 38–44, 62, 65, 66, 69, 74, 82, 91, 93, 112, 114, 115, 119, 120, 121, 129, 134, 137, 143, 146].

3.1 Развитие методов количественных исследований процессов переноса скрытого тепла и тепломассообмена в системе глобальной циркуляции атмосферы Земли на синоптических и климатически значимых масштабах, в том числе, для изучения климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Земли

3.1.1 Детектирование атмосферных рек по данным спутникового радиотепловидения для анализа региональных климатических изменений и процессов формирования экстремальных погодных условий

Полученные длинные ряды глобальной циркуляции интегрального водяного пара на основе данных микроволновых спутниковых радиометров с использованием метода спутникового радиотепловидения (см. п. 5.1) позволили предложить и начать отрабатывать методику детектирования атмосферных рек (AP) как над поверхностью Мирового океана, так и над сушей. Атмосферная река представляет собой узкий длинный шлейф влаги в атмосфере. Внутри AP осуществляется интенсивный перенос водяного пара. Описание процессов переноса водяного пара AP широко используется в современных моделях атмосферной циркуляции.

Атмосферные реки играют существенную роль в глобальном круговороте воды, некоторым оценкам, на них приходится более 90 % глобального согласно меридионального переноса водяного пара, при этом АР покрывают менее 10 % любой заданной внетропической линии широты. АР являются одной из основных причин вызывают экстремальных осадков, которые сильные наволнения BO многих среднеширотных, прибрежных регионах мира, включая западное побережье Северной Америки, Западную Европу, западное побережье Северной Африки и т.д. С другой стороны, отсутствие атмосферных рек там, где они обычно бывают, зачастую приводит к возникновению засух в различных частях мира, например, Южной Африке, Испании и Португалии.

Развиваемый в ИКИ РАН подход спутникового радиотепловидения позволил использовать данные микроволновых спутников SSMIS для построения полей интегрального влагосодержания (англ. integrated water vapor, IWV) с глобальным покрытием как над океаном, так и над сушей, а также векторных полей адвекции водяного пара, описывающих атмосферную динамику. Выделение АР осуществляется в суточных полях интегрального влагосодержания по всей планете. Алгоритм программного выделения АР на картах спутниковых данных основан на применении адаптируемого порогового значения интегрального влагосодержания, превышение которого является критерием детектирования АР. По заданному пороговому значению строится бинарная маска областей высокого влагосодержания и проводится их скелетизация — построение «скелетов» выделенных областей (см. далее). После этого происходит оценка возможной фрагментации скелетов и соединение фрагментов, относящихся к одной АР.

Скелетом в компьютерной графике называется множество точек, равноудалённых от границ фигуры. Скелет подчёркивает геометрические и топологические свойства фигуры, такие как её соединения, связность, длина, направление, ширина. Фактически скелет является представлением формы фигуры, упрощает её дальнейший анализ. Скелетизация даёт возможность представить бинарное изображение (маску) в виде множества тонких линий, взаимное расположение, размеры и форма которых адекватно описывают размеры, форму и ориентацию в пространстве соответствующих областей изображения АР. Главными задачами скелетизации при детектировании АР рек являются: уточнение положения оси АР (линии, вдоль которой ожидаются максимальные потоки водяного пара); объединение фрагментов образа АР в единую фигуру; подготовка к трассировке АР во времени (отождествлению АР на последовательных изображениях за разные сутки и описанию её эволюции).

Одной из проблем в алгоритме выделения АР является подбор порогового значения. Для отработки всей методики исследования АР как единого конвейерного процесса возникла необходимость быстрой реализации ряда ключевых процедур обработки. В связи с этим некоторые из них, предполагающие в дальнейшем значительную автоматизацию на основе накопленной статистики обработки, на первом этапе заменены их упрощёнными аналогами. Так, подбор оптимального порога интегрального влагосодержания на данный момент осуществляется методом визуального перебора. На рисунке 3.1.1 представлены обработанные изображения 30 августа 2020 г. с адаптивным порогом по величине 0,3. Это безразмерная величина — число в диапазоне от 0 до 1, определяющее долю пикселей, значение в которых оцениваемой величины (IWV) будет превышать порог (т.е., косвенным образом регулирующее величину порога). Низкое значение доли пикселей приводит к повышению вероятности «пропуска цели» — исключения из маски АР части пикселей, которые должны быть в неё включены. Высокое значение доли приводит к повышению вероятности «ложной тревоги» (неоправданному включению дополнительных пикселей в маску АР).

Метод спутникового радиотепловидения позволяет наряду с построением глобальных полей водяного пара оценить их горизонтальную адвекцию по специальной методике оценки оптического потока, что даёт возможность измерить расход влаги через выбранное сечение AP. На рисунке 3.1.2 представлено суточное поле интегрального влагосодержания и показано черным прямоугольником сечение, для которого проведена оценка расход влаги. Так, например, 2 июля 2019 г. в 06:00:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time) расход влаги через эту AP составил 27,1·10⁶ кг/с. Длина сечения AP составила 12 географических градусов широты, что равно примерно 1300 км. Чёрными векторами показано направление адвекции водяного пара, определённое методом спутникового радиотепловидения.



Рисунок 3.1.1 — Обработанные поля интегрального влагосодержания за 30.08.2020 с порогом 0,3 в левой колонке: *a* — бинарная маска; *б* — скелетизация; *в* — поле IWV с выделенными AP; изображения с порогом 0,5 в правой колонке: *г* — бинарная маска; *д* — скелетизация; *е* — поле IWV с выделенными AP. Цветовая шкала IWV дана в кг/м²

Таким образом, создана и программно реализована методическая основа исследований важного и недостаточно изученного структурного элемента общей атмосферной циркуляции — атмосферных рек. Следующие этапы работы связаны, с одной стороны, с построением глобальной и региональной климатологии АР на основе автоматизации процесса детектирования АР, с другой — с выявлением и количественным описанием параметров связи внутригодовых и межгодовых региональных особенностей формирования АР с развитием чрезвычайных ситуаций, экстремальных погодных явлений и стихийных бедствий и катастроф (наводнений, засух, усиления пожароопасности и др.). Важным аспектом является обеспечение в рамках развитой методики применения подхода спутникового радиотепловидения возможности расчёта элементов регионального гидрологического п. 3.3) баланса (см. с точностью, позволяющей строить заблаговременные прогнозы наводнений на крупных реках. Это особенно актуально для рек удалённых и труднодоступных территорий России.


Рисунок 3.1.2 — Суточное изображение поля IWV на 0207.2019

3.2 Развитие методов дистанционной диагностики процессов, протекающих в криосфере Земли, в том числе исследование сезонной и многолетней динамики северной полярной шапки, анализ состояния пресноводных акваторий в период ледостава, определение характеристик замерзающих водно-болотных угодий для изучения климатических и экологических изменений арктических и субарктических территорий

3.2.1 Анализ гидрологических изменений, происходящих в Арктике, по данным спутниковой микроволновой радиометрии

Работа выполнялась совместно с Институтом водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН), г. Барнаул и Арктическим и Антарктическим научноисследовательским институтом (ААНИИ), Санкт-Петербург.

Анализ современных климатических трансформаций на обширной территории арктического региона необходим для возможности надёжного прогнозирования возникающих опасных гидрологических и метеорологических явлений. Оперативная информация о гидрологических реакциях на климатические изменения имеет решающее значение для судоходства, а также при планировании экономического развития и поддержки инфраструктуры арктических регионов. Происходящие гидрологические изменения могут быть оценены только на основе спутниковых данных дистанционного зондирования, а оперативная ежедневная информация может быть получена только с использованием всепогодных данных спутниковой микроволновой радиометрии.

В исследовании были использованы данные по яркостной температуре продукта L1C SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) радиометра MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis) спутника Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency) SMOS. Яркостная температура на горизонтальной $T_{\rm H}$ и вертикальной $T_{\rm V}$ поляризации измеряется в диапазоне углов зондирования 0–60° микроволновым радиометром MIRAS. MIRAS принимает восходящее излучение на частоте 1,41 ГГц. Максимальный пространственный охват достигается при угле зондирования 42,5°, при этом пространственное разрешение составляет величину

 35×65 км. Данные L1C SMOS привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9(*англ*. Discrete Global Grid Snyder Icosahedron grid with equal area), линейный размер ячейки которой составляет величину порядка 16 км, а площадь — около 195 км². Таким образом, значение яркостной температуры для любой ячейки продукта L1C SMOS формируется участком подстилающей поверхности площадью 1760 км² (по уровню 3 дБ). Сама же ячейка площадью 195 км² расположена в центре этого участка. Для достижения максимальной достоверности из анализа были исключены следующие измерения:

- 1) значения, связанные с влиянием радиочастотных помех (по флагу качества RFI1);
- 2) данные с погрешностью определения $T_{\rm H}$ и $T_{\rm V}$ более 5 К;
- 3) данные с коэффициентом поляризации ($T_{\rm H}/T_{\rm V}$) вне диапазона 0,01–0,99.

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

Объектом исследования выступали различные области Карского моря, которые были расположены на разном удалении от суши и устьев рек, а также различались по продолжительности существования и толщине ледяного покрова, температуре и солёности воды. На рисунке 3.2.1 представлена карта Карского моря с наложенной на неё геодезической сеткой DGG ISEA 4H9. Белым цветом на рисунке выделены исследуемые ячейки. Жёлтыми стрелками на рис. 3.2.1 указаны ячейки с характерной межгодовой и сезонной динамикой яркостной температуры исследуемого региона, представленные в настоящем отчёте.



Рисунок 3.2.1 — Карта-схема исследуемой территории с ячейками геодезической сетки ISEA 4H9. Овалом вокруг ячейки 4069015 показана область формирования значения яркостной температуры по уровню 3 дБ для этой ячейки

Характерные сезонные вариации яркостной температуры Карского моря представлены на рисунке 3.2.2, где показано пространственное распределение величины яркостной температуры T_{π} на горизонтальной поляризации поверхности исследуемого региона по данным спутника SMOS (продукт L1C) за февраль и август 2021 г.



Рисунок 3.2.2 — Карта исследуемой территории с пространственным распределением величины *T_s* на горизонтальной поляризации (продукт L1C SMOS): *a* — 21.02.2021, *б* — 24.08.2021. Слева в верхнем углу показана шкала *T_s* в градусах К

Рисунок 3.2.2 хорошо иллюстрирует сезонные изменения яркостной температуры для исследуемого региона, которая в летний период для горизонтальной поляризации является минимальной (около 80 K) — водная поверхность, а в зимний период достигает максимальных значений (порядка 250 K) — снежно-ледяной покров. Таким образом, сезонные контрасты яркостной температуры могут достигать значений 150 K и более.

На рисунке 3.2.3 показана межгодовая и сезонная динамика яркостной температуры на горизонтальной поляризации для четырёх ячеек, указанных на рисунке 3.2.1.

Анализ рисунка 3.2.3 показывает, что в летний период для всех областей яркостная температура стабильна. Возникающие контрасты яркостной температуры (порядка 20 К) связаны с вариациями температуры и солёности воды, а также с морским волнением. В зимний период области, в которых расположены ячейки 4069015 и 4068512 (а, б), также являются достаточно стабильными от года к году. Наблюдающиеся контрасты яркостной температуры в этот период (20–150 К) связаны с оттепелью и появлением на поверхности образованием разводий, разрушением льда снежниц, а также только что сформировавшегося ледяного покрова под действием сильных ветров. Исключением стал 2012 г. для обеих ячеек (а, б), а также 2020 г. для ячейки 4069015 (а). Данные продукта L1C SMOS показывают, что в эти годы в зимний период ледяной покров в данных областях не был стабильным: он то полностью покрывал всю исследуемую область, то полностью разрушался. Такая динамика, вероятно, связана с влиянием заприпайных полыней, которые часто образуется в этом регионе (см. рисунок 3.2.4). Ещё большее влияние заприпайных полыней на состояние ледяного покрова сказывается в областях, где расположены ячейки 4052100 и 4055708 (в, г). Здесь практически каждый год ледяной покров не является стабильным, он то устанавливается, то исчезает на непродолжительное время.











Рисунок 3.2.3 — Межгодовая и сезонная динамика $T_{\rm R}$ на горизонтальной поляризации (продукт L1C SMOS) для четырёх ячеек: *a* — 4069015, *б* — 4068512, *в* — 4052100, *г* — 4055708. Расположение ячеек указано на рисунке 3.2.1



Рисунок 3.2.4 — Расположение заприпайных полыней в арктических морях (Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб: ААНИИ, 2012. 180 с.): ЮВЗФИ — Юго-восточная Земли Франца-Иосифа, СНЗ — Северная Новоземельская, ЮНЗ — Южная Новоземельская, АМ — Амдерминская, ЯМ — Ямальская, ОЕ — Обь-Енисейская, ЦК — Центральная Карская, ЗСЗ — Западная Североземельская, ВСЗ — Восточная Североземельская, СВТ — Северо-Восточная Таймырская, ВТ — Восточная Таймырская, АЛ — Анабаро-Ленская, ЗН — Западная Новосибирская (запад), ВНСв - Восточная Новосибирская (восток), А — Айонская, ЗЧ — Западная Чукотская, ВЧ — Восточная Чукотская, СВ — Северная Врангелевская, ЮВ — Южная Врангелевская

Годы со стабильным ледяным покровом для ячеек 4069015 и 4068512 (см. рисунок 3.2.3a, δ) позволил определить границы временных периодов открытой воды, замерзания, ледостава и вскрытия льда для Карского моря, соответствующие качественным изменениям характеристик собственного микроволнового излучения морской акватории. На основе анализа временных рядов яркостной температуры были определены фазы ледового режима: период открытой воды, период образования ледяного покрова, период установившегося ледяного покрова, период разрушения и таяния ледяного покрова (рисунок 3.2.5).



Рисунок 3.2.5 — Временной ход *T_я* на горизонтальной поляризации, определённый по данным продукта L1C SMOS для ячейки 4069015. Римскими цифрами на рисунке обозначены: І — период открытой воды, II — период образования ледяного покрова, III — период установившегося ледяного покрова, IV — период разрушения и таяния ледяного покрова

Полученные характеристики фаз ледового режима, а также межгодовая и сезонная динамика яркостной температуры на горизонтальной поляризации для ячейки 4069015, позволили построить межгодовую зависимость периодов открытой воды с 2012 по 2021 г. Эта зависимость представлена на рисунке 3.2.6. Поскольку ячейка 4069015 соответствует области Карского моря со стабильным ледяным покровом, то можно утверждать, что полученная зависимость соответствует динамике всей части акватории Карского моря со стабильным ледяным покровом. Полученная зависимость представляет собой синусоиду с периодом в четыре года. Данный результат требует тщательной проверки и дальнейшего серьёзного анализа, поскольку выявить корреляцию обнаруженного цикла с какими-либо земными процессами пока не удалось.



Рисунок 3.2.6 — Временной ход продолжительности периода открытой воды для ячейки 4069015. Серые круги — рассчитанные значения по данным продукта L1C SMOS синяя кривая аппроксимация данных. В правом верхнем углу показаны параметры аппроксимации

Выполненный анализ межгодовой и сезонной динамики $T_{\rm M}$ различных областей Карского моря показал, что данные спутниковой микроволновой радиометрии открывают новые возможности в использовании пассивных спутниковых наблюдений в микроволновом диапазоне, для изучения природных динамических процессов, а также анализа гидрологических явлений, происходящих в Арктике.

Проведённые исследования показали, что данные радиометра MIRAS спутника SMOS могут быть использованы:

- для анализа больших акваторий арктического региона со стабильным или динамичным морским ледяным покровом. Таким образом, открывается возможность контроля стабильности морского ледяного покрова в крупных акваториях с частотой два раза в сутки (частота пролёта спутника SMOS над Арктикой);
- определения фаз морского ледяного покрова: период открытой воды, период образования ледяного покрова, период установившегося ледяного покрова, период разрушения и таяния ледяного покрова;
- 3) возможности прогнозирования продолжительности ледового и водного периодов.

3.2.2 Влияние загрязнённости морского льда на ошибки в определении сплочённости в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии

Работа выполнялась совместно с Арктическим и Антарктическим научноисследовательским институтом (ААНИИ), Санкт-Петербург.

Данные спутниковой микроволновой радиометрии имеют большое значение для решения ряда научных и практических задач. Эти данные стали основным источником информации об изменении площади ледяного покрова с 1978 г., когда начал работу сканирующий многоканальный микроволновый радиометр SMMR (англ. Scanning Multichannel Microwave Radiometer) на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) Nimbus-7. В настоящее время регулярные данные пассивного микроволнового зондирования полярных регионов поступают с радиометров SSMIS (англ. Special Sensor Microwave Imager/Sounder) и AMSR2 (англ. Advanced Microwave Scanning Radiometer 2). Для расчёта сплочённости морского льда по значениям яркостной температуры, получаемой с этих радиометров, уже разработано множество алгоритмов (например, NASA Team, NASA Team 2, Bootstrap, ASI, NORSEX, Bristol, CalVal и т.д.), а также постоянно разрабатываются новые алгоритмы. Такое разнообразие алгоритмов и непрерывная работа научного сообщества по их усовершенствованию обусловлены тем, что до сих пор ни один из них не даёт абсолютно точные значения сплочённости морского льда. При расчётах крайне сложно учесть всё разнообразие природных процессов, оказывающих влияние на итоговые результаты. При создании алгоритмов применяются различные каналы (от 6,925 до 91,655 ГГц на горизонтальной и вертикальной поляризации) и методы. Значения сплочённости морского льда, получаемые с помощью различных алгоритмов, могут существенно различаться, и у каждого алгоритма есть свои преимущества и недостатки.

Одной из причин таких ошибок в определении сплочённости морского ледяного покрова по данным спутниковых радиометров представляется загрязнённость льда (см. отчёт по теме «Мониторинг» за 2021 г.). Анализ современных публикаций показал, что до настоящего времени ещё не проводились исследования того, какой вклад вносит загрязнённость в недооценку площади морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии и как реагируют на загрязнённость различные алгоритмы. Связано это с недостатком исходных точных данных о пространственном распределении загрязнённых льдов. Помимо этого, сложно отделить влияние загрязнённости от влияния процессов таяния (наличия талой воды на поверхности льда), так как эти два фактора проявляются одновременно.

Для оценки влияния загрязнённости на определение сплочённости морского льда был исследован припай в Восточно-Сибирском море. Мощный устойчивый припай в данном районе представляется идеальным объектом для отслеживания изменений состояния поверхности льда в период таяния, так как сохраняется неизменным в пространстве положение основных элементов поверхности. При этом известна толщина льда по данным близлежащих полярных станций и неизменна десятибалльная сплочённость льда до тех пор, пока припай не взломался, в отличие от дрейфующих льдов, где сложнее отследить изменения характеристик поверхности льда в одной и той же точке из-за их непрерывного перемещения и изменения сплочённость.

Для анализа были взяты шесть алгоритмов: Arctic Radiation and Turbulence Interaction STudy Sea Ice (ASI), Bootstrap (BT), NASA Team (NT), три гибридных алгоритма Climate Data Record (CDR), Technical University of Denmark (TUD) и один из алгоритмов Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF) — OSI-401-b. Эти шесть алгоритмов были выбраны исходя из доступности данных, что, соответственно, приводит к широкому их использованию и популярности в научных исследованиях. В исследовании использовались продукты уровня L3, содержащие в себе информацию о сплочённости морского льда, рассчитанной по этим шести алгоритмам:

1. Алгоритм ASI разработан коллективом Бременского университета. Он базируется на расчёте поляризационной разности значений яркостной температуры высокочастотного канала (89 ГГц для AMSR2 и 91,655 ГГц для SSMIS). Поскольку для этого канала существенно влияние атмосферы, то дополнительно в качестве погодных

фильтров используется градиентное соотношение пар каналов 36–37 и 18–19 ГГц и 22–23 и 18–19 ГГц вертикальной поляризации, а также алгоритм Bootstrap для уменьшения её эффектов. Ежедневные расчёты сплочённости льда по Арктике доступны на сайте <u>https://seaice.uni-bremen.de/</u>. Для анализа были взяты результаты обработки данных радиометра AMSR-2 (ASI v.5.4) с разрешением 6,25 км.

2, 3. Алгоритмы NT и BT разработаны в NASA Goddard Space Flight Center (GSFC). Алгоритм NT базируется на поляризационных и градиентных соотношениях для яркостной температуры в разных каналах и поляризациях. Алгоритм BT основывается на соотношениях яркостной температуры в разных каналах. В настоящей работе используются расчёты BT версии 3.1. Алгоритм NT использует канал 19,35 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации и канал 37 ГГц вертикальной поляризации. BT использует канал 37 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации и канал 19,35 ГГц вертикальной поляризации.

4. Алгоритмы NT и BT являются основой алгоритма CDR. Для каждого пикселя на поверхности определяется наибольшее из двух значений сплочённости морского льда, определённых по NT и BT, поскольку известно, что оба алгоритма недооценивают сплочённость. Кроме этого, CDR использует порог сплочённости 10 % по BT для определения кромки льда. Значения сплочённости ледяного покрова, рассчитанные по алгоритма NT, BT и CDR были получены на сайте NSIDC в составе продуктов NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration (<u>https://nsidc.org/data/g02202/versions/4/</u>) и Near-Real-Time NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration (<u>https://nsidc.org/data/g02202/versions/4/</u>). И Near-Real-Time NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration (<u>https://nsidc.org/data/G10016/versions/2/</u>). Использовались результаты обработки данных радиометра SSMIS с разрешением 25 км.

5. Алгоритм OSI-401-b был разработан в рамках консорциума OSI SAF Норвежским и Датским метеорологическими институтами. OSI-401-b — это гибридный алгоритм, созданный на основе двух концептуально похожих алгоритмов: Bristol и Bootstrap frequency mode (BFM). Первый использует каналы 37 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации и 19,35 ГГц вертикальной поляризации, второй — каналы 37 и 19,35 ГГц вертикальной поляризации. Для обеспечения оптимальных расчётов в прикромочной зоне и в сплочённом льду используются достоинства каждого алгоритма: для алгоритма Bristol вводится меньший весовой коэффициент при сплочённостях ниже 40 %, в то время как алгоритму BFM присваивается меньший вес при сплочённостях выше 40 %, поскольку Bristol показывает лучшие результаты для сплошного льда, а BFM — для областей с открытой водой. В исследовании использовались результаты обработки данных радиометра SSMIS, представленные в сетке с шагом 10 км, полученные с сервера Норвежского метеорологического института <u>ftp://osisaf.met.no/</u>.

6. OSI-408 — это продукт, включающий два набора данных, которые были получены по двум алгоритмам: OSISAF и TUD. Продукт TUD был разработан в рамках консорциума OSI SAF Норвежским и Датским метеорологическими институтами. Алгоритм TUD — это тот же гибридный алгоритм OSI-401-b, только рассчитывается по данным AMSR. TUD базируется на алгоритме Bootstrap с использованием высокочастного канала 89 ГГц. Первоначально вычисляется сплочённость по алгоритму BFM, после чего анализируются её значения. Если сплочённость выше нуля, то используется канал 89 ГГц с динамическими точками привязки. В данном случае пиксель разделяется на четыре субпикселя, в каждом из которых поляризационная разность линейно преобразуется в значение сплочённости льда. Если значение сплочённости равняется нулю, то это значение сохраняется. В исследовании использовались результаты обработки данных радиометра AMSR-2, представленные в сетке с шагом 10 км. Данные были получены с сервера Норвежского института <u>ftp://osisaf.met.no/</u>.

Для анализа влияния загрязнённости на определение сплочённости морского льда, полученной различными алгоритмами по данным спутниковой микроволновой радиометрии, были выбраны семь пар расположенных рядом друг с другом точек. Точки выбирались с разной степенью загрязнённости льда, но с максимально схожими другими характеристиками: одинаковой сплочённостью ледяного покрова (сплошной лёд — припай, 10 баллов), историей нарастания и разрушения. Положение выбранных точек отображено на рисунке 3.2.7. На рисунках 3.2.8 и 3.2.9 приводится изменение значений сплочённости, рассчитанной по алгоритмам ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR. На каждом графике кривые сплочённости заканчиваются в день взлома припая в каждой точке, т.е. в тот день, когда фактическая сплочённость льда становилась ниже 10 баллов. Соответственно, по графикам на рисунках 3.2.8 и 3.2.9 можно проследить, насколько каждый алгоритм недооценивает реальную сплочённость морского льда и, зная течение природных процессов в каждой точке, можно отследить влияние степени разрежённости на каждый алгоритм. Также на рисунках 3.2.8 и 3.2.9 приводится температура воздуха на 12:00 каждого дня и осадки, полученные из интернет-ресурса чешской метеорологической компании InMeteo <u>https://www.ventusky.com/</u> для каждой точки.



Рисунок 3.2.7 — Восточно-Сибирское море. Расположение точек, в которых проводился анализ влияния загрязнённости на данные о сплочённости льда, определённой различными алгоритмами по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Снимок Terra MODIS от 21.06.2021

Процесс разрушения припая оценивался визуально дешифрированием ежедневных спутниковых изображений Terra (MODIS) в видимом диапазоне (полученных из интернетресурса Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США https://worldview.earthdata.nasa.gov/) И радиолокационных Sentinel-1 изображений спутников (полученных ИЗ интернет-ресурса Датского технического университета http://www.seaice.dk/). В районе анализируемых точек разрушение припая происходило следующим образом:

- В районе точек 1 и 2 максимальное затопление поверхности льда отмечалось в период со 2 по 5 июня 2021 г., после чего произошло обсыхание льда (то есть накопленная на поверхности вода стекла под лёд по образовавшимся во льду трещинам). В точке 2 взлом припая произошёл 9–10 июня, а в районе точки 1 на десять дней позже, 20-21 июня. К началу июля лёд в данном районе был уже сильно разрежен.
- В районе точек 3 и 4 максимальное затопление льда было отмечено 5–6 июня 2021 г. К 9 июня лёд уже полностью обсох. К 14 июня припай в точке 4 растаял, не взламываясь. В районе точки 3 припай взломался 19 июня, а к 28 июня лёд был уже сильно разрежен.

- В районе точек 5 и 6 припай был максимально затоплен в период с 5 по 7 июня 2021 г. В точке 5 припай взломался в период с 29 июня по 1 июля. В точке 6 лёд держался до 3 июля, а затем его вынесло ветром.
- В районе точек 7 и 8 максимальное затопление наблюдалось в период с 6 по 8 июня 2021 г. В отличие от предыдущих случаев, обсыхание льда происходило не моментально, процесс длился с 9 по 16 июня. К 17 июня лёд полностью обсох. 26 июня произошёл взлом припая, но лёд держался большими полями ещё до 2 июля. 2–3 июля поля стали разрушаться, и сплочённость ледовой зоны стала уменьшаться.
- В районе точек 9 и 10 максимальное затопление отмечалось в несколько разные периоды. Так, в точке 9 припай был максимально затоплен с 3 по 9 июня 2021 г. В точке 10 затопление наблюдалось чуть позже — с 4 по 14 июня. Взлом припая произошёл 26 июня. В районе точки 9 взломанный лёд сдрейфовал сразу, а в районе точки 10 лёд держался большими полями до 1 июля, затем зона также разредилась.
- В районе точек 11 и 12, в отличие от предыдущих случаев, очень сильного затопления не наблюдалось, максимальное количество снежниц отмечалось 15– 17 июня. К 19–20 июня лёд полностью обсох. Взлом припая произошёл 26– 27 июня. До 30 июня лёд держался на месте, а затем начал дрейфовать.
- В районе точек 13 и 14 процессы также проходили немного по-разному. В точке 13 сложно выделить дату максимального затопления (возможно, из-за сильной торосистости). В точке 14 припай был максимально затоплен 13–15 июня, после чего произошло обсыхание льда. 26 июня в данном районе произошёл взлом припая, но лёд ещё продолжал держаться на месте до 30 июня, а затем начал смещаться.

Все вышеперечисленные процессы в каждой точке чётко прослеживаются на графиках временной изменчивости сплочённости льда, представленных на рисунках 3.2.8 и 3.2.9. До начала таяния во всех точках все алгоритмы показывают 10 баллов сплочённости (с редкими отклонениями в пределах 1 балла). Далее, к моменту максимального затопления поверхности льда талой водой все алгоритмы с небольшими исключениями показывают минимальные значения сплочённости, т.е. максимально недооценивают фактическую сплочённость льда. Затем, с момента начала обсыхания льда, значения сплочённости снова увеличиваются, ошибка становится меньше. И, наконец, сплочённость снова начинает занижаться при максимальном разрушении припая до момента его окончательного взлома. На всех графиках наблюдаются более низкие значения сплочённости с конца мая по конец июня в точках с загрязнённым льдом, по сравнению с точками с чистым льдом. Наиболее сильные отличия от реальной сплочённости льда показывает алгоритм ASI, чуть меньше алгоритм TUD, а минимальная разница с реальной сплочённостью у алгоритмов OSI-401-b, BT, NT и CDR. В точках с максимальной загрязнённостью (точки 1, 3, 5 — см. рисунок 3.2.8а, в, д и точки 9, 13 см. рисунок 3.2.9a, d) занижение сплочённости во время таяния наиболее заметное для всех алгоритмов относительно сплочённости в соответствующих точках с чистым льдом. В точках с меньшей загрязнённостью (точки 7 — рис. 3.2.8 ж и 11 — рис. 3.2.9 вазница не столь заметна. Степень занижения для каждого алгоритма определяется используемыми спектральными каналами, что более подробно будет рассмотрено ниже.



Рисунок 3.2.8 — Графики изменения сплочённости морского льда по данным алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR в точках 1–8, расположение которых отмечено на рисунке 3.2.7. В нижней части графика показана температура воздуха на 12:00 каждого дня и выпавшие осадки (снег и дождь)



Рисунок 3.2.9 — Графики изменения сплочённости морского льда по данным алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR в точках 9–14, расположение которых отмечено на рисунке 3.2.7. В нижней части графика показана температура воздуха на 12:00 каждого дня и выпавшие осадки (снег и дождь)

Обращает на себя внимание «необычное поведение» алгоритма OSI-401-b, который 5 июня в точках 1 и 4 показывает сплочённость 0 баллов (см. рисунок 3.2.8*a*, *г*). В это время в обеих точках наблюдался скачок температуры до +7 °C, а в точке 4 также выпало большое количество осадков в виде дождя. Сильное повышение температуры привело к обильному таянию снежного покрова и образованию на льду большого количества воды, которое в точке 1 увеличивалось за счёт большего притока тепла из-за наличия загрязнений, а в точке 4 — из-за жидких осадков, выпавших в этот день. Вероятно, такое состояние поверхности ледяного покрова и комбинация каналов, которую использует алгоритм OSI-401-b, привели к значительным ошибкам в определении сплочённости льда. Однако этот вопрос требует дальнейшего теоретического анализа, что планируется выполнить в будущих исследованиях.

Также стоит отметить существенное отличие значений сплочённости, рассчитанных с помощью алгоритма ASI, от значений сплочённости, полученных по другим алгоритмам в точке 9 (см. рисунок 3.2.9*a*). Лёд в этой точке отличается наиболее

сильной загрязнённостью, что хорошо видно на снимке в видимом диапазоне (см. рисунок 3.2.7) — поверхность льда почти чёрная. Алгоритм ASI существенно сильнее остальных алгоритмов занижает сплочённость грязных льдов.

Разница между отображением сплочённости чистых и загрязнённых льдов показана на рисунке 3.2.10. По графику видно, что все алгоритмы реагируют в период таяния на загрязнённость льда, но наиболее чувствителен к загрязнённым льдам алгоритм ASI. На втором месте по чувствительности — алгоритм TUD, и менее чувствительны к наличию грязи на поверхности льда алгоритмы OSI-401-b, BT, NT и CDR. Объясняется это частотами, которые используются в каждом алгоритме. Алгоритмы ASI и TUD используют высокочастотный канал (85-91 ГГц). Глубина формирования излучения в этом канале для морского льда составляет величину порядка 1 мм, т.е. излучение, принимаемое радиометром, идёт от поверхности, которая является загрязнённой и влажной. А алгоритмы OSI-401-b, BT, NT и CDR используют частоты 19 и 37 ГГц. Глубина формирования излучения для морского льда значительно больше, и излучает уже не поверхность, а целый слой льда. Однако данное объяснение требует дальнейшей углублённой проверки и экспериментальных измерений в полевых условиях. Также стоит отметить, что не только минимальная чувствительность к загрязнённости льдов, но и в целом минимальные ошибки в определении сплочённости в период таяния наблюдаются у алгоритмов BT и CDR.



Рисунок 3.2.10 — Разница между средней сплочённостью льда в точках с чистым льдом и в точках с грязным льдом (в баллах), определённой с помощью алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR по данным спутниковой микроволновой радиометрии

Результаты исследования показали, что загрязнённость льда хорошо проявляется на спутниковых снимках в видимом диапазоне в определённый период таяния. В исследуемом районе, в Восточно-Сибирском море, это период с конца мая, когда вытаивает снежный покров на поверхности льда, до начала июля, когда происходит разрушение морского льда. Известно, что во время процессов таяния, когда на поверхности льда появляются снежницы, происходит существенное занижение сплочённости льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Однако помимо влияния разрежённости в период таяния дополнительное влияние на занижение сплочённости оказывает загрязнённость льда. Путём сравнения значений сплочённости в семи парах точек с одинаковой разрежённостью, но с разной загрязнённостью, было определено, что наиболее чувствителен к загрязнённым льдам алгоритм ASI, а на втором месте по чувствительности — алгоритм TUD. Оба алгоритма используют высокочастотный канал 85–91 ГГц. Алгоритмы OSI-401-b, BT, NT и CDR, использующие низкочастотные каналы 19 и 37 ГГц, менее чувствительны к загрязнённости льда. Причины такого явления теоретически понятны (см. выше), однако требуют дальнейшего углублённого изучения и экспериментальных измерений в полевых условиях.

Полученные результаты позволили выделить, с одной стороны, два алгоритма ASI и TUD, к которым нужно относиться с большей осторожностью при их использовании в период таяния в шельфовых морях, где загрязнённые льды занимают значительные площади, а с другой стороны, эти два алгоритма можно использовать для разработки методики определения районов с загрязнёнными льдами.

3.3 Развитие методов диагностики крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений

3.3.1 Возможности предсказания наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса

В рамках продолжающихся работ по развитию методов и подходов мониторинга дистанционного спутникового крупномасштабных природных И антропогенных явлений рассмотрен вопрос о возможности предсказания наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса. Разработанный ранее новый метод спутникового радиотепловидения, который позволяет на основе анализа восстанавливаемой динамики полей интегрального влагосодержания (англ. precipitable water vapor, PWV) рассчитывать потоки водяного пара над океанами, может быть применён над сушей. Рассмотрено уравнение баланса атмосферной воды над выделенной территорией, например, над водосбором крупной реки. Это уравнение позволяет оценить количество осадков, выпавших над водосбором, за любой интервал времени, например за время интенсивных дождей. Затем предлагается установить корреляцию между выпавшими осадками и опасным уровнем реки, найти время задержки между осадками и временем наводнения. Это позволит заблаговременно предсказывать опасные наводнения над выделенными территориями по микроволновым измерениям из космоса, что представляется актуальной задачей. Достоинством такого подхода выступает замкнутость задачи только на многоволновые радиометрические измерения, которые можно проводить, например, на основе данных МТВЗА-ГЯ. При этом не требуется привлечение данных реанализа или данных наземных метеостанций, что приобретает особую значимость в районах с редкой сетью станций.

Однако точность восстановления полей PWV над сушей существенно ниже, чем над океанами, поскольку радиофизические характеристики подстилающей поверхности испытывают сильную изменчивость. По этой причине и точность восстановления потоков водяного пара над сушей хуже. Закономерно возникает вопрос, а достаточно ли существующей точности радиотепловых измерений для определения осадков над водосбором реки? Проведены исследования погрешностей предложенного метода определения выпавших осадков на примере реки Амур, которая подвержена сильным и опасным наводнениям.

