

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 01.20.0.2.00164

УТВЕРЖДАЮ

Директор

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



А.А.Петрукович

« 20 » декабря 2021 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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

по теме:

МОНИТОРИНГ

0024-2021-0005

(промежуточный, этап 2021/1)

Научный руководитель

д-р .техн. наук

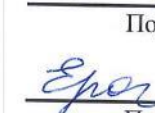
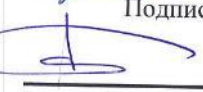
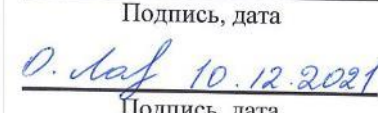
Е.А. Лупян

Москва

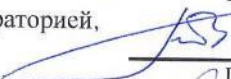
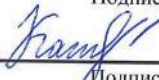
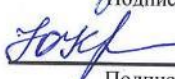
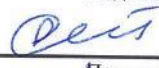
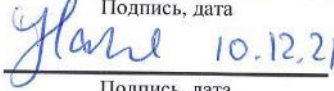
2021

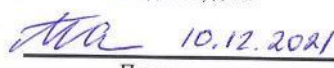
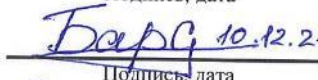
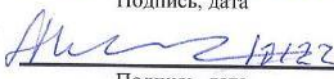
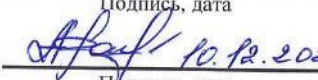
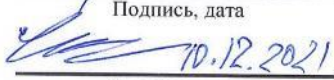
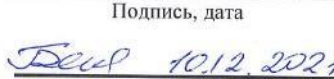
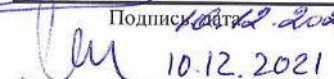
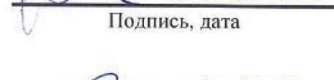
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

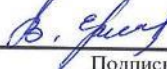
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

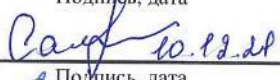
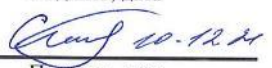
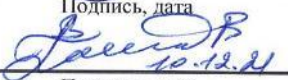
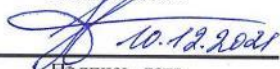
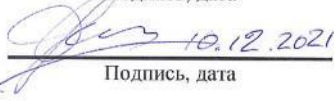
Руководитель темы, Зав отделом, докт. техн. наук	 <u>10.12.21</u> Подпись, дата	Е.А.Лупян (раздел 1-8, введение, заклочение)
Ответственный исполнитель, Зав отделом, докт. техн. наук	 <u>10.12.21</u> Подпись, дата	Е.А.Лупян (раздел 1,3)
Ответственный исполнитель, главный научный сотрудник, д.т.н. , профессор	 <u>10.12.21</u> Подпись, дата	С.А. Барталев (раздел 2,7,8)
Ответственный исполнитель, зав. отд., д.ф.-м.н.	 <u>10.12.21</u> Подпись, дата	Д.М. Ермаков (раздел 3,4,5)
Ответственный исполнитель, зав.отд., д.ф.-м.н.	 <u>10.12.2021</u> Подпись, дата	Н.С. Ерохин (раздел 5)
Ответственный исполнитель, гл. конструктор проекта	 <u>10.12.2021</u> Подпись, дата	И.В. Полянский (раздел 6)
Ответственный исполнитель, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.	 <u>10.12.2021</u> Подпись, дата	О.Ю. Лаврова (раздел 4,7)

Исполнители отдела 56

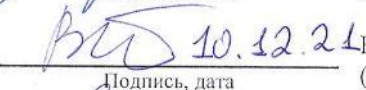
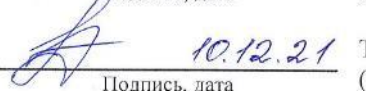
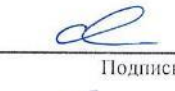
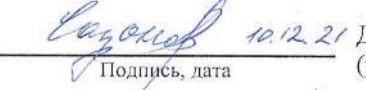
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.	 10.12.21	Мазуров А.А. (раздел 1,7)
	Подпись, дата	
заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.	 10.12.21	В.Н. Пырков (раздел 1)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, зав. лаб., к.т.н.	 10.12.21	И.В. Балашов (раздел 1,3)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, зав. лаб., к.т.н.	 10.12.21	М.А. Бурцев (раздел 1,3,7)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, зав. лаб., к.т.н.	 10.12.21	А.А. Прошин (раздел 1,3,7)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, зав. сектором, к.ф.-м.н.	 10.12.21	Д.Е. Плотников (раздел 2,7)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.21	В.А. Егоров (раздел 2,8)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.21	А.В. Кашницкий (раздел 1,3)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	 10.12.21	Ю.С. Крашенинникова (раздел 1)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, д.т.н.	 10.12.21	П.Б. Руткевич (раздел 1,5)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.21	Ф.В. Стыщенко (раздел 2,8)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.21	В.А. Толпин (раздел 1)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.21	И.А. Уваров (раздел 1)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.21	С.А. Хвостиков (раздел 2,8)
	Подпись, дата	
старший научный сотрудник, к.г.н.	 10.12.21	Шабанов Н.В. (раздел 2)
	Подпись, дата	
научный сотрудник, к.ф.- м.н.	 10.12.21	В.О. Жарко (раздел 2,7,8)
	Подпись, дата	
научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.21	А.А. Златопольский (раздел 1)
	Подпись, дата	
научный сотрудник, к.т.н.	 10.12.2021	Д.А. Кобец (раздел 1,7)
	Подпись, дата	

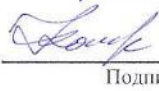
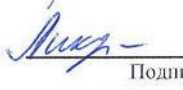
младший научный сотрудник	 10.12.2021 Подпись, дата	П.А. Колбудаев (раздел 1,3)
младший научный сотрудник	 10.12.2021 Подпись, дата	Матвеев А.М. (раздел 1)
младший научный сотрудник	 10.12.2021 Подпись, дата	Миклашевич Т.С. (раздел 2)
младший научный сотрудник	 10.12.21 Подпись, дата	И.Г. Сычугов (раздел 1)
младший научный сотрудник	 10.12.2021 Подпись, дата	Ховратович Т.С. (раздел 2,8)
главный специалист, к.т.н.	 10.12.21 Подпись, дата	С.С. Бартаев (раздел 2)
главный специалист	 10.12.2021 Подпись, дата	А.Ю. Дегай (раздел 1)
главный специалист, к.ф.-м.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	А.А. Козочкина (раздел 1,7)
ведущий специалист, д.т.н.	 10.12.21 Подпись, дата	Л.А. Ведешин (раздел 1)
ведущий специалист	 10.12.2021 Подпись, дата	А.А. Романов (раздел 1)
ведущий специалист	 10.12.21 Подпись, дата	В.П. Саворский (раздел 1,7)
ведущий специалист	 10.12.2021 Подпись, дата	Г.С. Самиуллина (раздел 1,7)
главный конструктор проекта	 10.12.2021 Подпись, дата	В.А. Скачков (раздел 1)
ведущий конструктор, к.х.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	З.С. Белокопье (раздел 1)
ведущий конструктор	 10.12.21 Подпись, дата	Д.В. Ершов (раздел 2)
Ведущий конструктор, к.г.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	Ладонина Н.Н. (раздел 2,7)
ведущий конструктор.	 10.12.2021 Подпись, дата	Марченков В.В. (раздел 1)
ведущий конструктор	 10.12.21 Подпись, дата	Панова О.Ю. (раздел 1,2)
ведущий инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Артамонова Ю.В. (раздел 1)

ведущий инженер	 10.12.21 Подпись, дата	М.В. Радченко (раздел 1)
ведущий инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Л.В. Романова (раздел 1)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	А.В. Алдушин (раздел 1)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	М.В. Андреев (раздел 1)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	М.А. Богодухов (раздел 2)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	А.А. Бриль (раздел 1,7)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Е.В. Бушмелева (раздел 1)
инженер	 10.12.212 Подпись, дата	И.И. Ворушилов (раздел 2,8)
инженер	 10.12.212 Подпись, дата	П.В. Денисов (раздел 1)
инженер	 10.12.212 Подпись, дата	Д.С. Дианова (раздел 1,7)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	В.В. Ермаков (раздел 1)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Е.С. Ёлкина (раздел 2)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	В.Ю. Ефремов (раздел 1,3)
инженер	 10.12.212 Подпись, дата	А.А. Иванова (раздел 2)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	Р.И. Камбалина (раздел 1)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	А.М. Константинова (раздел 1)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	Д.В. Лозин (раздел 1)
инженер	 10.12.212 Подпись, дата	Г.С. Моисеенко (раздел 1)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	Б.И. Рузаков (раздел 1)

инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	Б.П. Руткевич (раздел 1)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	И.А. Сайгин (раздел 2,8)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Е.В. Самофал (раздел 2)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	К.С. Сенько (раздел 1)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	И.И. Середа (раздел 1)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	В.М. Сидоренков (раздел 2)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	А.В. Солодилов (раздел 1)
инженер	 10.12.2021 Подпись, дата	К.А. Трошко (раздел 1)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Черных В.Н. (раздел 1)
техник	 10.12.2021 Подпись, дата	Д.Л. Пчеловодов (раздел 1)
Старший лаборант	 10.12.2021 Подпись, дата	Юдин Д.А. (раздел 1,7)

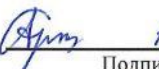
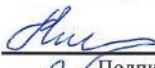
Исполнители отдела 55

главный научный сотрудник, д.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	Е.А. Шарков (раздел 3,4)
ведущий научный сотрудник, к.н.	 10.12.21 Подпись, дата	Г.П. Арумов (раздел 5)
ведущий научный сотрудник, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	А.В. Кузьмин (раздел 3,4,5)
ведущий научный сотрудник, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	М.Д. Расв (раздел 4)
старший научный сотрудник, к.н.	 10.12.21 Подпись, дата	Д.А. Боярский (раздел 3)
старший научный сотрудник, к.н.	 10.12.21 Подпись, дата	А.В. Бухарин (раздел 5)
старший научный сотрудник, к.н.	уволена	Л.Б. Ванина-Дарт (раздел 5)
старший научный сотрудник, к.н.	 10.12.21 Подпись, дата	М.И. Митягина (раздел 4,7)
старший научный сотрудник, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	М.Н. Садовский (раздел 3,4,5)
старший научный сотрудник, д.н.	 10.12.21 Подпись, дата	В.В. Стерлядкин (раздел 3,4,5)
старший научный сотрудник, к.н.	 10.12.21 Подпись, дата	В.В. Тихонов (раздел 3)
научный сотрудник	 10.12.21 Подпись, дата	Т.Ю. Бочарова (раздел 4,7)
научный сотрудник, к.н.	уволен	Н.А. Князев (раздел 5)
научный сотрудник	 10.12.21 Подпись, дата	А.Н. Ляш (раздел 5)
научный сотрудник, к.н.	 10.12.21 Подпись, дата	Д.С. Сазонов (раздел 3,4,5)
научный сотрудник, к.н.	уволен	Е.И. Скворцов (раздел 4)

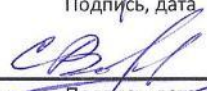
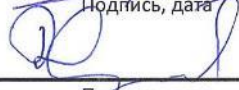
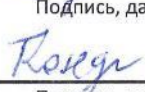
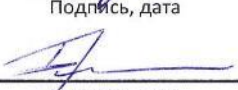
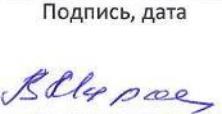
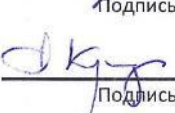
научный сотрудник, к.н.	 10.12.21	А.Я. Строчков (раздел 4,7)
	Подпись, дата	
младший научный сотрудник	 10.12.21	Е.В. Краюшкин (раздел 4)
	Подпись, дата	
младший научный сотрудник	 10.12.21	Е.В. Папинов (раздел 3,4,5)
	Подпись, дата	
главный специалист	 10.12.2021	Н.Ю. Комарова (раздел 3,7)
	Подпись, дата	
главный специалист	уволена	И.В. Покровская (раздел 3)
главный специалист	 10.12.2021	М.Ю. Русаков (раздел 4)
	Подпись, дата	
ведущий программист	 10.12.21	С.А. Вторин (раздел 3,4)
	Подпись, дата	
ведущий математик	 10.12.21	А.Б. Селунский (раздел 3,4,5)
	Подпись, дата	
ведущий математик	 10.12.2021	А.В. Тюрин (раздел 3)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	 10.12.21	Т.А. Алексеева (раздел 3)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	 10.12.21	А.А. Горшков (раздел 3,4,5)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	уволена	О.О. Зверева (раздел 3)
ведущий инженер	уволена	И.С. Кондакова (раздел 7)
ведущий инженер	 10.12.2021	М.А. Кузнецова (раздел 3)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	 10.12.2021	Т.В. Ликучева (раздел 7)
	Подпись, дата	
ведущий инженер	 10.12.21	Ю.В. Соколова (раздел 3)
	Подпись, дата	
инженер	 10.12.2021	Т.С. Арищенко (раздел 7)
	Подпись, дата	

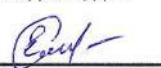
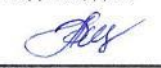
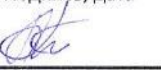
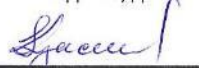
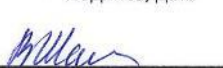
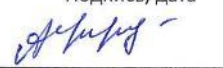
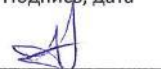
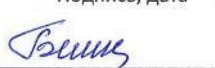
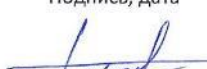
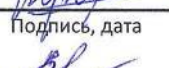
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Д.А. Елизаров (раздел 4)
инженер	 10.12.21 Подпись, дата	Н.А. Князев (раздел 4,7)
инженер.	 10.12.21 Подпись, дата	А.Ю. Баданов (раздел 3)
электроник	 10.12.21 Подпись, дата	В.С. Антонов (раздел 4)

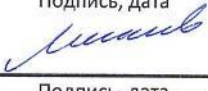
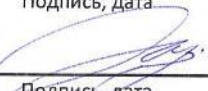
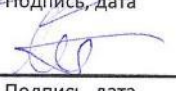
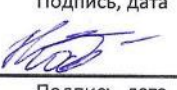
Исполнители отдела 51

главный научный сотрудник дн	 10.12.2021 Подпись, дата	В.Е. Захаров (раздел 5.2.6)
ведущий научный сотрудник, д.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	Н.М. Астафьева (раздел 5.2.4)
ведущий научный сотрудник, д.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	Е.Б. Кудашев (разделы 5.2.1, 5.2.2)
ведущий научный сотрудник, д.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	О.Г. Онищенко (раздел 5.2.4)
зав лабораторией, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	С.Н. Артеха (раздел 5.2.3)
старший научный сотрудник, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	А.А. Гусев (раздел 5.4)
старший научный сотрудник, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	Г.В. Левина (раздел 5.2.5)
старший научный сотрудник	 10.12.2021 Подпись, дата	С.Л. Шалимов (раздел 5.1)
научный сотрудник, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	Н.Н. Зольникова (раздел 5.2.6)
младший научный сотрудник, к.н.	 10.12.2021 Подпись, дата	Л.А. Михайловская (раздел 5.2.3)
главный специалист	 10.12.2021 Подпись, дата	Н.И. Каленова (раздел 5.2.1)

Исполнители отдела 57

зав отдела, д.н.	 _____ Подпись, дата	Р.В. Бессонов (раздел 6)
главный научный сотрудник, д.н.	 _____ Подпись, дата	Г.А. Аванесов (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 _____ Подпись, дата	С.В. Воронков (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 _____ Подпись, дата	Жуков Б.С. (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 _____ Подпись, дата	Т.В. Кондратьева (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 _____ Подпись, дата	А.В. Никитин (раздел 6)
научный сотрудник, к.н.	 _____ Подпись, дата	Н.Н. Брысин (раздел 6)
научный сотрудник	 _____ Подпись, дата	А.Н. Василейская (раздел 6)
научный сотрудник	 _____ Подпись, дата	Н.А. Строилов (раздел 6)
младший научный сотрудник	 _____ Подпись, дата	Е.В. Белинская (раздел 6)
младший научный сотрудник	 _____ Подпись, дата	С.А. Прохорова (раздел 6)
младший научный сотрудник	 _____ Подпись, дата	П.С. Сметанин (раздел 6)
младший научный сотрудник	 _____ Подпись, дата	Я.Д. Эльяшев (раздел 6)
главный конструктор проекта	 _____ Подпись, дата	В.М. Муравьев (раздел 6)
главный конструктор проекта	 _____ Подпись, дата	М.И. Куделин (раздел 6)
главный специалист	 _____ Подпись, дата	А.А. Крупин (раздел 6)