Уравнение баланса атмосферной влаги для выделенного региона Земли можно представить в следующем виде:

$$Prev(S, t_2 - t_1) = \sum_{S} PWV(x, y, t_2) - \sum_{S} PWV(x, y, t_1) + Infl(S, t_2 - t_1),$$

где $\operatorname{Prev}(S, t_2 - t_1)$ — (*англ.* precipitation-evaporation) количество осадков, выпавших на площади *S*, или количество воды, испарившейся с этой площади, за интервал времени

 $t_2 - t_1$; $\sum_{S} PWV(x, y, t_2)$ — полное количество водяного пара, находящейся в атмосфере над поверхностью *S* в начале и конце интервала $t_2 - t_1$; Infl(*S*, $t_2 - t_1$) (*англ.* inflow) количество атмосферной воды, вошедшей-вышедшей через границу *L* выделенной площади *S* за интервал времени $t_2 - t_1$ Все слагаемые в уравнении имеют размерность кг.

Данное уравнение позволяет рассчитать баланс атмосферной воды над выделенной территорией: запасённого над поверхностью водяного пара, количества воды, вошедшей или вышедшей через границы водосбора, и определить количество выпавших осадков за любой выбранный интервал времени. Относительная погрешность таких измерений, зависит не только от погрешности измерения водяного пара и точности методов радиотепловидения при восстановлении поля горизонтальных потоков атмосферной влаги, но и от размеров речного бассейна, интенсивности и продолжительности осадков. В качестве примера применения предложенного метода выбран водосбор р. Амур. Для относительной погрешности определения выпавших осадков получено соотношение:

$$\frac{\Delta \operatorname{Prev}(S, t_2 - t_1)}{\operatorname{Prev}(S, t_2 - t_1)} \approx \frac{\Delta \operatorname{Infl}(S, t_2 - t_1)}{\operatorname{Infl}(S, t_2 - t_1)} = \frac{(\Delta Q_x)\sqrt{1 + K_1^2 + 2K_2^2}}{(Q_x) \cdot (1 - K1) \cdot \sqrt{NM}}$$

где $(\Delta Q_x)/(Q_x)$ — относительная погрешность измерения вектора переноса водяного пара; параметр K_1 характеризует долю водяного пара, который прошёл не конденсируясь через весь водосбор. Чем ближе K_1 к единице, тем слабее интенсивность осадков и меньшая доля водяного пара выпадает в виде дождя. Параметр К₂ принципиальной роли не играет и характеризует долю переноса в направлении, перпендикулярном преимущественному движению. Величина N = A/a, равна отношению характерного размера границы водосбора к масштабу а — элементу разрешения в методе радиотепловидения. Параметр М пропорционален длительности интегрирования осадков и соответствует количеству спутниковых кадров минус единица. Для примера водосбора Амура проведены следующие оценки: $(\Delta Q_r)/(Q_r) = 23\%;$ $K_1 = 0.86$ (это соответствует средней 0,25 мм/ч, уровню $K_2 = 0,2;$ интенсивности осадков моросящего дождя); M = 10 cyt/0.5 cyt = 20количество N = A/a = 500 km/100 km = 5;____ независимых слагаемых за интервал 10 сут. В результате получено, что для территории, составляющей 20 % от бассейна Амура, при среднем количестве выпавших осадков 60 мм в течение 10 дней относительная погрешность предложенного радиометрического метода измерения осадков по нашим оценкам составит около 22 %. В умеренных широтах нередко наблюдается прохождение внетропических циклонов, пассатный перенос, атмосферные реки, которые сопровождаются интенсивными осадками, масштаб которых существенно превышает использованные оценки. Это повышает точность предложенного метода и целесообразность его применения.

Таким образом, выполненные оценки подтверждают перспективность применения балансовых оценок гидрологического цикла на основе подхода спутникового радиотепловидения для предсказания наводнений на крупных реках по данным спутникового радиотеплового мониторинга.

3.3.2 Метод оперативной оценки площадей гибели лесов от пожаров

Природные пожары являются важным объектом изучения в области лесного хозяйства. Результатом проведённого ранее в рамках работы по теме «Мониторинг» исследований по определению зависимости между интенсивностью горения лесных пожаров и степенью повреждения различных типов лесов стало построение набора зависимостей вероятности гибели лесов различных типов в различные периоды пожароопасного сезона от наблюдаемой интенсивности их горения (см. отчёт по теме

«Мониторинг» за 2021 г.). На основе полученных зависимостей в рамках работ по теме «Мониторинг» в 2022 г. для экспресс-оценки площадей погибшей растительности в результате действия пожаров был разработан специальный метод, который кратко будет представлен в настоящем разделе.



Рисунок 3.3.2.1 — Общая схема расчета площади погибших лесов

Метод основан на использовании зависимостей от значений FRP (*англ*. Fire Radiative Power), нормированных на площадь элемента (FRPS [MBT/км²]) вероятности гибели лесного покрова. Данные зависимости были получены на основе баз данных, сформированных в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) с помощью данных прибора MODIS о наблюдении горения на территории

России за периоды с 2006 по 2021 г. Для получения таких зависимостей информация о максимальных значениях FRPS, наблюдавшихся на конкретных участках пожаров, сравнивалась с постпожарными повреждениями, полученными на основе спектральных изменений в анализируемых точках, которые также получались на основе данных прибора MODIS.

Общая схема расчёта площади погибших лесов представлена на рисунке 3.3.2.1. При расчёте используются ряды ежегодных растровых карт максимальных FRPS в тех точках (пикселах), в которых в течение анализируемого года детектировалось горение. Данные карты также сопоставляются с ежегодно обновляемыми картами, содержащими информацию об основных типах лесного покрова. По информации о типе растительности и месяце пожара для каждой точки выбирается соответствующая вероятностная кривая, определяющая зависимость между FRPS и вероятностью гибели леса внутри ячейки карты. Полученная вероятность умножается на площадь ячейки карты FRPS (5,29 га), в результате чего получается оценка площади погибшего леса. Далее оценка суммируется по всем ячейкам карты FRPS, в результате чего получается интегральная оценка площадей погибшей растительности на территории РФ. Также, для получения корректных оценок площадей погибших лесов необходимо учитывать, что конкретная ячейка карты может быть не полностью покрыта лесом, а значит реальная площадь погибшей растительности будет меньше прогнозируемой. С целью коррекции оценок площадей погибших лесов было предложено использовать маски леса высокого разрешения, полученные на основе данных спутников LANDSAT (пространственное разрешение около 27×27 м). Для этого был использован продукт Global Forest Change. Использование такого подхода для разных годов показало достаточную устойчивость коэффициента коррекции интегральной площади погибших лесов на уровни страны. В связи с этим было предложено для различных годов использовать одинаковый коэффициент коррекции Kforest=0.859, на который умножается получаемая оценка погибшей растительности на территории страны.



Рисунок 3.3.2.2 — Оценки площади погибших лесов на территории РФ с 2001 по 2022 гг., полученные на основе анализа FRPS (голубой график) и метода, основанного на сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров с 2006 по 2020 (оранжевый график)

На рисунке 3.3.2.2 представлено сравнение получаемых оценок площадей погибших лесов с оценками таких площадей, полученными методом, основанном на

сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров. Можно утверждать, что данные оценки в целом согласованы и сопоставимы, что подтверждает возможность применения данного метода. Это является одним из подтверждений корректности работы предложенного метода. В то же время следует отметить, что предложенный метод может позволить не только получать интегральные оценки погибших лесов за весь пожароопасный сезон, но и использоваться для получения предварительных оценок площадей погибших лесов непосредственно после окончания конкретного пожара.

3.3.3 Развитие возможностей системы VSV и её использование для анализа извержений вулканов Камчатки и Курил в 2021 год

В 2022 г. получила развитие подсистема графического анализа временных рядов данных, позволяющая в рамках информационной системы VolSatView исследовать временные ряды спутниковых наблюдений. В частности, была создана новая система обработки серий спутниковых изображений, ориентированная на высокопроизводительное определение спектральных характеристик заданных областей поверхности Земли и построение на их основе временных рядов. Необходимость такой разработки была связана с обеспечением пользователей возможностью работать интерактивно и, запрашивая данные для заданного участка и временного диапазона, получать готовые для анализа временные ряды данных с минимальным временем ожидания.

Эта система выполняет следующие функции:

- диспетчеризация заданий на основе запросов от пользовательского интерфейса;
- многопотоковая обработка данных;
- кэширование подготовленных рядов данных;
- пользовательский контроль хода выполнения задания;
- комплексная передача данных и метаданных в пользовательский интерфейс.



Рисунок 3.3.3.1 — Анализ динамики радиояркостной температуры вулкана Малый Семячик 2 августа 2022 г. по данным со спутника Himawari-8

Кроме этого, в подсистеме графического анализа рядов данных была реализована возможность статистического анализа данных в пространственной окрестности наблюдаемого объекта. Это позволяет сочетать как наблюдение временной динамики собственно исследуемого объекта (вулкана), так и статистический анализ яркости и радиояркостной температуры в его окрестностях, а также сравнительный анализ рядов наблюдений объекта и наблюдений фонового временного ряда. В частности, пользовательский интерфейс помимо собственно динамики яркости объекта может отображать разницу с фоновым значением, диапазоны значений до максимума и минимума по окрестности, а также границы стандартного отклонения.

В 2022 г. система VolSatView использовалась для анализа ряда событий вулканической активности. Наблюдались извержения четырёх вулканов Северных Курильских островов: Алаид (о. Атласова), Чикурачки и Эбеко (о. Парамушир), Чиринкотан (о. Чиринкотан).

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Мониторинг-Климат» проводились в полном соответствии с утвержденным планом. В их рамках решены задачи и получены результаты по следующим основным направлениям:

- Развитие методов количественных исследований процессов переноса скрытого тепла и тепломассобмена в системе глобальной циркуляции атмосферы Земли на синоптических и климатически значимых масштабах, в том числе, для изучения климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Земли;
- Развитие методов дистанционной диагностики процессов, протекающих в криосфере Земли, в том числе исследование сезонной и многолетней динамики северной полярной шапки, анализ состояния пресноводных акваторий в период ледостава, определение характеристик замерзающих водно-болотных угодий для изучения климатических и экологических изменений арктических и субарктических территорий;
- Развитие методов и подходов мониторинга крупномасштабных опасных природных антропогенных явлений.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Климат» в 2022 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 4 МОНИТОРИНГ-ОКЕАН

Введение

В настоящей главе отчёта представлены основные результаты, полученные в рамках работ по направлению «Мониторинг-Океан», определённых в плане НИР ИКИ РАН на 2021–2023 гг.:

- Исследования нелинейной динамики морского волнения методами спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга морских акваторий;
- Разработка научных основ совместного использования новейших радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий, включая арктические регионы;
- Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оценки параметров процессов в верхнем слое океана и в приводном слое атмосферы.

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2022 г. результаты также изложены в основных публикациях [45,47,48].

4.1 Исследования нелинейной динамики морского волнения методами спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга морских акваторий

4.1.1 Развитие аппаратно-программных средств дистанционной диагностики параметров и динамики морского волнения

В лаборатории микроволновой радиометрии ИКИ РАН проводятся многолетние экспериментальные исследования нелинейной динамики морского волнения с использованием микроволновых радиополяриметрических и оптических методов с целью разработки методик спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга и измерений. проведения подспутниковых В рамках этих работ созданы автоматизированные измерительные комплексы, включающие в себя поворотную сканирующую платформу «Траверс-2», на которую устанавливается комплекс микроволновых радиометров и веб-камера, акустические метеокомплексы, измеряющие скорость и направление ветра на нескольких уровнях, давление и влажность, компьютерная система, которая регистрирует все измеряемые параметры И экспериментальные данные, управляет поворотной платформой И позволяет контролировать эксперимент по сети интернет.

В дополнение к этому, для независимого контроля поверхностного волнения разработан и создан лазерный волнограф, позволяющий измерять широкий диапазон волн, включая капиллярное волнение.

Комплексные испытания и натурные измерения регулярно выполняются (в среднем с периодичностью около одного раза в год) на специализированных морских полигонах, в том числе, с морской гидрографической платформы экспериментального отделения МГИ РАН, расположенной в пгт. Кацивели, Крым, а также с морских пирсов, расположенных на территории Южного отделения Института океанологии РАН (Голубая бухта, Геленджик).

Глубокий анализ статистики экспериментальных угловых зависимостей радиояркостной температуры, накопленной в последние годы (2020–2021), особенно при приёме излучения морской поверхности на поляризациях, повёрнутых на ±45°, выявил их существенное расхождение как с результатами предварительных модельных оценок, так и с данными других авторов, описанными в литературе. Установлено, что результаты

измерений содержат аддитивную ошибку, величина которой имеет гармонический характер зависимости от азимутального и вертикального углов визирования. Характер ошибки практически не зависит от метеорологических условий, проявляется одинаково в данных обоих радиометрических приёмников диапазона 0,8 см, но имеет разную амплитуду, достигающую величины 20 К. Среди возможных причин наблюдаемого эффекта: 1) дрейф установленных углов поворота вращателя поляризации на эффекте Фарадея, который определяет поляризацию принимаемого излучения, И 2) неконтролируемое изменение положения приёмников в пространстве при сканировании.

Для установки или проверки углов поляризаций обычно используют излучение на линейной поляризации, создаваемое генератором шума, а приёмная антенна радиометра поворачивается относительно оси излучателя. Максимум сигнала, принимаемого радиометром, определяет угол установки данной поляризации. Однако точность установки угла исходящего излучения, учитывая размеры волновода 7,2×3,4 мм оценивается как ±5°, что является недостаточным для наших измерений. В связи с этим была предложена схема измерений с переотражением излучения горизонтальной поляризации от поверхности воды на настильных углах визирования. Согласно формулам Френеля, вертикальная поляризация на углах вблизи угла Брюстера (для диапазона 0,8 см угол Брюстера составляет 78° от надира) испытывает полное поглощение, в то время как горизонтальная поляризация отражается от поверхности практически без потерь. В этом случае вертикальная составляющая излучения, если она присутствует (из-за неточной установки излучателя), полностью поглощается и в отражённом излучении будет только горизонтальная линейная поляризация. Для проверки и юстировки углов поляризаций радиометров был создан лабораторный стенд, фрагмент которого (часть оптической трассы между радиометром и отражающей водной поверхностью) показан на рисунке 4.1.1.



Рисунок 4.1.1 — Лабораторный юстировочный стенд (фрагмент)

Поворотная платформа с радиометром (в левом верхнем углу рисунка) установлена на стабилизированном основании; оптическая ось антенны радиометра направлена на отражающую поверхность воды в широкой горизонтальной кювете (в правом нижнем углу), облучаемой с противоположной стороны генератором шума ГШ-6. Углы наклона осей рупоров приёмного радиометра и облучателя — 10,4±0,2°. Радиометр с приёмной антенной имеет возможность вращаться вокруг своей оптической оси для поиска максимума сигнала. Влияние вклада изучения, распространяющегося в направлении приёмника по альтернативным оптическим путям, минимизировано с помощью поглотителей (калибровочные «абсолютно чёрные» тела в виде синих пирамид).

Радиометр-поляриметр R08Р принимает излучение на четырёх поляризациях: вертикальной, горизонтальной и повёрнутых поляризациях на +45° и -45°. Проведённые измерения углов установки поляризаций позволили отъюстировать положения углов с точностью до 0,5°. На рисунке 4.1.2 приведён пример измерений и аппроксимаций данных для определения углов установки поляризаций с помощью фарадеевского вращателя.



Рисунок 4.1.2 — Пример результатов измерений и аппроксимаций данных для определения углов установки поляризаций радиометра-поляриметра R08P1

С помощью созданного лабораторного стенда и специально разработанной процедуры обработки данных удалось установить и устранить причину расхождений измерений (в первую очередь на поляризациях ±45°) приборным комплексом с данными теоретических оценок.

В 2022 г. проведены обновление и доработка программного обеспечения комплекса регистрации данных и управления поворотной платформой «Траверс-2» с целью перехода программного обеспечения с системы Windows-7 на более современную систему Windows-10 и повышения устойчивости работы измерительного комплекса в дистанционном режиме по сети интернет.

За прошедший период был разработан и реализован высокоточный способ определения параметров морского волнения во всём диапазоне волновых чисел: от гравитационного до капиллярного. Капиллярные волны играют принципиально важную роль в задачах рассеяния электромагнитных волн на взволнованной морской поверхности

и при решении обратных задач дистанционного зондирования Земли из космоса. При появлении капиллярных волн наблюдается резкий рост коэффициента поглощения не только в оптическом, но и микроволновом диапазоне длин волн. По этой причине капиллярные волны нередко оказываются определяющим фактором в задачах метеопараметров атмосферы и подстилающей поверхности восстановления по радиотепловым и оптическим измерениям Земли с космических аппаратов. Поэтому исследование детальной связи параметров капиллярных волн с рассеивающими характеристиками морской поверхности представляется важной фундаментальной и прикладной задачей. Трудность проведения таких исследований заключалась в том, что до последнего времени не существовало прямых методов дистанционного определения параметров капиллярных волн в натурных условиях. Основой способа выступает лазерное сканирование взволнованной морской поверхности с регистрацией на видеокамеру траектории луча на границе раздела. При этом проводится синхронизация начала развёртки луча с началом записи изображения на матрицу видеокамеры. Данный способ позволяет дистанционно определять детальную структуру всех видов гравитационных и гравитационно-капиллярных волн в широком диапазоне метеоусловий. Достигнутая точность по измерению высоты поверхности раздела составила 0,8 мм, а точность привязки всей траектории к единому моменту времени составляла 10⁻⁴ с. В текущем году была проведена разработка экспериментального лазерного волнографа второго поколения, способного выполнять измерения в сложных морских условиях на гидрофизической платформе, и программного обеспечения обработки его данных в оперативном режиме.

4.2 Разработка научных основ совместного использования новейших микроволновых и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий, включая арктические регионы

4.2.1 Применение комплексного использования радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров высокого пространственного разрешения для оценки загрязнения Левантийского бассейна в результате аварийного разлива нефти г. Банияс (Сирия)

Разрабатываемые методики комплексного использования радиолокационных и оптических спутниковых данных высокого пространственного были применены для оценки загрязнения акватории восточной части Средиземного моря, куда 23 августа 2021 г. вследствие аварии на электростанции г. Банияс (Сирия) попало несколько тонн нефтепродуктов. Мониторинг нефтяного загрязнения проводился с использованием комплексного подхода на основе данных оптического диапазона космических систем PlanetScope (сенсоры Dove), Sentinel-2 (MSI), Landsat-8 (OLI-TIRS) и радиолокационных данных системы Sentinel-1 (C-SAR). PlanetScope — самая большая в мире спутниковая группировка из 200 наноспутников, осуществляющих съёмку в четырёх каналах (Red (красный) — 590–670 нм; Green (зелёный) — 500–590 нм; Blue (синий) — 455–515 нм; NIR (англ. near infrared, ближний инфракрасный) — 780-860 нм) на солнечно-синхронной орбите высотой 475 км, предоставляющих данные сенсоров Dove со сверхвысоким пространственным разрешением в 3 м. Основное преимущество этих данных состоит в том, что они покрывают практически весь земной шар и поступают в систему PlanetScope ежедневно. Недостаток системы PlanetScope заключается в том, что установленные на её спутниках приборы нацелены на исследование суши, поэтому проводят съёмку только достаточно узкой полосы прибрежной зоны морской поверхности. Вследствие этой особенности съёмки в рамках нашего мониторинга оптические данные PlanetScope были использованы для исследования распространения нефтяного загрязнения только вдоль побережья Сирии.

Было проанализировано в общей сложности 29 спутниковых изображений, полученных за период с 24 августа по 9 сентября 2021 г. Подготовка, анализ и обработка

спутниковых данных выполнена в информационной системе спутникового мониторинга морей и океанов See the Sea (STS), разработанной в Институте космических исследований РАН.

На основе анализа разнородных данных была проведена оценка скорости распространения нефтяного пятна с первых часов после начала аварии (рисунок 4.2.1) и до момента полной ликвидации нефтяного загрязнения, а также площадь загрязнения морской поверхности в разные моменты времени. К моменту получения первых радиолокационных изображений после аварии (примерно через 12 часов) протяженность нефтяного слика составила 11,5 км от точки разлива, площадь пятна 20 км².



Рисунок 4.2.1 — Проявление нефтяного загрязнения на радиолокационном изображении C-SAR Sentinel-1A от 24.08.2021, 03:43:42 UTC. Площадь пятна 20 км²

Под действием ветра и вдольберегового течения, направленного на север, нефтяная пленка быстро распространилась вдоль побережья Сирии, достигнув за два дня провинции Латакия, которая находится от места катастрофического разлива на расстоянии более 70 км. Средняя скорость распространения нефтяной плёнки составила 0,4 м/с. К 29 августа под действием циклонического поверхностного течения нефтяное загрязнение распространилось в западном направлении, практически достигнув восточного берега Северного Кипра.

К 30 августа площадь пятна в открытом море составила более 1250 км², а вдоль побережья Сирии — 220 км². Для локализации границ нефтяной плёнки в STS использовались инструменты классификации объектов на изображении. В частности, для определения площади нефтяного загрязнения морской поверхности, которое имело сложную форму, использовался метод классификации загрязнения «с обучением» (рисунок 4.2.2).

Оптические данные Dove PlanetScope позволили не только определить местоположение нефтяного загрязнения и оценить его площадь, но и изучить тонкую структуру пятна, выявить характер распределения сгустков нефти в самом пятне (рисунок 4.2.3).



Рисунок 4.2.2 — Результат классификации с обучением, применённой к нефтяному пятну, выявленному на РЛИ от 29.08.2021, 15:41:42 UTC (зелёная область), наложенный на РЛИ от 30.08.2021, 03:43:03 UTC. Площадь пятна, по данным радиолокационной съёмки, составила около 1500 км²



Рисунок 4.2.3 — Проявление тонкой структуры нефтяного пятна на цветосинтезированном изображении (RGB-каналы) Dove PlanetScope от 27.08.2021, 07:33:28 UTC

После 29 августа, когда нефтяное загрязнение стало угрожать побережью Кипра, кипрскими и турецкими властями была начата операция по ликвидации нефтяного разлива, которая продолжалась несколько дней. На последующих спутниковых изображениях, которые стали доступны начиная с 4 сентября, следов нефтепродуктов в

районе Кипра не наблюдается. А вот вдоль побережья Сирии они идентифицируются как на РЛИ, так и на оптических изображениях как минимум до 12 сентября. Такое длительное нахождение нефтяного загрязнения на морской поверхности вдоль береговой черты может быть объяснено тем, что оно смывалось с берега, а никакие работы по очистке берегов и прибрежной акватории не проводились.

4.3 Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оценки параметров процессов в верхнем слое океана и в приводном слое атмосферы

4.3.1 Спутниковый радиолокационный мониторинг ледяного покрова в Керченском проливе

Работа выполнялась совместно с сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Керченский пролив играет важную роль в водообмене между Азовским и Чёрным морями, является важным транспортным коридором для морских перевозок, а также обладает большим военно-стратегическим значением. Строительство и открытие Крымского моста через Керченский пролив в мае 2018 г. придало этому району ещё большую значимость.

В феврале 2017 г. сотрудниками ИКИ РАН по спутниковым данным обнаружили, что опоры Крымского моста (даже в самой широкой судоходной части) не пропускают лёд из Азовского моря в Чёрное, чего не наблюдалось до его строительства. Эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости постоянного мониторинга ледяного покрова в данном районе.

В 2022 г. был проведён мониторинг ледяного покрова в Керченском проливе за период с зимы 2017/2018 по настоящее время. Мониторинг базировался на данных радиолокаторов SAR-C спутников Sentinel-1A, -1В. Было получено, что начиная с зимы 2017/2018 гг. по настоящее время лёд в Керченском проливе был только в третьей декаде февраля 2021 г. (рисунок 4.3.1), когда по данным метеостанции в Керчи температура воздуха опускалась до –11°.



Рисунок 4.3.1 — Проявление ледового покрова в Керченском проливе на радиолокационном изображении от 25 февраля 2021 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2021)

Во все остальные зимы в Керченском проливе льда не было, хотя в восточной части Азовского моря ледяной покров отмечался каждый год. С 1 декабря 2022 г. уже образовался ледяной покров в Таганрогском заливе.

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Мониторинг-Океан» проводились в полном соответствии с утверждённым планом. В их рамках решены задачи и получены результаты по следующим основным направлениям:

- Исследования нелинейной динамики морского волнения методами спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга морских акваторий;
- Разработка научных основ совместного использования новейших радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий, включая арктические регионы;
- Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оценки параметров процессов в верхнем слое океана и в приводном слое атмосферы.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Океан» в 2022 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 5 МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА

Введение

Направления работ по разделу Мониторинг-Атмосфера в 2022 г. содержат следующие подразделы:

- разработка научных основ и методов анализа временных серий спутниковых многосенсорных наблюдений, исследований и мониторинга атмосферных явлений;
- развитие моделей и методов анализа данных для мониторинга и прогноза состояния атмосферы, в т.ч. мощных вихревых структур с учётом ветровых потоков, фазовых переходов влаги, атмосферного электричества, вариаций космических лучей;
- разработка новых методов обработки данных дистанционных наблюдений в ИК и видимом диапазоне и лидарных наблюдений облачности;
- исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов;
- развитие методик решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы по данным ДЗЗ с использованием нейронных сетей.

Основные результаты проведённых по темам в 2022 г. работ кратко представлены в настоящей главе отчёта.

Полученные в 2022 г. результаты подробно изложены в списках публикаций в иностранных и российских журналах, а также в материалах различных конференций, проходивших в 2022 г., приведённых в конце отчёта [8, 9, 50–56, 72, 73, 104, 122–124, 126–128, 147, 148].

5.1 Разработка научных основ и методов анализа временных серий спутниковых многосенсорных наблюдений исследований и мониторинга атмосферных явлений

5.1.1 Волновые возмущения нижней и верхней ионосферы во время тропического циклона Faxai 2019 г.

С использованием региональной сети станций сверхдлинноволнового радиопросвечивания в Дальневосточном регионе России и измерений возмущений электронной плотности посредством спутников миссии SWARM исследован отклик нижней и верхней ионосферы на прохождение тайфуна Faxai 2019 г. Приведённые экспериментальные данные отчетливо демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала, а также электронной плотности во время активной стадии тайфуна. Параметры волновых возмущений соответствуют атмосферным внутренним гравитационным волнам. Максимум спектральной плотности волновых возмущений в нижней ионосфере соответствует 16–20 мин. Предложен механизм воздействия обусловленный внутренних волн ионосферу, поляризационными на полями. возникающими при волновом движении плазмы в нижней части *F*-области. Такие поля, проецируясь вдоль силовых линий геомагнитного поля, позволяют интерпретировать наблюдаемые вариации фазы СДВ-сигнала и вариации электронной плотности в верхней ионосфере.

5.1.2 Об аномальных амплитудах ветра в нижней ионосфере

Согласно экспериментам, как зональная, так и меридиональная составляющие ветра демонстрируют явное увеличение амплитуды, начиная с высот 80–85 км, достигают максимума на высотах 100–110 км и постепенно уменьшаются с дальнейшим ростом высоты. При этом максимальные амплитуды ветра оказываются намного больше, чем предсказывает теория приливных движений в ионосфере или эмпирическая модель горизонтального ветра. Впервые предложена двумерная модель, объясняющая причину аномальных амплитуд ветра в нижней ионосфере. Модель основана на учёте спирального профиля ветра на высотах мезосферы-термосферы и турбулентной спиральности.

5.1.3 Построение длинных рядов глобальной циркуляции водяного пара в атмосфере по данным SSMIS

Атмосферная адвекция водяного пара является одной из важнейших составляющих планетарного гидрологического цикла. Она обеспечивает перенос атмосферной влаги и скрытого тепла из тропиков к высоким широтам и от океанов вглубь континентов, в значительной степени определяя климат Земли. Поэтому актуальной задачей анализа длинных рядов данных дистанционного зондирования Земли является уточнение и детализация картины глобальной адвекции атмосферной влаги и её регулярный мониторинг. В рамках спутникового радиотепловидения предложена интерполяционная методика расчёта потоков водяного пара, полностью замкнутая относительно данных спутниковых радиотепловых измерений. Расчёт осуществляется на глобальной регулярной координатной сетке с шагом 0,25 географического градуса и позволяет восстановить поля водяного пара и его потоки с периодичностью 4–8 раз в сутки. Подход успешно применён к анализу динамики атмосферных мезомасштабных и синоптических процессов, а также к расчёту ряда параметров глобальной атмосферной циркуляции. Несмотря на то, что для применимости подхода спутникового радиотепловидения нет пространственных (географических) ограничений, ранее эта методика применялась только над поверхностью океана из-за отсутствия продуктов микроволновых измерений интегрального водяного пара атмосферы (PWV) над сушей и другими типами подстилающих поверхностей. Поэтому возникла необходимость разработать алгоритмы восстановления интегрального паросодержания над всеми типами подстилающей поверхности по данным микроволновых радиометров SSMIS и выполнить обработку максимально длинных рядов данных. Интегральное паросодержание атмосферы (PWV) является одним из базовых продуктов пассивного микроволнового ДЗЗ из космоса. Для его восстановления традиционно используются измерения вблизи линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Такие измерения хорошо пригодны для восстановления PWV над поверхностью воды, но мало пригодны для восстановления над сушей. Причиной этого является большая величина излучательной способности покровов суши и достаточно слабая поглощающая способность атмосферы в области 22 ГГц. Изменение излучения атмосферы за счёт водяного пара на 22 ГГц практически невозможно различить на фоне ярких покровов суши, обладающих сильной изменчивостью излучательной способности. Решением проблемы может быть использование дополнительных измерений на частотах с более сильным поглощением в атмосферном водяном паре 150–200 ГГц. На сегодняшний день радиометров, имеющих набор каналов как в области слабой линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц, так и в области сильной линии поглощения 183,31 ГГц мало. Наиболее привлекательными являются радиометры серии SSMIS, поскольку они функционируют одновременно на нескольких спутниках DMSP F16, F17, F18, выполняющих наблюдения в близкое местное время. SSMIS имеет 24 радиометрических канала на частотах от 19 до 200 ГГц и конический тип сканирования под углом 53°. Для восстановления PWV по данным SSMIS могут быть использованы два подхода: физический и статистический. Физический подход заключается в решении некорректной обратной задачи на основе комплексной модели переноса излучения и дополнительной априорной информации 0 состоянии исследуемых объектов. Статистический ____ в установлении функциональной зависимости различными математическими методами между одновременными спутниковыми измерениями излучения и подспутниковыми измерениями водяного пара. В настоящий момент

статистический подход становится одним из основных в решении подобных задач благодаря большому объёму накопленных метеорологических данных наземных станций и продуктов их обработки. В данной работе были применены искусственные нейронные сети (ИНС) как наиболее современный вариант статистического подхода. Для восстановления использовалась схема трёхслойной ИНС прямого распространения с 10 нейронами в скрытом слое с передаточной функцией *tanh* (рисунок 5.1.3.1).



Флаг типа поверхности

Рисунок 5.1.3.1 — Схема нейросетевого алгоритма восстановления PWV по данным SSMIS

В качестве входов ИНС или предикторов использовались данные TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 каналов 1–18 и высота рельефа с флагом типа поверхности. Всего 20 входов. Выход у ИНС единственный — значение PWV. Для обучения ИНС использовались данные реанализа ECMWF ERA5 за 2020 г., совмещённые со спутниковыми по времени в пределах ± 15 мин. Размер обучающей выборки составил 5 млн точек. Для тестирования сети использовались 3 млн точек измерений SSMIS, совмещённых с данными ERA5. По результатам тестирования предложенный нейросетевой алгоритм обеспечил восстановление PWV над всеми типами поверхности со среднеквадратичной ошибкой 2,4 мм (рисунок 5.1.3.2*a*) и над сушей — 3,0 мм (рисунок 5.1.3.2*b*).

После восстановления полей водяного пара по данным SSMIS к ним применялись алгоритмы спутникового радиотепловидения. Процедура обработки состояла из следующих основных этапов:

- 1. Восстановление полей PWV по данным радиометрических измерений разных спутников;
- 2. Нанесение полей PWV на регулярную прямоугольную сетку координат;
- 3. Устранение пропуска данных путём совмещения близких по времени полей PWV получение опорных полей PWV;
- 4. Временная интерполяция опорных полей;
- 5. Вычисление векторов смещения между опорными или интерполированными полями и пересчёт их в векторы адвекции водяного пара.

Первый этап этой схемы был описан выше. Наложение полей PWV на регулярную сетку координат 0,25×0,25° выполнялось при помощи линейной интерполяции значений, ближайших к центру узла сетки. Далее проводилось устранение пропусков данных в полях PWV. Схема сканирования SSMIS не позволяет получать полного покрытия

данными всего земного шара, из-за чего между областями измерений остаются существенные пропуски — лакуны.



Рисунок 5.1.3.2 — Диаграмма рассеяния значений PWV, восстановленных по данным SSMIS и полученных из реанализа: *а* — над всем земным шаром; *б* — над сушей





Рисунок 5.1.3.3 — Глобальное поле PWV по данным SSMIS F16 (*a*); глобальное поле PWV после закрытия пропусков данных (*б*)

Для SSMIS их возможно устранить практически полностью, закрывая пропуски в данных одного спутника данными с другого. Временной промежуток между наблюдениями разных спутников DMSP одной и той же точки поверхности медленно варьирует на многолетних интервалах. За основу были взяты данные PWV со спутника

F16, затем пропуски в них были последовательно закрыты данными со спутников F18 и F17. Оставшиеся незначительные по площади лакуны были устранены алгоритмом «сшивки» спутникового радиотепловидения. Пример получения полей полного покрытия приведён на рисунок 5.1.3.3.

Поля полного покрытия могут быть получены два раза в сутки с интервалом в 12 ч. Они являются опорными для следующих этапов алгоритма. К ним применяется алгоритм расчёта оптического потока и вычисление смещения элементов полей, наблюдаемых на последовательных двенадцатичасовых интервалах. При этом выполняется временная интерполяция опорных полей с шагом до 3 ч. Получающиеся при этом поля векторов смещения элементов изображения пересчитываются в векторы адвекции путём геометрической калибровки (пересчёта из координат расчетной сетки в расстояния на поверхности Земли и деления на соответствующие интервалы времени). Пример полученного глобального поля адвекции по данным SSMIS за 24 августа 2020 г. приведён на рисунок 5.1.3.4.



Рисунок 5.1.3.4 — Глобальное поле адвекции водяного пара по данным SSMIS

На рисунке хорошо виден перенос водяного пара над Евразией. По всей видимости зафиксированный поток является атмосферной рекой, которая привела к выпадению значительного количества осадков на своём пути. Ранее такой поток не мог быть зарегистрирован по данным микроволновых радиометрических измерений из-за отсутствия полей PWV над всеми типами поверхности. Расчёт таких полей адвекции с шагом 6 ч был выполнен для данных SSMIS с 2012 по 2021 г. Таким образом были получены длинные ряды (10 лет) адвекции водяного пара в атмосфере в глобальном масштабе. Эти данные, в частности, используются в качестве входной информации при решении задач предсказания наводнений и расчёта гидрологического баланса в бассейнах крупных рек.

5.2 Развитие моделей и методов анализа данных для мониторинга и прогноза состояния атмосферы, в том числе мощных вихревых структур с учётом ветровых потоков, фазовых переходов влаги, атмосферного электричества, вариаций космических лучей

5.2.1 Модели и методы скалярной волновой фильтрации полей пристеночных турбулентных пульсаций давления

В акустике турбулентных потоков исследования взаимодействия турбулентного потока с обтекаемыми структурами, возбуждение потоком вибраций в структурах и шумов обтекания, являются важной исследовательской проблемой, генерация получившей своё развитие применительно к шумам обтекания многих объектов и аппаратов, движущихся в воде и воздухе с большими скоростями. Взаимодействие турбулентных потоков и обтекаемых структур актуально в акустике турбулентных потоков в задачах прогноза и управления аэрогидродинамическим возбуждением колебаний элементов конструкций (корпуса самолётов, подводных лодок, высокоскоростных автомобилей и других транспортных средств). Акустика турбулентных потоков использует статистические параметры турбулентных полей скорости и давления как исходный фундамент для статистического описания процессов генерации акустического излучения и формирования полей пристеночных турбулентных давлений. Скалярный частотно-волновой спектр представляет суммарную энергию всех волновых компонент поля турбулентных давлений с заданным модулем волнового вектора, содержит в концентрированном виде информацию, требуемую при решении задач аэрогидродинамической акустики. Исследования частотно-волнового спектра направлены на установление вклада различных волновых компонент турбулентного поля пульсаций давления в суммарную нагрузку, определяющую вибрации и звукоизлучение обтекаемых элементов структур. Было показано, что, хотя поля турбулентных давлений в пограничном слое имеют выраженный конвективный характер, физические механизмы, определяющие соответствующие им значимые эффекты, оказываются практически зависимыми. Широкополосная скалярная волновая фильтрация поля турбулентных пристеночных давлений может осуществляться на базе использования конечно-размерных приближений "идеального" скалярного волнового фильтра с единичной волновой чувствительностью в заданном диапазоне волновых чисел и нулевой чувствительностью вне этого диапазона. Одно из таких приближений — контурные фильтры, формируемые с помощью совокупности небольшого количества контурных приёмников в форме концентрических окружностей. Было показано, что несмотря на трудность практической реализации скалярной волновой фильтрации полей пристеночных турбулентных пульсаций давления, построение контурных фильтров представляется перспективным направлением исследований.