ведущий конструктор	 Подпись, дата	В.Ю. Белов (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата	А.А. Дроздов (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата	А.Н. Лукин (раздел 6)
ведущий инженер	 Подпись, дата	Е.А. Соловьева (раздел 6)
ведущий инженер	 Подпись, дата	Э.А. Суханова (раздел 6)
ведущий программист	 Подпись, дата	Е.В. Коломеец (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата	Е.Б. Краснопевцева (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата	В.А. Шамис (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата	А.А. Курячая (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата	Л.М. Суворова (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата	В.Д. Устинов (раздел 6)
инженер	 Подпись, дата	Н.Г. Ширшова (раздел 6)
инженер	 Подпись, дата	Е.В. Ядвичук (раздел 6)
Инженер	 Подпись, дата	Н.Ф. Абрамов (раздел 6)
Инженер	 Подпись, дата	М.И. Беличенко (раздел 6)
Инженер	 Подпись, дата	А.В. Бережков (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата	А.В. Гусева (раздел 6)

ведущий конструктор	 _____ Подпись, дата	Р.Р. Дудкина (раздел 6)
Инженер	 _____ Подпись, дата	А.А. Кобелева (раздел 6)
Инженер	 _____ Подпись, дата	С.А. Корольков (раздел 6)
Инженер	 _____ Подпись, дата	К.П. Любченко (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата	Д.К. Новиков (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата	Т.А. Суворова (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата	Ю.П. Теремок (раздел 6)
Программист	 _____ Подпись, дата	М.В. Ваваев (раздел 6)
программист	 _____ Подпись, дата	А.С. Лискив (раздел 6)
программист	 _____ Подпись, дата	Д.И. Хорохорин (раздел 6)
станочник широкого профиля 8 разряда	 _____ Подпись, дата	В.И. Панферов (раздел 6)
техник	 _____ Подпись, дата	И.В. Кондратьев (раздел 6)

Исполнители отдела Ц90

специалист



10.12.2021

А.В. Щукина
(раздел 7)

Подпись, дата

нормоконтролер



13.12.2021

Е.А.Лупян

Подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчёт 225 стр., 131 рис., 167 источника.

НАСТОЯЩИЙ ОТЧЁТ ПОСВЯЩЁН ОПИСАНИЮ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ, ПОЛУЧЕННЫХ В 2021 ГОДУ В РАМКАХ ТЕМЫ «МОНИТОРИНГ» (№ 0024-2021-0005), ВЫПОЛНЯЮЩЕЙСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ ИНСТИТУТОМ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. В ОТЧЁТЕ ПРИВОДЯТСЯ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ, ЗАПЛАНИРОВАННЫХ НА 2021 ГОД ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ: «МОНИТОРИНГ-ТЕХНОЛОГИИ», «МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА», «МОНИТОРИНГ-КЛИМАТ», «МОНИТОРИНГА-ОКЕАН», «МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА», «МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ», «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.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	2
РЕФЕРАТ.....	15
СОДЕРЖАНИЕ.....	16
ВВЕДЕНИЕ	22
РАЗДЕЛ 1 МОНИТОРИНГ-ТЕХНОЛОГИИ	24
Введение	24
1.1 Развитие подходов организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач	24
1.1.1 Проведение анализа возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга состояния объектов «пиксельных» и «субпиксельных» размеров	24
1.1.2 Разработка методов анализа состояния ледового покрова	26
1.1.3 Эффект «согласованного голосования» и возможности его использования	28
1.1.4 Развитие подходов оценки состояния сельскохозяйственных культур.....	33
1.1.5 Развитие подходов картографирования использования сельскохозяйственных земель	35
1.1.6 Разработка подходов к организации дистанционного мониторинга динамики речных стоков.....	36
1.1.7 Разработка системы обработки данных для оценки испарений и накопленного экологического ущерба	37
1.2 Создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования.....	39
1.2.1 Разработка подходов к оценке эффективности выполнения работ по тушению лесных пожаров на основе данных дистанционного мониторинга	39
1.2.2 Развитие подходов оперативного представления информации дистанционного мониторинга природных пожаров.....	41
1.2.3 Развитие подходов мониторинга подвижных объектов	42
1.3 Поддержка и развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений, в том числе решения междисциплинарных задач	45
1.3.1 Текущие задачи ЦКП и их актуальность	45
1.3.2 Структура и технические возможности ЦКП и их развитие в 2021 году.....	45
1.3.3 Архивы спутниковых данных и их наполнение в 2021 году	47
1.3.4 Основные информационные продукты, предоставляемые ЦКП.....	51
1.3.5 УНУ «Вега-Science» и развитие её в 2021 году	52
1.3.6 Научные и прикладные информационные системы, использовавшие возможности ЦКП в 2021 году	53
1.3.7 Пользователи ЦКП.....	56
1.3.8 Научные проекты, выполняемые с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в 2021 году	56

1.3.9 Основные публикации, при подготовке которых были использованы возможности ЦКП.....	58
1.3.10 Анализ текущих особенностей и возможных направлений развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг»	58
1.3.10.1 Текущие особенности развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг».....	58
1.3.10.2 Возможные перспективные направления развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг».....	59
1.4 Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса	60
1.4.1 Построение сезонных временных серий безоблачных ежедневных измерений КМСС на территорию России.....	60
1.4.2 Оценка точности географической привязки временных рядов предварительно обработанных изображений КМСС.	65
1.4.3 Разработка методов и подходов работы с данными КА «Арктика М».....	68
1.4.4. Формирование архива геопривязанных данных МКС на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг»	70
Заключение	73
РАЗДЕЛ 2 МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА.....	74
Введение	74
2.1 Развитие научных основ и методов обработки временных рядов мультисенсорных данных ДЗЗ различного пространственного и временного разрешения для обеспечения долговременного мониторинга наземных экосистем	74
2.1.1 Развитие методов предварительной обработки данных MODIS, VIIRS	74
2.1.2. Развитие методов построения и нормализации зимних композитных изображений покрытой снегом земной поверхности по данным Terra-MODIS ..	81
2.1.3 Разработка методов предварительной обработки данных высокого пространственного разрешения	86
2.2 Развитие методов обработки данных ДЗЗ для получения устойчивых нормализованных наборов и долговременных рядов данных для изучения наземных экосистем	88
2.2.1 Развитие метода оценки проективного покрытия древесного полога леса.....	88
2.2.2. Развитие методов получения однородных временных рядов индекса листовой поверхности на основе данных MODIS	92
2.3 Развитие методов дистанционного мониторинга динамики наземных экосистем с использованием физических и эколого-математических моделей	92
2.3.1. Разработка алгоритма разделения индекса листовой поверхности между верхним и нижним ярусом лесов России	92
2.3.2 Исследование изменений спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов засушливой зоны России и сопредельных территорий при пирогенном воздействии.....	98
2.4 Формирование и анализ многолетних рядов наблюдений наземных экосистем для исследования глобальных изменений, решения задач рационального природопользования и устойчивого развития	102

2.4.1 Картографирование пахотных земель России на основе сезонных серий данных MODIS высокого временного разрешения	102
2.4.2 Разработка методов автоматического картографирования используемой пашни на основе спутниковых данных КМСС	105
2.4.3 Исследование пространственно-временной динамики выгоревших площадей в пойменных ландшафтах засушливой зоны России	106
2.4.4 Моделирование динамики площадей водных объектов засушливой зоны России.....	108
Заключение	114
РАЗДЕЛ 3 МОНИТОРИНГ-КЛИМАТ	116
Введение	116
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	116
3.1.1 Анализ вертикально интегрированных потоков атмосферного водяного пара по данным спутникового радиотепловидения, метеозондов и реанализа.....	117
3.1.2. Расчёт динамики поля интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным МТВЗА-ГЯ.....	121
3.1.3 Анализ факторов, приводящих к большим ошибкам в определении снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии	123
3.1.4 Оценка гидрологических изменений заболоченных территорий Арктики и субарктики методами микроволновой радиометрии	130
3.2 Развитие методов диагностики крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений	133
3.2.1 Анализ масштабов аномальной горимости лесов России в 2021 году	133
3.2.2 Непрерывный мульти-спутниковый мониторинг вулканов для обнаружения извержений на примере бокового прорыва вулкана Ключевской в феврале 2021 года	134
3.2.3 Создание методов оперативной оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе анализа интенсивности горения.....	137
3.2.4 Разработка методов оперативной оценки площадей, пройденных огнём	139
3.2.5 Анализ извержения грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море 4 июля 2021 года	142
3.2.6 Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых по данным спутниковой микроволновой радиометрии	145
Заключение	150
РАЗДЕЛ 4 МОНИТОРИНГ-ОКЕАН	151
Введение	151
4.1 Исследования нелинейной динамики морского волнения методами спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга морских акваторий	151

4.2 Разработка научных основ совместного использования новейших микроволновых и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий, включая арктические регионы.....	154
4.2.1 Выявление зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный период 2020/2021 годов.....	154
4.2.2 Применение комплексного анализа спутниковых и метеорологических данных для оценки загрязнения морской поверхности в результате аварийного разлива нефти на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума.....	155
4.2.3 Комплексное использование спутниковых данных и результатов синхронных подспутниковых измерений для определения мутности воды и концентрации взвешенного вещества в приустьевых зонах Чёрного и Каспийского морей.....	157
4.3 Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оценки параметров процессов в верхнем слое океана и в приповерхностном слое атмосферы.....	158
4.3.1 Апробация методов количественной оценки параметров выноса вод Калининградского залива в Балтийское море на основе многолетних данных дистанционного зондирования из космоса и результатов подспутниковых натурных измерений.....	158
4.3.2 Апробация методов количественной оценки нефтяных загрязнений, вызванных сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты, в северо-восточной части Чёрного моря и в Каспийском море на основе многолетних данных дистанционного зондирования из космоса.....	160
4.3.3. Восстановление температуры поверхности океана, скорости приповерхностного ветра, интегрального паросодержания и интенсивности осадков по данным МТВЗА-ГЯ.....	161
4.3.3.1. ТПО, скорость ветра и интегральное паросодержание.....	161
4.3.3.2 Интенсивность осадков.....	163
4.3.3.3 Корректировка географической привязки данных микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ.....	164
Заключение.....	166
РАЗДЕЛ 5 МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА.....	168
Введение.....	168
5.1 Разработка научных основ и методов анализа временных серий спутниковых многосенсорных наблюдений исследований и мониторинга атмосферных явлений.....	168
5.1.1 Влияние широтного и меридионального ветра на формирование слоёв спорадической ионизации в ионосфере.....	168
5.1.2 Проявление атмосферных движений планетарного масштаба в геомагнитных вариациях.....	169
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.....	170
5.2.1 Подавление акустического шума при измерении пристеночных турбулентных пульсаций давления.....	170

5.2.2 Развитие экспериментальных исследований турбулентных пристеночных пульсаций давления. критический анализ и обобщение накопленных опытных данных	171
5.2.3 Атмосферные вихри в геомагнитной аномалии.....	171
5.2.4 Стационарная концентрированная вихревая модель.....	172
5.2.5 Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения мезомасштабных вихрей.....	173
5.2.6 Изменение климата: численное моделирование поведения тропических циклонов в контексте глобального потепления.....	174
5.3 Разработка новых методов обработки данных дистанционных наблюдений в ИК и видимом диапазоне и лидарных наблюдений облачности	174
5.3.1 Анализ способов взаимного перехода между микроскопическими параметрами рассеивающей среды и параметрами обратного сигнала из атмосферы с использованием эквивалентного рассеивающего объекта	174
5.4 Исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов	175
5.5 Развитие методик решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы по данным ДЗЗ с использованием нейронных сетей.....	176
5.5.1 Восстановление температурно-влажностных профилей атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2-2	176
5.5.2 Восстановление интегрального паросодержания атмосферы над сушей по данным SSMIS.....	179
Заключение	182
РАЗДЕЛ 6 МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ.....	183
Введение	183
6.1 Разработка методик, методов и алгоритмов полётных радиометрической и геометрической калибровок приборов КМСС-М и КМСС-2, в том числе, создание банка контрольных точек.....	183
6.2. Разработка методики и проведение полётной радиометрической калибровки приборов КМСС-М и КМСС-2.....	184
Заключение.....	187
РАЗДЕЛ 7 МОНИТОРИНГ-ИНФРАСТРУКТУРА.....	188
Введение	188
7.1. Проведение ежегодной международной конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://conf.rse.geosmis.ru/)	188
7.2 Проведение научных семинаров и школ-конференций по фундаментальным проблемам ДЗЗ из космоса	189
7.2.1 Проведение ежегодной Всероссийской научной школы-конференции молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса (http://conf.rse.geosmis.ru/)	189
7.2.2 Проведение Всероссийского семинара «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=814)	190

7.3 Выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://jr.rse.cosmos.ru/)	190
7.4 Проведение работ по подготовке и повышению квалификации кадров на базе Научно-образовательного центра ИКИ РАН. В том числе:	190
7.4.1 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»	190
7.4.2 Проведение конкурсов работ молодых учёных, работающих в области дистанционного мониторинга Земли, природных и антропогенных сред	191
7.4.3 Научно-методическое обеспечение работ базовых кафедр ИКИ РАН и образовательных курсов, проводимых специалистами ИКИ РАН, по направлению «Дистанционного зондирования и исследования Земли из космоса»	191
Заключение	192
РАЗДЕЛ 8 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИКИ РАН, ВЫПОЛНЕННЫХ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ В 2021 ГОДУ	
8.1. Создание методов оперативной оценки состояния озимых сельскохозяйственных культур на основе данных спутниковых наблюдений.....	193
8.2. Методика комплексного анализа спутниковых и метеорологических данных для оценки загрязнения морской поверхности в результате аварийных разливов нефти.....	193
РАЗДЕЛ 9 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИКИ РАН, ГОТОВЫЕ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В 2021 ГОДУ	
РАЗДЕЛ 10 ГРАНТЫ ПО НАПРАВЛЕНИЮ МОНИТОРИНГ	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	
ПУБЛИКАЦИИ.....	
Публикации в зарубежных изданиях	199
Публикации в отечественных научных рецензируемых изданиях	201
Статьи в сборниках материалов конференций	206
Материалы конференций	206
Тезисы, доклады, циркуляры	212
Патенты.....	215
Публикации (РНФ)	215
Публикации в соавторстве с зарубежными авторами	219
Публикации по теме Мониторинг в рецензируемых изданиях.....	219

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 соответствии 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 № 01.20.0.2.00164).

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-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 2021 г., которые выполнялись в соответствии 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
- Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса

Подробно полученные в данном направлении результаты изложены в следующих научных публикациях [1, 2, 5, 6, 18, 19, 20, 23, 28, 29, 31–35, 43, 73, 82–85, 87–95, 100, 110–112, 136, 137, 141, 144, 151, 152].

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

1.1.1 Проведение анализа возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга состояния объектов «пиксельных» и «субпиксельных» размеров

При решении задач мониторинга растительности с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) часто используется анализ значений различных дистанционных индикаторов состояния растений в течение сезона вегетации. В частности, при мониторинге сельскохозяйственных земель может применяться анализ средних для поля значений индекса NDVI, измеренных в течение сезона вегетации. Использование данных, полученных на основе приборов с разным пространственным разрешением, может влиять на вычисленные величины среднего значения вегетационного индекса на каждом поле в зависимости от его размера, площади и морфологии.

В 2021 г. был выполнен анализ влияния пространственного разрешения данных ДЗЗ на получаемые значения среднего вегетационного индекса NDVI на поле в зависимости от его площади. Использовались три набора спутниковых данных с разным пространственным разрешением. Для каждого набора данных был использован временной ряд восстановленных ежедневных безоблачных изображений вегетационного индекса NDVI. Технология создания таких ежедневных изображений опирается на весовую реализацию метода локальной взвешенной регрессии полиномами LOESS для восстановления временных рядов безоблачных спутниковых наблюдений без необходимости использования масок облачности и теней. Получение и обработка спутниковых данных были выполнены с помощью возможностей Центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг. Использовались:

1. Серии восстановленных изображений низкого пространственного разрешения (250 метров на пиксель), полученные на основе данных прибора MODIS спутников Aqua и Terra.

2. Серии восстановленных изображений с пространственным разрешением 60 м на пиксель, полученные на основе прибора KMSS (камеры МСУ-М) спутника «Метеор-М» № 2.
3. Серии восстановленных изображений высокого пространственного разрешения (10 метров на пиксель), полученные на основе прибора MSI спутников Sentinel-2.

Была взята выборка сельскохозяйственных полей в различных регионах России. Выборка суммарно включала более 10 тыс. полей. Для каждого поля было рассчитано среднее значение индекса NDVI на поле по каждому приведённому набору данных. При расчёте среднего значения вклад каждого пикселя растровых данных при пересечении с контуром поля учитывался пропорционально площади этого пикселя. 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. В качестве примера полученных результатов на рисунке 1.1.1.1 представлены значения коэффициента корреляции Пирсона для групп полей разной площади при учёте значений индекса NDVI за период между 15-й и 35-й неделями года.