5.2.2 Грозовая активность и вихревые структуры в атмосфере

Ионизация аэрозоля в стратосфере и верхней тропосфере высыпающимися частицами космических лучей усиливает вихревую активность атмосферы. Важная роль аэрозольной примеси проявляется в генерации плазменных вихрей и накоплении вихрями энергии и массы в атмосфере при конденсации влаги. Вследствие каскадного характера процесса ионизации влияние космического излучения оказывается нелинейным. В плазменных неоднородностях стохастически возбуждаются апериодические электростатические возмущения, которые играют заметную роль в генезисе вихрей. Показано, что на процесс усиления вихревых структур в атмосфере влияют обратные Проявление обратных связей стимулируется грозовой активностью. связи. Электромагнитные волны, излучаемые грозовыми разрядами, вызывают высыпание частиц радиационных поясов Земли, в частности протонов внутреннего радиационного

пояса с энергией порядка 100 МэВ. Ионизация аэрозолей в каскадах высыпающихся частиц способствует возбуждению плазменных МГД-механизмов в геомагнитном поле. При взаимодействии вихрей Россби с плазменными вихрями происходит усиление атмосферных вихревых структур с нарастанием градиентов давления. Грозовые разряды связаны с плазменными вихрями. С нарастанием грозовой активности пожары в сухих грозах усиливают накачку загрязнений в атмосферу. С нарастанием концентрации загрязнений усиливается плазменная вихревая активность и связанная с нею грозовая активность.

5.2.3 Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов

Квазитропические циклоны (квази-ТЦ) в российских научных публикациях и СМИ часто называют субтропическими циклонами, мезоциклонами или штормами. В условиях происходящих изменений климата увеличивается число интенсивных атмосферных вихрей (тропических и квазитропических циклонов, полярных ураганов, облачных смерчей-торнадо) и расширяются географические и сезонные пределы их появления. Первые спутниковые снимки мезомасштабных циклонических вихрей в Чёрном море, у которых наблюдалась особенность типа «глаза» урагана, относятся к 2002 г. и находятся в архивах Метеобюро Великобритании. Однако эти вихри имели очень короткое время жизни и не исследовались. Первым детально изученным черноморским квази-ТЦ стал мезоциклон, сформировавшийся в юго-западной части моря 25–29 сентября 2005 г. Недавним примером стал черноморский квази-ТЦ 11-16 августа 2021 г. С мая по октябрь 2021 г. над Чёрным и Азовским морями появилось несколько квази-ТЦ, которые были выявлены зарубежными метеорологами из Европы, США и Австралии. Для предотвращения возможных катастрофических ситуаций становится чрезвычайно важной точная диагностика циклогенеза и основанный на ней прогноз дальнейшей эволюции и траектории формирующегося вихря. Главным источником энергии для тропических, квазитропических и полярных ураганов является тепловая конвекция, вызванная значительной разностью температур между атмосферным слоем и подстилающей водной поверхностью. Это позволяет предложить единый подход для диагностики циклогенеза во всех трёх случаях. Теоретическим базисом является фундаментальная физическая теория турбулентного вихревого динамо (ИКИ РАН). Теория даёт количественные критерии, определяющие возбуждение крупномасштабной вихревой неустойчивости в атмосфере. Большое значение также имело «прорывное» открытие вихревой облачной конвекции, которое проложило путь к обоснованию «спирального» сценария зарождения интенсивных долгоживущих атмосферных вихрей. Обнаружение конвекции нового типа стало возможно только с применением средств появившегося на рубеже тысячелетий и начавшего применяться облачно-разрешающего атмосферного численного моделирования. В настоящей работе первые предложен оригинальный подход для определения точного времени начала тропического циклогенеза. Такой подход включает комбинированный анализ спутниковых изображений облачности и соответствующих данных облачно-разрешающего численного моделирования для области развивающегося вихревого возмущения. Атмосферное численное моделирование позволяет точно определить момент времени, в который реализуются необходимые условия для возникновения неустойчивости. Этот момент интерпретируется как начало циклогенеза. Найденные в работе специфические конфигурации вихревой облачной конвекции, соответствующие начальной стадии циклогенеза, могут быть использованы в оперативной метеодиагностике при анализе спутниковых изображений облачности. Иллюстрация подхода дана на примере диагностики тропического циклогенеза. Даны практические рекомендации по «спиральной» постобработке метеорологических полей для диагностики крупномасштабной вихревой неустойчивости. Предлагаемая диагностика может помочь метеослужбам в более раннем выявлении этих опасных штормов. Обсуждена возможность

применения для черноморских вихрей точной диагностики циклогенеза, обоснованной в совместных работах с американскими коллегами для случая тропических циклонов и только что протестированной индийскими метеорологами для реально наблюдавшихся тропических ураганных вихрей.

5.2.4 Малопараметрическая нелинейная модель тропических циклонов как платформа для численного моделирования влияния глобального потепления на морские перевозки

На основе малопараметрической нелинейной модели (МНМ) в качестве платформы для численных расчётов моделируется динамика тропических циклонов (ТЦ). Для одного циклона с базовыми наборами начальных данных рассчитываются его основные параметры, такие как скорость ветра, время жизни и категория. Для учёта климатических изменений и пространственного глобального потепления используется набор параметров с повышенной температурой поверхности океана. На основе спутниковых изображений и существующих баз данных для параметров циклонов соответствующих категорий вычисляются активные площади, траектории и время жизни ТЦ. Проведён анализ влияния изменения климата на морские перевозки, приводящего к изменениям расписания, вынужденным простоям судов и изменениям траекторий движения. Сделаны выводы о влиянии глобального потепления и изменения климата на морской транспорт.

5.2.5 Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга и диагностики параметров тропических циклонов

Тропические циклоны (ТЦ) играют важную роль в энергетическом И гидрологическом циклах Земли, влияя на перенос тепла и влаги в атмосфере. При этом ТЦ являются одними из самых разрушительных природных явлений, представляющих существенную угрозу для жизни и имущества людей, находящихся в зонах возможного формирования этих атмосферных катастроф. Поэтому, одной из актуальных задач ДЗЗ остается мониторинг и диагностика параметров тропических циклонов. В силу сложности задачи, традиционным и наиболее часто применяемым подходом к определению интенсивности ТЦ является экспертная оценка по методу Дворака, в котором значение скорости ветра определяют на основе размера, формы и завихренности ТЦ. Из-за многочисленных вариаций форм и размеров ТЦ, недостаточной точности существующих методов автоматического определения скоростей ветра в экстремальных погодных условиях стандартная процедура оценки интенсивности ТЦ до сих пор остаётся в существенной степени субъективной. Формализация решения возможна с использованием искусственного интеллекта, в частности, на основе технологий искусственных нейронных сетей (ИНС). Такой подход развивается в настоящее время в ИКИ РАН. Методология обработки и анализа данных, включающая обучение и дальнейшее применение ИНС, показана на рисунке 5.2.5.1.

В основу обучающей и тестовой выборки были положена информация базы данных (БД) «HURDAT2». Эта БД была составлена Национальным ураганным центром США (The National Hurricane Center, NHC). В неё включены данные авиаразведки и экспертная оценка параметров ТЦ. Продолжающиеся ряды данных по ТЦ восходят к 1851 г. и включают в себя такие параметры, как: время, тип, дату, максимальную скорость устойчивого ветра, широту, долготу центра циклона, давление, радиусы ветра по направлениям и радиус максимального ветра ТЦ. Каждому ТЦ соответствуют записи параметров с 6-часовыми интервалами. Информация БД была отфильтрована с учётом наличия пригодных для анализа спутниковых изображений ТЦ в ИК диапазоне спектра (основное требование — как минимум 80 % площади облачной структуры ТЦ должно быть покрыто данными), в результате чего была сформирована выборка данных, содержащая 13169 записей для ТЦ акваторий северо-востока Тихого океана и северо-

запада Атлантики за 2005 – 2021 годы. В качестве источника спутниковых изображений был использован архив Института метеорологических спутниковых исследований (CIMSS, США). В архиве содержатся данные о ТЦ с геостационарных спутников, где изображения представлены в ИК-диапазоне.



Рисунок 5.2.5.1 - Методология работы

На основе объединённой информации HURDAT2 и CIMSS была сформирована собственная БД, использованная в дальнейшей работе. Важной задачей в обучении нейронных сетей является создание сбалансированного набора данных. Даже при сложной и специализированной архитектуре нейросети практически невозможно добиться хорошего результата, если обучающая выборка имеет недостаточное количество кластеров или в каждом классе находится разное их количество, так как нейронная сеть будет отдавать предпочтение тем классам, в которых содержится большее количество данных, или будет происходить переобучение. Так как изображения в сформированном наборе данных имели неравномерное распределение по интенсивности ТЦ, потребовалось создать сбалансированный набор обучающей и проверочной выборки. Это было достигнуто применением процедуры аугментации, или генерирования новых изображений на основе имеющихся. С учётом начального числа изображений ТЦ разной интенсивности было реализовано два метода аугментации (расширения) набора изображений:

- отражение по вертикали и горизонтали;
- поворот на случайный угол.

Далее к расширенному набору данных была применена стандартная процедура нормализации (выравнивания яркостей изображений). В итоге был получен нормализованный набор данных из 144000 элементов для обучения и тестирования. Для построения распознающего классификатора на основе ИНС была применена модель
глубокого обучения на базе свёрточных нейронных сетей (CHC). Типичная топология CHC приведена на рисунке 5.2.5.2.

Вся совокупность ТЦ была разделена на восемь классов по интенсивности: от C1 — тропическая депрессия (максимальная скорость ветра 20–30 узлов) до C8 — сильный ураган (максимальная скорость ветра более 135 узлов). На рисунке 5.2.5.4 показаны эволюционные кривые обучения созданной нейросети.



Рисунок 5.2.5.2 — Топология свёрточной нейронной сети

В процессе обучения точность на проверочном наборе быстро возрастает в течение первых 15 эпох (с 52 до 80 %), а затем стабилизируется на достаточно приемлемом уровне (83–84 %), что свидетельствует о хорошей сходимости модели в процессе обучения. Данные кривые, как в процессе обучения, так и в процессе валидации (тестирования) показывают, что реализованная модель не имеет переобучения. Это связано с использованием слоёв отсева (Dropout), которые предотвратили переобучения ценой некоторого снижения скорости обучения. По результатам применения созданной СНС для классификации ТЦ по их интенсивности и сопоставления полученных оценок с данными HURDAT2 была рассчитана матрица ошибок (confusion matrix), показывающая высокую точность отнесения ТЦ к правильному классу интенсивности с использованием построенной методики. Матрица ошибок проиллюстрирована на рисунке 5.2.5.

На рисунке 5.2.5.3 проиллюстрирована архитектура реализованной СНС.

В целом, была достигнута высокая точность распознавания класса интенсивности ТЦ, соответствующая известным мировым аналогам. В настоящее время ведутся работы

по совершенствованию предложенной методики. В частности, показано, что ещё более высокую точность восстановления характеристик ТЦ способна обеспечить архитектура СНС, реализующая регрессионный подход. Предварительные оценки точности восстановления интенсивности ТЦ превосходят 90 %.



Рисунок 5.2.5.3 — Архитектура реализованной СНС



Рисунок 5.2.5.4 — Эволюционные кривые точности и ошибки СНС



Рисунок 5.2.5.5 — Матрица ошибок созданной СНС

5.3 Разработка новых методов обработки данных дистанционных наблюдений в ИК и видимом диапазоне и лидарных наблюдений облачности

5.3.1 Способы моделирования рассеивающего объекта в задачах зондирования атмосферы одночастотным лидаром обратного рассеяния

Продолжена разработка способов дистанционного определения микроструктуры рассеивающей среды для приземного слоя атмосферы с помощью одночастотных лидаров обратного рассеяния. Приземный слой атмосферы характеризуется наличием полидисперсных и несферических частиц с различными оптическими и физическими свойствами. В частности, рассмотрены вопросы совместного применения оптимальных схем зондирования и нефелометров в задачах калибровки и интерпретации обратных сигналов. Показаны преимущества оптимальной схемы в задаче калибровки лидара упругого рассеяния при измерении коэффициента обратного рассеяния (KOP). Оптимальные схемы включают в себя основной канал, который представляет собой коаксиальную схему зондирования, в которой поле зрения совпадает с угловым размером зондирующего пучка. Это связано с тем, что геометрический форм фактор передающего и приёмного каналов для коаксиального канала постоянен вдоль всей зондируемой дистанции. Показано, что в импульсном режиме оптимальными схемами можно измерить зондируемый объем среды на заданной точке трассы. Из принципа обратимости лучей следует, что для такой схемы в поле зрения приёмного канала находится четверть мощности лазерного импульса. Как было показано ранее, поля зрения приёмного канала и зондирующего пучка измеряются с помощью экранов с модуляцией коэффициента пропускания на трассе с фиксированной дальностью. В качестве таких экранов предложено использование перфорированных экранов, изготовленных по изображениям частиц. Посредством таких экранов можно сопоставить исследуемой среде эквивалентную среду, состоящую из монодисперсных рассеивающих частиц. Показано, что оптимальные схемы измерений микроструктуры рассеивающего слоя могут быть реализованы, как посредством изменения расстояния между экраном и лидаром на трассах с фиксированной дальностью, так и по линейному увеличению изображений частиц на перфорированном экране. Однако с помощью оптимальной одноканальной схемы нельзя измерить угловую

трансформацию пучка. Поскольку эквивалентное сечение определяется однозначно только по угловому размеру ореола вокруг пучка, то для его измерения предложено приёмным применение двухпозиционных схем (c дополнительным каналом). Предложенный метод основан на возможности определения углового размера ореола при рассеянии вперёд. Двухпозиционная схема состоит из двух каналов, одним из которых является коаксиальный канал. Оптическая ось второго канала смещена относительно коаксиального канала на некоторую базу. В этом случае появляется возможность прямых измерений микроструктуры рассеивающего слоя путём сопоставления исследуемому слою эквивалентного слоя, состоящего из монодисперсных рассеивающих частиц. Сделан вывод о возможности использования отражающих сфер для калибровки лидара обратного рассеяния. Отмечены преимущества этого способа при калибровке миниатюрного лидара обратного рассеяния с предельно малой средней мощностью зондирующего пучка. Для этой схемы сигнал обратного рассеяния сосредоточен на расстояниях до нескольких сотен метров, что позволяет производить калибровку обратного сигнала на относительно малых трассах до 100 м. Микроструктура эквивалентной среды также может быть сопоставлена микроструктуре эквивалентной среды посредством контактных измерений обратного рассеяния на отдельных частицах с помощью нефелометров. Для этого достаточно проведения относительных измерений обратных сигналов на отдельных частицах с последующей обработкой данных с использованием ненормализованных моментов. Концентрация эквивалентных частиц, рассчитанная по указанной методике, как правило, меньше концентрации частиц, составляющих рассеивающий объект. Это связано с наличием функции распределения частиц по поперечным сечениям. Для несферических частиц концентрация эквивалентных частиц зависит от ориентации плоскости сечений частиц по отношению к линии зондирования. Для монодисперсных сферических частиц концентрация эквивалентных частиц равна концентрации реальных частиц. Измеряемые значения КОР И концентрации эквивалентных частиц позволяют определить дифференциальное сечение обратного рассеяния на отдельной частице. Коэффициент пропускания и эквивалентная концентрация позволяют определить сечение экстинкции для исследуемого слоя. Представленный сценарий измерений может использоваться для исследования рассеивающих объектов, состоящих из полидисперсных и несферических частиц. Отмечены предельные случаи, когда сечение рассеивающей частицы представляет собой пересекающиеся линии (волокна, нити, полосы и т.д.). Использование модели эквивалентной среды может быть применимо и в этих случаях. Метод может быть расширен для случаев, когда рассеивающий объект состоит из частиц с различными оптическими и физическими свойствами, в частности, для приземного слоя атмосферы. Сделан вывод о том, что представленный метод с использованием эквивалентной среды имеет наглядную и обоснованную последовательность этапов для интерпретации данных лидарного зондирования приземного слоя атмосферы.

5.4 Исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов

Рассмотрена возможность использования цилиндрических пропорциональных счётчиков наполненных ³Не для измерения спектра атмосферных нейтронов. В настоящее время единственным устройством, используемым для изменения спектра атмосферных нейтронов, является так называемый спектрометр Боннера, представляющий собой набор сферических газоразрядных счётчиков, окружённых замедлителями различной толщины. Спектр нейтронов восстанавливается (unfolding) по скоростям счёта отдельных детекторов решением обратной задачи. Сферическая геометрия счётчика обеспечивает максимальную зависимость его скорости счёта от толщины замедлителя, что, естественно, повышает точность восстановления исходного спектра. На сегодняшний день коммерчески доступными являются только счётчики диаметром 5 см. Естественно, что изза низкой интенсивности потока естественного нейтронного фона, этот размер

недостаточен для сбора статистики, обеспечивающей адекватную точность измерения спектра. Гораздо более доступные цилиндрические счётчики позволяют обеспечить практически неограниченную чувствительную площадь, но обладают более слабой зависимостью скорости счёта от толщины замедлителя, и возможность их применения для измерения спектра в настоящий момент не вполне ясна. В настоящей работе для двух упомянутых выше геометрий детекторов выполнено моделирование, результат которого показан на рисунке 5.4.1.



Рисунок 5.4.1 - Сравнение эффективности регистрации нейтронов сферическими и цилиндрическими счётчиками

Как можно видеть, формы кривых практически совпадают вплоть до энергии 10 Мэв, что вполне достаточно при измерении спектра атмосферных нейтронов. Однако чувствительность к толщине замедлителя у цилиндрических счётчиков в 2–5 раз ниже. Очевидно, что это различие может быть компенсировано повышением точности измерений за счёт увеличения площади детекторов. Результаты для мононаправленного потока незначительно отличаются от описанных выше. Для получения конкретных значений необходимо выполнить моделирование регистрации спектра атмосферных нейтронов и восстановлением исходного спектра. С последним в настоящий момент возникли трудности, связанные с тем, что международные организации, которые обладают необходимым кодом, уклоняются от его предоставления.

5.5 Развитие методик решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы по данным ДЗЗ с использованием нейронных сетей

5.5.1 Реализация процедуры восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2-2 в сервисе «Bera-Science»

В Институте Космических Исследований РАН продолжается работа по внедрению данных МТВЗА-ГЯ и продуктов их обработки в информационный сервис «Bera-Science» ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Одним из таких продуктов являются профили температуры и абсолютной влажности тропосферы, получаемые на основе данных МТВЗА-ГЯ. Для внедрения в сервис был разработан алгоритм восстановления температурно-влажностных профилей по данным МТВЗА-ГЯ на основе технологии искусственных нейронных сетей (ИНС). МТВЗА-ГЯ имеет 31 радиометрический канал; данные 28 из них используются в

внедрённой технологии. Максимальную чувствительность к вариациям рамках температуры имеют 10 каналов в полосе поглощения кислорода 50-60 ГГц, к вариациям влажности чувствительны 3 канала вблизи линии поглощения 183,31 ГГц. Максимум весовых функций влажности лежит не выше 10 км (изобара 200 мбар), поэтому как профиль температуры, так и профиль влажности восстанавливаются только для тропосферы. Обработка проводится для восьми слоёв тропосферы (от 1000 до 200 мб), разделённых условными границами с шагом 100 мб, каждый из которых характеризуется восстановленным средним значением температуры и влажности. При этом для каждого атмосферного слоя построена отдельная ИНС, использующая в качестве предикторов яркостные температуры во всех радиометрических каналах. В дальнейшем предусмотрена оптимизация пространства предикторов. Кроме радиометрической информации в качестве предикторов используются флаги типа поверхности (Surf), направление движения по орбите (Dir), а также координаты центра пятна разрешения на поверхности Земли. Восстановление профиля абсолютной влажности требует информации о профиле температуры атмосферы, поэтому на первом этапе производится восстановление профиля температуры, который служит дополнительным предиктором для восстановления профиля абсолютной влажности. Таким образом, общую схему восстановления профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ с помощью ИНС можно представить в следующем виде (рисунок 5.5.1):



Рисунок 5.5.1 — Общая схема восстановления профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ с помощью ИНС

Обучение и тестирование ИНС было реализовано на данных МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2-2, накопленных за период с марта по декабрь 2020 г. В качестве подспутниковых данных были использованы данные реанализа ЕСМWF Ега 5. Данные реанализа содержат глобальные поля температуры и удельной влажности на 37 изобарических уровнях от 1000 до 1 мб с неравномерным вертикальным шагом. Временное разрешение данных реанализа Ега 5 составляет 1 ч; пространственное разрешение по горизонтали 0,25×0,25° на регулярной прямоугольной сетке координат. Профили из реанализа были пересчитаны в значения абсолютной влажности и усреднены в восьми слоях толщиной 100 мб от 1000 до 200 мб. Для пространственного совмещения данные МТВЗА-ГЯ были интерполированы на прямоугольную сетку координат реанализа, но без экстраполяции для сохранения широтьс в пределах ±30 мин. После совмещения полученный набор данных был разбит на обучающую и тестовую выборки. Обучающая

выборка содержала данные во временном интервале от марта до октября 2020 г., тестовая выборка ноябрь – декабрь 2020 г. Для уменьшения объёма и исключения горизонтальных пространственных корреляционных эффектов полученные выборки были прорежены случайным образом; итоговый размер обучающей выборки составил 12 млн точек, а тестовой выборки — 3 млн точек. На основе полученных выборок была проведена оптимизация топологии общей схемы ИНС (см. рисунок 5.5.1) для достижения наилучшей точности восстановления профилей и уменьшения вычислительной нагрузки при восстановлении. Сначала было экспериментально подобрано число нейронов в скрытом слое ИНС температуры (N) и влажности (M). Для этого было проведено многократное обучение сетей с разным количеством *N* и *M*. Для температурной ИНС оптимальное число нейронов скрытого слоя N = 38. Для влажностной ИНС M = 17. После обучения ИНС с оптимальными топологиями были исследованы результаты восстановления профилей температуры и влажности на тестовой выборке. МТВЗА-ГЯ в своих данных предоставляет информацию о типе постилающей поверхности для точки измерений. Всего в данных различается семь типов поверхности: суша, растительность/суша, прибрежный район, лёд, возможно лёд, вода и береговой район. Результаты восстановления приведены в таблице 5.5.1. Также результаты восстановления были сопоставлены с мировыми аналогами, в частности, с данными системы Microwave Integrated Retrieval System (MIRS) — оперативного восстановления метеопараметров на основе радиотепловых спутниковых данных ATMS и др., основанной на физическом алгоритме. Результаты сравнения приведены в таблице 5.5.1 и на рисунке 5.5.2.

Уровень, мб	Суша	Растительность/ суша	Прибрежный район	Лёд	Возможно лёд	Вода	Береговой район
	RMSE восстановления температуры, К						
950	4,8	3,9	3,1	3,1	3,0	1,66	3,4
850	3,6	3,2	2,9	2,6	2,6	1,9	2,9
750	2,8	2,6	2,2	2,1	2,3	1,6	2,4
650	2,9	2,3	2,0	2,2	2,2	1,5	2,2
550	2,3	2,3	1,9	3,0	2,2	1,4	2,2
450	2,3	2,0	1,9	1,8	2,4	1,4	1,9
350	3,4	2,1	1,9	1,7	2,7	1,4	2,2
250	2,0	2,2	1,9	2,3	2,5	1,6	2,1
	RMSE восстановления влажности, г·м ⁻³ /%						
950	1,5/24,3	1,1/21,6	1,1/13,9	0,6/25,7	0,8/29	0,9/8,1	1,1/18,6
850	1,2/26,1	0,9/25,7	1,0/19,0	0,5/32,4	0,6/28,6	1,0/14,8	0,9/23,8
750	0,9/30,5	0,7/31,9	0,8/23,8	0,4/35,7	0,4/32,5	0,8/22,5	0,7/28,4
650	0,6/35,9	0,5/36,8	0,6/30,3	0,3/43,1	0,3/42,9	0,6/30	0,5/34,1
550	0,3/43,1	0,3/41,9	0,4/35,0	0,2/48,2	0,2/49,4	0,4/34,8	0,3/40,1
450	0,16/49,6	0,15/49,1	0,19/40,6	0,1/55,6	0,1/51,9	0,2/38,8	0,2/45,3
350	0,06/52,1	0,05/52,4	0,07/44,5	0,03/66	0,03/51,3	0,07/39,2	0,06/48,6
250	0,011/48,6	0,01/48,4	0,0147/40	0,005/60	0,006/53	0,015/37	0,011/46

Таблица 5.5.1 — Результаты восстановления профилей температуры и влажности



Рисунок 5.5.2 — Диаграммы рассеяния температуры и влажности, восстановленных по данным МТВЗА-ГЯ и полученным из реанализа ERA5 на уровнях 950, 650 и 350 мб

По мере развития и совершенствования алгоритма осуществляется обновление его текущей внедрённой версии в сервис «ВЕГА-Science»; продукты обработки частично доступны на сайте <u>http://sci-vega.ru/maps/leaflet.shtml</u>.

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Мониторинг-Атмосфера» проводились в полном соответствии с утверждённым планом. В их рамках решены задачи, получены и опубликованы значимые результаты по следующим основным направлениям:

- разработка научных основ и методов анализа временных серий спутниковых многосенсорных наблюдений, исследований и мониторинга атмосферных явлений;
- развитие моделей и методов анализа данных для мониторинга и прогноза состояния атмосферы, в том числе мощных вихревых структур с учётом ветровых потоков, фазовых переходов влаги, атмосферного электричества, вариаций космических лучей;
- разработка новых методов обработки данных дистанционных наблюдений в ИК и видимом диапазоне и лидарных наблюдений облачности;
- исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов;
- развитие методик решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы по данным ДЗЗ с использованием нейронных сетей.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Атмосфера» в 2022 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 6 МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ

Введение

В настоящей главе отчёта представлены основные результаты, полученные в рамках работ по направлению «Мониторинг-Эффект», определённых в плане НИР ИКИ РАН на 2021–2023 гг.

- Развитие методов построения, управления и калибровки перспективных российских приборов наблюдения Земли;
- Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса, в том числе потоковой обработки;

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2022 г. результаты также изложены в следующих публикациях [30, 46, 57, 58, 60, 68, 70, 71, 75, 78, 80, 81, 89, 97, 116–118, 135, 149].

6.1 Развитие методов построения, управления и калибровки перспективных российских приборов наблюдения Земли

6.1.1 Повышение точности географической привязки данных измерений *MTB3A-ГЯ*, установленного на борту космического annapama «Метеор-М» № 2-2

В соответствии с планом работ на 2022 г. были проведены исследования по поиску оптимальных методов оценки качества и последующей корректировки географической привязки данных российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ. На основании анализа данных, поступающих с МТВЗА-ГЯ, было показано, что их географическая привязка характеризуется ошибками, в некоторых случаях достигающими 70-100 км (5-7 элементов разрешения прибора). Общепринятой считается практика постоянного контроля качества геопривязки для сканирующих радиометрических комплексов космического базирования с её последующей (в случае необходимости) корректировкой. Выделяют несколько наиболее частых причин снижения точности геопривязки: уход спутниковых часов, представляющий собой разницу между показаниями спутниковых часов и всемирным координированным временем UTC; систематическая несоосность прибора, когда положение надира не указывает на подспутниковую точку (тангаж, крен и рыскание сканера); зависящие от времени ошибки ориентации спутника (тангаж, крен и рыскание космического аппарата); неточность эфемеридных данных, используемых для прогнозирования положения спутника; ошибки моделирования программы сканирования прибора, такие как вариации азимутального углового шага. Подобные ошибки возникают при работе любых радиометрических сканеров, функционирующих на орбите. В ходе эксплуатации происходит их планомерное выявление, корректировка и последующий пересчёт всего набора полученной информации, включая и готовые продукты. В исследовании разработаны и программно реализованы аналогичные процедуры обработки данных МТВЗА-ГЯ.

Отсутствие широтных и временных вариаций возникающих расхождений позволило сделать вывод, что основным источником ошибок геопривязки для инструмента МТВЗА-ГЯ становится несовпадение приборной системы координат (ПСК), относительно которой известен алгоритм сканирования, с системой координат космического аппарата (СККА) «Метеор-М» № 2-2, для которой проводятся расчёты положения и ориентации в космическом пространстве.

Основываясь на анализе работ по этой тематике (применительно к зарубежным аналогам МТВЗА-ГЯ), можно выделить несколько основных подходов к решению этой проблемы. Во-первых, это использование данных звёздных датчиков для постоянной оценки текущей ориентации инструмента и, в случае отклонения параметров движения от ожидаемых, внесение оперативных изменений в алгоритм геопривязки. Несмотря на то, что КА «Метеор-М» № 2-2 имеет на борту три подобные системы, их использование для корректировки геопривязки МТВЗА-ГЯ оказалось невозможным в виду отсутствия достоверной информации о матрицах перехода между ПСК и СККА. Вторым подходом представляется использование графических методов корректировки радиометрических портретов, широко применяемых при работе с фотоизображениями и включающих в себя масштабирование, повороты, проекционные трансформации и т.п. Этот подход, в силу значительного прогресса в области обработки изображений, позволяет выполнить точное совпадение истинной географической карты с радиометрическим изображением поверхности Земли, однако не содержит информации о корректирующих углах ориентации инструмента в пространстве. А это, в свою очередь, не позволяет выполнить расчёт параметров (углы встречи с Землёй, углы засветки Солнцем, кроссполяризационные эффекты и т.п.), критически важных для последующего решения актуальных задач пассивной радиополяриметрии.

В связи с вышесказанным усилия коллектива были сосредоточены на применении подходов из следующей, третьей группы. «Радиометрические» подходы разной степени сложности основаны на сравнении реальных и ожидаемых радиометрических портретов поверхности Земли с последующей минимизацией расхождений между ними. При формировании ожидаемых образов используются как самые общие физические представления, так и сложные модели формирования и переноса излучения, иногда включающие в себя и модели функционирования оборудования.

С целью оценки качества геопривязки данных МТВЗА-ГЯ и её последующей корректировки (поиска и введения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания прибора), были опробованы три «радиометрических» подхода (по сути, речь идёт о выборе минимизирующей функции в рамках итерационных алгоритмов поиска корректирующих углов крена, тангажа и рыскания). А именно: 1) минимизация разности средних значений радиояркостной температуры океана и суши; 2) минимизация разности измерений для восходящих и нисходящих витков; 3) минимизация расхождений истинной и восстановленной по радиотепловому изображению береговых линий.

В рамках реализации первого подхода был отмечен следующий его недостаток: существенный разброс найденных значений как для различных тестовых полигонов в пределах одного дня измерений МТВЗА-ГЯ, так и при работе с одним тестовым полигоном в течение нескольких дней. Аналогичная ситуация наблюдалась и при смене частоты, а также при работе с восходящими и нисходящими полувитками. Полученные значения среднеквадратического отклонения для всех трёх углов превышали 1°. Исследования в данном направлении показали, что глобальный минимум выбранной оценочной функции не имеет ярко выраженного характера, что приводит к получению размытого облака решений (с характерным размером более 2°) в пространстве углов крен – тангаж – рыскание. Полученные в рамках данного подхода решения нельзя считать удовлетворительными.

Физической основой второго метода выступает следующий принцип: если географическая привязка выполнена правильно, то расхождения между излучением одних и тех же элементов поверхности, наблюдаемых на восходящих и нисходящих витках, обусловлено лишь суточными вариациями температуры подстилающей поверхности (за счёт временного сдвига витков), которое, исходя из теоретических оценок, не может превышать значения 20 К. Естественно, при наличии активных атмосферных возмущений (большие значения интегрального паросодержания, выпадение осадков и т.п.) и существенных временных сдвигах (данные измерений одного элемента относятся к

155

разным суткам/месяцам) это условие не будет выполняться, но это — предмет дополнительного анализа и требует установления ограничений на применимость метода в целом. Таким образом, итерационный алгоритм подбора корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, должен обеспечить минимизацию количества элементов разрешения на поверхности, для которых разница величин яркостной температуры для нисходящих и восходящих витков превышала бы 20 К.

В результате применения данного алгоритма к результатам измерений МТВЗА-ГЯ за 2020 г. был проведён поиск оптимальных значений корректирующих углов крена, тангажа и рыскания этого прибора (для чего потребовалось разработать независимую процедуру географической привязки данных МТВЗА-ГЯ. Найденные значения составили: -0,84±0,15° (для угла рыскания), -0,44±0,14° (для угла крена) и +1,13±0,05° (для угла тангажа). Было показано, что введение указанных углов в процедуру географической привязки МТВЗА-ГЯ позволяет существенно снизить её ошибки. Так, средние расхождения береговых линий, заимствованных из высокоточных географических баз данных и восстановленных по радиометрическим портретам, при отсутствии корректировки географической привязки составляют 53,70±13,61 км. Аналогичные значения, полученные для реализуемого в настоящее время алгоритма, используемого в программном комплексе предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ (созданного разработчиками аппаратуры), составляют 20,03±6,77 км. Применение корректирующих углов, найденных коллективом ИКИ РАН, позволило снизить это значение до 4,36±3,54 км. Представленные значения — средние для шести тестовых полигонов, информация по которым обобщалась за период с 16 по 28 июня 2020 г. Для оценки степени близости истинной географической и восстановленной по радиометрическим изображениям береговых линий использовался третий из упомянутых радиометрических подходов. Результаты его работы иллюстрирует рисунок 6.1.1.



Рисунок 6.1.1 — Пример оценки степени близости истинной географической (чёрные точки) и восстановленной (сплошная чёрная линия) береговых линий для существующего варианта геопривязки (*a*) и с использованием найденных значений корректирующих углов крена, тангажа и рыскания (б)

В настоящее время найденные оптимальные значения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания переданы в ЦКП «Мониторинг» и АО «Российские космические системы» для внедрения соответствующих процедур корректировки в комплекс предварительной обработки данных МТВЗА-ГЯ.

6.1.2 Оценка точности продуктов, полученных в результате атмосферной коррекции данных приборов серии КМСС («Метеор-М» № 2 и «Метеор-М» № 2-2) для решения задач оперативного мониторинга растительного покрова

В предыдущих отчётах была описана развёрнутая на базе вычислительных ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» автоматическая технология, позволяющая устранять искажения географической привязки изображений, полученных приборами серии КМСС, детектировать облачность и тени от неё, выполнять многофакторную коррекцию измерений, включая компенсацию влияния атмосферы и учёт эффектов, связанных с различиями геометрии освещения и наблюдения в пределах 960-километровой полосы обзора. Многофакторная коррекция для каждого спектрального канала предусматривает приведение локализованного распределения безоблачных измерений КМСС К пространственно соответствующих атмосферно-скорректированных распределению измерений эталона внутри скользящего окна переменного размера (метод histogram matching). На последнем этапе происходит восстановление сезонных временных серий ежедневных измерений коэффициентов спектральной яркости земной поверхности, обеспечивая совместимость с методами и технологиями для распознавания, оценки состояния и динамики растительного покрова. В частности, на основе восстановленных временных серий изображений КМСС И разработанной ранее технологии картографирования пашни по данным MODIS была продемонстрирована возможность получения аналогичным образом более точной карты используемых пахотных земель на территорию части ЮФО с пространственным разрешением 60 м, что с качественной точки зрения указало на совместимость скорректированных данных КМСС с имеющимися подходами для работы с данными других спутниковых систем.