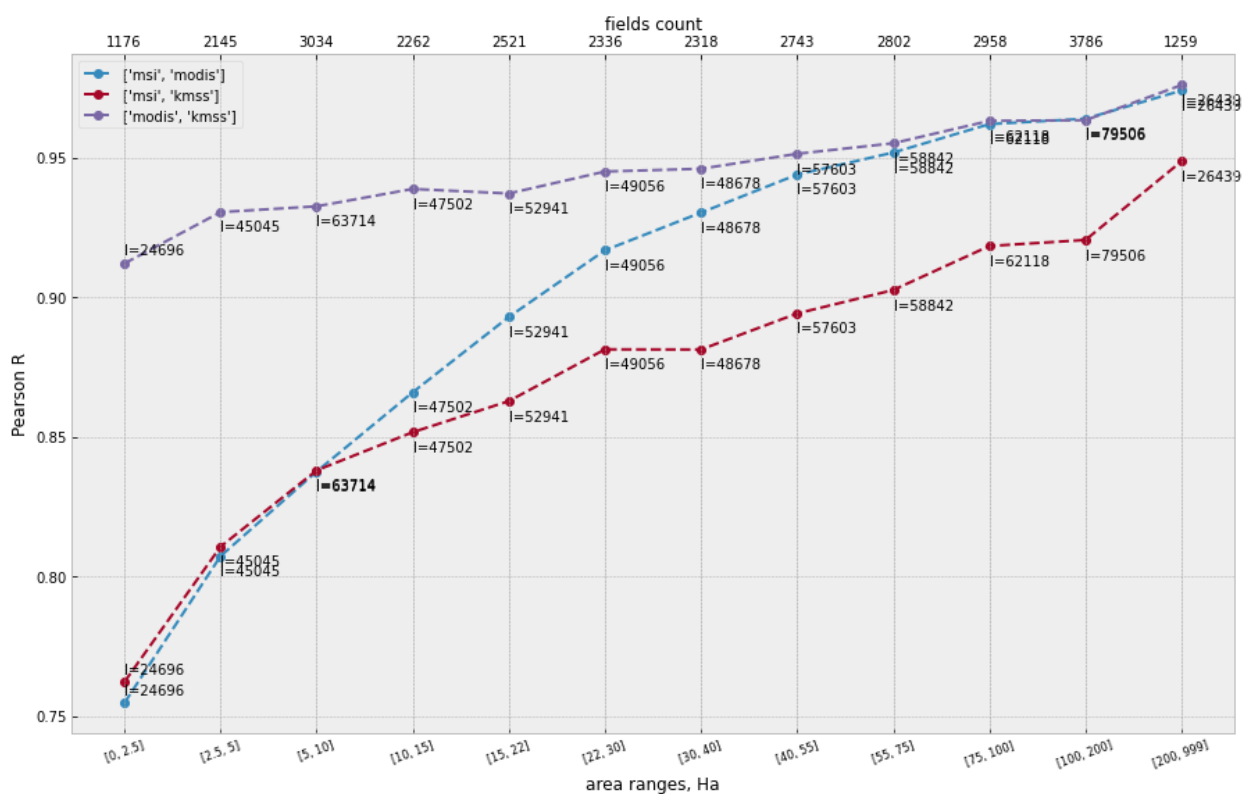


Рисунок 1.1.1.1 — Изменение коэффициента корреляции для групп полей разной площади при учёте значений индекса NDVI за период между 15 и 35 неделями года. Выборка из 29 340 полей в разных регионах России. По оси ординат - значения коэффициента корреляции Пирсона, по оси абсцисс — диапазон площадей для каждой группы полей в гектарах. Количество полей в каждой группе подписано по оси ординат в верхней части графика. Рядом с каждой точкой приведено число независимых ненулевых значений индекса NDVI, участвовавших в расчёте. Красным цветом приведена пара MSI и KMSS (10 и 60 м на пиксель), голубым цветом приведена пара MSI и MODIS (10 и 250 м на пиксель), фиолетовым цветом приведена пара MODIS и KMSS (250 и 60 м на пиксель)

В процессе исследования также дополнительно был проведён анализ влияния на корреляцию разных факторов: учёт значений за разные периоды года, влияние шага

группировки полей по площади, учёт только однородных полей и выборки из разных регионов России. При различной комбинации этих факторов абсолютные значения коэффициента корреляции для каждой группы могли меняться в худшем случае до 10 % от приведённых на рисунке значений, но общая тенденция оставалась неизменной. Результаты корреляционного анализа показали общую высокую согласованность среднего значения индекса NDVI на поле по разным данным: даже для маленьких полей с размером менее 10 га значения коэффициента корреляции Пирсона превысило 0,75 для пар KMSS-MSI и MODIS-MSI и 0,85 для пары MODIS-KMSS. При этом с увеличением размера полей коэффициент корреляции достаточно равномерно рос до значений выше 0,95 на полях с размером более 100 га. Таким образом, полученные результаты количественно показывают возможность использовать восстановленные ряды спутниковых данных для мониторинга состояния объектов даже пиксельного и субпиксельного размера.

1.1.2 Разработка методов анализа состояния ледового покрова

В 2021 г. были продолжены работы по развитию метода автоматической классификации ледового покрова по спутниковым данным оптического и ближнего ИК-диапазона. Актуальность и полнота информации о ледяном покрове важна как для обеспечения безопасности судов, так и для более эффективного промысла.

Для России наиболее актуальным является решение данной задачи для Охотского моря. Это связано с тем, что Охотское море является самым продуктивным морем России. При этом оно обладает обширной площадью ледового покрытия в период минтаевой путины, когда производится вылов основного объёма водных биологических ресурсов, что требует актуальной информации о состоянии ледового покрова.

В настоящее время регулярно представляются в автоматическом режиме данные по ледовой обстановке на основе микроволновых спутниковых данных. Пространственное разрешение таких данных не более пяти километров. Нет сомнений, в необходимости улучшения пространственного разрешения информации о ледовом покрытии.

Также предоставляются уточнённые данные по ледовой обстановке по данным радарных спутниковых снимков и снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, требующие «ручной» работы экспертов, в основном по анализу текстуры изображения.

MODIS также предоставляет данные по льдам и снегу. Но использование данного продукта крайне неудобно, так как облачность и лёд представлены одним цветом. Оператор на основе контекста и текстуры, а также по сравнению с данными предыдущих суток должен разделить лёд и облачность.

Использование данных прибора Terra-MODIS является важным для построения методики автоматической классификации ледового покрытия по причине, доступности информации в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с относительно хорошим разрешением по всему земному шару на каждые сутки.

В работах предыдущих лет на основе анализа двумерных гистограмм по нормализованным индексам и отдельным каналам MODIS (NDSI-band6 и NDWI-band4) была представлена методика полностью автоматизированной классификации ледового покрытия. NDWI — индекс аналогичный индексу NDSI, но для классификации пикселя, как «открытая вода». Анализ проводился с помощью машинного обучения, принципиальным шагом в разработке методики стал учёт сезонных особенностей для вышеуказанных гистограмм.

В ранее представленных работах приведено много примеров, существенного улучшения результатов автоматической классификации с помощью полученных корректировок критериев отнесения к различным классам. Разработанный сервис предоставления классификации ледового покрытия на основе спутниковых данных интегрирован в картографический интерфейс ОСМ.

Ниже на рисунке 1.1.2.1 представлены цвета отображения различных классов в картографическом интерфейсе ОСМ.

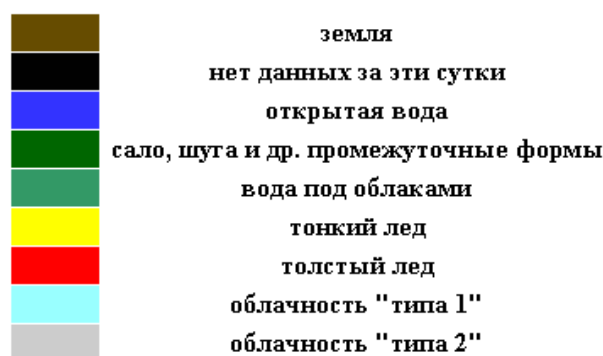


Рисунок 1.1.2.1 — Легенда классифицированных изображений

Несмотря на существенные улучшения в автоматической классификации, зона, в которой по спутниковым снимкам за день определено отнесение морской поверхности к свободной ото льда или к покрытой льдом, далеко не полная.

В 2021 г. была проведена оценка возможности с помощью композиций обработанных снимков за несколько дней существенно улучшить полноту классификации.

Были обработаны снимки MODIS за шесть зимних и весенних месяцев посредством разработанного ранее алгоритма. Затем, по полученным результатам составлены композиционные распределения, на основе четырёх дней. Каждый пиксель композита был получен самым последним «безоблачным» результатом в случае наличия хотя бы одного результата, отличного от облачного. В случае отсутствия хотя бы одного «безоблачного» результата пикселю присваивался класс как на последнем спутниковом снимке.

К сожалению, полной классификации морской поверхности получить не удалось.

Можно, однако, отметить два оптимистичных момента:

1. Было проверено, что случаев быстрого перехода из состояния «вода под облаками» в состояние «лёд» ничтожно мало: менее одного процента. Это говорит, о том что критерии отнесения к данному классу вполне надёжны. С учётом обнаруженных незначительных отклонений были проведены дополнительные корректировки критериев.

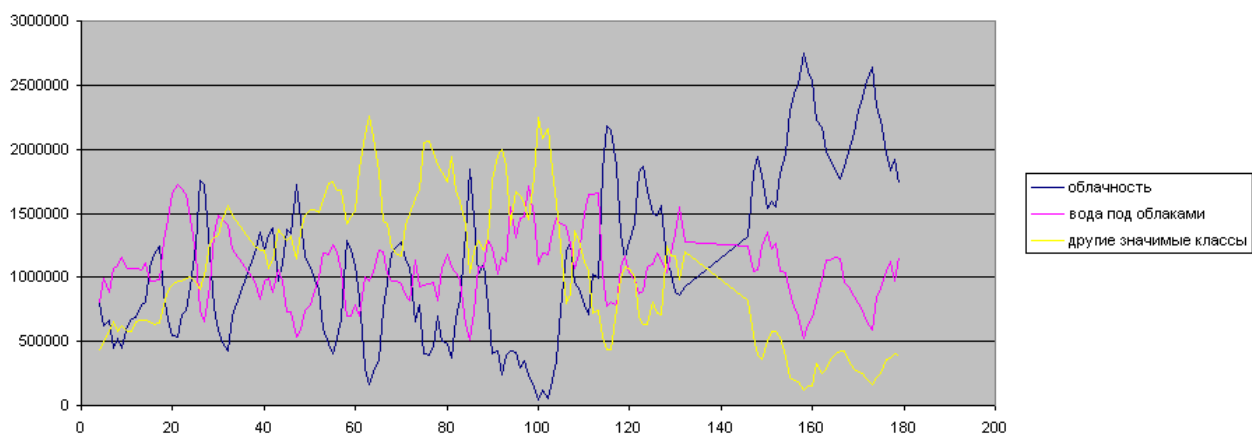


Рисунок 1.1.2.2 — Количество пикселей разных классов на композиционных сценах по дням года

2. Состояний «вода подо льдом» значительное количество. Во многих случаях не меньше, чем состояний, отнесённых к классам облачности. На рисунке 1.1.2.2 приведён график количества пикселей различных классов по дням года.

Пример значительного количества пикселей класса «вода подо льдом» приведён на рисунке 1.1.2.3.

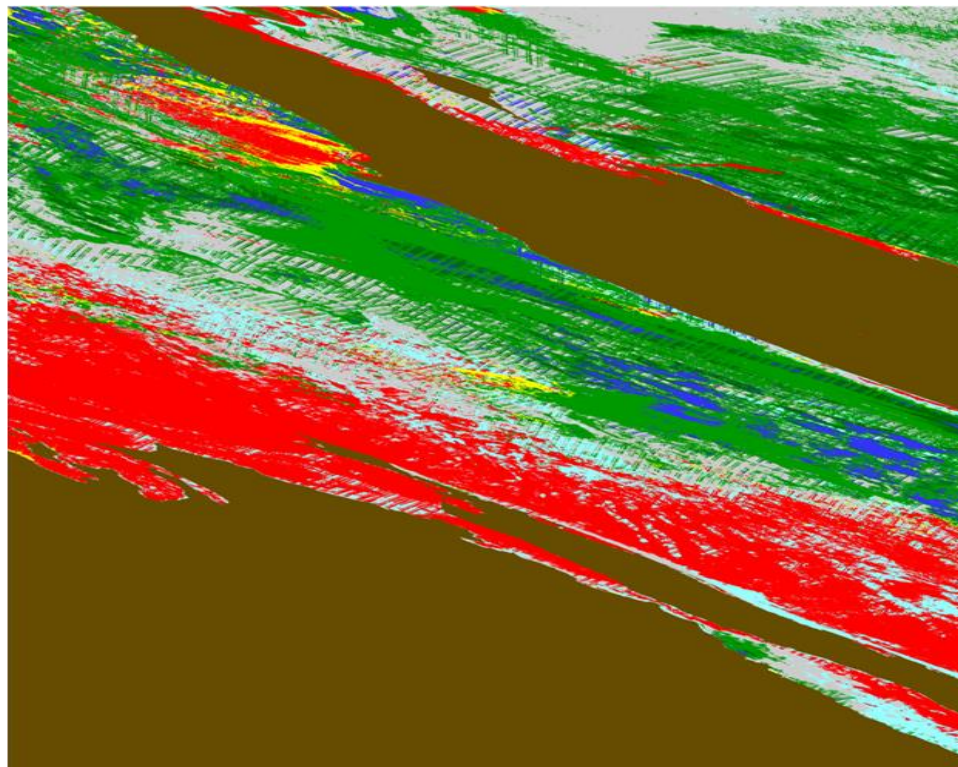


Рисунок 1.1.2.3 — Пример значительного количества пикселей класса «вода подо льдом»

Таким образом, показано, что в разработанном в методе автоматической классификации используются корректные критерии классификации пикселей спутникового снимка, в том числе отнесения зоны морской поверхности к классу «вода подо льдом».

Это, в свою очередь, позволяет значительно увеличить зону морской поверхности, на которой было проведено отнесение к классам покрытых льдом или свободных ото льда.

Этот факт говорит в пользу составления композиционных карт при совместном использовании с другими источниками ледовой информации, например, с картами на основе субмиллиметрового диапазона для улучшения их пространственного разрешения.

1.1.3 Эффект «согласованного голосования» и возможности его использования

Суть эффекта заключается в следующем. Пусть имеется датчик, измеряющий какой-то физический параметр, причём большинство показаний датчика случайны, и только небольшая часть правильна. Если значение измеряемого параметра постоянно, то при определенных условиях можно выявить эти правильные показания, даже если их число ничтожно по сравнению с общим числом измерений. Для этого нужно так организовать получение и анализ гистограммы показаний, чтобы в позиции верного измерения образовался яркий экстремум. Назовём это эффектом «согласованного голосования».

Как пример, может быть рассмотрена следующая ситуация. Изображения участка поверхности Земли, полученные в разное время и трансформированные в единую систему

координат, могут оказаться немного сдвинутыми друг относительно друга (на несколько или на первые десятки пикселей). Если изображения отличаются не существенно, то можно перебрать все возможные варианты сдвига и определить при каком сдвиге сходство (например, корреляция) изображений максимально. Однако этот способ применить во многих случаях нельзя, так как суммарная площадь изменённых участков (изменение объектов, сезонные изменения, облака, дефекты съёмки и пр.) может оказаться больше сохранившихся участков, положение которых неизвестно.

Можно было бы определить сдвиг даже по небольшому фрагменту этих изображений. Однако, неизвестно, по какому именно фрагменту можно найти реальный сдвиг, а для какого фрагмента нет соответствия, и результатом поиска будет ложное, случайное значение. Абсолютное значение оценки сходства при поиске сдвига также не могло быть достаточным критерием надёжности измерения так как сходство может быть не абсолютным, а только в целом, с различием деталей. В итоге, нет возможности определить сдвиг изображений по какому-то одному фрагменту. Средний вектор сдвига, найденный по нескольким фрагментам, также не даёт достоверную оценку, так как большинство фрагментов может дать вектор, не связанный с искомым сдвигом.

Эффект «согласованного голосования» позволил построить следующую процедуру.

Небольшой фрагмент одного изображения сравнивался с соответствующей областью второго изображения. Находилась и фиксировалась «лучший» сдвиг фрагмента, при котором сходство оказывалось максимальным. Лучший сдвиг определялся для большого числа фрагментов, равномерно покрывающих изображение, и строилась гистограмма лучших сдвигов. Оказалось, что даже при изменении большей части изображения, по пику в гистограмме можно было найти правильный сдвиг и оценить надёжность полученного результата.