В результате работы технологии на основе спутниковых данных КМСС-М и КМСС-2 ранее были построены ежедневные безоблачные изображения NDVI и измерений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах за 2020 и 2021 гг. наблюдений. В начале 2022 г. указанная технология была модифицирована и запущена в режиме оперативного мониторинга на территорию зернового пояса РФ с публикацией оперативных продуктов в интерфейсе систем семейства Вега. Обновление продуктов происходило несколько раз в неделю, причём из-за штатных задержек поступления вспомогательного продукта МОD09, достигающих 6 дней, ожидалось снижение качества оперативно формируемых ежедневных продуктов.

В рамках работ в 2022 г. проведён эксперимент, нацеленный на количественную оценку качества оперативно сформированных в течение сезона 2022 года атмосферноскорректированных изображений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах приборов серии КМСС на больших территориях. Оценка производилась путём сравнения КСЯ по данным КМСС с эталоном, полученным по данным MODIS (прошедший атмосферную коррекцию продукт MOD09 с использованием модели 6SV). Для количественной оценки использовались метрики «точности», «неопределённости» и «погрешности» (accuracy (A), иncertainty (U), precision (P)) из эксперимента ACIX по сравнению различных атмосферных корректоров, рассчитываемые по следующим формулам:

$$A = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n} \Delta \rho_i^{SR} \right), \quad P = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\Delta \rho_i^{SR} - A \right)^2 \right)}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\Delta \rho_i^{SR} \right)^2}.$$

Значение Др вычислялось следующим образом. При сопоставлении использовались группы 4×4 60-метровых пикселей КМСС класса «чистая поверхность» (согласно маске облачности и теней), соответствующие одному пикселю эталона MODIS с пространственным разрешением 240 м. Значения пикселей в группе осреднялись, полученное значение сопоставлялось со значением указанного пикселя MODIS. Анализ производился независимо для каждого канала (RED и NIR). Полученное значение отклонения приписывалось эталонному значению КСЯ.

Статистика была собрана с территории агропояса РФ и прилегающих стран на регулярной пространственно-временной основе (рисунок 6.1.2.1). В качестве пространственной сети использовалась базовая структура гранул КМСС с шагом 1°, созданная и используемая в рамках всех технологических операций.



Рисунок 6.1.2.1. — Расположение участков верификации оперативно получаемых продуктов КСЯ земной поверхности в красном и ближнем ИК-каналах по данным приборов серии КМСС

Помимо метрик A,P,U, в процессе анализа собиралась статистика, в результате чего было получено распределение частоты оценок в зависимости от значения эталонного КСЯ. Распределение оценок позволило оценить средневзвешенные значения метрик точности. Графики метрик точности в зависимости от эталонного значения КСЯ приведены на рисунке 6.1.2.2.

В результате было установлено, что в процессе многофакторной коррекции измерений КМСС наблюдается положительное значение ошибки accuracy (завышение скорректированного КСЯ по КМСС по отношению к MODIS) в области низких значений и отрицательное значение ошибки accuracy (занижение скорректированного КСЯ по КМСС по отношению к MODIS) в области высоких значений КСЯ, что ожидаемо для метода гистограммного приведения. При этом средневзвешенное значение ошибки accuracy в канале NIR оказалось близко к нулю с точностью до третьего знака после запятой, значение метрик P,U (дисперсия и приведённая к нулю дисперсия) составляет 0,02. Средневзвешенное значение ошибки accuracy в канале RED равно 0,01, значение метрик P,U составляет 0,05.

Таким образом, выполненная оценка результатов оперативной атмосферной коррекции данных КМСС подтверждает совместимость скорректированных измерений для решения задач оперативного мониторинга земной поверхности на основе имеющихся методов, разработанных для данных других спутниковых систем аналогичного назначения.



Рисунок 6.1.2.2 — Распределение значений метрик А,Р,U для атмосферно-скорректированных измерений КМСС в канале NIR (*a*) и RED (*б*), а также гистограмма частоты оценок (зелёный цвет на заднем фоне)

6.1.3 Развитие методов построения, управления и калибровки перспективных съёмочных систем и систем технического зрения космического базирования на примере оптимизации параметров системы наблюдения искусственных объектов в космическом пространстве

В настоящее время происходит непрерывное расширение области использования съемочных систем и систем технического зрения космического базирования. Этот процесс

обусловлен целым рядом причин. Отметим только две причины, которые представляются наиболее важными.

Во-первых, это сравнительно малые веса, габариты и потребляемую мощность систем технического зрения, их высокую прочность и надёжность. Эти свойства очень важны для бортовых систем, устанавливаемых на мобильных объектах.

Во-вторых, это высокая информативность телевизионных датчиков. Это потенциально существенно расширяет возможности систем управления, что дает возможность гибко менять цели, а также перестраивать планы и сценарии действий в зависимости от окружающей обстановки, что характерно для современных, а тем более для будущих систем на базе автономного искусственного интеллекта.

рассматривать телевизионные Далее будем системы, используемые для относительной навигации при стыковке космических аппаратов (КА). В системах предыдущего использовались одиночные камеры, что существенно поколения ограничивало их возможности как со стороны больших, так и со стороны очень малых расстояний. Например, интервал дальности работы системы AVGS составил 0,5-300 м (Howard R., Johnston A., Bryan T., Book M. Advanced Video Guidance Sensor (AVGS) development testing // Proc. SPIE. V. 5418. Spaceborne Sensors. Defense and Security. Orlando, Florida, United States. 2004. DOI: 10.1117/12.542475). Более современная система NGAVGS рассчитана на приблизительно такой же интервал дальности (Lee J., Carrington C., Spencer S., Bryan T., Howard R., Johnson J. Next Generation Advanced Video Guidance Sensor: Low Risk Rendezvous and Docking Sensor // Proc. AIAA Space Conference 2008. San Diego. California, USA. 2008. DOI: 10.2514/6.2008-7838). Видеометр разработки EADS SODERN имеет интервал рабочих дальностей 1,2–300 м (Blarre L., Perrimon N., Moussu C., Da Cunha P., Strandmoe S. ATV Videometer Qualification // Ргосю 55th Intern. Astronautical Congress. Vancouver, Canada. 2004. IAC-04-A.3.07. DOI: 10.2514/6.IAC-04-A.3.07). Более современная навигационная система Hydra (Granade S.R., Roe F.D. Ground Testing the Hydra AR&D Sensor System // Proc. SPIE. V. 6958. Sensors and Systems for Space Applications II. 69580R. SPIE Defense and Security Symposium. Orlando, Florida, United States. 2008. DOI: 10.1117/12.777245) включает в себя AVGS в качестве подсистемы и поэтому имеет приблизительно такой же интервал рабочих дальностей. Система Hydra включает в себя также ULTOR Passive Pose and Position Engine (P3E). Эта корреляционная система решает навигационную задачу с использованием другой, чем AVGS мишени, не содержащей ретрорефлекторы.

Следует отметить, что системы AVGS, NGAVGS и Видеометр работают с мишенью, которая включает в себя мишень для больших дальностей и мишень для малых дальностей, имеющую существенно меньшие размеры. Это позволяет увеличить диапазон рабочих дальностей до указанных выше величин.

В более новых разработках систем относительной навигации, выполняющих измерения в более широком диапазоне дальностей, используются обычно несколько телевизионных камер, имеющих различные поля зрения. Примером может служить оптическая навигационная система VIBANASS (Mühlbauer Q., Richter L., Kaiser C., Hofmann P. Robotics Space Systems and Subsystems for Advanced Future Programmes // Proc. Intern. Symp. Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS). European Space Agency. Turin, Italy. 2012. Mühlbauer Q., Rank P., Kaiser C. On-Ground Verification of VIBANASS (Vision Based Navigation Sensor System): Capabilities and Results // 12th Symp. Advanced Space Technologies ESA/ESTEC. Noordwijk. in Robotics and Automation, 2013. Presentation URL: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2013/Presentations/Muehlbauer_2811222.pdf. Benningho H., Boge T. A Novel Navigation and Sensor Strategy for Far, Mid and Close Range Rendezvous to a Cooperative Geostationary Target Spacecraft // Proc. AIAA SPACE Conference and Exposition. Pasadena, California, USA. 2015. AIAA 2015-4481. DOI: 10.2514/6.2015-4481). Она содержит два блока камер, в каждом из которых есть три камеры с различными полями зрения. Система предназначена для работы в интервале дальностей от 0,7 до 3000 м.

Какое требуется разрешение изображения для решения задач распознавания и измерения

Рассмотрим вопросы, связанные с разрешением изображений, которые могут быть использованы для распознавания. Современные матрицы фотоаппаратов обеспечивают формирование изображений, содержащих десятки мегапикселей. Оставив пока без рассмотрения вопросы, связанные с радиационной стойкостью таких матриц, отметим, что использование матриц с высоким разрешением приводит с одной стороны, к заметному ухудшению отношения сигнал/шум (особенно, при недостаточной освещённости) из-за малой площади пикселей, а с другой стороны — к существенному поступающей увеличению потока информации, ОТ оптического датчика И соответственному существенному увеличению необходимых вычислительных ресурсов, необходимых для обработки этой информации. Это является достаточно серьезной проблемой для систем управления, устанавливаемых на мобильных объектах, особенно для объектов, работающих в тяжёлых условиях (например, в условиях космоса).

Между тем достаточно давно, ещё в 1958 г., были сделаны некоторые оценки числа элементов разрешения, которые являются достаточными для решения человеком задач обнаружения, определения ориентации, различения и опознания. В настоящее время эти оценки известны как критерий Джонсона (Johnson J. Analysis of image forming systems // Proc. Image Intensifier Symposium. U.S. Army Research and Development Laboratories. Ft. Belvoir, VA. 1958. P. 249–273. URL: https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf). Согласно этому критерию для решения с вероятностью 50 % наиболее сложной задачи из этого списка (опознание) оказалось достаточно 12,8^{+3,2} полупериодов штриховой миры (что приблизительно соответствует такому же количеству пикселов изображения) для минимального видимого размера объекта, которые должна разрешать видеосистема. Как видим, для решения указанных задач требуется не так уж и много пикселов.

Следует, однако, отметить, что если требуется решать, помимо перечисленных задач, ещё и задачи относительной навигации, то это существенно повышает требования к необходимому количеству элементов разрешения. Это происходит просто из-за необходимости обеспечения приемлемой точности измерения. В качестве примера можно привести задачи относительной навигации в случае реализации кооперируемой стыковки космических аппаратов. При кооперируемой стыковке пассивный космический аппарат оснащен специальной стыковочной мишенью, которая может содержать либо активные излучатели (светодиоды, лазерные диоды), либо пассивные ретрорефлекторы (например, уголковые отражатели оптического диапазона).

Если же идёт речь о некооперируемой стыковке, то здесь ситуация ещё более усложняется, поскольку необходимо уже распознавать отдельные малоразмерные элементы конструкции аппарата и использовать их для решения задачи относительной навигации. Малый размер этих элементов обусловлен тем, что для элементов больших размеров проблематично получить приемлемую точность навигации из-за неопределённости координат точки привязки больших элементов. Соответственно, и требования к числу элементов изображения в указанном случае существенно возрастают.

Рассмотрим, как решается противоречие между желательным большим разрешением изображения и нежелательными большими вычислительными затратами на обработку таких изображений применительно к биологическим системам. По некоторым оценкам, разрешение человеческого глаза вблизи центральной ямки (fovea centralis) приблизительно соответствует 10 мегапикселям (хотя в сетчатке каждого из наших глаз расположено примерно 100–140 млн светочувствительных клеток). Именно в области центральной ямки фокусируется изображение отдалённых объектов, которые мы хотим рассмотреть. В то же время на периферии поля зрения разрешение уменьшается приблизительно на 2 порядка. На рисунке 6.1.3.1 показана относительная острота зрения

левого глаза человека (горизонтальный разрез) в градусах от центральной ямки (*Gruesser O-J., Gruesser-Cornehls U.* Physiology of vision // Fundamentals of Sensory Physiology: ed. Schmidt RF. N.Y.: Springer-Verlag, 1978).



Рисунок 6.1.3.1 — Относительная острота зрения

Из графика можно заключить, что уже на расстоянии порядка 25° от центральной ямки разрешение глаза падает приблизительно на порядок. Таким образом, высокое разрешение используется при рассмотрении малоразмерных удалённых объектов, а по мере приближения к ним среднее разрешение по площади изображения объекта существенно падает, что позволяет существенно уменьшать вычислительные затраты на обработку изображений. В центральной ямке каждая светочувствительная клетка имеет свой аксон. В центральной ямке находятся так называемые колбочки, которые отвечают за цветное зрение. По мере отдаления от центральной ямки все больше и больше колбочек, а также и палочек, отвечающих за сумеречное зрение, объединяются в рецептивные поля, которые имеют один аксон. На периферии зрения рецептивные поля могут содержать тысячи палочек или гораздо меньшее количество колбочек, имеющих один аксон на всех. За счёт такой группировки 100–140 млн рецепторов имеют всего порядка 1 млн аксонов, по которым передаётся видеоинформация в мозг. Таким образом, существенное понижение разрешения на периферии зрения реализуется путём объединения множеств палочек в рецептивные поля.

Здесь можно усмотреть прямую аналогию с бинигом или бинированием — технологией объединения соседних пикселей в один пиксел большей площади. Однако эта аналогия будет не полной. Дело в том, что за счёт быстрых движений глаз (саккад) по информативным точкам изображения, мозг синтезирует изображение высокого разрешения. Такой режим не характерен для систем технического зрения. Поэтому для технических систем не удастся реализовать такую большую степень изменения разрешения, которую реализует глаз.

Тем не менее, даже при наблюдении удалённых объектов, изображение которых фокусируется в области центральной ямки (т.е. области максимального разрешения глаза), «На расстоянии 50–100 м человека не всегда можно узнать, при удалении на 1000 м трудно определить его пол, возраст и форму одежды; с расстояния 5 км его вообще не увидишь» (Шаронов В.В. Наблюдение и видимость. М.: Военное изд-во Министерства Обороны Союза ССР, 1953. 98 с.). По этой причине для наблюдения удалённых объектов человек использует оптические приборы, такие как зрительные трубы, телескопы, бинокли. Здесь возникает прямая аналогия с оптической навигационной системой VIBANASS и ей подобными системами, использующими несколько телевизионных камер с различными фокусными расстояниями.

Количество эталонов, необходимое для распознавания в условиях мультиразрешения

Отметим следующее важное обстоятельство, относящееся к случаю стыковки с некооперируемыми аппаратами. Для решения задачи распознавания необходимо иметь на борту достаточно большое количество эталонов. При этом число всех возможных изображений трёхмерного объекта не просто бесконечно, но имеет мощность континуума, т.е. не является счётным множеством. Однако это бесконечно большое множество возможных изображений распадается на вполне конечное множество классов изображений. Каждый такой класс при этом содержит также несчётное множество изображений, но изображения из каждого класса уже являются топологически эквивалентными. Теоретически для решения задачи распознавания достаточно иметь число эталонов, совпадающее с числом классов топологически эквивалентных изображений. Однако ограниченность разрешения реальных изображений требует увеличения этого числа. К сожалению, видимое изображение зависит не только от ракурса наблюдения, но ещё и от расстояния, которое влияет не только на масштаб изображения, но и на перспективные искажения.

Необходимо отметить, что при стыковке с кооперируемыми аппаратами, никаких проблем, связанных с изменением видимой структуры эталонов, а также с необходимостью масштабирования эталонов, как правило, не возникает. Это обусловлено простой структурой стыковочной мишени, используемой для измерений.

Современные эталоны изображений, основанные на использовании множества особых точек (SIFT (scale-invariant feature transform), SURF (speeded-up robust features) и их всевозможные модификации), способны работать при масштабировании изображения в пределах 2–2,5 раза. Поэтому для сокращения числа необходимых для распознавания и измерения эталонов, целесообразно использовать приёмы мультиразрешения, в каком-то смысле подобные мультиразрешению естественных зрительных систем. Чисто аппаратно это целесообразно делать путём бинирования изображений. Естественно, это мультиразрешение не может иметь столь широкого диапазона, как в естественных системах.

Рассмотрим более подробно бинирование изображений на примере двух камер, имеющих существенно различающиеся поля зрения: 10 и 40°. Такие поля зрения имеют камеры в системе VIBANASS. В эту систему входят ещё камеры с промежуточным значением поля зрения, равного 30°, но мы их рассматривать не будем. В качестве примера КМОП-матрицы возьмём матрицу, специально разработанную для применения в условиях космического пространства, имеющую размер 2048 × 2048 пикселей и размер одного пикселя 10×10 мкм (Capella LN/LS).

На рисунке 6.1.3.2 показаны рубежи переключения режимов бинирования для камеры с полем зрения 10°. По горизонтальной оси графика отложено расстояние до КА. По вертикальной оси отложен видимый максимальный размер КА в пикселях. Условия переключения определяются максимальным размером наблюдаемого КА, которое принято равным 23,19 м, что соответствует размаху панелей солнечных батарей. Поскольку целью данной работы является показать возможность использования метода мультиразрешения, то не будем анализировать вопросы, связанные с нежёсткостью панелей солнечных батарей и влиянием этого фактора на точность измерений. Интервал допустимых размеров видимого изображения, в котором решаются задачи распознавания и измерения, задан равным 256–512 пикселей.



Рисунок 6.1.3.2 — Рубежи переключения бинирования камеры с полем зрения 10°; 1 — без бинирования, 2 — однократное бинирование, 3 — двукратное бинирование

При этом на больших расстояниях (больше 531 м) используется максимальное разрешение матрицы камеры, что обеспечивает максимальную точность измерений. На меньших расстояниях используется бинирование, что не является критичным в плане точности измерений, поскольку с уменьшением дальности точность измерений возрастает. Исходя из условия, что видимый размер не должен быть менее 256 пикселов, можно определить максимальную дальность распознавания и измерения этой камерой в 1060 м. На расстояниях, превышающих 1060 м, возможно грубое распознавание и измерение углов ориентации пассивного КА с пониженной точностью. На предельной дальности (когда размер изображения составляет порядка 20 пикселей) возможна только очень грубая оценка дальности и измерение направления на пассивный КА. На расстояниях, меньших 133 м, приходится производить измерения по наблюдаемым фрагментам КА, поскольку панели солнечных батарей выходят за границы кадра. Т.е. фактически уже будет использоваться другой эталон.

На рисунке 6.1.3.3 показаны рубежи переключения режимов бинирования для камеры с полем зрения 40°. Также исходя из условия, что видимый размер не должен быть менее 256 пикселов, можно определить максимальную дальность распознавания и измерения этой камерой в 254 м. На расстояниях, меньших 32 м, приходится производить измерения по наблюдаемым фрагментам КА, поскольку панели солнечных батарей выходят за границы кадра. То есть также будет использован уже другой эталон.



Рисунок 6.1.3.3 — Рубежи переключения бинирования камеры с полем зрения 40°; 1 — без бинирования, 2 — однократное бинирование, 3 — двукратное бинирование. Таким образом, для фиксированного ракурса требуется единственный эталон в диапазоне от 1060 до 32 м (т.е. при изменении расстояния в 33 раза) при использовании обоих камер с полем зрения 10 и 40°. На расстояниях меньших 133 м для камеры с полем зрения 10° и 32 м для камеры с полем зрения 40° потребуются другие эталоны из-за выхода части элементов КА из поля зрения и из-за нарастания перспективных искажений

Влияние бинирования на точность измерения

Поскольку бинирование непосредственно влияет на точность измерений, необходимо сделать оценку влияния этого фактора на точность измерений. Для этого используются численно-аналитические оценки, сделанные для обеих камер. Графики ошибок измерений построены для набора из $11 \times 11 = 121$ ракурсов визирования с шагом 5°. Изображение КА для нулевых углов ракурса визирования представлено на рисунке 6.1.3.4. Там же цифрами отмечены точки привязки (они же информативные или особые точки), использованные для измерений. В расчётах используется информация о трёхмерных координатах этих точек.

Опибки навигации оцениваются в системе координат, связанной с камерой. При этом ось 0Х направлена по оси объектива, ось 0У направлена вверх, ось 0Z направлена вправо. Углы α , β и γ соответствуют поворотам вокруг осей 0Х, 0У и 0Z соответственно. Оценка точности измерений производилась по методике, описанной в (*Grishin V.A.* Precision Estimation of Camera Position Measurement Based on Docking Marker Observation // Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. V. 20. No. 3. P. 341–348. DOI: 10.1134/S1054661810030107).

В качестве примера приведены графики результатов расчёта ошибок измерения углов ориентации (рисунок 6.1.3.5) и ошибок измерения координат (рисунок 6.1.3.6) на расстоянии 32 м. При расчётах было принято, что среднее квадратическое отклонение (СКО) ошибок локализации особых точек равно 1 пикселю. В случае стыковки с кооперируемым КА, имеющим специальную стыковочную мишень, ошибки локализации могут быть значительно меньше указанной величины. В таблицах 6.1.3.1 и 6.1.3.2 приведены максимальные ошибки для данного диапазона углов ракурса наблюдения (углов λ и ϕ) для разных расстоянии и режимов бинирования для камер с полем зрения 10 и 40°.



Рисунок 6.1.3.4 — Положение десяти точек привязки



Рисунок 6.1.3.5 — СКО ошибок измерения углов (в градусах) в зависимости от значений углов λ и φ



Рисунок 6.1.3.6 — СКО ошибок измерения линейных координат (в метрах) в зависимости от значений углов λ и φ

Таблица 6.1.3.1 — Максимальные ошибки измерения для разных расстояний и режимов бинирования в указанном выше диапазоне углов λ и φ для камеры с полем зрения 10°

Бинирование	Дальность,	Размер в	Ошибки измерений					
	М	пикселах	α, град	β, град	ү, град	Х, м	Ү , м	Z , м
Нет	1060	256	0,95	2,47	2,36	17,04	43,68	45,65
	531	511	0,48	1,23	1,13	4,13	10,44	11,43
Однократное	530	256	0,95	2,46	2,25	8,22	20,81	22,78
	266	510	0,47	1,23	1,02	1,92	4,74	5,71
Двукратное	265	256	0,95	2,45	2,04	3,81	9,41	11,34
	133	510	0,47	1,22	0,85	0,83	1,97	2,84

Таблица 6.1.3.2 — Максимальные ошибки измерения для разных расстояний и режимов бинирования в указанном выше диапазоне углов λ и φ для камеры с полем зрения 40°

Бинирование	Дальность,	Размер в	Ошибки измерений					
	М	пикселах	α, град	β, град	ү, град	Х, м	Ү, м	Z , м
Нет	254	257	0,95	2,46	2,02	3,63	8,95	10,88
	128	510	0,47	1,23	0,84	0,79	1,87	2,73
Однократное	127	257	0,94	2,43	1,65	1,55	3,67	5,38
	64	510	0,47	1,21	0,60	0,30	0,68	1,36
Двукратное	63	259	0,92	2,36	1,15	0,55	1,28	2,58
	32	510	0,48	1,22	0,40	0,10	0,24	0,71

Таким образом, хотя бинирование, естественно, уменьшает точность измерений, но при однократном и двукратном бинировании ошибки измерений остаются вполне приемлемыми. В частности, ошибка измерения дальности изменяется в пределах 0,3–1,6%. Разумеется, эта ошибка зависит от количества точек привязки, их пространственного расположения и точности их локализации на изображении.

Выводы

- На примере рассмотрения частной задачи, решаемой съёмочной системой космического базирования — наблюдения искусственных объектов в космическом пространстве, обоснованы несколько подходов в достижении широкого диапазона работы съёмочных систем за счёт реализации следующих мер:
- Использования камер с различными полями зрения и фокусными расстояниями.
- Использования дескрипторов особых точек, частично инвариантных к изменению масштаба изображения (в 2–2,5 раза). В частности, таким свойством обладают дескрипторы алгоритмов SIFT, SURF и им подобные. Имеются возможности дальнейшего расширения этого диапазона и увеличения надёжности установления соответствия точек по дескрипторам их окрестностей.
- Использования мультиразрешения, когда на больших расстояниях используется полное разрешение камер, а при уменьшении расстояния изображение подвергается бинированию, одно- или двукратному.
- Особо следует отметить возможность существенного сокращения вычислительной нагрузки за счёт мультиразрешения числа эталонных изображений, которые необходимо готовить для широкого диапазона дальностей. Это важно, поскольку подготовка эталонных изображений для случая некооперируемой стыковки является достаточно трудоёмким процессом.

6.1.4 Разработка методов перспективных систем наблюдения Земли из космоса, в интересах распознавания образов искусственных объектов и сооружений

В настоящее время существенно расширяется круг задач, в которых используется дистанционная съёмка удалённых объектов из космоса, включая системы наблюдения поверхности Земли и Луны, а также искусственных космических объектов. Ярким примеров, удобным для моделирования с точки зрения автоматизации методов распознавания образов является процесс сближения и стыковки беспилотных космических аппаратов. Новые задачи связаны с обслуживанием космических аппаратов, пополнением запасов топлива/окислителя, заменой вышедших из строя компонентов космического аппарата, изменением орбиты и др.

В процессе стыковки система управления активного космического аппарата использует информацию о своих координатах относительно пассивного аппарата. В качестве основного источника такой информации сейчас рассматриваются системы навигации, решающие взаимосвязанные задачи идентификации оптической (распознавания) объекта и измерения относительных координат. Основной проблемой является стыковка с некооперируемыми космическими аппаратами. На таких космических аппаратах отсутствует специальная мишень, которая устанавливается на кооперируемых космических аппаратах, изначально предназначенных для выполнения стыковок. Мишень позволяет производить измерение относительных координат с высокой точностью и надёжностью. При некооперируемой стыковке алгоритмы работы оптико-электронных систем по сравнению с алгоритмами, предназначенными для навигации при стыковке с кооперируемыми космическими аппаратами, многократно усложняются. Соответственно, возникает необходимость решения задачи информационного обеспечения процесса стыковки, а именно — подготовки эталонной информации для решения задач распознавания и измерения (Гришин В.А., Бережков А.В. Информационное обеспечение задач стыковки космических аппаратов (подготовка эталонов и отработка алгоритмов распознавания и измерения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 50–57. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-50-57).

В общем случае ракурс наблюдения пассивного аппарата может быть любым (т.е. пассивный аппарат может наблюдаться с любого направления), а расстояние до него изменяться в очень широких пределах. Космический аппарат является конструктивно сложным трёхмерным (3D) объектом. Рассмотрим некоторые вопросы отображения (в частности — центральной проекции) точек поверхности 3D объекта на плоскость (в которой располагается фотоприёмная матрица). При этом будет введено важное понятие классов эквивалентности отображений. Нас интересует, что происходит при изменении ракурса наблюдения 3D объекта. Во-первых, при изменении ракурса наблюдения в определённых пределах на плоскость могут проектироваться одни и те же точки 3D-объекта. Такие проекции можно назвать топологически эквивалентными, поскольку между ними существует взаимно однозначное взаимно обратимое непрерывное отображение. В качестве примера можно привести наблюдение кубика вдоль линии, проходящей через центр кубика и одну из его вершин. При изменении ракурса наблюдения в окрестности этой линии в довольно широких пределах, мы будем наблюдать те же самые три грани кубика, и любые два таких изображения могут быть преобразованы одно в другое. Более того, если наблюдать этот же кубик вдоль линии, проходящей через центр кубика и противоположную вершину, то можно наблюдать три другие грани кубика. Важно отметить, что эти две проекции задают два класса топологической эквивалентности проекций кубика и несут в себе информацию о множестве всех возможных проекций изображениях этого кубика. А это множество является несчетным и имеет мощность континуума. Подход, связанный с классами эквивалентности отображений рассматривается в книге (Файн В.С. Опознавание изображений. Основы непрерывно-групповой теории и её приложения. М.: Изд-во «Наука», 1970). В этой книге классы эквивалентности формируются при использовании групп преобразований. Следует отметить, что в данном случае речь идёт не о яркости точек, а о соответствии образов точек 3D-объекта на различных его отображениях (проекциях). Это соответствие ни в коей мере не зависит ни от источников освещения, ни от теней, ни от двухлучевых функций отражательной способности (bidirectional reflectance distribution function) поверхности 3D-объекта в каждой точке его поверхности и т.д.

Во-вторых, при изменении ракурса наблюдения 3D объекта проекции одних элементов этого объекта могут перекрывать проекции других элементов. В этом случае эти два отображения уже не будут содержать отображения (проекции) в точности совпадающих множеств точек 3D-объекта и не будут являться топологически эквивалентными, поскольку между ними уже не будет существовать во всех точках взаимно однозначного взаимно обратимого непрерывного отображения, а будет наблюдаться топологическая перестройка изображения.

Существует ещё и третий случай, когда при изменении ракурса наблюдения точки 3D-объекта, расположенные вблизи от границ проекций его точек, «уходят за горизонт» либо «появляются из-за горизонта». В качестве примера можно привести точки поверхности шара. Формально этот случай можно рассматривать как второй случай. Однако, исключив точки, находящиеся близко от «горизонта», этот случай можно свести к первому случаю с классами эквивалентности.

Вообще говоря, для анализа топологических перестроек изображений объекта используется аппарат дифференциальной геометрии и теории особенностей (теории катастроф). Достаточно подробно и строго с математической точки зрения данные вопросы изложены в книге ($\Phi opcaйm A$., $\Pi ohc \mathcal{K}$. Компьютерное зрение. Современный подход: пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004). Для описания топологической перестройки изображений (в частности — видимых и невидимых контуров) могут быть использованы так называемые аспектные графы (aspect graphs) (*Bowyer K.W., Dyer C.R.* Aspect graphs: an introduction and survey of recent results // Proc. SPIE. V. 1395, Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 13950R. Zurich, Switzerland, 1990. DOI: 10.1117/12.2294270. Eggert D.W., Bowyer K.W., Dyer C.R. Aspect graphs: State-of-the-art and applications in digital photogrammetry // Proc. ISPRS 17th Congress: Intern. Archives Photogrammetry Remote Sensing, 1992. Pt. 5. P. 633–645. *Van Effelterre T*. Aspect graphs for visual recognition of three-dimensional objects // Perception. 1994. V. 23. Iss. 5. P. 563–582. DOI: 10.1068/p230563. *Yang C.C., Marefat M.M., Johnson E.J.* Entity-based aspect graphs: Making viewer centered representations more efficient // Pattern Recognition Letters. 1998. V. 19. No. 3–4. P. 265–277. DOI: 10.1016/S0167-8655(98)00006-3), предложенные Koenderink и van Doorn в 1979 г.

В принципе, количество эталонов, необходимых для распознавания/измерения, должно соответствовать числу топологически не эквивалентных проекций объекта. Однако, дискретное представление изображений, которое формируется фотоприёмной матрицей, ограничивает возможности по их трансформации. Поэтому требуется некоторое увеличение количества эталонов.

Частная форма представления эталонной информации

Существенного упрощения задачи подготовки эталонной информации можно добиться использованием эталонов специального вида. А именно — предлагается использовать эталоны, состоящие из набора информативных (особых) точек изображения (interest points) с их привязкой к трёхмерным координатам пассивного космического аппарата. Трёхмерные координаты особых точек получаются из трёхмерной конструкторской модели объекта, формируемой в системах автоматизированного проектирования (computer-aided design — CAD), а особые точки формируются при обработке синтезированных системой визуализации изображений объекта в процессе подготовки миссии на Земле. В этом случае топологическая перестройка изображения, возникающая при изменении ракурса, приводит к исчезновению одних особых точек на изображении и к появлению других особых точек.

Указанные преобразования эталонов, состоящих из особых точек, гораздо проще выявлять и оценивать, чем выявлять и оценивать топологические перестройки всего изображения. А самое главное — число эталонов, необходимых для покрытия всей области неопределённости, радикально сокращается.

Остановимся на понятии области неопределённости. Собственно, навигация это определение местоположения и ориентации движущегося объекта. Соответственно, если требуется решить такую задачу, то, по крайней мере, один из указанных параметров не определён, либо определён с недостаточной точностью.

Вообще говоря, в практически важных случаях искомые параметры не могут принимать абсолютно произвольные значения. Т.е. всегда можно указать некую область, в которой может находиться рассматриваемый объект, координаты которого мы и хотим определить. В реальных ситуациях размер таких областей может определяться по данным, поступающим от различных источников навигационной информации. В частности, это могут быть инерциальные навигационные системы, радионавигационные системы, систем звёздной навигации, спутниковые навигационные системы и др. Таким образом, область неопределённости это та область, в которой может находиться объект. Решение навигационной задачи приводит к уменьшению области неопределённости.

Для оптических навигационных систем важным параметром является соотношение размера области пространства, в которой эталонное изображение способно обеспечить решение задачи навигации, и размера области неопределённости положения объекта. Если размер области пространства, в которой эталонное изображение способно обеспечить решение задачи навигации, меньше области неопределённости положения объекта, то приходится строить сетку гипотез о возможных положениях объекта, покрывающую область неопределённости и рассматривать все возможные гипотезы положения объекта в этой области неопределённость. Для каждой гипотезы необходимо наличие, по крайней мере одного эталонного изображения. Область неопределённости лежит в пространстве той системы координат, которая используется для навигации и управления. Для описания относительного положения использована сферическая система координат, связанная с корпусом пассивного КА. По аналогии со сферической географической системой координат используются термины «долгота» и «широта». Начало координат может располагаться на плоскости, на которой располагается либо стыковочная мишень для случая кооперируемой стыковки, либо стыковочный узел, либо иные компоненты, важные для проведения стыковки. Нулевые значения «долготы» и «широты» соответствуют нормали к указанной плоскости. Для описания углового положения активного космического аппарата использовались различные матрицы поворота относительно системы координат, в которой два вектора лежат в указанной плоскости пассивного космического аппарата, а третий — ортогонален к ней.

В тексте уже неоднократно использовался термин «ракурс наблюдения». Уточним этот термин. Ракурс — это направление, с которого наблюдается пассивный космический аппарат в системе координат, связанной с этим самым пассивным космическим аппаратом. В данном случае это сферическая система координат. Активный космический аппарат определяет своё положение также в этой системе координат, поскольку решается задача стыковки с пассивным аппаратом. Множество ракурсов наблюдения в нашем случае параметризовано двумя углами «долготой» и «широтой». С этого направления активный космический аппарат ведёт наблюдение пассивного космического аппарата.

Разворот камеры относительно её оптической оси не учитывается, поскольку дескрипторы, использованные для описания эталонов, инвариантны к повороту. На малых расстояниях до пассивного космического аппарата приходится вводить параметризацию эталонов в зависимости от расстояния по причине заметного влияния перспективных искажений.

Собственно, совокупность таких эталонов для различных ракурсов и используется для распознавания пассивного аппарата. Каждая особая точка снабжается специальным дескриптором, который обеспечивает правильную идентификацию точки на реальном изображении, формируемом камерой на борту активного космического аппарата. К дескриптору предъявляются достаточно жёсткие требования по устойчивости к характеру освещения, устойчивости к изменению ракурса наблюдения, ориентации в поле зрения и к изменению масштаба изображения. Удовлетворительными характеристиками обладают дескрипторы особых точек, используемые, например, в алгоритмах SIFT и SURF. Использование эталонов изображений, состоящих из особых точек, как показывает практика, позволяет достаточно успешно решать задачи распознавания изображений, включая задачи навигации (Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. P. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94. Chen Yu-lang, Gao Jing-min. SURF-Based Image Matching Method for Landing on Small Celestial Bodies // Proc. 2019 Intern. Conf. Modeling, Analysis, Simulation Technologies and Applications (MASTA 2019). Hangzhou, China. 2019. P. 401–407. DOI: 10.2991/masta-19.2019.68. Qu X., Soheilian B., Habets E., Paparoditis N. Evaluation of SIFT and SURF for vision based localization // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. V. XLI-B3. P. 685-692. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B3-685-2016).

Вторым преимуществом такого подхода является то, что особые точки, хорошо локализуемые на изображении, и используемые для решения задачи распознавания, также могут быть использованы и для решения задачи относительной навигации, поскольку заданы их трёхмерные координаты.