Обобщим этот подход, и рассмотрим, на что следует обращать внимание, чтобы надёжно воспользоваться эффектом «согласованного голосования». Формальное описание поможет точнее описать ситуацию и позволит распространить этот метод на более широкий круг практических задач.

Сформулируем в общем виде проблему, которую постараемся решить, используя эффект согласованного голосования. Пусть в многомерном евклидовом пространстве $X = \{x\}$ заданы функции $\{F_i(x)\}$. Область определения функции обозначим $D(F_i) \subseteq X$. На множестве этих функций заданы аффинное преобразование Y и мера сходства S .

Преобразование Y осуществляется с учётом числовых параметров $\{p\}$, $Y(F_i, p_1, p_2, \dots, p_k) = F_j$. Для каждого p_i задано n_i значений, а значит, имеется $N = n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$ наборов этих параметров (векторов) $P = (p_1, p_2, \dots, p_k)$, причём существует такой «нулевой» вектор, при котором функция F_i преобразуется в себя. Отметим, что при преобразовании Y возможно изменение $D(F_i)$.

Мера S даёт числовую оценку сходства $S(F_i, F_j) = N_{ij}$ в интервале $[0,1]$, где 1 означает, что F_i и F_j идентичны, а 0 означает, что сходства нет или нет возможности осуществить сравнение. Сходство определяется по области $D_{ij} = D(F_i) \cap D(F_j)$ или в подобласти $d \subset D_{ij}$. В последнем случае будем говорить о локальном сходстве. Сходство равна 0 в том случае, если область его измерения пуста или недостаточна (последнее определяется свойствами меры).

Рассматривается следующая задача. Для пары функций F_i и F_v нужно найти вектор параметров P , который обеспечивает их максимальное сходство, $S(Y(F_i, P), F_v) = N_{iv}$. Такой вектор можно было бы найти перебором. Однако есть два обстоятельства, осложняющих поиск. Первое. Нас будет интересовать ситуация, когда в области D_{ij} функции F_i и F_v не сходны, $N_{iv} \ll 1$, но возможно есть неизвестная нам «область сходства» $A \subset D_{ij}$, для которой существует вектор P_a , обеспечивающий высокое сходство функций. Второе. Даже в этой области, A , сходство функций не абсолютно, и нет заранее определенного порогового значения сходства, на которое можно было бы опереться.

Решить поставленную задачу, когда одновременно неизвестны и область сходства, и порог сходства, и нужные параметры преобразования (и даже существуют ли они) не удалось. Однако для таких мер S , в которых высокое сходство в области D возможно только тогда, когда высоко и локальное сходство в подобластях $B \subset D$ (например, корреляция), можно сформулировать задачу несколько иначе. Чтобы найти вектор P_a будем искать не A , а его небольшие подобласти $B \subset A$, рассчитывая на то, что должно быть много областей B , в которых высокое сходство обеспечивает один и тот же вектор P_a .

Предлагается следующий алгоритм. Покроем $D(F_i)$ набором связных областей $W_m \subset X$, $W_m \cap D(F_i) \neq \emptyset$, где $m = 1, 2, \dots, M$, которые будем называть фрагментами, например, множество гиперкубов. Для каждого W_m найдём вектор P_m , который максимизирует сходство, рассчитанное по этому фрагменту, и будем говорить, что фрагмент W_m «проголосовал» за вектор P_m . Строим многомерную гистограмму, которая аккумулирует «голоса» всех фрагментов W_m . Ожидаемый эффект «согласованного голосования» основан на том, что для всех $W_m \subset A$ максимум сходства будет найден при одном и том же векторе параметров, обозначим его P_u . А для остальных W_m будут найдены разнообразные, случайные значения P_m распределённые практически равномерно. В этих условиях в позиции гистограммы голосов P_u можно ожидать яркий пик.

Если найден яркий уникальный пик гистограммы, то он указывает на вектор P_u , который обеспечивает сходство функций, а область сходства «очерчивается», хотя и довольно грубо, объединением фрагментов «голосовавших» за P_u . Если такой пик не обнаружен, то либо нет области сходства, либо неудачно организован поиск. Отметим, что предложенный алгоритм опирается не на абсолютное значение сходства, а на его относительные, максимальные значения. Решение, принимаемое по наличию яркого пика, выглядит более надёжным, чем решение по превышению порога сходства. Тому, что означает «яркий уникальный пик», как его искать, как создать условия его порождения — посвящён следующий раздел.

Обратим внимание, что решения нет и в том случае, если в гистограмме присутствует несколько пиков близкой величины. Это может произойти из-за того, что распределение случайных голосов не равномерно, имеет свой пик. Другая ситуация. У пары функций может оказаться несколько областей сходства с разными параметрами преобразования. В этом случае будет найдена область, которая существенно больше остальных. «Голоса» от меньших областей либо потеряются в фоне, либо не дадут принять решение.

Представляется вполне реальным обобщить предложенный подход на более широкий класс преобразований и пространств. Возможность работы с иными преобразованиями, Y , обусловлена тем, что в операциях алгоритма, никак не использовано то, что это преобразование является аффинным. Что касается перехода к не евклидовым пространствам X , то при этом важно сохранить возможность построения набора фрагментов, которые покрывают область определения $D(F_i)$ «равномерно» (аналогично решётке гиперкубов), чтобы в распределении случайных голосов не образовывались ложные максимумы. Также, возможно, не потребуется и связность фрагментов.

Размерность и размер «гистограммы голосования» определяется возможными вариантами «голосования», то есть размерностью и числом векторов параметров, N . Если значения каждого параметра, p_i , получены квантованием диапазона возможных значений, то увеличение диапазона и уменьшение шага квантования резко увеличивает размер гистограммы. Возможно, в каких-то ситуациях окажется допустимым сначала решать задачу при более грубом квантовании, а значит с меньшим числом вариантов, и затем перейти к детальному анализу в меньшем диапазоне. Однако, если квантование слишком

грубо, то можно не получить хорошего совпадения функций F , и надёжного экстремума меры сходства, который обеспечивает «согласованное голосование».

Число фрагментов. Для того, чтобы надёжно найти пик «согласованных голосов» в «гистограмме голосования», случайные «голоса» должны создавать достаточно ровный «фон», тогда пик, превышающий этот «фон» в несколько раз, окажется достоверным указателем на нужную позицию. Фон выравнивается, если гистограмма «населена», т.е. в её «ячейках» не мало голосов (скажем, около 10). Это можно обеспечить соответствующим соотношением между числом отсчётов гистограммы N , и числом голосов. Если голосуют все M фрагментов и случайные голоса распределены равномерно (обсудим это ниже), а достаточное среднее число голосов в каждой ячейки обозначим h , то M должно быть не меньше $N \times h$. Точнее было бы потребовать, чтобы на столько большим было $M - V$, где V — число согласованных голосов. Однако, при организации поиска число V ещё неизвестно, так что будим исходить из того, что данный метод поиска нужен, когда V относительно мало, скажем $V/M < 0,2$. Если же в конкретной ситуации окажется, что V существенно больше, чем $0,2M$, то населённость фона гистограммы будет небольшой, но зато пик, скорее всего, окажется в разы больше, чем флуктуации неровного фона.

Необходимо упомянуть ситуацию, с которой на практике не встречались. Если N мало (мало параметров и известен узкий диапазон их возможных значений), то среднее число случайных голосов, h , может оказаться большим, и небольшое число согласованных голосов, V , может не сформировать относительно большого пика гистограммы. В этой ситуации стоит посмотреть, нельзя ли увеличить число возможных значений параметров, сделав меньше шаг квантования и увеличив диапазон значений параметров, даже зная, что это избыточно, что нужных значений там нет. При этом случайные голоса распределятся среди большего числа возможных вариантов голосования, h уменьшится, а V сохранится.

За счёт согласованного голосования мы хотим получить достаточно большой пик, т.е. $V/h > T$, где T — порог, или ориентировочно, $V > T \cdot N/M$. Таким образом, если требуется обеспечить выбор из большого числа возможных параметров, N , то необходимо организовать голосование большого числа фрагментов, M . Тут мы подходим к следующему принципиальному выбору — размер фрагментов.

Размер фрагментов и их организация. С одной стороны, для того, чтобы голосовало большое число фрагментов, нужно покрыть $D(F_i)$ фрагментами небольшого размера. Причём фрагменты должны быть небольшими и по сравнению с возможными размерами области A (условно — с её «шириной»).