Необходимо отметить, что в процессе создания эталонов оператор должен производить жёсткий отбор информативных (особых) точек (interest points), используемых для распознавания и навигации. Это связано с тем, что на изображении космического аппарата присутствует большое количество информативных точек, которые легко обнаруживаются алгоритмами поиска, но не могут быть использованы для навигации, поскольку не имеют жёсткой привязки в системе координат, связанной с космическим аппаратом. В первую очередь к ним относятся очень яркие блики на поверхностях с большим коэффициентом отражения. Это, в частности, зеркальная экранно-вакуумная изоляция (multi-layer insulation — MLI), которая покрывает большую часть поверхности корпуса, и её форма не является стабильной, а также различные полированные металлические элементы, границы очень резких теней на корпусе аппарата от выступающих элементов конструкции, наложение изображений контрастных элементов конструкции, имеющих различное пространственное положение. Реально указанные факторы приводят к тому, что практически для решения задачи навигации пригодно не очень большое количество точек поверхности космического аппарата. Все это является причиной того, что процесс формирования эталонных изображений является весьма трудоёмким и должен обязательно выполняться под непосредственным контролем квалифицированного оператора.

Формирование покрытия как выборки из множества ракурсов с высокой избыточностью

При использовании эталонов, состоящих из набора особых точек изображения, возможно существенное упрощение процедуры формирования минимального покрытия эталонами области неопределённости. Для формирования покрытия области неопределённости сначала покрываем всю область неопределённости достаточно частой сеткой эталонов, например, с шагом порядка 1°. Сетка может быть неравномерной, например, как в случае покрытия сферы. Затем необходимо отобрать те эталоны, которые удовлетворяют указанным ниже условиям:

- Покрытие должно обеспечивать для каждого ракурса наблюдение и распознание числа информативных точек, не меньше заданной величины.
- Матрица ошибок измерения для каждого ракурса должна удовлетворять заданным требованиям по точности и корреляционным связям между ошибками измерения. Матрица ошибок измерений может быть рассчитана для любой фиксированной конфигурации особых точек.

Теоретически, для решения задачи относительной навигации достаточно трёх точек. Однако, для увеличения точности навигации, снижения коэффициентов корреляции ошибок линейных и угловых координат, а также повышения надёжности измерений желательно иметь не менее 7–10 точек.

Если дополнительно построить изображения при разных положениях Солнца, то при такой частой сетке, покрывающей всю область неопределённости, возможно реализовать полуавтоматическую селекцию информативных точек, которые не могут быть использованы для навигации, что обеспечит существенную помощь оператору при формировании эталонных изображений.

При формировании минимального покрытия области неопределённости проблемой является то, что область применимости каждого эталона по ракурсам наблюдения определяется множеством точек, в которых удовлетворяются ограничения, указанные выше. Форма этих областей не является постоянной, зависит от многих факторов и индивидуальна для каждого конкретного эталона. Поэтому получение оптимального покрытия весьма проблематично.

Следует отметить, что прямой перебор вариантов всех возможных покрытий практически невозможен даже для $11 \times 11 = 121$ отсчётов углов ракурса. В работе [151] показано, что в этом случае число вариантов покрытия, которые необходимо рассмотреть и сравнить, будет равно $2,658 \cdot 10^{36}$. Если принять, что на формирование одного покрытия и оценку его качества требуется всего 1 микросекунда (что очень быстро), тогда на полный перебор потребуется $8,429 \cdot 10^{22}$ лет. Очевидно, что прямой перебор невозможен.

Исходя из технической сущности задачи, следует рассматривать только такие покрытия, которые обеспечивают полное покрытие области неопределённости, т.е. когда

любая точка области неопределённости покрывается хотя бы одним эталоном. Имеется большое число теоретических работ, относящихся к задачам покрытия. Например, в классической работе (*Tom Л.Ф.* Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве: пер. с нем. И.М. Макаровой. М.: Физматлит, 1958) получена оценка плотности системы равных кругов, покрывающей бесконечную плоскость. В работе (*Tarnai T., Gáspár Z.* Covering a square by equal circles // Elemente der Mathematik. 1995. V. 50. No. 4. P. 167–170. DOI: 10.5169/seals-46351) построены покрытия квадрата равными кругами и даны оценки плотности таких покрытий. В работе (*Kennedy T.* Compact packings of the plane with two sizes of discs // Discrete and Computational Geometry. 2006. V. 35. No. 2. P. 255–267. DOI: 10.1007/s00454-005-1172-4) построены покрытия плоскости кругами двух радиусов. В общем, полученные разными авторами теоретические результаты синтеза оптимальных покрытий относятся к покрытиям регулярными фигурами, чаще всего кругами одного радиуса или кругами нескольких заданных радиусов. В нашем случае и форма областей применимости эталонов может существенно различаться, и размеры этих областей зависят от ракурса формирования эталона.

Остаётся только численное решение, которое может быть получено путём перебора с возвратами и большим количеством специально разработанных эвристик для сокращения этого перебора. Такой вариант решения представляется неоправданно сложным и трудоёмким, тем более что создание такого покрытия является далеко не единственным этапом, которые должны быть реализованы при формировании эталонной информации.

Упрощённая процедура формирования выборки

Поскольку синтез покрытия, связанный с перебором вариантов, является достаточно сложным в плане создания набора эвристик, отбрасывающих бесперспективные варианты, поэтому предлагается искать решение задачи синтеза покрытия существенно более простыми средствами, хотя и с возможно меньшей эффективностью, что выразится в использовании несколько большего числа эталонных изображений. Предлагаемый подход также является эвристическим.



Рисунок 6.1.4.1 — Формирование сетки эталонов по ракурсам наблюдения, покрывающей всю область неопределённости

Для упрощения задачи разработан алгоритм синтеза покрытия, использующий частую сетку ракурсов (например, с шагом 1°), имеющую регулярную структуру

(рисунок 6.1.4.1). В качестве такой структуры целесообразно использовать прямоугольную в некоторой, возможно нелинейной системе координат, сетку. Узлы этой сетки соответствуют ракурсам, для которых строится изображения, и формируются соответствующие эталоны. Для определённости будем рассматривать сетку 51×51 узлов, охватывающую область 50×50° по «долготе» и «широте». Ракурс, оптимальный для стыковки, соответствует нулевым углам «долготы» и «широты».

Для построения сетки эталонов целесообразно использовать введённую ранее сферическую систему координат. Сетка эталонов может быть задана для некоторого пространственного угла, а также легко распространена на всю сферу сферической системы координат, если возникает необходимость распознавать и измерять относительные координаты для любого ракурса наблюдения пассивного аппарата. Поскольку наибольший интерес представляет обычно только один пространственный (телесный) угол, в центре которого находится либо стыковочная мишень, либо стыковочный узел, либо иной конструктивный элемент пассивного космического аппарата, используемый для стыковки, то набор эталонов строится для четырехгранного телесного угла сферы.

На рисунке 6.1.4.2 показаны условные области применимости эталонов, для значения «широты», равной 0°. Область применимости для каждого эталона является то множество ракурсов, для которых эталон может быть использован, поскольку в этих точках удовлетворяются указанные ранее два условия. Поскольку рисунок является иллюстративным, то форма областей применимости выбрана круговой. Реально, и конфигурация и размеры этих областей зависит от ракурса, для которого синтезирован эталон. На рисунке для упрощения показаны области применимости 11 эталонов, а реально их для нашей сетки их количество равно 51 для одной полосы. Кроме того, реальные эталоны в полосе имеют гораздо большее перекрытие областей применимости, которые имеют размер порядка 10–30°.



Рисунок 6.1.4.2 — Формирование горизонтальной полосы покрытия

На рисунке показаны два размера. Первый размер — А, соответствует наименьшему вертикальному размеру области применимости из всех эталонов, находящихся в полосе. Второй размер — В, соответствует минимальному вертикальному размеру объединения областей применимости всех эталонов, находящихся в полосе.

Для упрощения задачи построения перейдём от задачи покрытия к задаче замощения, т.е. созданию покрытия без пробелов и двойных покрытий. При замощении будем рассматривать прямоугольные фрагменты областей покрытия, полностью находящиеся в области применимости каждого эталона. При этом прямоугольные фрагменты, из которых строится замощение, укладываются стык в стык (без перекрытия) а полные области применимости перекрываются.

Для упрощения процедуры замощение строится горизонтальными полосами. Вертикальный размер прямоугольных фрагментов в каждой полосе один и тот же, горизонтальный размер может отличаться в пределах одной полосы. Вертикальный размер различных полос также может быть различным.

Построение замощения начинаем из центра, т.е. из области покрытия для ракурса с равными нулю обоими углами, что соответствует индексам решётки (26,26). Нашей целью является удаление максимального числа эталонов из этой полосы для обеспечения минимального покрытия. При удалении части эталонов минимальный вертикальный размер объединения В при этом неизбежно уменьшится. Поэтому задаём новое значения вертикального размера B, уменьшенное на $\Delta = 2-4^{\circ}$. Теперь строим замощение полосы, последовательно перебирая эталоны и строя для каждого прямоугольник максимального размера по горизонтали. Вертикальный размер всех прямоугольников один и тот же, на $\Delta = 2-4^{\circ}$ меньше начального значения размера В. Замощение строим в положительном направлении от центрального эталона и в отрицательном направлении. Если на каком-то этапе при переборе эталонов по строке с шагом 1° получилась «щель» между прямоугольными областями замощения, делаем возврат на один шаг и уменьшаем ширину прямоугольной области, чтобы избежать двойного покрытия. Если мы дошли до границ сетки, то проверяем количество точек привязки на этих границах. Если оно меньше заданной величины, то вставляем дополнительные эталонные изображения. Может так получиться, что на одном крае полосы или на обоих краях пара эталонов расположены слишком близко. Поэтому может возникнуть соблазн разместить точки более равномерно, улучшив тем самым покрытие. Однако такие попытки чаще всего требуют многократных перестановок, и более эффективным методом получения более равномерного распределения эталонов является небольшое изменение величины Δ и повторное построение замощения полосы. Ширина построенных прямоугольных областей может меняться в зависимости от положения в полосе. Как правило, при движении к концам полосы ширина прямоугольных областей уменьшается.

Далее по такому же алгоритму последовательно строятся полосы выше и ниже уже построенной полосы — рисунок 6.1.4.3.



Рисунок 6.1.4.3 — Последовательное построение полос покрытия вверх и вниз от первой построенной полосы

Если строим полосу, лежащую выше уже построенной полосы, то добиваемся, чтобы нижняя граница новой полосы вплотную примыкала к верхней границе уже построенной полосы. Аналогично, если строим полосу, лежащую ниже уже построенной полосы, то добиваемся того, чтобы верхняя граница новой полосы вплотную примыкала к нижней границе уже построенной полосы. Если на верхней или нижней границе всей области $50 \times 50^{\circ}$ не выполнены условия применимости, то вставляем дополнительную полосу, с центрами, расположенными на соответствующей границе. Ширина этих полос может уменьшаться по мере отдаления от центральной полосы. На рисунке 6.1.4.3 для упрощения ширина прямоугольных областей в разных полосах показана одинаковой. На практике они обычно различаются.

Далее строим таблицу, связывающую ракурс в пределах ±25° по каждому из углов с конкретным эталоном, который должен быть использован для распознавания и навигации. Оценка ракурса формируется на этапе грубого распознавания пассивного космического аппарата.

Для отработки алгоритма синтеза покрытия области неопределённости была разработана простая модель области применимости. Эта модель построена на основании проведённых экспериментов для сетки эталонов малой размерности — 11×11 с шагом 5°. Модель числа точек, для которых устанавливается соответствие, имеет вид:

$K(i, i_0, j, j_0) = \left[(\eta_{i_0, j_0} + A_0 - \mu_{i, j}) * exp(-(\alpha(i - i_0)^2 + \beta(j - j_0)^2)) \right]$

Здесь квадратные скобки обозначают целую часть числа; i_0, j_0 — индексы, соответствующие ракурсу наблюдения, для которого сформирован эталон; i, j — индексы, соответствующие направлению, для которого определяется число точек, для которых устанавливается соответствие; $__{i,j}$ — случайная величина с равномерным распределением в интервале $[0, 1]; \eta_{i_0, j_0}$ — случайная величина с равномерным распределением на отрезке A_0 — минимальное число особых точек, которым должен обладать эталон; установлено значение A = 20.

При использовании этой формулы в каждой точке (*i*, *j*) проверяется условие:

$K(i_o, i_0, j_0, j_0) \geq K(i, i_0, j, j_0)$

Если это условие в какой-то точке области применимости эталона нарушено, то значение $K(i, i_0, j, j_0)$ заменяется на $K(i_0, i_0, j_0, j_0)$. Коэффициенты α, β отражают зависимость области применимости эталонов от ракурса визирования. Это обычно происходит, когда большая часть наблюдаемой поверхности для ракурса i_0, j_0 приблизительно ортогональна направлению визирования.

Таким образом, следующие выражения имитируют распределение точек привязки, которое приблизительно изотропное для нулевого ракурса (26,26) и имеет тенденцию к сжатию носителя при отклонении от нулевого ракурса:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 + a \frac{|i_0 - 26|}{25} \right)_{-} = -0 \left(1 + b \frac{|j_0 - 26|}{25} \right)$$

Заданы следующие параметры $\alpha_0 = 0,01; \alpha = 1; \beta_0 = 0,01; \beta_0=1.$



Рисунок 6.1.4.4 — Профиль применимости девяти эталонов в линиях уровня для девяти точек, выделенных на рисунке 6.1.4.1



Рисунок 6.1.4.5 — Профиль применимости построенного покрытия области неопределённости

На рисунке 6.1.4.4 приведены профили области применимости девяти эталонов в линиях уровня. На рисунке 6.1.4.5 приведён профиль построенного покрытия также в линиях уровня. Минимальное количество визируемых особых точек, удовлетворяющим указанным выше двум условиям для любого ракурса в пределах 50×50°, было задано равным 7.

Таким образом, чтобы покрыть область неопределённости размером $50 \times 50^{\circ}$ из общего количества 2601 были отобраны 28 эталонов, или 1,076 %. Качество построенного покрытия можно приблизительно определить как отношение суммы площадей областей применимости использованных эталонов к площади покрываемого пространства, равной $51 \times 51 = 2601$. У построенного покрытия это отношение равно 1,772. Для оптимального покрытия бесконечной плоскости кругами в (*Qu X., Soheilian B., Habets E., Paparoditis N.* Evaluation of SIFT and SURF for vision based localization // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. V. XLI-B3. P. 685–692. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B3-685-2016) получена оценка эффективности покрытия, которая имеет вид:

$$D \le \frac{\pi}{\sqrt{27}} = 1,209...$$

D — это отношение суммарной площади всех кругов, покрывающих область к площади всей области. Таким образом, построенное покрытие можно считать приемлемым с учётом простоты использованного алгоритма, а также того, что покрывается ограниченная область, а не бесконечная плоскость.

Рассмотрим несколько иллюстраций. На рисунке 6.1.4.6 представлены три синтезированных изображения некоторого абстрактного космического аппарата. Слева и справа от корпуса аппарата видны солнечные блики на поверхности больших параболических антенн. Сами параболические антенны при таком освещении не просматриваются.



Рисунок 6.1.4.6 — Синтезированное изображение космического аппарата при трёх различных значениях угла «долготы»

Вариации яркости панелей солнечных батарей на левом и правом изображениях обусловлены, скорее всего, геометрическими и фотометрическими погрешностями синтеза изображений программой рендеринга общего назначения. Для визуализации космических аппаратов в ряде стран разработаны специализированные программы рендеринга с гораздо более жёсткими требованиями к величине геометрических и фотометрических ошибок, чем те, которые установлены для программ рендеринга общего назначения. Иллюстрации показывают, насколько сильно изменяется вид центральной части (корпуса космического аппарата) при изменении ракурса наблюдения на ± 25° только по одной координате («долготе»). Очевидно, что для перекрытия области изменения ракурсов по двум координатам 50°×50° потребуется значительное число эталонов.

Иллюстративное изображение результатов установления соответствия особых точек представлено на рисунке 6.1.4.7. Это изображение иллюстративное в том смысле, что оно позволяет понять, как произошло установление соответствия.



Рисунок 6.1.4.7 — Установление соответствия особых точек эталона (*слева*) и изображения полученного для другого ракурса (*справа*)

На рисунке показан результат установления соответствия для шести особых точек эталона. Реально, при благоприятной ситуации, происходит установление соответствия нескольких десятков точек (что делает визуальный анализ результатов установления соответствия особых точек достаточно сложным и требует нескольких итераций). На рисунке только для одной из шести особых точек соответствие установлено неправильно. Обычно, доля ошибочно установленных соответствий больше, чем 1/6. Одной из причин этого является то, что дескрипторы особых точек, построенные на основе широко распространённых дескрипторов SIFT и SURF на высококонтрастных изображениях склонны к вырождению. Поэтому их эффективность снижается.

Для автоматического выявления точек, для которых соответствие установлено неправильно, используются специальные алгоритмы. Кроме того, на рисунке 6.1.4.7 особые точки располагаются симметрично, что на практике, при работе в автоматическом режиме, наблюдается крайне редко. Характер расположения особых точек и степень их симметричности оказывают очень сильное влияние на точность измерений. Приведенное изображение как раз и было получено при экспериментальной оценке степени влияния симметрии положения особых точек на ошибки измерения.

Выводы

Предложен простой способ формирования покрытия области неопределённости эталонами для решения задач автоматического распознавания изображений искусственных объектов на примере относительной навигации при стыковке с некооперируемыми космическими аппаратами. Качество синтезированных покрытий может считаться приемлемым для практических приложений, включающих, в том числе, распознавание образов искусственных сооружений — зданий, дорожных развязок, крупных объектов техники и др. на поверхности Земли при обработке результатов дистанционной съёмки высокого разрешения.

6.2 Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса, в том числе потоковой обработки

6.2.1 Адаптация алгоритма восстановления интенсивности осадков к радиометрическим измерениям прибора МТВЗА-ГЯ

Приборы серии МТВЗА (модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы) могут быть использованы для восстановления интенсивности осадков над поверхностью воды и суши. Однако имеют одно принципиальное отличие от широко известных иностранных аналогов — это угол зондирования, который составляет 65°. Поэтому интеграция данных МТВЗА в уже существующие модели достаточно сложна. Исследование способов восстановления интенсивности осадков по данным прибора МТВЗА-ГЯ необходимо начать с адаптации простых алгоритмов.

В качестве простой модели был выбран известный из научной литературы алгоритм ALG'85. Это один из основных алгоритмов, который много лет применялся для восстановления осадков по наблюдениям приборов SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave/Imager).

Основные этапы адаптации алгоритма:

- 1) оценка доступных для анализа радиометрических каналов с данными,
- 2) картирование ледовой области, над которой оценка осадков не проводится,
- 3) разработка регрессии для оценки индекса рассеяния в атмосфере на частоте 91,6 ГГц,
- 4) установление корреляционно-статистических связей между индексом рассеяния и интенсивностью осадков (с использованием глобальных полей интенсивности осадков по реанализу).

Прибор МТВЗА-ГЯ характеризуется наличием большого числа радиометрических каналов, однако в некоторых из них наблюдаются систематические сбои и высокий уровень шумов, в связи с чем они исключены из дальнейшего рассмотрения (это каналы $T_{91,6}^{\rm H}$, $T_{42}^{\rm V,H}$, $T_{48}^{\rm V,H}$). В целях восстановления интенсивности осадков будет выполнен анализ

данных только каналов в окнах прозрачности атмосферы, свободные от шумов и сбоев (это каналы $T_{10,6}^{V,H}$, $T_{18,7}^{V,H}$, $T_{23,8}^{V,H}$, $T_{31,5}^{V,H}$, $T_{36,7}^{V,H}$ и $T_{91,6}^{V}$).

Отдельной подзадачей алгоритма стало маскирование области льдов, которое производится на основе анализа данных на частоте 10,6 ГГц (вертикальная и горизонтальная поляризация). Определяется поляризационная разница $T_{10,6}^{\text{Diff}} = T_{10,6}^{\text{V}} - T_{10,6}^{\text{H}}$. Если $T_{10,6}^{\text{Diff}} < 90$ К, то в этой точке лёд, если $90K \le T_{10,6}^{\text{Diff}} < 110$ К, то в этой точке возможен лёд, во всех остальных случаях поверхность воды принимается свободной ото льда.

В модели ALG'85 индекс рассеяния SI (англ. Scattering Index) над водной поверхностью рассчитывается следующим образом:

 $SI = -174, 4 + 0, 72T_{h}(19V) + 2, 439T_{h}(22V) - 0,00504T_{h}(22V)^{2} - T_{h}(85V),$

где T_b — радиояркостная температура в соответствующем канале в градусах Кельвина. Интенсивность осадков RR (*англ*. Rain Rate) определяется как: RR = 0,00188*SI*^{2,0343}.

Прибор МТВЗА-ГЯ аналогичен прибору SSM/I, поэтому для составления уравнения для SI можно использовать близкие по частотам каналы. Близким каналом, в котором будет анализироваться рассеяние за счёт осадков, является $T_{91,6}^V$, необходимо только подобрать регрессионное соотношение для SI используя данные МТВЗА-ГЯ.

По всем доступным каналам МТВЗА-ГЯ было построено регрессионное соотношение со слагаемыми в 1-й, 2-й и 3-й степени. Была проведена оценка уровня значимости коэффициентов регрессий и исключены незначимые слагаемые. Окончательно были пересчитаны коэффициенты упрощённого регрессионного соотношения (таблица 6.2.1.1). Диаграмма рассеяния для модели приведена на рисунке 6.2.1.1

$$\begin{split} T_{\text{mod}} &= a_0 + a_1 T_{23,8}^{\text{V}} + a_2 (T_{23,8}^{\text{V}})^2 + a_3 T_{36,7}^{\text{V}} + a_4 (T_{36,7}^{\text{V}})^2 + \\ &+ a_5 T_{23,8}^{\text{H}} + a_6 (T_{23,8}^{\text{H}})^2 + a_7 T_{36,7}^{\text{H}} + a_8 (T_{36,7}^{\text{H}})^2. \end{split} \\ SI = T_{\text{mod}} - T_{91,6}^{\text{V}}$$

Таблица 6.2.1.1 — Коэффициенты регрессионного уравнения

N⁰	Коэффициент а _i	N⁰	Коэффициент а _i
0	-6687,94141915439	5	5,26195216587934
1	-66,1900808514748	6	-0,0172878290145368
2	0,142722067034945	7	-6,29788385125355
3	118,946333874621	8	0,0213748601916347
4	-0,241036695017523		



Рисунок 6.2.1.1 — Диаграмма рассеяния для регрессионной модели и данных МТВЗА-ГЯ, измеренных на частоте 91,6 ГГц, вертикальная поляризация



Рисунок 6.2.1.2 — Рассчитанный по данным МТВЗА-ГЯ индекс рассеяния SI

На основе полученного регрессионного соотношения для индекса рассеяния (SI) были рассчитаны глобальные карты по измерениям МТВЗА-ГЯ (рисунок 6.2.1.2). Для сопоставления SI с количеством осадков были взяты данные peahaлиза GPM IMERG (*англ.* Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurements). Набор данных из реанализа содержит интенсивность осадков с временным разрешением 30 мин и пространственным в $0,1\times0,1^{\circ}$. Для сопоставления данные реанализа были приведены к пространственному разрешению в $0,25\times0,25^{\circ}$ (рисунок 6.2.1.3), как и данные МТВЗА-ГЯ.



Рисунок 6.2.1.3 — Данные реанализа GPM IMERG, приведённые к сетке измерений МТВЗА-ГЯ

Для анализа были выбраны по одному дню за каждый месяц 2020 г. Всего проанализировано 182 области, как на рисунке 6.2.1.4. Для каждой области массивы с данными по интенсивности осадков и индексу рассеяния были отсортированы по возрастанию и была построена их зависимость (рисунок 6.2.1.5).




Рисунок 6.2.1.4 — Пример выделенной области для сравнения индекса рассеяния и интенсивности осадков по реанализу

Рисунок 6.2.1.5 — Зависимость интенсивности осадков от индекса рассеяния



Рисунок 6.2.1.6 — Зависимость интенсивности осадков от индекса рассеяния и интегрального паросодержания в атмосфере

При анализе зависимостей, приведённых на рисунке 6.2.1.5, было обнаружено, что интенсивность осадков зависит как от индекса рассеяния, так и от интегрального паросодержания (см. рисунок 6.2.1.6). Таким образом, было решено дополнить модельную функцию зависимостью от интегрального паросодержания. Все проанализированные области с осадками были сгруппированы по среднему значению в них паросодержания в диапазоне $\pm 2,5$ мм. Для каждой группы была построена аппроксимация вида $Y = aX^b$, и коэффициенты *a* и *b* были построены как функция от интегрального паросодержания. Простая модель для восстановления интенсивности осадков по данным МТВЗА-ГЯ имеет следующий вид:

$$RR = a(V) \cdot SI^{b(V)}, \ a(V) = 0,0130562276V + 2,401194589,$$

$$b(V) = \exp(-0,07270139134V) \times 0,0002117555473,$$

где V — интегральное паросодержание, восстанавливаемое по данным МТВЗА-ГЯ в соответствии с ранее разработанным алгоритмом. Полученные оценки осадков над поверхностью океана коррелированы с оценками для других приборов космического базирования, таких как SSMIS (F16/F18) и AMSR-2.

Следует отметить, что к настоящему моменту проанализирована только небольшая часть данных за 2020 г. Это связано с решением вопроса точной геопривязки данных МТВЗА-ГЯ (см. п. 6.1). Полный анализ можно будет провести только после выполнения процедуры геопривязки всего объёма накопленных архивных данных, которая занимает значительное время.

6.2.2 Адаптация алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными MCУ-MP

В настоящее время одним из наиболее устойчивых и надёжных алгоритмов детектирования пожаров по спутниковым данным является алгоритм MOD14, рассчитанный на работу с данными прибора MODIS, установленного на спутниках TERRA и AQUA. Алгоритм разработан специалистами Мерилендского университета. Этот алгоритм обеспечивает достаточно достоверное детектирование пожаров и даёт очень низкий процент ложных тревог. Вместе с тем, большой интерес представляет исследование возможностей детектирования пожаров по данным с приборов, для которых ещё не было разработано подобных алгоритмов. В июле 2019 года был запущен новый отечественный метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-2. На его борту функционирует многоканальное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР. Съёмка с этого устройства ведётся во всех спектральных диапазонах, необходимых при детектировании пожаров по алгоритму MOD14 (а именно каналы 2 (700-1100 нм), 4 (3500-4100 нм) и 5 (10500-11500 нм)). Так же, данные получаемые МСУ-МР в каналах, которые используются для детектирования пожаров, имеют такое же пространственное разрешения, как и соответствующие каналы приборов MODIS (1 км). Все это позволяет говорить о возможности адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными MCУ-MP.

Поэтому в рамках темы «Мониторинг» в 2022 г. была начата работа по адаптации алгоритма детектирования пожаров МОD14 для работы с данными прибора МСУ-МР установленного на российском спутнике «Метеор-М» № 2-2. Результаты данной работы представлены в настоящем разделе отчёта.

Методы решения

В основе предложенного подхода к детектированию пожаров лежит анализ выборок, построенных на основе данных МСУ-МР по участкам, в которых по данным прибора MODIS с использованием алгоритма MOD14 был детектирован пожар. Выборка составлялась из наборов параметров, рассчитанных по данным МСУ-МР в точках, где был зарегистрирован пожар. Параметры аналогичны тем, что используются при детектировании по алгоритму MOD14, их описание представлено в таблице 6.2.2.1. Для локализации пожаров на снимках МСУ-МР использовалась информация о горячих точках, детектированных по данным MODIS на территории РФ за 2021 г. Каждой такой точке подбирался покрывающий её сеанс МСУ-МР. Время такого сеанса отличалось от времени регистрации точки не более чем на 30 мин.

В процессе такого сопоставления учитывалось, что данные МСУ-МР имеют не очень устойчивую географическую привязку (на краях сцен МСУ-МР ошибки привязки могут достигает девяти километров (для данных 2021 г.)). Поэтому, на сценах МСУ-МР выбирались точки с максимальной яркостной температурой в 4 канале в радиусе девяти километров вокруг центра с координатами горячих точек, детектированных по данным прибора MODIS. Такие точки считались «горячими точками» на сцене МСУ-МР, для них рассчитывался вышеописанный набор параметров. Сформированная выборка в

автоматизированном режиме проходила различные фильтрации, с целью исключения из нее различных шумов. В результате объём итоговой выборки превысил 12000 наборов данных в различных «горячих точках».

Параметр	Краткое описание
R ₂	Коэффициент отражения во 2 канале (700–1100 нм)
T ₄	Яркостная температура в 4 канале (3500–4100 нм)
T ₅	Яркостная температура в 5 канале (10500211500 нм)
dT	$T_4 - T_5$
T ₄ _mean, T ₅ _mean, dT_mean	Средние значения фона вокруг горячей точки
T ₄ _mad, T ₅ _mad, dT_mad	Абсолютное среднее отклонение фона
Bkg_fire_mad	Статистика по высокотемпературной части фона

Таблица 6.2.2.1 — Описание параметров горячих точек выборки

Также была сформирована выборка точек, не являющихся горячими. Для этого был взят набор сеансов МСУ-МР, покрывающих области, на которых не было зарегистрировано горячих точек MODIS в день этого сеанса.

Модифицированный MOD14. Основная часть алгоритма MOD14 заключается в вычислении тестовых выражений, использующих параметры из наборов для каждой точки сцены. Помимо этого, данные параметры сравниваются с пороговыми значениями, отсеивающими заведомо отрицательные случаи. Предложенная модификация алгоритма MOD14 представляет собой изменение коэффициентов тестовых выражений и пороговых значений таким образом, чтобы алгоритм срабатывал положительно на обучающей выборке горячих точек и отрицательно на выборке точек, не являющимися горячими. Для этого был проведён анализ распределений яркостных температур горячих точек в каналах со схожим спектральным диапазоном MCУ-MP (4 и 5 каналы) и MODIS (21 и 31 каналы) (рисунок 6.2.2.1).



Рисунок 6.2.2.1 — Распределение яркостной температуры горячих точек по данным МСУ-МР и MODIS. *Слева*: канал 4 МСУ-МР (3500–4100 нм) и канал 21 MODIS (3929–3989 нм) (значение по вертикальной оси красной линии в точке 327 по горизонтальной оси достигает 0.28) *Справа*: канал 5 МСУ-МР (10500–11500 нм) и канал 31 MODIS (10780–11280 нм)

Помимо модификации основной части алгоритма MOD14, для его адаптации под данные MCУ-MP было необходимо решить целый ряд задач. Одной из таких задач стала фильтрация сеансов со сбойными данными. Такие сеансы потенциально могут давать значительное количество ложных детектирований. В данных встречается два типа помех — сбойные полосы и одиночные помехи. Первый вид ошибок может быть

фильтрован стандартными методами, тогда как второй изначально неразличим от «горячих точек» в канале 4. В тоже время в случае возникновения одиночных помех, помехи наблюдаются во всех каналах, что делает возможным их определение в дальнем ИК-канале, так как одиночные выбросы для этого фонового канала нетипичны. Разработанная фильтрация была апробирована на ряде тестовых данных и практически полностью справилась со всеми сбойными сеансами.

Другой проблемой стала фильтрация ложных детектирований на водных поверхностях. Данная проблема в оригинальном MOD14 решается использованием маски воды. Для данных MCУ-MP использование той же версии маски приводило бы к излишней фильтрации вследствие описанной ранее проблемы допривязки. Поэтому данная маска была загрублена, в результате чего на ней остались лишь большие водоёмы (большие озера, моря, океаны), для которых проблема допривязки несущественна. Использование данной маски позволило полностью решить проблему ложных детектирований на больших водоёмах.

Ещё одной задачей стала фильтрация ложных детектирований, возникающих на горячих поверхностях. В оригинальном MOD14 существует отдельная тестовая секция, определяющая горячие поверхности, которая, однако не может быть применена для данных MCУ-MP в виду работы этой секции в зоне температур выше порога насыщения 4 канала прибора MCУ-MP. В связи с этим отдельно была составлена выборка из ложных детектирований на горячих поверхностях, изучение которой позволило определить тестовую секцию, позволяющую фильтровать такие случаи на данных MCУ-MP. Работа предложенных тестов на выборке ложных детектирований, а также на выборке горячих точек (ошибочное срабатывание фильтра), представлено в таблице 6.2.2.2.

	Всего	T4=327	T5>310	T5>310 T4=327	R2>0.15	R2>0.15 T5>310 T4=327
Ложное детектирование на	164072	137820	120846	115267	159790	149404
горячей поверхности						
Правильно детектированные	13351	4603	116	84	6201	53
горячие точки						

Таблица 6.2.2.2 — Работа фильтров на выборках ложных детектирований на горячих поверхностях и выборке горячих точек

Результаты

Описанный выше метод детектирования пожаров был интегрирован в информационную систему «Вега-Science» (уникальная научная установка, входящая в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг», <u>http://sci-vega.ru/</u>). Данная система, в том числе, имеет доступ к потоку данных МСУ-МР, поступающих из центров приёма НИЦ «Планета» (http://planet.rssi.ru/). Это позволило оценить эффективность работы адаптированного к данным МСУ-МР алгоритма MOD14. На рисунках 6.2.2.2–6.2.2.5 и таблицах 6.2.2.3 и 6.2.2.4 представлено сравнение результатов детектирования пожаров (горячих точек) с использованием алгоритма MOD14 по данным прибора MODIS и модифицированной версии алгоритма MOD14 по данным прибора MCУ-МР. Хорошо видно, что оба алгоритма дают достаточно хорошо совпадающие результаты детектирования. При этом следует отметить, что расхождение в получаемых результатах могут быть связаны, в том числе, и с тем, что съёмка приборами MODIS и MCУ-MP выполнялась в несколько разное время.



Рисунок 6.2.2.2 — Пример результата работы детектирования горячих точек с использованием модифицированной версии алгоритма MOD14 по данным прибора MCУ-MP. Данные съёмки 01.08.2022, 04:56:12. Красным цветом представлены результаты детектирования



Рисунок 6.2.2.3 — Пример результата работы детектирования горячих точек с использованием алгоритма MOD14 по данным прибора MODIS. Красным выделен результат работы алгоритма



Рисунок 6.2.2.4 — Пример результата работы детектирования пожаров с использованием модифицированной версии алгоритма MOD14 по данным прибора MCУ-MP с 1 по 10 августа



Рисунок 6.2.2.5 — Пример результата работы детектирования пожаров с использованием алгоритма MOD14 по данным прибора MODIS с 1 по 10 августа

Дата/время одного	из сеансов МСУ-МР	Количество сеансов МСУ-МР с общей областью интереса	Кол-во сеансов MODIS покрывших сеанс MCV-MP за данный промежуток времени	Горячих точек MODIS совпало с точками MCУ-MP	Горячих точек MODIS в кольце радиуса 1 вокруг точек MCУ-MP	Горячих точек MODIS в кольце радиуса 2 вокруг точек MCУ-MP	Несопоставленных точек МСУ-МР	Несопоставленных точек MODIS	Всего точек МСУ-МР	Всего точек MODIS
01.08.2022	3:18:59	2	19	1085	665	232	1996	631	3081	2613
02.08.2022	2:57:29	3	12	197	116	43	458	331	655	687
03.08.2022	9:14:57	3	23	567	475	178	684	294	1251	1514
01.08.2022	10:03:21	1	13	339	297	178	423	253	762	1067
03.08.2022	5:50:45	1	9	25	16	16	40	47	65	104
04.08.2022	7:12:40	1	12	19	13	5	2	64	21	101
05.08.2022	0:21:10	2	16	490	231	80	757	547	1247	1348
06.08.2022	8:05:55	2	16	252	294	199	574	978	826	1723
06.08.2022	3:05:18	1	7	12	21	9	37	38	49	80
07.08.2022	7:43:16	2	19	46	22	18	184	1956	230	2042
08.08.2022	9:00:10	2	20	1250	929	413	1003	867	2253	3459
08.08.2022	3:56:58	2	13	456	231	112	530	400	986	1199
09.08.2022	10:20:26	3	25	988	344	140	1960	741	2948	2213
09.08.2022	3:34:55	2	15	282	280	183	464	136	746	881
10.08.2022	3:13:08	1	4	12	3	12	14	15	26	42
10.08.2022	0:06:28	3	18	592	304	143	1339	582	1931	1621
				6612	4241	1961	10465	7880	17077	20694
Всего сопоставленных MODIS: 12814										

Таблица 6.2.2.3 — Сравнение работы детектирования горячих точек по данным MODIS и MCУ-MP на областях с общей географической областью зарегистрированных горячих точек 1–10 августа 2022 г.

Таблица 6.2.2.4 — Сравнение площадей пожаров, сформированных в результате детектирования горячих точек по данным MODIS и MCУ-MP на территории РФ 1–10 августа 2022 г.

	Число лесных пожаров	Лесная площадь пожаров, га	Лесная площадь пожаров без коррекции, га
МСУ-МР	517	499 405	868 238
MODIS	639	540 335	906 434

6.2.3 Организация автоматической обработки низкоуровневых данных КА «Канопус-В» в центрах НИЦ «Планета»

В составе отечественной спутниковой группировки «Канопус-В» на сегодняшний день функционирует пять космических аппаратов, с которых поступает существенный объём данных высокого пространственного разрешения (до 2 м для панхроматической камеры и до 12 м для мультиспектральной). Для качественной последующей обработки и усвоения в информационные системы данные необходимо конвертировать из исходного бинарного формата RSML в формат, совместимый с современными открытыми средствами работы с геоданными и изображениями. Оптимальным в данном случае является формат GeoTIFF, обеспечивающий хранение тяжёлых многоканальных данных с сопутствующей информацией о геопривязке, сжатие данных без потерь, поддержку внутренней регулярной тайловой структуры и хранение дополнительных масштабов изображений для ускорения доступа к данным.

В наземных комплексах приёма и обработки данных центров НИЦ «Планета» для обработки информации, поступающей со спутников серии «Канопус-В», используется программный комплекс NormSatBIK разработки НИИ «Фотон» РГРТУ, не предусматривающий возможности работы в пакетном режиме. В силу этого ресурсоёмкая и продолжительная обработка (до нескольких часов на один сеанс) производилась операторами в ручном режиме, что требовало больших временных и трудовых затрат и было практически неосуществимо силами персонала центров.

Для решения данной проблемы был разработан способ автоматизации обработки данных КА «Канопус-В», основанный на имитации действий оператора при работе с пакетом NormSatBIK. Для выбора оптимального решения для автоматизации был проведён анализ существующих пакетов для тестирования ПО, так как подобный функционал в первую очередь характерен для них. После выбора подходящего пакета, обеспечивающего управление оконными приложениями на основе информации о структуре их интерфейса и органов управления, а не на основе экранных координат, была реализована сценарная обвязка для выполнения необходимых действий оператора, а также для встраивания этой обработки в общую инфраструктуру обработки центров НИЦ «Планета». В итоге такая автоматизация позволила эффективно организовать потоковую обработку всего объёма данных КА «Канопус-В», принимаемых в центрах, и не только успешно обрабатывать оперативный поток поступающих данных, но и постепенно дообрабатывать доступные архивы исходных данных. Объёмы обработанных данных до внедрения процедуры автоматической обработки и их сравнение с результатами за аналогичный период времени после внедрения приведены на рисунках 6.2.3.1 и 6.2.3.2 соответственно.



Рисунок 6.2.3.1 — Покрытие обработанными данными «Канопус-В» за октябрь 2021 г.

В настоящий момент обработка развёрнута и успешно функционирует во всех трёх центрах НИЦ «Планета»: дальневосточном, сибирском и европейском. Результаты обработки в полностью автоматическом режиме поступают в объединённую систему работы с данными (ОСРД) НИЦ «Планета», ИСДМ-Рослесхоз и другие информационные системы, для которых ОСРД НИЦ «Планета» выступает в роли провайдера данных.



Рисунок 6.2.3.2 — Покрытие обработанными данными «Канопус-В» за октябрь 2022 г.

6.2.5 Коррекция привязки данных МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2

Спутниковые снимки среднего разрешения с космических аппаратов (КА) серии «Метеор-М» представляют интерес для решения большого числа задач мониторинга экосистем. Для решения таких задач успешно применяются как оперативные данные, так и временные серии снимков за несколько дней и многолетние данные. Для оперативной оценки ситуации, например мониторинга пожароопасной обстановки с подозрениями на возникшие пожары, а также анализа временной изменчивости характеристик поверхности, требуется точная геометрическая совместимость данных, полученных за разные времена. На приборе МСУ-МР, КА «Метеор-М» № 2-2 перестали поступать данные об ориентации аппарата от звёздных датчиков, вследствие чего комплекс обработки не может выдавать точные географические координаты снимков.



Рисунок 6.2.5.1 — Полигоны с береговой линией. Регион Сибири

Для уточнения географической привязки мы использовали метод корреляции снимков с набором регионов, где есть устойчивая береговая линия, поскольку данные за один сеанс со станции приёма охватывают достаточно большую территорию. В процессе обработки по пролёту спутника ищутся регионы, над которыми есть данные. Контуры регионов по Сибири можно увидеть на рисунок 6.2.5.1.

Результаты выполнения процедуры допривязки заносятся в базу данных для дальнейшего анализа.

Пример дополнительной предобработки географической допривязки можно увидеть на рисунок 6.2.5.2.



Рисунок 6.2.5.2 - Результат географической допривязки данных МСУ-МР

6.2.6 Модернизация программного комплекса оперативной обработки данных КА «Арктика-М» № 1

В рамках развития работ по усвоению данных КА «Арктика-М» № 1 был модернизирован программный комплекс обработки этих данных. Разработанный в 2021 г. «блочный» метод привязки данных имел ряд существенных недостатков: лишние дисковые операции при обработке изображения (чтение, запись вспомогательных файлов); необходимость «жертвовать» качеством привязки в пользу оперативности работы из-за ограничения числа контрольных точек привязки у библиотеки GDAL (больше тайлов, меньше скорость и наоборот); специфика реализации драйверов библиотеки GDAL для многопоточных программ; сложность разработки и поддержки программного комплекса обработки, написанного на языке C++. Обновление систем программного обеспечения серверов обработки и диспетчеризации данных позволило использовать современные решения по обработке растровых данных. Для оптимизации потоковой обработки данных КА «Арктика-М» № 1 на языке python 3.8 был написан программный комплекс на основе использования поддерживаемых в сообществе библиотек SatPy/PyResample на базе обновлённой библиотеки Proj8. Такой метод обеспечивает оптимальную скорость работы с точной привязкой в сравнении с «блочным»

методом обработки. На рисунках 6.2.6.1 и 6.2.6.2 приведены примеры результатов обработки данных КА «Арктика-М» № 1 двумя методами со одинаковым временем обработки. На рисунке 6.2.6.3 показано улучшение привязки, которое даёт новое программное обеспечение по сравнению с «блочным».



Рис 6.2.6.1 — Результат обработки данных КА «Арктика-М» № 1 за 05.05.2022, 10:15 на базе Ргој8, канал 9,7 мкм



Рис 6.2.6.2 — Результат обработки данных КА «Арктика-М» № 1 за 05.05.2022, 10:15 «блочным» подходом, канал 9,7 мкм



Рис 6.2.5.3 — Сравнение двух методов обработки: *а* — «блочный» метод; *б* — справа ПО на базе Proj8

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Мониторинг-Эффект» проводились в полном соответствии с утвержденным планом. В их рамках решены задачи и получены результаты по следующим основным направлениям:

- Развитие методов построения, управления и калибровки перспективных российских приборов наблюдения Земли;
- Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса, в том числе потоковой обработки.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Эффект» в 2022 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 7 ВАЛИДАЦИЯ

Введение

В настоящей главе отчёта представлены основные результаты, полученные в рамках работ по направлению «Мониторинг-Валидация», определённых в плане НИР ИКИ РАН на 2021–2023 гг.

- Валидация разрабатываемых методов и подходов обработки и анализа спутниковых данных, в том числе на основе проведения подспутниковых наблюдений;
- Алгоритм приведения измеренных с высоким спектральным разрешением микроволновых спектров собственного микроволнового излучения атмосферы в нестационарных состояниях к единому моменту времени;
- Валидация спутниковых алгоритмов определения значений мутности и концентрации взвешенного вещества на основе квазисинхронных подспутниковых натурных измерений;
- Определение трёхмерной структуры вихревых диполей на основе спутниковых данных и измерений *in situ*;
- Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2022 г. результаты также изложены в следующих публикациях [95, 99, 108, 125, 139].

7.1 Валидация разрабатываемых методов и подходов обработки и анализа спутниковых данных, в том числе на основе проведения подспутниковых наблюдений

7.1.1 Создание опорных выборок на больших территориях с помощью краудсорсинга

Для картографирования объектов различного типа землепользования на больших территориях, в том числе, используемых пахотных земель, требуется пространственнораспределённая, актуальная, тематически и географически точная обучающая выборка. Вопрос наличия такой выборки особенно актуален для ряда исторических эпох и/или территорий, где точность других источников информации (так называемые «планшеты», «внутрихозы», другие данные наземных обследований) вызывает сомнения, или этой информации не было, или она более недоступна. В этом контексте интерес представляет анализа характеристик обучающих разработка методов создания И наборов контролируемой территории, которые позволили точности на большие бы минимизировать аналогичный труд квалифицированных экспертов. В частности, одним из вариантов получения необходимых данных является создание такой разметки волонтёрами. Потенциальными преимуществами подхода является скорость обработки больших территорий, относительно низкие затраты на организацию и финансирование работ, возможность сократить количество экспертов до определённого минимума. В рамках проведённых в 2022 г. работ были исследованы характеристики опорных данных, полученных ранее с помощью фотоинтерпретации спутниковых изображений.

В целях создания указанных опорных данных для распознавания пахотных земель с помощью краудсорсинга была организована экспериментальная платформа, на основе которой по спутниковым данным проводилась разметка объектов наземного покрова как экспертами в области дистанционного зондирования Земли, так и волонтёрами. Задачей всех участников было создание разметки объектов двух классов: «пашня» и «не-пашня» (для бинарной классификации) по свободно доступным спутниковым данным высокого разрешения (прежде всего, Sentinel-2 и Landsat) на 2017 г. В качестве платформы, предоставляющий доступ к спутниковым данным и инструментам аннотирования объектов, использована разработанная в ИКИ РАН система «Bera-Science».

Для анализа результатов эксперимента были решены следующие задачи:

- 1. Агрегация и систематизация полученных данных;
- 2. Выбор информативных метрик для оценки точности\качества разметки на уровне отдельных волонтёров и в целом;
- 3. Оценка точности волонтёров на основе метрик: средние показатели, распределение точностей внутри группы, ранжирование волонтёров по точности;
- 4. Оценка пространственных тенденций точности волонтёров на больших (неоднородных) территориях и оценка возможности идентификации «простых» территорий (с высокой точностью большинства участников-волонтёров) и «сложных» территорий (в которых недостаточно результатов только волонтёров и будет необходимо привлечение экспертов) на основе стратификации GAEZ (Global Agro-Ecological Zones).

были следующие В рамках эксперимента использованы определения. «Волонтёры» — это участники эксперимента без опыта или с базовым опытом в дешифрировании спутниковых изображений и ДЗЗ. Волонтёрам проводится краткий инструктаж по фотоинтерпретации спутниковых снимков, а также по системе, в которой выполняется работа («Bera-Science»), описываются дешифровочные признаки для корректного отнесения объекта на снимке к соответствующему классу. Задачей волонтёров было по временному ряду изображений определить тематический класс объекта вокруг заданного точечного объекта, нарисовать однородный с точки зрения сезонной динамики объект и присвоить ему метку соответствующего класса. «Эксперты» — это участники эксперимента с опытом обработки и дешифрирования спутниковых изображений. Задачей экспертов было создание контрольной разметки, которая считалась истинной на дальнейших этапах работы. Контрольная выборка охватывает только часть точек, обработанных волонтёрами, и служит для проведения оценки точности. Обрабатываемые объекты были распределены главным образом по Европейской части России и соответствовали группе классов из карты растительного покрова GlobeLand30. Инструмент аннотирования позволял выбирать из классов «пашня», «не пашня» и «неизвестно». Метка «неизвестно» использовалась в случае любого рода затруднений при интерпретации, и при оценке точностей далее не учитывалась (и не считалась за ошибку). «Используемая пашня» — участок земной поверхности, имеющий в распашки, сезоне признаки выращивания яровых исследуемом И озимых сельскохозяйственных культур или обработки с целью сенокошения. «Не пашня» участок земной поверхности без соответствующих признаков использования в исследуемом сезоне (рисунок 7.1.1.1).

Всего в эксперименте приняли участие 11 волонтёров и несколько экспертов. В среднем участник-волонтёр за выделенное ему время интерпретировал не менее 400 точечных объектов на территории Европейской России и прилегающих стран. Участниками использовались доступные в системе «Вега-Science» спутниковые данные, прежде всего, архивы данных спутников Landsat и Sentinel-2, а также временные ряды вегетационного индекса NDVI по данным MODIS за 2017 г.

С целью обеспечения репрезентативности и полноты получаемой разметки, точки по территории анализа распределялись методом случайного стратифицированного сэмплинга в несколько этапов:

1. Карта наземного покрова GlobeLand30 с пространственным разрешением 30 м была использована для идентификации территорий, соответствующих классу «культивируемые земли» и «луга»;

- 2. Для этих территорий была проведена сегментация временных серий данных MODIS, в результате были получены однородные с точки зрения пространственновременной сезонной динамики участки растительного покрова;
- 3. Для каждого сегмента определён его центроид;
- 4. Проведено регулярное прореживание центроидов, в результате чего на каждого участника приходилось от 200 до 500 уникальных точечных объектов, расположенных в различных агрозонах GAEZ.





Рисунок 7.1.1.1 — Вид интерфейса аннотирования объектов в системе «Вега» для фотоинтерпретации спутниковых данных (*a*) и расположение проинтерпретированных контрольных и остальных объектов на территории Европейской РФ и сопредельных стран на фоне карты зон агростратификации GAEZ (*внизу*)

Для оценки точности волонтёров были использованы метрики F1-score по классам «пашня» и «не-пашня», а также общая точность (Overall Accuracy). В результате общее количество точечных объектов, доступных для анализа в рамках эксперимента составило 4866, из них почти половина (2437) были контрольными, т.е. были интерпретированы также и экспертами (см. рисунок 7.1.1.1). Среднее количество точек на одного участника эксперимента составило 454 с дисперсией 20. Среднее количество контрольных точек на

участника составило 221 с дисперсией 10. По результатам эксперимента в среднем около 2 % точек участники не смогли интерпретировать и поставили метку «неизвестно».

На рисунке 7.1.1.2 представлены гистограммы распределения общего количества точек на участника и распределение количества контрольных точек, а также соответствующие диаграммы размаха. Нормальное распределение контрольных точек по участникам эксперимента свидетельствует о равномерном и репрезентативном покрытии контрольными точками и гарантирует сравнимость результатов оценки точности участников. Для оценки стабильности результата волонтёра были построены гистограммы распределения точности в зависимости от агрозоны (по трём метрикам отдельно). Гистограммы всех 11 участников, совмещённые на одном графике, позволяют сравнить и ранжировать участников.



Рисунок 7.1.1.2 — Гистограммы распределения числа всех точек по участникам (вверху слева), распределение числа контрольных точек по участникам (вверху справа), а также распределения метрик точности по агрозонам для каждого из 11 участников: общей точности (слева внизу), метрики F1-score по классу «пашня» (в центре внизу) и метрики F1-score по классу «не пашня» (справа внизу)

Было обнаружено, что общая точность распознавания класса «не-пашня» в среднем выше точности распознавания класса «пашня», а общая точность не опускается ниже 0.65. Средняя общая точность бинарной классификации объектов волонтёрами составила 0.87 со стандартным отклонением 0.06. Точность распознавания класса «пашня» составила 0.86 (стандартное отклонение 0.09), точность распознавания класса «не-пашня» составила 0.88 (стандартное отклонение 0.05), что в целом говорит о понимании поставленной задачи участниками и относительно высоком качестве её выполнения, на что также указывает невысокие отклонения в точностях среди волонтёров. Необходимо также отметить, что идентифицировать класс «не-пашня» участникам оказалось проще, о чём также говорит и более высокое стандартное отклонение точности для класса «пашня», чем для класса «не-пашня».

На агрозону пришлось минимум 12 точек, максимум - 656 (стд. откл. 123), из них с контролем оказалось от 6 до 261 точки (стд. откл. 54). В среднем на агрозону пришлось 44 контрольных точки. Доля объектов класса «пашня» заметно менялась между агрозонами

на протяжении зоны анализа ETP: от 0 до 0,87 (среднее 0,40, стд. откл. 0,23). Результаты оценки точности распознавания пашни по агрозонам показали, что средняя общая точность классификации внутри страты практически равна общей точности и даже превышает её (0,88 по страте и 0,87 средняя точность волонтёра по всем стратам вместе), но отличается более высоким стандартным отклонением по сравнению с общей точностью (0,09 против 0,06). При этом точность распознавания класса «пашня» в среднем по агрозоне ожидаемо ниже точности распознавания класса «не-пашня», а высокое стандартное отклонение (0,22) для метрики F1-score по классу «пашня» говорит о сильной вариабельности точности между агрозонами (рисунок 7.1.1.3).



Рисунок 7.1.1.3 — Картограммы значений метрики F1-score по агрозонам GAEZ (вверху) и дисперсия значений между участниками (внизу) для классов «пашня» (слева) и «не пашня» (справа)

Таким образом, проведённый в рамках этих работ эксперимент показал применимость предложенных решений к созданию разметки на базе краудсорсинга, а именно:

- возможность организации работ на базе инструментария системы «Вега-Science»;
- возможности объективной оценки точности полученного набора данных;
- возможности формирования достаточно репрезентативной выборки для бинарной классификации на большие неоднородные территории;
- возможности оценки пространственных тенденций точности и использования полученных результатов для гибкого управления уровнем участия квалифицированных экспертов.

Предложенные подходы к организации и количественному контролю создания разметки с привлечением волонтёров можно использовать для получения достоверных и быстро формируемых опорных данных на большие территории.

7.1.2 Разработка инструмента экспертной валидации растровых карт в системе «Bera-Science»

В 2022 г. был разработан и внедрён в состав системы ВЕГА-Science специальный информационный инструмент для экспертной валидации растровых карт, полученных с использованием спутниковых данных. С его помощью возможна валидация карт по узлам

регулярной сетки. На рисунке 7.1.2.1 представлен внешний вид этого инструмента. регулярной сетки задаются контролирующим процесс Параметры валидации исследователем с расширенными правами. По параметрам шаг и сдвиг первого узла создается набор точек для каждого попавшего в узел сетки пикселя. Шаг задаётся в пикселях самой карты. Сдвиг также задаётся в пикселях карты и необходим для случайного перераспределения узлов при пересоздании набора. Далее исследователи с ограниченными правами (только на правку ранее созданного ранее набора, без возможности его создания) могут подтверждать или отклонять значение в каждом таком узле. В случае, если класс задан верно, оператор подтверждает данный уел карты. Если класс задан неверно, то данный узел помечается ошибочным. По результатам такой проверки корректности карты получается информация о корректности карты в каждом узле созданной сетки. На основе этой информации рассчитывается матрица ошибок и общие показатели точности карты, а именно точность, полнота, fl-оценка. Инструмент был отработан на примере анализа точности экспериментальных карт пахотных земель и древесно-кустарниковой растительности по данным с пространственным карт разрешением 10 м на пиксель на отдельные регионы России.



Рисунок 7.1.2.1 — Внешний вид инструмента валидации растровых карт в составе картографического интерфейса системы ВЕГА-Science на примере экспериментальной карты пашни на Московскую область. Карта является бинарной маской, где в каждом пикселе помечено, относится ли он к пашне или нет. Подтверждённые (верные) узлы сетки с классом «пашня» помечены зелёным, верные узлы с классом «не пашня» помечены фиолетовым. Узлы, в которых в карте ошибка помечены оранжевым (класс «пашня») или красным (класс «не пашня»)

7.2 Алгоритм приведения измеренных с высоким спектральным разрешением микроволновых спектров собственного микроволнового излучения атмосферы в нестационарных состояниях к единому моменту времени

Работа выполнялась совместно с Фрязинским филиалом Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Фрязино.

Актуальная задача дистанционного зондирования состояния и динамики атмосферы — получение данных, характеризующих нестационарные, быстро меняющиеся гидрометеорологические условия. Важным частным случаем таких наблюдений выступает микроволновое зондирование собственного радиотеплового излучения атмосферы в условиях разрывной облачности, движущейся в поле зрения прибора. В безоблачной атмосфере результаты такого зондирования успешно применяются для восстановления полей температуры и влажности атмосферы (в том числе, их вертикального распределения). Наличие облаков резко меняет применяемый сигнал за счёт наличия на пути распространения излучения жидко-капельной влаги и/или кристаллов льда. Учёт их влияния и восстановление общего содержания воды в облаках принципиально возможны, однако, речь может идти о некоторых «эффективных» значениях, характеризующих пятно и интервал наблюдения в целом. Оправданность использования таких «эффективных» оценок во многом зависит от того, в какой степени состояние атмосферы можно считать неизменным в области и интервале времени наблюдений. Наиболее критичен этот вопрос при наблюдении нестационарных, быстро меняющихся атмосферных состояний, представляющих особый интерес в связи с тем, что они часто связаны с процессами крупномасштабной (мезомасштабной) изменчивости: прохождением фронтов, развитием сильных ветров, резкой сменой погодных условий.

В ходе продолжающейся работы по исследованию микроволновых спектров собственного излучения атмосферы с поверхности Земли с помощью радиометраспектрометра Р22М (разработка СКБ ИРЭ РАН и ФИРЭ РАН) предложен алгоритм эффективного приведения измеренных спектров к единому моменту времени. Прибор Р22М измеряет спектр микроволнового излучения в диапазоне частот 18-27,2 ГГц со спектральным разрешением 200 МГц. Регистрация сигнала основана на супергетеродинной схеме с программируемым синтезатором частот, что позволяет получать до 47 частотных каналов с шагом 0,2 ГГц внутри указанного частотного диапазона. Измерения проводятся одновременно на двух заданных частотах, разнесённых на 3,2 ГГц. Для регистрации полного спектра необходимо последовательное сканирование на 31 рабочей частоте гетеродина, что занимает около 11 с. При этом 15 частотных каналов в середине диапазона дублируются, то есть измерения на частотах 21,2–24,0 ГГц выполняются дважды: в начале и в конце каждого цикла измерений. Рабочий цикл измерений изображён на рисунок 7.2.1.



Рисунок 7.2.1 — Циклограмма работы Р22М (см. описание в тексте)

По горизонтальной оси на рисункt 7.2.1 отложены номера частотных каналов. По вертикальной оси — время. Цикл измерений начинается на парных частотах 18 и 21,2 ГГц (на циклограмме парные частоты показаны разными цветами: нижняя — красным, верхняя — синим). Через интервал, равный времени накопления сигнала, осуществляется переключение на следующую пару частотных каналов с шагом 200 МГц (18,2 и 21,4 ГГц). Таким образом последовательно формируются низкочастотная (обозначенная красным цветом) и высокочастотная (синим) ветви измеряемого спектра. Начиная с частоты 21,2 ГГц эти ветви перекрываются (в середине циклограммы на рисунке). Такое перекрытие происходит в 15 последовательных частотных каналах. К этому моменту высокочастотная ветвь спектра достигает канала максимальной частоты (27,2 ГГц), после

чего рабочий цикл заканчивается и начинается следующий. Как указано выше, длительность выполнения одного рабочего цикла составляет $T \approx 11$ с.

Для получения спектра, характеризующего «мгновенное» состояние атмосферы, требуется пересчитать данные измерений, приведя их в пределах цикла измерений к единому моменту времени *t*₀. В качестве такого момента времени было выбрано время начала текущего рабочего цикла. Таким образом, начальные измерения каждого цикла не проходили процедуру интерполяции, а для измерений в остальных каналах было выполнено условие

$$t - T < t_0 < t_i < t_i + T,$$

где t_i — момент времени измерения в *i*-м канале в текущем рабочем цикле.

Сделав замену $x = t - t_i$, смещающую начало отсчёта времени к моменту измерения в *i*-м канале, и предполагая, что изменения сигнала во времени хорошо описываются квадратичной зависимостью $s_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$, находим значение $s_i(x_0)$, где $x_0 = t_0 - t_i$, по известным (измеренным) значениям $s_i(0)$, $s_i(\pm T)$, восстановив значения a_i , b_i , c_i :



б

Рисунок 7.2.2 — Примеры спектров собственного радиотеплового излучения атмосферы в нестационарных условиях: *а* — до временной коррекции; *б* — после коррекции

Полученное значение $s_i(x_0)$ и является искомым, интерполированным по времени, значением сигнала в *i*-м частотном канале, эффективно приведённом к моменту начала рабочего цикла.

Для проверки качества интерполяции были проведены расчёты средних величин невязки в перекрывающихся частотных каналах в сеансах калибровки и атмосферных измерений до и после приведения спектров к единому моменту времени. Пример приведён на рисунке 7.2.2, визуализирующем один из сеансов измерений атмосферного спектра.

Выборочная обработка данных показала, что наблюдаемые невязки уменьшаются почти на порядок: от 0,89–2,14 К по исходным данным сеансов наблюдения атмосферы до 0,08–0,27 К после коррекции.

Таким образом, реализована возможность накопления данных «мгновенных» спектров собственного микроволнового излучения атмосферы в диапазоне 18-27,2 ГГц в сложных. быстро меняющихся гидрометеорологических условиях с высоким спектральным разрешением и удовлетворительной радиометрической погрешностью. Остаточные средние невязки между двумя ветвями спектра сопоставимы с погрешностью измерений в отдельных каналах (около 0,1-0,3 К). Это делает формируемые наборы данных важным источником подспутниковой информации, которую можно использовать калибровки дистанционных измерений и построения интересах (уточнения) В геофизических функций восстановления атмосферных параметров В сложных метеорологических условиях.

7.3 Валидация спутниковых алгоритмов определения значений мутности и концентрации взвешенного вещества на основе квазисинхронных подспутниковых натурных измерений

С целью валидации спутниковых алгоритмов определения значений мутности и концентрации взвешенного вещества в апреле-мае 2022 г. были проведены подспутниковые натурные измерения в прибрежных водах Чёрного моря в районе выноса (плюма) р. Мзымта. Во время пяти выходов в море на маломерном судне (25, 26, 27, 30 апреля и 3 мая) были проведены измерения мутности морской воды на 106 гидрологических станциях (рисунок 7.3.1).



Рисунок 7.3.1 — Расположение станций подспутниковых измерений 25 апреля 2022 г. на MSI Sentinel-2A, каналы 4, 3, 2. Числа у маркеров — номера станций

На каждой станции измерений проводился также отбор проб воды для дальнейшего определения концентрации взвешенного вещества в различных областях плюма. Накопленный массив данных натурных измерений позволил продолжить эксперименты по валидации спутниковых алгоритмов по определению мутности и концентрации взвешенного вещества, которые основываются на данных сенсоров оптического диапазона высокого пространственного разрешения, таких как MSI Sentinel 2A/2B, OLI Landsat-8. Одной из задач экспедиционных работ 2022 г. было провести валидацию данных новейшего сенсора OLI-2 спутника Ladsat-9, запущенного 27 сентября 2021 г. и полностью введенного в эксплуатацию в январе 2022 г. Наличие на орбите двух спутников серии Landsat позволяет получать больше информации над одним и тем же местом, а главное, увеличивается число квазисинхронных данных приборов MSI и OLI. В частности, 25 апреля 2022 г. при проведении подспутниковых измерений в районе плюма р. Мзымта были получены два квазисинхронных изображения OLI Landsat-9 в 08:01:29 UTC и MSI Sentinel-2 в 08:27:36, т.е. с разницей в 26 минут. Для данных этих двух приборов были применены спутниковые алгоритмы Nechad 2016 и Dogliotti, и было проведено сравнение полученных результатов для всех станций натурных измерений, осуществленных в этот день. Анализ результатов расчетов различных алгоритмов по восстановлению мутности морской воды, подтвердил полученные ранее выводы: алгоритм Dogliotti в приустьевых зонах завышает в несколько раз значения мутности, если измеряемый диапазон величин сравнительно небольшой — 60–90 НТУ. Для небольших значений мутности лучшее согласование с натурными данными показывает алгоритм Nechad 2015. Достоверность аппроксимации как для данных Landsat-9, так и для данных Sentinel-2 около 0,8 в обоих случаях (рисунок 7.3.2).



Рисунок 7.3.2 — Диаграмма рассеяния значений мутности морской воды, определённой с помощью портативного турбидиметра (Turb *in situ*) и значений, полученных на основе данных MSI Sentinel-2A от 25 апреля 2022 г. (Turb satellite)

Первые результаты валидации новейшего сенсора OLI-2 Landsat-9 подтвердили адекватность получаемых параметров. Однако по сравнению с сенсором MSI, данные OLI-2 несколько занижены (рисунок 7.3.3). Аналогичные работы были проделаны и по валидации спутникового алгоритма Nechad 2015, определяющего концентрацию взвешенного вещества. Результаты, полученные при применении этого алгоритма для

данных OLI-2 Landsat-9 и в этом случае оказались заниженными по сравнению с результатами, полученными на основе данных MSI.



Рисунок 7.3.3 — Диаграмма рассеяния значений мутности морской воды, определённой с помощью портативного турбидиметра (Turb *in situ*) и значений, полученных на основе применения алгоритма Nechad для данных сенсоров MSI Sentinel-2A и OLI Landsat-9 от 25 апреля 2022 г. (Turb satellite)

Для того чтобы накопить достаточную для статистической обработки выборку данных подспутниковых измерений, полученных в безоблачные дни синхронно со спутниковой съёмкой, необходимо продолжить работы по валидации спутниковых алгоритмов в следующем году.

7.4 Определение трехмерной структуры вихревых диполей на основе спутниковых данных и измерений in-situ

Район юго-восточной части Балтийского моря известен своей вихревой активностью. Субмезомасштабные вихри, а также их разновидности в форме вихревых диполей регулярно наблюдаются как в Гданьском заливе, так и в акватории северней Самбийского п-ова. Механизмы образования субмезомасштабных вихревых структур многообразны. К основным из них можно отнести: ветровой импульс, неоднородности атмосферного потока, сдвиговая неустойчивость течений, речной сток, взаимодействие вихрей разных масштабов и их диссипация во времени, взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт). Вихри и вихревые диполи регулярно идентифицируются на спутниковых радиолокационных и оптических изображениях. Спутниковые изображения позволяют определять пространственные характеристики вихрей, а при наличии серии последовательных изображений и скорость их распространения. Проведённые подспутниковые измерения позволяют исследовать трёхмерную структуру. С этой целью были проведены измерения с маломерного судна в юго-восточной части Балтийского моря севернее Самбийского полуострова синхронно со спутниковой съёмкой.

По последовательной серии из пяти спутниковых изображений высокого разрешения с сенсоров MSI Sentinel-2A,В и SAR-C Sentinel-1, на которых были выявлены два вихревых диполя, удалось оценить динамику подобных динамических процессов в

пространстве и во времени. Было получено, что подобные вихревые образования в прибрежной зоне моря могут существовать не менее пяти суток. Формирование подобных структур в регионе происходит под действием ветровой ситуации с отличительным циклоническим характером завихренности и при отсутствии действия длительных ветров одного направления. Вихревые диполи распространялись со скоростью порядка 6–9 см/с, существенно увеличиваясь в размерах с момента образования, более чем в два раза (рисунок 7.4.1). Распространение вихревых диполей в пространстве происходит симметрично и определяется воздействием сформировавшихся в акватории моря течений, в то время как преобладающая ветровая динамике в регионе оказывает на движение подобных структур меньшее влияние.



Рисунок 7.4.1 — Схема распространения вихревых диполей во времени с момента образования и до момента последнего проявления на спутниковых изображениях. Красными и синими точками показаны центры циклонических вращений каждой вихревой структуры

Во время проведения океанографических исследований удалось провести измерения параметров выявленных на спутниковых изображениях вихревых диполей с помощью судового акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) и СТДзонда. На рисунке 7.4.2 представлена схема измерений параметров вихревого диполя с помощью ADCP.

Результаты экспериментальных исследований показали, что формирование прибрежных вихревых образований происходит в районах выдающихся в море мысов при огибании их прибрежным сильным вдольбереговым течением. По данным измерений ADCP показана ситуация отсутствия за выдающимися в море мысами установившихся течений, наблюдавшихся до момента подхода к мысу. Этот факт позволяет говорить о вовлечении прибрежных вод в динамический процесс формирования «ножки» вихревого диполя. Прямые контактные наблюдения различных частей вихревого диполя позволяют сделать вывод, что влияние подобных структур прослеживается до глубины 20 м, а сами вихревые структуры не являются сугубо поверхностными проявлениями местной циркуляции вод. При этом динамика вод внутри самих вихревых диполей неоднородна: циклоническая часть диполя имеет более высокие скорости горизонтального движения вод, до 20 см/с, в то время как скорости потока в антициклонической части существенно ниже, не более 10 см/с. На основе результатов контактных океанографических измерений установлено влияние вихревых диполей на гидрологическую структуру вод, что выражается в локальном подъеме изотерм к поверхности. Величина вовлечения (подъёма) нижележащих вод в циклоническую завихренность на примере изотермы 20 °C составляет порядка 5 м.



Рисунок 7.4.2 — Схема проведения экспериментальных работ по исследованию структуры течений в регионе обнаружения вихревого диполя за 14.07.2021. Общая схема (*слева*); увеличенный фрагмент с пересечением маломерным судном вихревого диполя (*справа*)

7.5 Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи

Контроль водных ресурсов на основе использования только данных наземных измерительных постов, особенно в случаях, когда он осуществляется службами различных государств, сталкивается с трудностями в получении однородной информации на протяжении всего течения трансграничных рек. Поэтому задача развития различных подходов и методов в получении объективной, однородной информации о состоянии рек региона на основе данных спутниковых наблюдений является крайне актуальной. Значимость таких методов во многом определяется тем, что они могут обеспечить получение объективной информации о состоянии различных участков русел рек и расходов водных ресурсов в независимости от государственной принадлежности территории, по которой данные реки протекают. Следует также отметить, что использование таких подходов и методов могло бы существенно упростить получение информации о состоянии водных объектов на труднодоступной территории. Для решения данной задачи был предложен подход организации дистанционного контроля расхода воды в различных местах течения рек на основе регулярного мониторинга ширины русла реки с использованием данных спутникового мониторинга. Для решения данной задачи предлагается использовать технологию создания так называемых «космических гидропостов» (КГП), представляющих из себя привязанные к определённым участкам реки полигоны, в границах которых на основе спутниковых наблюдений проводится оценка площади покрытой водой в конкретные моменты времени.

В рамках темы «Мониторинг» были проведены работы по оценке возможностей использования предлагаемой технологии для мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи. В работе были рассмотрены основные задачи и возможности предлагаемой технологии, в том числе задачи выбора оптимальных участков рек для КГП, схемы их установки и калибровки, а также объединения отдельных КГП во взаимосвязанные последовательности (сети). На примере совместного анализа

спутниковых данных и данных стационарного гидропоста Керки (Туркменистан) на реке Амударье были опробованы подходы построения сети КГП и проведены оценки эффективности работы её работы на основе анализа временных рядов суточных стоков в районе гидропоста Керки за три года — 2014, 2016, 2018 гг.

Проведенные эксперименты показали, что в целом предложенная технология КГП работоспособна и позволяет создавать и калибровать на основе данных наземных измерительных постов, как отдельные КГП, так и их сети. Предложенная технология может использоваться для расширения возможностей наземных сетей гидропостов с точки зрения более детального анализа состояния рек, в первую очередь на труднодоступных участках.

Созданные в рамках проведённой работы подходы и методы обработки спутниковых данных могут служить основой для автоматизации процесса формирования сетей КГП и внедрения их в системы контроля состояния водных ресурсов. При этом следует также учитывать, что регулярность и оперативность получения данных ДЗЗ в перспективе может позволить динамически обновлять и корректировать построенные модели калибровки КГП, снижая их зависимость от наземных данных. В дальнейшем предполагается продолжить развитие технологии КГП и создание их сетей для анализа состояния различных рек.

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Мониторинг-Валидация» проводились в полном соответствии с утвержденным планом. В их рамках решены задачи и получены результаты по следующим основным направлениям:

- Валидация разрабатываемых методов и подходов обработки и анализа спутниковых данных, в том числе на основе проведения подспутниковых наблюдений;
- Алгоритм приведения измеренных с высоким спектральным разрешением микроволновых спектров собственного микроволнового излучения атмосферы в нестационарных состояниях к единому моменту времени;
- Валидация спутниковых алгоритмов определения значений мутности и концентрации взвешенного вещества на основе квазисинхронных подспутниковых натурных измерений;
- Определение трёхмерной структуры вихревых диполей на основе спутниковых данных и измерений *in situ*;
- Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что намеченные работы по направлению «Мониторинг-Валидация» в 2022 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 8 МОНИТОРИНГ-ИНФРАСТРУКТУРА

Введение

В настоящей главе отчёта представлены основные результаты, полученные в рамках работ по направлению «Мониторинг-Инфраструктура», определённых в плане НИР ИКИ РАН на 2021–2023 гг.

- Ежегодное проведение научной конференции и выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»;
- Проведение научных семинаров и школ-конференций;
- Подготовка и повышение квалификации кадров на базе НОЦ ИКИ РАН.

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2022 г. результаты также изложены в следующих публикациях [15, 32–34, 49, 76, 94].

8.1 Проведение ежегодной международной конференции и выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<u>http://conf.rse.geosmis.ru/</u>)

8.1.1 Проведение ежегодной международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://conf.rse.geosmis.ru/)

С 14 по 18 ноября 2022 г. в Институте космических исследований Российской академии наук была проведена Двадцатая юбилейная международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://conf.rse.geosmis.ru/). Конференция проводилась в смешанном очно-онлайн формате. Все мероприятия конференции транслировались через ZOOM, одновременно проходило 5 заседаний секций. Видео всех заседаний выложено в YouTube, с ними можно ознакомиться на сайте

https://youtube.com/playlist?list=PL8RPBtcOOJAwZxgJsFnMBVc9CyKFXffg6.

- Работа конференции осуществлялась в рамках следующих секций и заседаний:
- два пленарных заседания, посвящённых достижениям в различных областях дистанционного зондирования Земли из космоса в XXI веке;
- методы и алгоритмы обработки спутниковых данных;
- технологии и методы использования спутниковых данных в системах мониторинга;
- вопросы создания и использования приборов и систем для спутникового мониторинга состояния окружающей среды;
- дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов;
- дистанционные исследования поверхности океана и ледяных покровов;
- дистанционное зондирование ионосферы;
- дистанционные методы в геологии и геофизике;
- дистанционное зондирование растительных и почвенных покровов;
- дистанционное зондирование планет Солнечной системы.
- проблемные вопросы внедрения и использования цифровых сервисов и услуг на основе данных ДЗЗ из космоса.

В рамках конференции был проведён круглый стол «Исследование многолетней фенологии водных объектов Арктики и Субарктики по данным спутникового дистанционного зондирования», на котором было представлено 20 докладов, охватывающих все аспекты исследования процессов в Арктике дистанционными методами.

Мероприятия конференции проходили в ИКИ РАН (основные пленарные заседания и заседания тематических секций), и НЦ ОМЗ ОАО Российские космические системы (выездное заседание «Проблемные вопросы внедрения и использования цифровых сервисов и услуг на основе данных ДЗЗ из космоса»).

Всего на конференции было представлено 528 докладов, из них 320 устных и 199 стендовых. В конференции приняли участие учёные и специалисты из 16 стран (по докладам), 73 городов и из 209 организаций. Для участия в конференции зарегистрировалось 965 человек.

Детальная информация о прошедшей конференции, в том числе электронный сборник материалов конференции и on-line трансляция доступны на сайте конференции по адресу: http://conf.rse.geosmis.ru/. Сборник материалов Конференции публикуется также на сайте Электронной российской библиотеки Elibrary и индексируется в системе РИНЦ.

8.1.2 Выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://conf.rse.geosmis.ru/)

По состоянию на начало декабря 2022 г. было выпущено пять номеров очередного Девятнадцатого тома научного журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 6-й номер журнала будет опубликован в конце декабря. Всего в 2022 г. планируется опубликовать около 150 статей.

Все опубликованные в журнале статьи находятся в свободном доступе на сайте журнала по адресу: http://jr.rse.cosmos.ru/.

Журнал входит в список рекомендованный ВАК и индексируется системами ядро РИНЦ, RSCI и Scopus.

В соответствие тематическим и сводным рейтингом журналов RSCI по состоянию на 1 декабря 2022 г. (<u>https://elibrary.ru/projects/rsci/rsci raiting 22.asp</u>) журнал входит в первый квантиль и занимает 14-е место в направление физические науки и астрономия (https://elibrary.ru/projects/rsci/rsci_raiting_22.asp)

8.2 Проведение научных семинаров и школ-конференций по фундаментальным проблемам ДЗЗ из космоса

8.2.1 Проведение ежегодной Всероссийской научной школы-конференции молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса (<u>http://conf.rse.geosmis.ru/</u>)

В рамках конференции была организована Восемнадцатая Всероссийская научная школа-конференция молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса. Во время проведения Школы-конференции были прочитаны лекции ведущими российскими учёными в области методов дистанционного зондирования наземных экосистем для мониторинга их бюджета углерода. С со списком лекций прочитанных в рамках Школы-конференции ознакомиться по адресу http://conf.rse.geosmis.ru/schedule.aspx?page=236#s1.

Прочитанные лекции доступны в настоящее время для свободного просмотра по адресам:

https://www.youtube.com/watch?v=bitFrhYZaeY

https://www.youtube.com/watch?v=4tIx1owAwr8

Школа-конференция была совместно организована ИКИ РАН и Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта «Космическая научная обсерватория углерода лесов России» (грант № 19-77-30015).

В рамках конференции были также проведены два мастер-класс на темы «Оценка используемости сельскохозяйственных угодий с использованием спутникового сервиса Вега», который провели сотрудники ИКИ РАН; и «Демонстрация процесса заказа данных из федерального фонда ДЗЗ, просмотр готовой продукции на геопортале», который провели сотрудники НЦ ОМЗ.

Лекции и мастер-класс транслировались также в online режиме. Молодые учёные представили 46 устных и 17 стендовых докладов.

8.2.2 Проведение Всероссийского семинара «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<u>http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=814</u>)

В 2022 г. в ИКИ РАН продолжил свою работу Всероссийский научный семинар «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Этот формат является хорошим дополнением к уже проходящим в нашей стране регулярным конференциям, посвящённым данной проблеме. Он позволяет иметь постоянно действующую площадку для обсуждения различных вопросов, связанных с проблемами дистанционного зондирования Земли из космоса. Семинар проходит в смешанном очно-онлайн формате с трансляцией через Zoom. С видеозаписями прошедших семинаров можно ознакомиться на сайте семинара

8.3 Проведение работ по подготовке и повышению квалификации кадров на базе Научно-образовательного центра ИКИ РАН. В том числе:

8.3.1 Участие в проведении дней «открытых дверей» и экскурсий в ИКИ РАН, а также научно-образовательных лекций для школьников, студентов и аспирантов в части представления возможностей направления «Дистанционного зондирования и исследования Земли из космоса»

В рамках работы со школами был проведены «Дни открытых дверей», на которых школьники знакомились с деятельностью ИКИ РАН, могли узнать о сотрудничестве с вузами; поддерживалась работа выставочного зала ИКИ РАН, в котором представлены как направления деятельности Института, так и макеты космических аппаратов; проводилось чтение научно-популярных лекций; консультаций, рецензирование и руководство научными работами школьников.

Часть работ велась в рамках грантов Департамента образования и науки по программе «Академический класс в московской школе» (http://docs.cntd.ru/document/456037056).

«Дни открытых дверей» проводились 16 апреля и 8 октября. Количество посетителей каждого — более 250 человек.

Проводилась работа по гранту Департамента образования по организации и проведению проектных работ и научно-исследовательских каникул для школьников. Были организованы занятия для школьников и учителей.

В 2022 г. в ИКИ РАН проводилась Летняя космическая школа, в организации которой участвовали сотрудники ИКИ РАН. В рамках Школы была организована секция по Дистанционному зондированию Земли из космоса.

8.3.2 Проведение конкурсов работ молодых учёных, работающих в области дистанционного мониторинга Земли, природных и антропогенных сред

Проводится организация конференций и школ молодых учёных по вопросам исследования и использования космического пространства, поддерживается участие молодых учёных ИКИ РАН в работе профильных школ и конференций, в том числе международных.

В 2022 г. были проведены следующие молодёжные мероприятия:

- ХІХ Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики. Представлено 150 докладов. По результатам конференции изданы Труды конференции.
- Ежегодная секция в рамках Научной конференции МФТИ. В секции участвовало 32 докладчика.

Были поддержаны поездки аспирантов на Международный Астронавтический конгресс и «Коспар».

8.3.3 Научно-методическое обеспечение работ базовых кафедр ИКИ РАН и образовательных курсов, проводимых специалистами ИКИ РАН, по направлению «Дистанционного зондирования и исследования Земли из космоса»

Осуществляется сопровождение работы базовой кафедры Московского физикотехнического института (научно-исследовательского университета) «Космическая физика».

В 2022 г. проходило обновление существующих лекционных курсов.

Осуществляется сотрудничество в сфере подготовки научных кадров с различными вузами (РУДН, МИФИ, МИИГАиК, Мехмат МГУ, Физфак МГУ, МАИ, МАТИ, БГУ, РХТУ, ОМГТУ и др.), что позволяет привлечь талантливую молодежь к научным исследованиям. Студенты занимаются научно-исследовательской работой по индивидуальному плану, проходят практику, готовят дипломные проекты, участвуют в научно-исследовательских проектах.

Основные формы сотрудничества ИКИ РАН с высшими учебными заведениями следующие:

- руководство научно-исследовательской работой студентов;
- обмен научно-педагогическими кадрами для чтения лекций, проведения семинаров, участие в Государственных аттестационных и экзаменационных комиссиях;
- проведение практик со студентами, магистрантами, аспирантами;
- консультирование и руководство подготовкой курсовых работ, дипломных работ и проектов.

В 2022 г. в ИКИ РАН централизованно проходили практику студенты Московского авиационного института (12 человек), МИИГАИК (15 человек).

Заключение

Представленные в данной главе материалы показывают, что работы по направлению «Мониторинг-Инфраструктура» проводились в полном соответствии с утверждённым планом. В их рамках решены задачи и получены результаты по следующим основным направлениям:

- Ежегодное проведение научной конференции и выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»;
- Проведение научных семинаров и школ-конференций;
- Подготовка и повышение квалификации кадров на базе НОЦ ИКИ РАН.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Инфраструктура» в 2022 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 9 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИКИ РАН

9.1 Спутниковый мониторинг динамики углерода в лесах России

В 2022 г. ИКИ РАН совместно с ЦЭПЛ РАН и СФУ на основе спутниковых данных дистанционного зондирования, выборочных наземных наблюдений и моделей получены оценки запасов углерода лесов России в 2001–2021 гг. В 2021 г. растительная биомасса лесов содержала 55,8×10⁹ т С, при доле запаса углерода в фитомассе деревьев — 73,7 %, напочвенного покрова – 11,3 %, мортмассы – 15,0 %. Анализ временного ряда данных о запасе углерода в растительной биомассе лесов позволил установить, что его величина за исследуемый период выросла на 7.8 % средней при скорости нарастания 210,5×10⁶ т С год⁻¹ (рисунок 9.1.1). Полученная карта (рисунок 9.1.2) позволяет выделить территории с положительной и отрицательной динамикой углерода в лесах, где его снижение преимущественно связано с нарушениями деструктивными факторами (рубки, пожары и др.).





36DACA VEDEROR

Рисунок 9.1.1 — Динамика запаса углерода в растительной биомассе лесов России

Рисунок 9.1.2 — Изменение запаса углерода в растительной биомассе лесов России, 2001–2021 гг.

9.2 Технология контроля данных сельскохозяйственной микропереписи 2021 года об использовании сельскохозяйственных угодий на основе средств спутникового мониторинга

ИКИ РАН и ООО «ИКИЗ» по заказу Росстата создали и внедрили технологию контроля данных сельскохозяйственной микропереписи 2021 г. (далее — СХМП) об использовании с/х угодий на основе средств спутникового мониторинга (далее — Технология). Разработанная Технология позволила в максимально автоматизированном режиме провести обработку спутниковых данных для получение информацию о с/х землях и их использование в 2021 г. и её сравнение с данными СХМП, для оценки достоверности полученной статистической информации. Технология активно использовалась на этапе подведения итогов СХМП в 2022 г. на территории всех с/х регионов России. Опыт применения Технологии показал, что она позволяет повысить достоверность статистической информации о состоянии и использование с/х земель и может в дальнейшем использоваться при проведении сельскохозяйственных переписей и статистических наблюдений ежегодных федеральных (сборе текущей сельскохозяйственной статистики).

При создании и внедрении Технологии были использованы решения по организации распределённой работы со сверхбольшими архивами спутниковых данных и результатами их обработки разработанные в рамках темы «Космос-Д» (госрегистрация № 122042500019-6) и методов обработки и анализа спутниковых данных, позволяющих

оценивать различные характеристики с/х земель, которые развиваются в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).



Рисунок 9.2.1 — Примеры районов в европейской части России с выявленными расхождениями между данными СХМП и данными спутниковых наблюдений (слева) и сравнение площади пашни и посевной площади (в районах Российской Федерации с площадью анализируемой категорий земель >50 тыс. га) по данным СХМП и данным спутниковых наблюдений (справа)

РАЗДЕЛ 10 ГРАНТЫ

Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)

19-35-60007	Шинкаренко С.С.	2019-2022
Пространственно-временные закономерности динамики	к.сх.н.	
состояния аридных пастбищных ландшафтов на основе		
анализа спектрально-отражательных свойств		
20-05-00198-a	Тихонов В.В.	2020–2022
Спутниковая микроволновая радиометрия эстуариев	канд. физ-мат.	
российской Арктики — анализ гидрологического	наук	
режима в период ледостава		
20-07-00200-а	Смирнов М.Т.	2020–2022
Развитие методов радиоинтерферометрии в задачах	канд. физ-мат.	
СВЧ радиометрического дистанционного зондирования	наук	
Земли		
20-02-00181	Кудашев Е.Б.	2020–2022
Измерение пристеночных пульсаций давления в	Д.Т.Н.	
условиях воздействия вибраций, акустического шума и		
флуктуаций температуры		

Российский научный фонд (РНФ)

019-77-30015	Барталев С.А.	2019-2022
Разработка методов и технологии комплексного	д.т.н.	
использования данных дистанционного зондирования		
Земли из космоса для развития системы национального		
мониторинга бюджета углерода лесов России в		
условиях глобальных изменений климата		
19-71-20035	Агошков В.И.	2019–2022
Информационно –вычислительная система	д.фм.н.	
вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ		
РАН – Черное море» и её интеграция с программно-		
аппаратным комплексом ЦКП «ИКИ-Мониторинг»		
19-75-20088	Малеев В.В.	2019–2022
Создание опирающейся на данные дистанционного	д.мед.н.	
зондирования Земли методологии анализа и		
прогнозирования влияния климатических и		
экологических факторов на заболеваемость природно-		
очаговыми инфекциями		
19-74-20185	Сирин А.А.	2019–2022
Научные основы учёта, оценки экологического	д.б.н.	
состояния, климатогенной роли и пожарной опасности		
антропогенно измененных торфяных болот на основе		
спутниковых и наземных данных		
19-77-20060	Лаврова О.Ю.	2019–2022
Оценка изменчивости экологического состояния	к.фм.н.	
Каспийского моря в текущем столетии по данным		
спутникового дистанционного зондирования		

РНФ 21-77-00018	Шинкаренко С.С.,	2021-2023
Закономерности динамики состояния ландшафтов	к.сх.н.	
речных пойм зоны недостаточного увлажнения в		
условиях гидрологических и климатических изменений		

Минобрнауки России

№ ЭБ 075-15-2022-1229,	Барталев С.А.,	2022
Применение технологий высокопроизводительных	д.т.н.	
вычислений и больших данных для совместной		
разработки экономически эффективных		
автоматизированных методов широкомасштабного		
биомониторинга водно-болотных угодий		

Программы фундаментальных исследований

МК-4903.2021.1.5	Кашницкий А.В.,	2021-2022
грант Президента РФ для поддержки молодых учёных –	К.Т.Н.	
кандидатов наук		
Разработка метода автоматического детектирования		
постпожарных повреждений леса на основе данных ДЗЗ		
высокого пространственного разрешения и создание		
исследовательской базы данных повреждений лесов		
пожарами на территории России с 2001 по 2022 годы		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что по результатам работ по направлению темы ««Мониторинг» сотрудниками ИКИ РАН опубликовано — 153 работы, из них опубликовано:

- в зарубежных изданиях 8;
- книг 1;
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах 51;
- статьи в сборниках материалов конференций 14;
- материалы конференций 56;
- тезисы, доклады 21;
- патенты 2.

Следует отметить что многие результаты, полученные в рамках выполненных работ по теме «Мониторинг», в том числе возможности, предоставляемые центром коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) используются в настоящее время для выполнения десятков научных проектов, выполняемых в более чем 120 научных и образовательных организациях.

На наш взгляд, важным является и тот факт, что результаты, полученные в рамках различных направлений работ по темы «Мониторинг», внедряется и используется для создания, поддержки и развития специализированных информационных систем дистанционного мониторинга, в том числе:

- Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ Рослесхоз (<u>http://www.pushkino.aviales.ru</u>), предназначенной для сбора информации о пожарах по всей территории России, о состоянии окружающей среды, подготовки информационных продуктов для анализа пожарной обстановки и последствий пожаров и оперативного распространения накопленной информации.
- Отраслевой информационной системы мониторинга Федерального агентства рыбного хозяйства (ОСМ Росрыболовства) (<u>http://osm.smislab.ru/</u>), ориентированной на получение информации о деятельности промысловых судов.
- Информационной системы комплексного дистанционного мониторинга лесов Приморского края («Вега-Приморье») (http://primorsky.geosmis.ru/).
- Информационной системы дистанционного мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил (VolSatView), использующейся как для изучения вулканов, так и для обеспечения полётов авиации (http://volcanoes.smislab.ru).
- Информационной системы Bera-GEOGLAM, развиваемой при поддержке Европейской комиссии и Министерства науки и образования РФ в интересах создания глобальной системы мониторинга сельского хозяйства. (http://vega.geoglam.ru/).
- Объединённой системы работы с данными центров приёма НИЦ «Планета» Росгидромета, которая обеспечивает возможность работы со спутниковой информацией и результатами её обработки для решения различных задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. (http://moscow.planeta.geosmis.ru/).
- <u>Т</u>ехнологии контроля данных сельскохозяйственной микропереписи об использовании сельскохозяйственных угодий (http://agrocensus21.geosmis.ru/).

В заключение отметим, что исходя из представленных в отчёте материалов, работы по теме «Мониторинг» проводились в соответствие с утверждённым планом и полностью выполнены.

публикации

опубликовано — 151 работы, из них опубликовано:

- в зарубежных изданиях 9
- книг 1
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах 49 (из них 9-в печати)
- статьи в сборниках материалов конференций 14
- материалы конференций 55
- доклады, тезисы, циркуляры 21
- Патенты 2
- публикаций по грантам РНФ 29
- в соавторстве с зарубежными учёными 4
- статьи в WoS и Scopus 46 (из них 8- в печати)
- статьи в WOS и Scopus (Q1, Q2) 4

Публикации в зарубежных изданиях

- Wu B., Zhang M., Zeng H., Tian F., Potgieter A.B., Yan N., Chang S., Zhao Y., Dong Q., Boken V., Plotnikov D.E., Guo H., Wu F., Zhao H., Deronde B., Tits L., Loupian E.A. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review // National Science Review. 2022. nwac290. DOI: doi.org/10.1093/nsr/nwac290. (WOS, Scopus) Q1
- Li X., Shabanov N.V., Chen L., Zhang Y., Huang H. Modeling solar-induced fluorescence of forest with heterogeneous distribution of damaged foliage by extending the stochastic radiative transfer theory // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 271. 112892. DOI: doi.org/10.1016/j.rse.2022.112892. (WOS, Scopus) Q1
- 3. *Plotnikov D.E., Loupian E.A., Kolbudaev P.A., Proshin A.A., Matveev A.M.* Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // IEEE Xplore. VIII Intern. Conference on Information Technology and Nanotechnology. (ITNT). 2022. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630. (Scopus)
- Girina O.A., Malkovsky S.I., Sorokin A.A., Loupian E.A., Korolev S.P. Numerical Modeling of the Ash Cloud Movement from the Catastrophic Eruption of the Sheveluch Volcano in November 1964 // Remote Sensing. 2022. 14(14). P. 3449. DOI: doi.org/10.3390/rs14143449. (WOS, Scopus) Q1
- Romanov A.N., Khvostov I.V., Tikhonov V.V., Sharkov E.A. Assessing Hydrological Changes in Wetland Areas of the Russian Arctic, Subarctic, and Northern Taiga Based on Microwave Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. Vol. 58. No. 9. P. 1100–1110. DOI: 10.1134/S0001433822090201. (Web of Science, Scopus Q3, PUHIL)
- Alekseeva T., Sokolova J., Afanasyeva E., Tikhonov V., Raev M., Waseda T., Nose T., Sharkov E. Peculiarities of using the data of sea ice concentration derived from satellite microwave radiometry for navigational tasks // Proc. 36th Intern. Symp. Okhotsk Sea and Polar Oceans 2022. Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2022. P. 22–25. (PIHIL)
- Petrova A.A., Sokolova Yu.V., Alekseeva T.A., Grishin E.A. Analysis of ice conditions along the Northern Sea Route ultra-late transit navigations in winter 2020–2021 // Proc. 36th Intern. Symp. Okhotsk Sea and Polar Oceans 2022. Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2022. P. 39-43. (PIIHII)
- 8. *Chkhetiani O.G., Shalimov S.L.* On anomalous wind amplitudes in the lower ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2022. V. 240, 105960. DOI: 10.1016/j.jastp.2022.105960 (Мониторинг) (Web of Sciences-Q3; Scopus)
- 9. *Levina G.V.* Helical Cyclogenesis in the Earth's Atmosphere and Beyond // Environ. Sci. Proc. 2022, 19(1). https://doi.org/10.3390/ecas2022-12869

Публикации в отечественных научных рецензируемых изданиях

- 10. Денисов П.В., Трошко К.А., Полецкая А.Ю., Гогачева Н.А., Ленник А.В., Лупян Е.А., Антошкин А.А., Кашницкий А.В., Кобец Д.А., Плотников Д.Е, Прошин А.А., Толпин В.А. Первые результаты контроля данных сельскохозяйственной микропереписи 2021 года с использованием средств спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. — в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 11. *Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А.* Особенности развития зерновых культур в России в 2022 году по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. — в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 12. Кашницкий А.В. Метод автоматического детектирования повреждений растительного покрова природными пожарами по данным спутников серий Landsat и Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 13. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Многолетняя динамика NDVI аридных пастбищных ландшафтов европейской России и сопредельных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 14. Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А.Н. Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 1. С. 1-12. DOI: 10.31857/S2587556622010113 (РИНЦ)
- 15. *Vedeshin L.A.* The First Scientific and Technical Experiments in Space Earth Sciences (On the 60th Anniversary of Satellite Images of the Earth from Manned Spacecraft) // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. Vol. 58. No. 12. P. 1794–1797. в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 16. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лупян Е.А., Умирзаков Г.У. Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 87-103. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 17. Лупян Е.А., Константинова А.М., Кашницкий А.В., Ермаков Д.М., Саворский В.П., Панова О.Ю., Бриль А.А. Возможности организации долговременного дистанционного мониторинга крупных источников антропогенных загрязнений для среду // Современные влияния на окружающую проблемы оценки ИХ дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 193-213. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 18. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Уваров И.А., Крамарева Л.С. Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения 2022 года вулкана Чикурачки (Северные Курилы) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 302-306. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-302-306. (РИНЦ, Scopus, Q3)

- 19. Виноградов С.А., Барталев С.А., Ершов Д.В., Мурачев А.С., Дёмин А.В. Оценка периодичности расчистки просек воздушных линий на территории присутствия ПАО «Россети Ленэнерго» по данным спутникового мониторинга и математического моделирования // Энергия единой сети. 2022. 1 (62). С. 20-31. (РИНЦ)
- 20. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н. Спутниковые наблюдения задымлений от тростниковых пожаров на Нижней Волге // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 93-105. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 21. Гирина О.А., Константинова А.М., Крамарева Л.С., Сорокин А.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Романова И.М., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Эксплозивное событие 19 апреля 2022 г. вулкана Карымский (Камчатка) по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 255-260. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-255-260. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 22. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития озимых сельскохозяйственных культур на юге европейской части России весной 2022 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 261-267. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-261-267. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 23. Денисов П.В., Трошко К.А., Лупян Е.А., Толпин В.А. Возможности и опыт использования информационной системы Вега-PRO для мониторинга сельскохозяйственных земель // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 66-83. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.006. (РИНЦ)
- 24. Златопольский А.А. Порядковая статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Базовый расчёт и приведённый порядок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 133-142. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-133-142. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 25. Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Нуждаев А.А., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Дистанционный мониторинг вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской (Камчатка) в 2020–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 153-161. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-153-161. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 26. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития сельскохозяйственных культур в первой половине лета 2022 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 302-311. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-302-311. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 27. Котельников Р.В., Лупян Е.А. Особенности дистанционно оцениваемых распределений площадей лесных пожаров для территорий с различным уровнем пожарной охраны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 75-87. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 28. Константинова А.М. Алгоритм автоматической фильтрации облачных данных для решения задач объектного дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 88-99. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-88-99. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 29. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Васильченко А.А. Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса

// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 207-222. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222. (РИНЦ, Scopus, Q3)

- 30. Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Лупян Е.А. Автоматический метод субпиксельной географической привязки спутниковых изображений КМСС-М на основе актуализируемого эталона низкого пространственного разрешения // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 5. С. 818-827. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098. (РИНЦ, WOS, Scopus, Q2)
- 31. Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С. Вулканы и космос // Земля и Вселенная. 2022. № 5. С. 5-18. DOI: 10.7868/S0044394822050012. (РИНЦ)
- 32. Ведешин Л.А., Герасютин С.А. Россия США: 50 лет сотрудничества в космосе. Часть 1 // Земля и Вселенная. 2022. № 5. С. 88-103. DOI: 10.7868/S0044394822050085. (РИНЦ)
- 33. Ведешин Л.А., Герасютин С.А. Россия США: 50 лет сотрудничества в космосе. Часть 2 // Земля и Вселенная. 2022. № 6. — в печати
- 34. Ведешин Л.А., Шаповалов Д.А. Первые научно-технические эксперименты по космическому землеведению (К 60-летию начала работ по космической съемке Земли с пилотируемых космических кораблей) // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 99-102. DOI: 10.31857/S0205961422050086. (РИНЦ, Scopus)
- 35. Златопольский А.А., Шекман Е.А. Порядковая статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Масштабный фактор и уравнения Хортона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 113-122. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-113-122. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 36. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Дорошенко В.В. Спутниковый мониторинг процессов опустынивания на юге европейской России в 2019-2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 319-327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 37. Лупян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217-232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 38. *Tikhonov V.V., Romanov A.N., Khvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinitskiy A.I., Tikhonova M.V., Sharkov E.A., Komarova N.Yu.* Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // Российская Арктика (Russian Arctic). 2022. № 2(17). Р. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71. (РИНЦ)
- 39. Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е. А. Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 4. С. 12–24. DOI: 10.31857/S020596142204008X. (Scopus, RSCI, РИНЦ)
- 40. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Ковалев С.М., Смоляницкий В.М. Влияние загрязненности морского льда на ошибки в определении сплоченности в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исследю Земли из космоса. 2022. № 5. С. 30–46. DOI: 10.31857/S0205961422050037. (Scopus, RSCI, РИНЦ)
- 41. Тихонов В.В., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Романов А.Н., Афанасьева Е.В., Соколова Ю. В., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Анализ гидрологического режима устьевых областей Енисея, Печоры и Хатанги в зимний

период по данным спутника SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 47– 62. DOI: 10.31857/S0205961422060124. (Scopus, RSCI, РИНЦ)

- 42. Афанасьева Е.В., Сероветников С.С., Алексеева Т.А., Гришин Е.А., Солодовник А.А., Филиппов Н.А. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 96–117. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117. (**RSCI, РИНЦ**)
- 43. Гришин Е.А., Павлова Е.А., Алексеева Т.А., Миронов Е.У. Современные особенности ледовых условий на пути плавания в Татарском проливе Японского моря // Российская Арктика. 2022. № 17. С. 72–58. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-72-85. (РИНЦ)
- 44. Стерлядкин В.В., Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Пашинов Е.В. Предсказание наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса. Возможно ли это? // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 40–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-40-52. (Scopus, Q3, РИНЦ)
- 45. *Сазонов Д.С.* Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 50–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64. (Scopus, Q3, РИНЦ)
- 46. Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 101–112. DOI: 10.31857/S0205961422060100. (Scopus, РИНЦ, RSCI)
- 47. *Князев Н.А., Лаврова О.Ю.* Спутниковый мониторинг распространения нефтяного загрязнения вдоль Сирийского побережья, вызванного аварией в городе Банияс 23 августа 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 295–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-295-301. (РИНЦ, Scopus, Q3, RSCI)
- 48. Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Елизаров Д.А. Трехмерная структура и динамика вод в прибрежных вихревых диполях в юго-восточной части Балтийского моря: результаты спутниковых наблюдений и подспутниковых измерений летом 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. в печати (РИНЦ, Scopus, Q3, RSCI)
- 49. Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А., Кобец Д.А. Двадцатая юбилейная международная конференция // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. в печати (РИНЦ, Scopus, RSCI)
- 50. Ижовкина Н.И., Артеха С.Н., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А. Грозовая активность и вихревые структуры в атмосфере // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 267–276. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-267-276 (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 51. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Модели и методы скалярной волновой фильтрации полей пристеночных турбулентных пульсаций давления // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 6, С. 670–678 DOI: 10.31857/S0320791922060077. (РИНЦ) [переводная версия: Kudashev E.B., Yablonik L.R. Models and Methods for Scalar Wave Filtration of Fields of Wall Turbulent Pressure Fluctuations // Acoustical Physics. 2022. V. 68. No. 6. P. 624–631. DOI: 10.1134/S1063771022060070 (Web of Sciences, Q4; Scopus)]
- 52. Арумов Г.П., Бухарин А.В., Макаров В.С. Трёхмерные отражающие объекты в задаче моделирования лидарного сигнала от рассеивающего слоя // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 328–334. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334 (РИНЦ, Scopus, Q3)

- 53. Арумов Г.П., Бухарин А.В. Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 31–36. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-31-36 (РИНЦ) [переводная версия: Arumov G.P., Bukharin A.V. Selection of the optimal traces for remote measurements of the microstructure of a scattering object produced from particle images // Measurement Techniques. V. 65. No. 10. (Scopus, Q3)]
- 54. Левина Г.В. Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 2. С. 47-59. DOI: 10.48612/fpg/vaxg-xdmv-11pn (Scopus, Q3)
- 55. Арумов Г.П., Бухарин А.В. Сочетание локальных и лидарных методов в задаче определения микрофизических свойств рассеивающей среды // Труды МФТИ. 2022. Том 14. № 4 (56). С.. (РИНЦ) в печати
- 56. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* К вопросу об интерпретации базовых лидарных коэффициентов для лидара обратного рассеяния // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. (Scopus, Q3) в печати
- 57. Гришин В.А. Мультиразрешение в оптических навигационных системах космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 105-113. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-16-3-105-113 (Scopus, Q3)
- 58. Гришин В.А. Задача формирования покрытия области неопределенности эталонами для систем оптической навигации // Автоматика и телемеханика. 2022. № 2. С. 63-77. DOI: 10.31857/S0005231022120066.

Книги

59. Шаповалов Д.А., Черкашина Е.В., Клюшин П.В., Гаврилова Л.А., Лимонов А.Н., Евстратова Л.Г., Савинова С.В., Лепехин П.П., Скубиев С.И., Широков Р.С., Барбасов В.К., Ведешин Л.А., Братков В.В., Мусаев М.Р., Магомедова А.А., Мусаева З.М., Шалов Т.Б. Методы дистанционного зондирования и космическая навигация в технологиях точного земледелия // Монография. Москва, 2022. 423 с. DOI: ISBN 978-5-00128-957-9.

Статьи в сборниках материалов конференций

- 60. Лупян Е.А., Бурцев М.А. Построение современных информационных систем спутникового мониторинга. Возможности сотрудничества России и Китая // Материалы Международной конференции «Россия и Китай в условиях кризиса международной безопасности». Москва. 15 июня 2022 года, 2022. С. 78-99. DOI: 10.56700/k2853-3492-8604-г. (РИНЦ)
- 61. Балашов И.В., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Сенько К.С. Спутниковый мониторинг пожаров в ИСДМ «Рослесхоз»: история, текущее состояние и перспективы развития // Материалы IX Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск. 13– 16 сентября 2022 г, 2022. С. 9-12. (РИНЦ)

- 62. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Оперативная оценка степени повреждений лесов пожарами на основе данных об интенсивности горения // Материалы IX Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск. 13–16 сентября 2022 г, 2022. С. 256-259. (РИНЦ)
- 63. Филина Я.А., Дунаева Е.А., Денисов П.В. Оценка состояния озимых зерновых культур по Республике Крым с помощью сервиса ВЕГА // Материалы IX Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск. 13–16 сентября 2022 г, 2022. С. 307-310. (РИНЦ)
- 64. Сайгин И.А., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Развитие методов картографирования растительного покрова // Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. 13–15 апреля 2022. Сборник трудов под ред. А. М. Садовского, 2022. С. 129-135. DOI: 10.21046/KMU-2022-129-135.
- 65. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Романова И.М., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Демянчук Ю.В. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2021 г. и их опасность для авиации // Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2022 года, 2022. С. 26-29. (РИНЦ)
- 66. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Романова И.М., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С. Эксплозивное извержение вулкана Чиринкотан (Северные Курилы) в 2021 г // Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2022 года, 2022. С. 22-25. (РИНЦ)
- 67. Мухамеджанов И.Д., Лупян Е.А. Технология и возможности организации спутникового мониторинга водных ресурсов Узбекистана // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы образования и науки в авиационной и космической технологиях». Ташкент, 2022. С. 403-405.
- 68. Сазонов Д.С. Использование данных МТВЗА-ГЯ для восстановления основных интегральных параметров системы «океан – атмосфера» // 15 я Международная науч. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с научной молодежной школой. ФРЭМЭ'2020: Тр. конф. Владимир – Суздаль. 2022. Т. 2. С. 382–385. (РИНЦ)
- 69. Пашинов Е.В., Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Стерлядкин В.В. Разработка методики спутникового радиотепловидения для раннего прогноза крупных наводнений в бассейне Амура // Информац. технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022: Материалы 6й Всероссийской конф. Владивосток, 3–8 окт. 2022. Владивосток: Дальневосточный федер. ун-т, 2022. С. 41. — ISBN 978-5-7444-5341-1. DOI: 10.24866/7444-5341-1. (Scopus, РИНЦ)
- 70. Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Алгоритм географической привязки данных измерений российского микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ // 15-я Международная научная конференция «физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова ФРЭМЭ'2022. 28–30 июля 2022, Владимир Суздаль. 2022. С. 416–420. ISBN 978-5-905527-51-7. http://freme.vlsu.ru/doc/works/FREME_2022_ISBN.pdf, (РИНЦ)

- 71. Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Стрельцов А.М., Евсеев Г.Е. Описание подходов к поиску корректирующих углов для повышения точности географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Материалы 10й Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», Москва, 2022. С. 71–82. https://www.vniiem.ru/ru/uploads/files/conferences/220929/materialy_2022.pdf, (РИНЦ)
- 72. Зольникова Н.Н., Шкевов Р., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А Малопараметрическая нелинейная модель как платформа для численного моделирования влияния глобального потепления на морские перевозки. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы», Российский университет транспорта, Москва, 2022. С. 167-178. DOI 10.47581/2022/MIIT-ITS.25
- 73. Пашинов Е.В., Ермаков Д.М., Втюрин С.А. Глобальные поля адвекции водяного пара в атмосфере Земли по данным SSMIS // Труды 15 й международной научной конференции «ФРЭМЭ'2022», 2022, с. 412-416.

Материалы конференций

- 74. Girina O.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nuzhdaev A.A., Romanova I.M., Loupian E.A., Sorokin A.A. The 2021 Activity of Kamchatkan Volcanoes and Danger to Aviation // EGU General Assembly. 23–27 May 2022. Vienna. Austria, 2022. DOI: 10.5194/egusphere-egu22-1862. (PIHII)
- 75. Константинова А.М., Лупян Е.А., Панова О.Ю., Саворский В.П. Возможности использования Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» для мониторинга влияния объектов горнодобывающей промышленности на окружающую // Материалы VI Всероссийской конференции среду «Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022». Владивосток. 3-8 октября 2022 г, 2022. С. 28-29. DOI: doi.org/10.24866/7444-5341-1.
- 76. Лаврова О.Ю., Лупян Е.А. Двадцать лет конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли ИЗ космоса» // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 6. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 77. Лупян Е.А., Балашов И.В., Буриев М.А., Кашниикий А.В., Кобеи Д.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Пырков В.Н., Радченко М.В., Толпин В.А., Уваров И.А. Методы и технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга (Опыт развития и использования) // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических C. 7. Российской 2022. исследований академии наук. Москва, DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 78. Лозин Д.В., Матвеев А.М., Кашницкий А.В., Лупян Е.А. Адаптация алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными MCУ-MP // Материалы 20й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 48. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)

- 79. Балашов И.В., Енина Е.А., Кашницкий А.В. Метод определения пройденных природными пожарами площадей по данным ДЗЗ высокого пространственного разрешения на основе нейронной сети архитектуры U Net // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 17. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 80. Бриль А.А., Бурцев М.А., Мазуров А.А., Фролова Е.А., Ткачёв А.А., Холодов Е.И. Организация потоковой обработки и предоставления данных КА «Арктика-М» № 1 в объединенной системе работы с данными НИЦ «ПЛАНЕТА» // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 78. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 81. Волкова Е.Е., Матвеев А.М., Кобец Д.А., Ерастов А.Д., Трумпф В.В., Холодов Е.И., Побаруев В.И. Организация автоматической обработки низкоуровневых данных КА «Канопус-В» в центрах НИЦ «Планета» // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 88. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- Мельников Д.В., 82. Гирина О.А., Маневич А.Г., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Спутниковый мониторинг извержений вулканов Северных Курил в 2022 г. с информационной системы VolSatView помощью // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 90. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 83. Константинова А.М., Лупян Е.А. Метод автоматической фильтрации зашумленных спутниковых наблюдений для решения задач дистанционного объектного мониторинга // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 99. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 84. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лупян Е.А. Анализ влияния водохранилищ Вахшского каскада на водность Амударьи с использованием данных спутникового мониторинга // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». конференции. Электронный сборник материалов Институт космических Российской академии наук. 2022. исследований Москва, C. 107. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- Ёлкина Е.С., Антошкин А.А., Денисов П.В. 85. Плотников Д.Е., Спутниковое картографирование тридцатилетней динамики пахотных земель регионов России на основе временных серий данных Landsat // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических Российской академии наук. Москва, 2022. C. 109. исследований DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 86. Лупян Е.А., Гирина О.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Уваров И.А., Кашницкий А.В., Бриль А.А., Константинова А.М., Марченков В.В., Бурцев М.А., Маневич А.Г., Крамарева Л.С., Мальковский С.И., Королев С.П., Гордеев Е.И.

Построение и текущие возможности информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView). История создания и 10 лет развития // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. C. 103. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)

- 87. Бриль А.А., Волкова Е.Е., Артамонова Yu. *V.*, *Мазуров А.А.*, Буриев М.А. Организация сбора данных китайских КА серии FY-3 и их усвоения в архивы ЦКП Международной «ИКИ-Мониторинг» // Материалы 20-й конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». конференции. Электронный сборник материалов Институт космических Российской наук. исследований академии Москва, 2022. C. 79. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 88. Бурцев М.А., Лупян Е.А. Возможности сотрудничества РФ и КНР в области построения современных информационных систем спутникового мониторинга // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 81. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 89. Волкова Е.Е., Мазуров А.А., Бурцев М.А. Устранение артефактов привязки и несведения каналов в данных КА «Метеор-М» с использованием корреляционной привязки // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 87. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 90. Кашниикий А.В., Балашов И.В., Лупян Е.А. База ланных повреждений растительного покрова природными пожарами по данным ДЗЗ высокого пространственного разрешения // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». конференции. Электронный сборник материалов Институт космических Российской академии наук. Москва, 2022. C. 97. исследований DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 91. Марченков В.В., Уваров И.А. Статистический анализ пространственно-временных рядов данных спутниковых наблюдений для мониторинга вулканической активности // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 105. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 92. Пырков В.Н., Дегай А.Ю., Черных В.Н. Рассмотрение возможности использования слабонаправленных антенн для транспондеров в системах мониторинга подвижных объектов // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 112. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- Нуждаев А.А., 93. Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Дистанционный мониторинг эксплозивных извержений вулкана Безымянный в 2022 г. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических

исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 264. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)

- 94. Антошкин А.А., Денисов П.В., Трошко К.А. Оценка используемости сельскохозяйственных угодий с использованием спутникового сервиса Вега (мастер-класс) // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 498. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 95. Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А., Трошко К.А. Новые возможности сервиса Вега для оценки состояния посевов и особенности развития культур в 2021-2022 гг. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических C. 297. исследований Российской академии наук. Москва, 2022. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 96. Кашницкий А.В. Метод автоматического детектирования повреждений растительного покрова природными пожарами по данным спутников серий Landsat и Sentinel-2 // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 308. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 97. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В. Изучение влияния типа лесной растительности и сезона пожара на степень постпожарных повреждений с использованием технологии оценки гибели леса на основе ланных об интенсивности горения пожаров // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». конференции. Электронный сборник материалов Институт космических Москва, исследований Российской академии наук. 2022. C. 313. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 98. Лупян Е.А., Денисов П.В., Трошко К.А., Полецкая А.Ю. Практический опыт применения современных спутниковых технологий при решении региональных задач АПК // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 315. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 99. Лупян Е.А., Денисов П.В., Трошко К.А., Полеикая А.Ю. Технологии спутникового мониторинга для контроля данных статистических наблюдений об использовании сельскохозяйственных угодий // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». конференции. Электронный сборник материалов Институт космических исследований Российской наук. 2022. C. 314. академии Москва, DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Егоров В.А. Метод фенологического 100. совмещения многолетних рядов спутниковых наблюдений на основе данных высокого временного разрешения // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». конференции. Электронный сборник материалов Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. C. 319. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 101. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Бисезонный индекс леса для картографирования защитных лесных насаждений // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 349. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)

- 102. Ворушилов И.И., Барталев С.А., Егоров В.А. Оценка динамики запаса стволовой древесины нарушенных территорий России // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 290. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- Денисов П.В. 103. Степанченко О.Е., Антошкин А.А., Особенности распознавания овощных культур ПО данным спутниковых наблюдений Международной конференции «Современные // Материалы 20-й проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 335. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 104. Руткевич П.Б., Руткевич Б.П. О движении крупномасштабной вихревой структуры в декартовой системе координат // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 449. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 105. Егоров В.А., Ворушилов И.И., Миклашевич Т.С. Технология построения временных рядов спутниковых данных // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 500. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- Жарко В.О., Богодухов М.А. Возможности оценки высоты и продуктивности 106. по спутниковым лидарным (лекция) // Материалы данным 20-й лесов конференции «Современные проблемы дистанционного Международной зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. 2022. C. 501. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 107. Ховратович Т.С. Показатели горизонтальной структуры лесов и их дистанционная оценка на основе оптических спутниковых данных (лекция) // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 505. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 108. Ёлкина Е.С., Плотников Д.Е., Толпин В.А., Щербенко Е.В. Анализ результатов эксперимента по созданию опорных выборок на больших территориях с помощью краудсорсинга // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». конференции. Электронный сборник материалов Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. C. 353. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 109. *Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А.* Опыт использования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» при решении научных и прикладных задач // Восьмой Белорусский космический конгресс. 25-27 октября 2022. Минск, 2022. С. 289-292.
- 110. Константинова А.М., Балашов И.В., Лупян Е.А. Реализация и технологии объектного дистанционного мониторинга на основе возможностей ЦКП «ИКИ-

Мониторинг» // Восьмой Белорусский космический конгресс. 25-27 октября 2022. Минск, 2022. С. 293-295.

- 111. Денисов П.В., Трошко К.А., Лупян Е.А., Толпин В.А. Возможности использования спутникового сервиса Вега-PRO для сельскохрзяйственного мониторинга // Восьмой Белорусский космический конгресс. 25-27 октября 2022. Минск, 2022. С. 325-329.
- 112. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Тихонов В.В., Раев М.Д., Ковалев С.М., Смоляницкий В.М. Влияние Шарков Е.А., загрязненности и разрушенности морского льда на интерпретацию данных спутниковой микроволновой радиометрии на примере припая Восточно-Сибирского моря 20-й Международной «Современные // Материалы конф. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14-18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 147. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 113. Романов А.Н., Рябинин И.В., Хвостов И.В., Тихонов В.В. Анализ современных гидрологических изменений в Арктике по данным спутника SMOS // Материалы 20-й Международной примере Карского моря) конф. (на «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14-18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 494. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 114. Баданов А.Ю., Ермаков Д.М. Анализ возможностей уточнения оперативного прогноза траектории тропического циклона с использованием данных спутникового радиотепловидения // Материалы 20-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 404. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a, (РИНЦ)
- 115. *Якушева А.Н., Ермаков Д.М.* Развитие алгоритмов технического зрения для уточнения параметров тропических циклонов по данным дистанционного зондирования Земли // Материалы 20-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 477. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- Сазонов Д.С. Адаптация алгоритма восстановления интенсивности осадков к 116. радиометрическим измерениям прибора МТВЗА-ГЯ // Материалы 20й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. Земли из C. 64. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 117. Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Реализация географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ // Материалы 20-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 62. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 118. Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Повышение точности географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ // Материалы 20-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 63. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 119. Селунский А.Б., Пашинов Е.В., Ермаков Д.М., Кузьмин А.В. Детектирование атмосферных рек по данным спутникового радиотепловидения // Материалы 20-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 453. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 120. Стерлядкин В.В., Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Пашинов Е.В. Микроволновые радиометрические измерения из космоса смогут предсказывать наводнения // Материалы 20-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 455. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)

- 121. Ермаков Д.М., Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Кузьмин А.В., Стерлядкин В.В. Возможности спутникового радиотепловидения в исследовании многолетнего гидрологического режима крупных северных рек (на примере Оби) // Материалы 20-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 нояб. 2022, ИКИ РАН. 2022. С. 481. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a. (РИНЦ)
- 122. Зольникова Н.Н., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Shkevov R. Анализ влияния глобального потепления на морские перевозки с использованием малопараметрической нелинейной модели. Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 36. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)
- 123. Левина Г.В. Квазитропические циклоны в Чёрном море (2002–2021). Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 427. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)
- Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Ермаков Д.М. Длинные ряды данных о 124. глобальной циркуляции водяного пара в атмосфере Земли на основе спутникового радиотепловидения // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических Российской акалемии наук. Москва. исследований 2022. C. 439. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)
- 125. Ермаков Д.М., Смирнов М.Т. Коррекция спектров радиотеплового излучения атмосферы, регистрируемых в нестационарных гидрометеорологических условиях // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 30. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. Развитие алгоритмов технического зрения для 126. уточнения параметров тропических циклонов по данным дистанционного зондирования Земли // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических наук. исследований Российской академии Москва, 2022. C. 477. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)
- 127. Арумов Г.П., Бухарин А.В. Совместное применение лидара упругого обратного рассеяния нефелометра для интерпретации сигнала через И // Материалы Международной эквивалентную среду 20-й конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических наук. Москва, 2022. C. исследований Российской академии 401. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)
- 128. Арумов Г.П., Бухарин А.В. Оптимальная схема измерения углового размера ореола прямого рассеяния в задаче сопоставления рассеивающему слою эквивалентной монодисперсной среды // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 402. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)

Тезисы, доклады

- 129. Girina O.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nuzhdaev A.A., Romanova I.M., Loupian E.A., Sorokin A.A. The 2021 Activity of Kamchatkan Volcanoes and Danger to Aviation // EGU General Assembly, 2022.
- 130. Лупян Е.А. Разработка методов построения распределенных геоинформационных систем дистанционного мониторинга // Всероссийская научная конференция «Современные проблемы наук о Земле». 11–15 апреля 2022. Москва. Тезисы, 2022. С. 323-324.
- 131. Барталев С.А. Космическое картографирование и географические исследования растительного покрова России // Всероссийская научная конференция «Современные проблемы наук о Земле». 11–15 апреля 2022. Москва. Тезисы, 2022. С. 230-232.
- 132. Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Матвеев А.М., Лупян Е.А., Прошин А.А. Восстановление временных серий ежедневных значений дистанционных характеристик растительного покрова на основе LOWESS по данным различных спутниковых систем // VIII Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». 23-27 Мая. Самара, 2022.
- 133. Шинкаренко С.С. Спутниковое картографирование состояния аридных ландшафтов России // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.
- 134. Константинова А.М., Бриль А.А. Автоматическое выделение источников выбросов диоксида азота по данным TROPOMI // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.
- 135. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е. Метод выявления облачности и теней на изображениях КМСС на основе обучения глубоких сверточных нейронных сетей // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.
- 136. Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Егоров В.А. Сравнение данных спутниковых наблюдений приборов MODIS и VIIRS // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.
- 137. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В. Реализация технологии оперативной оценки повреждений лесного покрова на основе данных о радиационной мощности пожаров // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.
- 138. Сайгин И.А., Стыценко Ф.В. Развитие метода картографирования растительного покрова // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.
- 139. Енина Е.А., Балашов И.В. Использование методов машинного обучения для уточнения площадей, пройденных огнем, по данным высокого разрешения // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.

- 140. Лозин Д.В., Денисов П.В., Трошко К.А., Середа И.И. Мастер-класс на тему: « Основные возможности системы ВЕГА-Science // IX Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск. 13–16 сентября 2022 г, 2022.
- 141. *Plotnikov D. E.* Agriculture satellite monitoring over Russia: the framework-based products and solutions // Intern. Forum on Big Data for Sustainable Development Goals. 7 September 2022.
- 142. Денисов П.В. Результаты практического применения технологий спутникового мониторинга земель сельскохозяйственного назначения в интересах органов АПК на примере Пензенского региона // Бизнес-форум «Цифровая трансформация в сельском хозяйстве». 14 июля 2022.
- 143. Лупян Е.А., Барталев С.А., Ершов Д.В. Организация дистанционного мониторинга лесных пожаров: опыт создания и развития системы ИСДМ-Рослесхоз // Всероссийская научная конференция с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами», посвященная 30-летию ЦЭПЛ РАН. 25-29 апреля 2022.
- 144. Барталев С.А. Золотое двадцатилетие космических исследований лесов России // Всероссийская научная конференция с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами», посвященная 30-летию ЦЭПЛ РАН. 25-29 апреля 2022.
- 145. Тихонов В.В., Романов А.Н., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Синицкий А. И., Тихонова М. В., Шарков Е. А., Комарова Н. Ю. Анализ смещения фронтальной зоны в Обской губе в зимний период по данным спутника SMOS // Тез. докл. научно-практ. конф. «Задачи и проблемы мониторинга природных условий Обской губы на фоне изменяющегося климата и интенсивной хозяйственной деятельности». СПб.: ААНИИ, 2022. С. 55–57.
- 146. Алексеева Т.А., Май Р.И., Дымент Л.Н., Ершова А.А., Гришин Е.А. Верификация автоматического ледового роутинга ААНИИ для выбора оптимального маршрута плавания в юго-западной части Карского моря // Тез. докл. Всероссийской науч. конф. «Моря России: вызовы отечественной науки». 26– 30 сент. 2022, Севастополь. 2022. С. 170–171. ISBN: 978-5-6043409-5-0. (РИНЦ)
- 147. Левина Г.В. Новый подход для изучения квазитропических циклонов в Черном море // Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы 4-й Международной конференции, г. Москва, 21–24 июня 2022 г. Электронный сборник материалов конференции. Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского Российской академии наук. Москва, 2022. С.112–113. https://conf2022.idg.ras.ru/ «Мониторинг»
- 148. Levina G.V. Cloud-resolving numerical modeling of hurricane-like quasi-tropical cyclones over the Black Sea // Fifth Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes. Virtual hosted in Novosibirsk, Russia, October 12-14, 2022. Book of Abstracts. The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS. Novosibirsk, 2022. P. 21–22. http://conf.nsc.ru/mhd2022/en
- Гришин В.А. Постановка задачи формирования оптимального покрытия области 149. неопределенности эталонами ДЛЯ систем оптической навигании // Математические методы распознавания образов: Тезисы докладов 20-й Всероссийской конференции с международным участием, г. Москва 2021 г. М.: 2021. C. 187–189. PAH, URL: http://machinelearning.ru/wiki/images/0/02/Mmpr 2021.pdf.

Патенты

- 150. Лупян Е.А., Балашов И.В., Сенько К.С. База данных тепловых аномалий и агрегированных пожаров (fd_hotspots). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623316. 8 декабря 2022 г.
- 151. Лупян Е.А., Балашов И.В., Сенько К.С. База данных наблюдений состояний лесных объектов (objects_surveys). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623316. 8 декабря 2022 г.

Публикации в соавторстве с зарубежными авторами

- Wu B., Zhang M., Zeng H., Tian F., Potgieter A.B., Yan N., Chang S., Zhao Y., Dong Q., Boken V., Plotnikov D.E., Guo H., Wu F., Zhao H., Deronde B., Tits L., Loupian E.A. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review // National Science Review. 2022. nwac290. DOI: doi.org/10.1093/nsr/nwac290. (WOS, Scopus) Q1
- Li X., Shabanov N.V., Chen L., Zhang Y., Huang H. Modeling solar-induced fluorescence of forest with heterogeneous distribution of damaged foliage by extending the stochastic radiative transfer theory // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 271. 112892. DOI: doi.org/10.1016/j.rse.2022.112892. (WOS, Scopus) Q1
- 3. Зольникова Н.Н., Шкевов Р., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А. Малопараметрическая нелинейная модель как платформа для численного моделирования влияния глобального потепления на морские перевозки. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы», Российский университет транспорта, Москва, 2022. С. 167-178. DOI 10.47581/2022/MIIT-ITS.25
- 4. Зольникова Н.Н., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Shkevov R. Анализ влияния потепления морские перевозки глобального на использованием с малопараметрической нелинейной модели. Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. C. 36. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a (РИНЦ)

РНΦ

- 1. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Ivanov N.М. Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 143-157. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
- 2. Кузьмина Ж.В., Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Марков М.Л. Современное состояние пойменных ландшафтов Нижнего Дона в условиях зарегулирования стока, климатических и гидрологических изменений // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28. № 4. С. 21-35. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-4-22-36
- 3. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Иванов Н.М. Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т.19. № 1. С. 143-157 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157
- 4. Барталев С.А., Ворушилов И.И., Егоров В.А. Построение и радиометрическая нормализация безоблачных композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности для мониторинга лесов // Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 57-69. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69.

- 5. Барталев С.А., Богодухов М.А., Жарко В.О., Сидоренков В.М. Исследование возможностей использования данных ICESat-2 для оценки высоты лесов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 195-206. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206.
- 6. *Хвостиков С.А., Барталев С.А.* Метод уточнения положения фронта пожара на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в модель распространения огня // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 9-18. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-9-18.
- Богодухов М.А., Барталев С.А., Жарко В.О. Развитие методов предварительной обработки стандартного набора данных ATL08 спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 для оценки высоты лесного покрова // Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. 13–15 апреля 2022. Сборник трудов под ред. А. М. Садовского, 2022. С. 19-25. DOI: 10.21046/KMU-2022-19-25.
- 8. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря. Москва: ИКИ РАН, 2022. 250 с. ISBN 978-5-00015-058-0. в печати
- Kostianoy, A.G., Lavrova, O.Y. (2022). Satellite Instrumentation and Technique for Oil Pollution Monitoring of the Seas. In: Di Mauro, A., Scozzari, A., Soldovieri, F. (eds) Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_4 (Scopus)
- Kostianoy, A.G., Lavrova, O.Y., Strochkov, A.Y. (2022). Satellite Instrumentation and Technique for Monitoring of Seawater Quality. In: Di Mauro, A., Scozzari, A., Soldovieri, F. (eds) Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_5 (Scopus)
- 11. *Lavrova O. Yu., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Bocharova T. Yu.* Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea, J. Hydrology X. 2022, Vol. 17, Art. No. 100145, 14 p., https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145. (Web of Science, Scopus, Q1)
- Mityagina, M.; Lavrova, O. Satellite Survey of Offshore Oil Seep Sites in the Caspian Sea. Remote Sens. 2022, 14, 525. https://doi.org/10.3390/rs14030525 (Web of Science, Scopus, Q1)
- 13. Шалимов С.Л., Захаров В.И., Соловьева М.С., Сигачев П.К., Некрасова М.Ю., Коркина Г.М. Волновые возмущения нижней и верхней ионосферы во время тропического циклона Faxai 2019 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. № 6 (РНФ). DOI: 10.31857/S0002333721010075 (РИНЦ) [переводная версия: (Web of Sciences-Q4; Scopus)]
- 14. Шинкаренко С.С. Динамика выгоревших площадей в ландшафтах Нижней Волги // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 348. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 15. Шинкаренко С.С. Особенности пожарного режима аридных нелесных ландшафтов (лекция) // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 507. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 16. Елизаров Д.А., Князев Н.А., Уваров И.А. Интеграция данных натурных измерений в информационную систему See the Sea // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из

космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 93. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.

- 17. Богодухов М.А., Барталев С.А., Жарко В.О. Анализ достоверности оценки высоты лесов по данным ICESat-2 с уровнем пространственной детальности 20x14 м на основе сравнения с результатами наземных измерений // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 288. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 18. Сайгин И.А., Стыценко Ф.В. Метод детектирования усыханий лесов на основе комбинированного использования спутниковых данных, полученных в зимний и летний периоды // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 332. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 19. Хвостиков С.А. Технология оценки баланса и динамики углерода лесов России на основе данных ДЗЗ (лекция) // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. C. 504. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 20. Стыценко Ф.В. Оценка последствий воздействия природных пожаров на лесные // Материалы 20-й Международной экосистемы (лекшия) конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли ИЗ КОСМОСА». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. C. 503. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 21. Шабанов Н.В., Барталев С.А., Ховратович Т.С., Жарко В.О., Медведев А.А., Тельнова Н.О. Полу-эмпирический подход разделения индекса листовой поверхности рассчитанного по данным ДЗЗ между верхним и нижним ярусами (лекция) // Материалы 20-й Международной лесов России конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исслелований Российской академии наук. Москва, 2022. C. 506. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 22. Барталев С.А. Как развивалась с начала века методология спутникового картографирования растительного покрова России // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы листанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 23. Барталев С.А. Методология комплексного использования спутниковых данных дистанционного зондирования, выборочных наземных наблюдений и моделирования для мониторинга бюджета углерода в лесах России (лекция) // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 499. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 24. Уваров И.А., Дубянский В.М., Малеев В.В., Платонов А.Е., Титков А.В. Использование информационной системы "ВЕГА Science" для анализа данных мониторинга природно-очаговых инфекций // Материалы 20-й Международной

конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 118. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.

- 25. Уваров И.А., Бриль А.А., Марченков В.В., Пармузин Е.И., Захарова Н.Б., Шелопут Т.О. Анализ состояния воды Черного моря на основе численного моделирования гидрофизических параметров в информационной системе See the Sea // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 117. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 26. Князев Н.А. Результаты мониторинга судовых загрязнений в Каспийском море по данным спутниковой радиолокации за 2022 г. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 171. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 27. *Назирова К.Р.* Результаты многолетнего спутникового мониторинга вихревых структур в Каспийском море на основе оптических спутниковых данных высокого пространственного разрешения для периода с 1999 по 2022 гг. С.197. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 28. Богодухов М.А., Барталев С.А., Жарко В.О. Развитие методов предварительной обработки стандартного набора данных ATL08 спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 для оценки высоты лесного покрова // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.
- 29. Ворушилов И.И., Барталев С.А., Егоров В.А. Развитие метода оценки запаса стволовой древесины с использованием данных Terra-MODIS // XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. Москва. Электронный сборник. 13-15 апреля, 2022.

Публикации по теме Мониторинг в рецензируемых изданиях

- Wu B., Zhang M., Zeng H., Tian F., Potgieter A.B., Yan N., Chang S., Zhao Y., Dong Q., Boken V., Plotnikov D.E., Guo H., Wu F., Zhao H., Deronde B., Tits L., Loupian E.A. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review // National Science Review. 2022. nwac290. DOI: doi.org/10.1093/nsr/nwac290. (WOS, Scopus) Q1
- Li X., Shabanov N.V., Chen L., Zhang Y., Huang H. Modeling solar-induced fluorescence of forest with heterogeneous distribution of damaged foliage by extending the stochastic radiative transfer theory // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 271. 112892. DOI: doi.org/10.1016/j.rse.2022.112892. (WOS, Scopus) Q1
- Plotnikov D.E., Loupian E.A., Kolbudaev P.A., Proshin A.A., Matveev A.M. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // IEEE Xplore. VIII Intern. Conference on Information Technology and Nanotechnology. (ITNT). 2022. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630. (РИНЦ, Scopus)
- Girina O.A., Malkovsky S.I., Sorokin A.A., Loupian E.A., Korolev S.P. Numerical Modeling of the Ash Cloud Movement from the Catastrophic Eruption of the Sheveluch Volcano in November 1964 // Remote Sensing. 2022. 14(14). P. 3449. DOI: doi.org/10.3390/rs14143449. (РИНЦ, WOS, Scopus) Q1

- Romanov A.N., Khvostov I.V., Tikhonov V.V., Sharkov E.A. Assessing Hydrological Changes in Wetland Areas of the Russian Arctic, Subarctic, and Northern Taiga Based on Microwave Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. Vol. 58. No. 9. P. 1100–1110. DOI: 10.1134/S0001433822090201. (Web of Science, Scopus Q3, PUHIL)
- 6. *Chkhetiani O.G., Shalimov S.L.* On anomalous wind amplitudes in the lower ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2022. V. 240, 105960. DOI: 10.1016/j.jastp.2022.105960 (Мониторинг) (Web of Sciences-Q3; Scopus)
- 7. *Levina G.V.* Helical Cyclogenesis in the Earth's Atmosphere and Beyond // Environ. Sci. Proc. 2022, 19(1). https://doi.org/10.3390/ecas2022-12869
- Денисов П.В., Трошко К.А., Полецкая А.Ю., Гогачева Н.А., Ленник А.В., Лупян Е.А., Антошкин А.А., Кашницкий А.В., Кобец Д.А., Плотников Д.Е, Прошин А.А., Толпин В.А. Первые результаты контроля данных сельскохозяйственной микропереписи 2021 года с использованием средств спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. — в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 9. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития зерновых культур в России в 2022 году по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. — в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 10. Кашницкий А.В. Метод автоматического детектирования повреждений растительного покрова природными пожарами по данным спутников серий Landsat и Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 11. *Vedeshin L.A.* The First Scientific and Technical Experiments in Space Earth Sciences (On the 60th Anniversary of Satellite Images of the Earth from Manned Spacecraft) // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. Vol. 58. No. 12. P. 1794–1797. в печати (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 12. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лупян Е.А., Умирзаков Г.У. Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 87-103. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 13. Лупян Е.А., Константинова А.М., Кашницкий А.В., Ермаков Д.М., Саворский В.П., Панова О.Ю., Бриль А.А. Возможности организации долговременного дистанционного мониторинга крупных источников антропогенных загрязнений для окружающую среду // Современные оценки ИХ влияния на проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 193-213. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 14. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Уваров И.А., Крамарева Л.С. Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения 2022 года вулкана Чикурачки (Северные Курилы) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 302-306. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-302-306. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 15. Виноградов С.А., Барталев С.А., Ершов Д.В., Мурачев А.С., Дёмин А.В. Оценка периодичности расчистки просек воздушных линий на территории присутствия ПАО «Россети Ленэнерго» по данным спутникового мониторинга и математического моделирования // Энергия единой сети. 2022. 1 (62). С. 20-31. (РИНЦ)
- 16. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н. Спутниковые наблюдения задымлений от тростниковых пожаров на Нижней Волге // Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 93-105. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105. (РИНЦ, Scopus, Q3)

- 17. Гирина О.А., Константинова А.М., Крамарева Л.С., Сорокин А.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Романова И.М., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Эксплозивное событие 19 апреля 2022 г. вулкана Карымский (Камчатка) по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 255-260. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-255-260. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 18. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития озимых сельскохозяйственных культур на юге европейской части России весной 2022 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 261-267. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-261-267. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 19. Денисов П.В., Трошко К.А., Лупян Е.А., Толпин В.А. Возможности и опыт использования информационной системы Вега-PRO для мониторинга сельскохозяйственных земель // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 66-83. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.006. (РИНЦ)
- 20. Златопольский А.А. Порядковая статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Базовый расчёт и приведённый порядок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 133-142. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-133-142. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 21. Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Нуждаев А.А., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Дистанционный мониторинг вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской (Камчатка) в 2020–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 153-161. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-153-161. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 22. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития сельскохозяйственных культур в первой половине лета 2022 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 302-311. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-302-311. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 23. Котельников Р.В., Лупян Е.А. Особенности дистанционно оцениваемых распределений площадей лесных пожаров для территорий с различным уровнем пожарной охраны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 75-87. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 24. Константинова А.М. Алгоритм автоматической фильтрации облачных данных для решения задач объектного дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 88-99. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-88-99. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 25. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Васильченко А.А. Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 207-222. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 26. Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Лупян Е.А. Автоматический метод субпиксельной географической привязки спутниковых изображений КМСС-М на основе актуализируемого эталона низкого пространственного разрешения

// Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 5. С. 818-827. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098. (РИНЦ, WOS, Scopus, Q2)

- 27. Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С. Вулканы и космос // Земля и Вселенная. 2022. № 5. С. 5-18. DOI: 10.7868/S0044394822050012. (РИНЦ)
- 28. Ведешин Л.А., Герасютин С.А. Россия США: 50 лет сотрудничества в космосе. Часть 1 // Земля и Вселенная. 2022. № 5. С. 88-103. DOI: 10.7868/S0044394822050085.(РИНЦ)
- 29. Ведешин Л.А., Герасютин С.А. Россия США: 50 лет сотрудничества в космосе. Часть 2 // Земля и Вселенная. 2022. № 6. в печати (РИНЦ)
- 30. Ведешин Л.А., Шаповалов Д.А. Первые научно-технические эксперименты по космическому землеведению (К 60-летию начала работ по космической съемке Земли с пилотируемых космических кораблей) // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 99-102. DOI: 10.31857/S0205961422050086. (РИНЦ, Scopus)
- 31. Златопольский А.А., Шекман Е.А. Порядковая статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Масштабный фактор и уравнения Хортона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 113-122. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-113-122. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 32. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Дорошенко В.В. Спутниковый мониторинг процессов опустынивания на юге европейской России в 2019-2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 319-327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 33. Лупян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217-232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232. (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 34. *Tikhonov V.V.*, *Romanov A.N.*, *Khvostov I.V.*, *Alekseeva T.A.*, *Sinitskiy A.I.*, *Tikhonova M.V.*, *Sharkov E.A.*, *Komarova N.Yu*. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // Российская Арктика (Russian Arctic). 2022. № 2(17). Р. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71. (РИНЦ, РИНЦ)
- 35. Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е. А. Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 4. С. 12–24. DOI: 10.31857/S020596142204008X. (РИНЦ, Scopus, RSCI, РИНЦ)
- 36. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Ковалев С.М., Смоляницкий В.М. Влияние загрязненности морского льда на ошибки в определении сплоченности в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исследю Земли из космоса. 2022. № 5. С. 30–46. DOI: 10.31857/S0205961422050037. (Scopus, RSCI, РИНЦ)
- 37. Тихонов В.В., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Романов А.Н., Афанасьева Е.В., Соколова Ю. В., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Анализ гидрологического режима устьевых областей Енисея, Печоры и Хатанги в зимний период по данным спутника SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 47–62. DOI: 10.31857/S0205961422060124. (Scopus, RSCI, РИНЦ)
- 38. Афанасьева Е.В., Сероветников С.С., Алексеева Т.А., Гришин Е.А., Солодовник А.А., Филиппов Н.А. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике // Проблемы Арктики

и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 96–117. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117. (**RSCI, РИНЦ**)

- 39. Гришин Е.А., Павлова Е.А., Алексеева Т.А., Миронов Е.У. Современные особенности ледовых условий на пути плавания в Татарском проливе Японского моря // Российская Арктика. 2022. № 17. С. 72–58. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-72-85. (РИНЦ)
- 40. Стерлядкин В.В., Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Пашинов Е.В. Предсказание наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса. Возможно ли это? // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 40–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-40-52. (Scopus, Q3, РИНЦ)
- 41. Сазонов Д.С. Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 50–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64. (Scopus, Q3, РИНЦ)
- 42. Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 101–112. DOI: 10.31857/S0205961422060100. (Scopus, РИНЦ, RSCI)
- 43. *Князев Н.А., Лаврова О.Ю.* Спутниковый мониторинг распространения нефтяного загрязнения вдоль Сирийского побережья, вызванного аварией в городе Банияс 23 августа 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 295–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-295-301. (РИНЦ, Scopus, Q3, RSCI)
- 44. Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Елизаров Д.А. Трехмерная структура и динамика вод в прибрежных вихревых диполях в юго-восточной части Балтийского моря: результаты спутниковых наблюдений и подспутниковых измерений летом 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. в печати (РИНЦ, Scopus, Q3, RSCI)
- 45. Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А., Кобец Д.А. Двадцатая юбилейная международная конференция // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. в печати (РИНЦ, Scopus, RSCI)
- 46. *Ижовкина Н.И., Артеха С.Н., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А.* Грозовая активность и вихревые структуры в атмосфере // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 267–276. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-267-276 (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 47. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Модели и методы скалярной волновой фильтрации полей пристеночных турбулентных пульсаций давления // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 6, С. 670–678 DOI: 10.31857/S0320791922060077. (РИНЦ) РФФИ [переводная версия: Kudashev E.B., Yablonik L.R. Models and Methods for Scalar Wave Filtration of Fields of Wall Turbulent Pressure Fluctuations // Acoustical Physics. 2022. V. 68. No. 6. P. 624–631. DOI: 10.1134/S1063771022060070 (Web of Sciences, Q4; Scopus)]
- 48. Арумов Г.П., Бухарин А.В., Макаров В.С. Трёхмерные отражающие объекты в задаче моделирования лидарного сигнала от рассеивающего слоя // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 328–334. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334 (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 49. *Арумов Г.П.*, *Бухарин А.В.* Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 31–36. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-31-36 (РИНЦ) [переводная версия: Arumov G.P., Bukharin A.V. Selection of the optimal traces for

remote measurements of the microstructure of a scattering object produced from particle images // Measurement Techniques. V. 65. No. 10. (Scopus, Q3)]

- 50. Левина Г.В. Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 2. С. 47-59. DOI: 10.48612/fpg/vaxg-xdmv-11pn (Scopus, Q3)»
- 51. *Арумов Г.П.*, *Бухарин А.В.* Сочетание локальных и лидарных методов в задаче определения микрофизических свойств рассеивающей среды // Труды МФТИ. 2022. Том 14. № 4 (56). С.. (РИНЦ) в печати
- 52. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* К вопросу об интерпретации базовых лидарных коэффициентов для лидара обратного рассеяния // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. (РИНЦ, Scopus, Q3) в печати
- 53. Гришин В.А. Мультиразрешение в оптических навигационных системах космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 105-113. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-16-3-105-113 (РИНЦ, Scopus, Q3)
- 54. *Гришин В.А.* Задача формирования покрытия области неопределенности эталонами для систем оптической навигации // Автоматика и телемеханика. 2022. № 2. С. 63-77. DOI: 10.31857/S0005231022120066. (РИНЦ)
- 55. Шаповалов Д.А., Черкашина Е.В., Клюшин П.В., Гаврилова Л.А., Лимонов А.Н., Евстратова Л.Г., Савинова С.В., Лепехин П.П., Скубиев С.И., Широков Р.С., Барбасов В.К., Ведешин Л.А., Братков В.В., Мусаев М.Р., Магомедова А.А., Мусаева З.М., Шалов Т.Б. Методы дистанционного зондирования и космическая навигация в технологиях точного земледелия // Монография. Москва, 2022. 423 с. DOI: ISBN 978-5-00128-957-9.