С другой стороны, важно учитывать, что внутри слишком маленького фрагмента, у сравниваемых функций может не оказаться достаточных изменений, деталей, «рисунка». Другими словами, в пределах фрагмента у функций может оказаться «ничего» сравнивать, и оценка сходства будет неинформативна. Что именно считать слишком маленьким фрагментом, зависит от свойств функций и меры S , как мы отметим в примере ниже.

Есть возможность увеличить число голосующих фрагментов, не уменьшая их размер, а добавив ещё одно покрытие $D(F_i)$ фрагментами того же размера. Допустимо, чтобы фрагменты из первого и второго набора пересекались, но важно, чтобы фрагменты покрывали $D(F_i)$ равномерно, не создавая участков «более насыщенных фрагментами», чем остальные. В частности, это может быть решётка гиперкубов, существенно смещённая относительно первой решётки. Можно и дальше добавлять фрагменты покрытия, учитывая указанные требования.

Распределение «случайных голосов». Обнаружить ничтожное число верных решений возможно, если распределение остальных, не имеет собственных ярких экстремумов. Поэтому необходимо отследить и отфильтровать те экстремумы гистограммы, которые являются артефактами конкретной реализации предложенного метода. Один из возможных источников ложных экстремумов - организация процедуры сравнения при поиске вектора параметров, дающего максимальное сходство. Перебор

параметров может происходить по фиксированной последовательности $P_1, P_2, \dots$. Сначала в качестве максимального фиксируется сходство фрагмента W_m с функцией F_v при параметрах P_1 , а затем этот выбор меняется на P_k , если при этих параметрах оценка сходства будет строго больше. Предположим, что сходство при всех параметрах одинаково, тогда максимальное сходство окажется у первого в последовательности вектора. Таким образом, в силу детерминированности процесса выбора, у первого (или у последнего) в последовательности перебора вектора параметров искусственно увеличивается вероятность быть выбранным.

Организуя процесс построения гистограммы, необходимо внимательно анализировать все его шаги, чтобы не возникали такие «искусственные» пики.

Поиск пиков в гистограмме. Необходимо обнаружить позицию гистограммы, в которой число голосов в разы превышает среднее число голосов. Причём и по абсолютной величине это число голосов должно быть достаточно велико, чтобы не оказаться случайным. Кроме того, величина пика отражает размер «области сходства», а очень маленькие области (и пики) могут и не интересовать.

Чтобы избавиться от описанных выше пиков, которые связаны с порядком перебора параметров, можно поступить следующим образом. Увеличим диапазон значений каждого признака на две позиции — одно значение на шаг квантования меньше нижней границы и одно значение на шаг больше верхней. Крайние позиции будут аккумулировать пики, порождённые порядком перебора, а мы не будем учитывать эти позиции при анализе гистограммы.

В некоторых случаях, например, если шаг квантования параметров слишком велик, может образоваться не один оптимальный вектор параметров, а несколько векторов с «соседними» значениями параметров. В результате, «голоса» фрагментов распределятся между соседними ячейками гистограммы, создавая «широкий» пик. Абсолютное значение гистограммы в «широком» пике окажется существенно меньше, и вместо одного окажется несколько высоких значений в соседних ячейках гистограммы. Предполагая такую возможность, имеет смысл анализировать не только отдельные ячейки, но и группы соседних ячеек с тем, чтобы обнаруживать и такой «широкий» пик.

Надёжность результата. Если в гистограмме голосов обнаружен яркий пик, то необходимо провести проверку — единственный ли это пик. Если существуют и другие пики, близкие по величине, то нет уверенности в правильном выборе. Поэтому найдём следующий по величине пик и отбрасываем полученный результат, если величина второго пика несущественно меньше первого.

Если пик не найден, то результат можно проверить, поменяв порядок в паре сравниваемых функций и повторив процедуру. Это имеет смысл в силу того, что процедура сравнения несимметрична. Кроме того, возможно, слишком узок диапазон параметров и его стоит увеличить. Можно также изменить набор фрагментов. Если пик найден не надёжно, то можно произвести преобразование с найденными параметрами $F_j = Y(F_i, P_u)$, и повторить поиск уже для пары F_j, F_v .

Итак, мы рассмотрели, на что необходимо обратить внимание, чтобы создать условия для согласованного голосования. В первую очередь — это число векторов параметров, число и размер фрагментов, и устранение «привилегированных» векторов.

В заключение рассмотрим возможности развития предложенного подхода. Исходя из приведённого формального описания, можно легко обобщить этот метод на другие ситуации. Во-первых, сопоставляя изображения, можно допускать их отличие не только по расположению (сдвиг), но и по повороту, масштабу. Практически допустимый диапазон поиска этих параметров зависит от размера и качества изображений, так как требуется соответствующее увеличение размера гистограммы и экспоненциальный рост числа «голосующих» фрагментов.

Во-вторых, можно работать не с двумерными функциями, как изображение, а с функциями иных размерностей. При этом изменяется только способ сравнения функций,

задания фрагментов и получения «голосов», а работа с гистограммой остаётся прежней. Представляется возможным получать эффект «согласованного голосования» и при не равномерном распределении случайных «голосов», если в этом распределении нет большого пика, конкурирующего с «согласованными голосами».

Наконец, не исследована упомянутая выше возможность обобщить метода на более широкий класс преобразований и пространств, с которыми пока не экспериментировали.

1.1.4 Развитие подходов оценки состояния сельскохозяйственных культур

Опыт, накопленный в ИКИ РАН к 2021 г., позволил создать методику постоянного оперативного дистанционного мониторинга озимых культур, оценки их состояния и потенциальной продуктивности с использованием сервисов семейства «Созвездие-Вега». В основе методики лежит детектирование площадей посевов озимых, определение динамики вегетационного индекса NDVI на землях, занятых соответствующими культурами, и анализ полученной информации совместно с метеорологическими показателями. Кроме того, анализ более чем 20-летнего ряда таких данных позволил для каждого района наблюдения провести расчёт среднемноголетних «норм» временной динамики NDVI. Отклонения временного хода NDVI от таких норм также используется как один из параметров оценки состояния озимых культур.

В таблице 1.1.4.1 приведены рекомендации по использованию различных данных и инструментов, имеющихся в сервисах семейства «Созвездие-Вега», для проведения оценок состояния и развития озимых культур в разные периоды года.

Таблица 1.1.4.1 — Данные и инструменты, рекомендованные к использованию при оценке состояния озимых культур в различные периоды проведения мониторинга

Данные	Период мониторинга			
	Осень	Зима	Весна	Лето
Спутниковые изображения, в том числе индексные	+	+	+	+
Температура и осадки	+	+	+	+
Гидротермический коэффициент (ГТК) и влага в почве	+	—	+	+
Глубина снежного покрова	—	+	—	—
Сезонная динамика NDVI	+	—	+	+
Карты озимых культур, выявленных по спутниковым данным	+	—	+	±
Карта отклонений NDVI от многолетней нормы	+	—	+	±
Карта отклонений максимумов NDVI от многолетних максимумов	—	—	—	+

С использованием методики выявлены следующие особенности развития озимых культур в сезоне 2020–2021 гг.

Осенью 2020 г. на юге Европейской части России наблюдалась масштабная засуха (рисунок 1.1.4.1а), отразившаяся на картограмме отклонений вегетационного индекса NDVI от среднемноголетних значений (красные районы на рисунке 1.1.4.1б). Кроме того, в конце 2020 г. на территории Северо-Кавказского федерального округа, Республики Калмыкия, Ростовской, Воронежской, Белгородской, Курской, Липецкой и Тамбовской областей по данным спутниковых наблюдений было детектировано значительно меньше озимых культур (рисунок 1.1.4.1в), чем осенью 2019 г. (рисунок 1.1.4.1г).

В весенне-летний период 2021 г. ситуация с озимыми культурами во многих районах юга Европейской части России нормализовалась, о чем говорит существенно возросшее количество детектированных по данным спутниковых наблюдений земель, занятых этой группой посевов (рисунок 1.1.4.2). Кроме того, выявлено, что в большинстве районов южной части Европейской территории России озимые культуры развивались лучше среднемноголетней нормы, а на севере Центрального федерального округа и в

большинстве районов Приволжского федерального округа (за исключением его юго-западной части) — близко к норме или несколько хуже неё (рисунок 1.1.4.3).

Кроме того, совместный анализ данных спутниковых наблюдений и многолетней статистической информации об урожайности озимых зерновых культур показал возможность проведения заблаговременной оценки их потенциальной продуктивности.

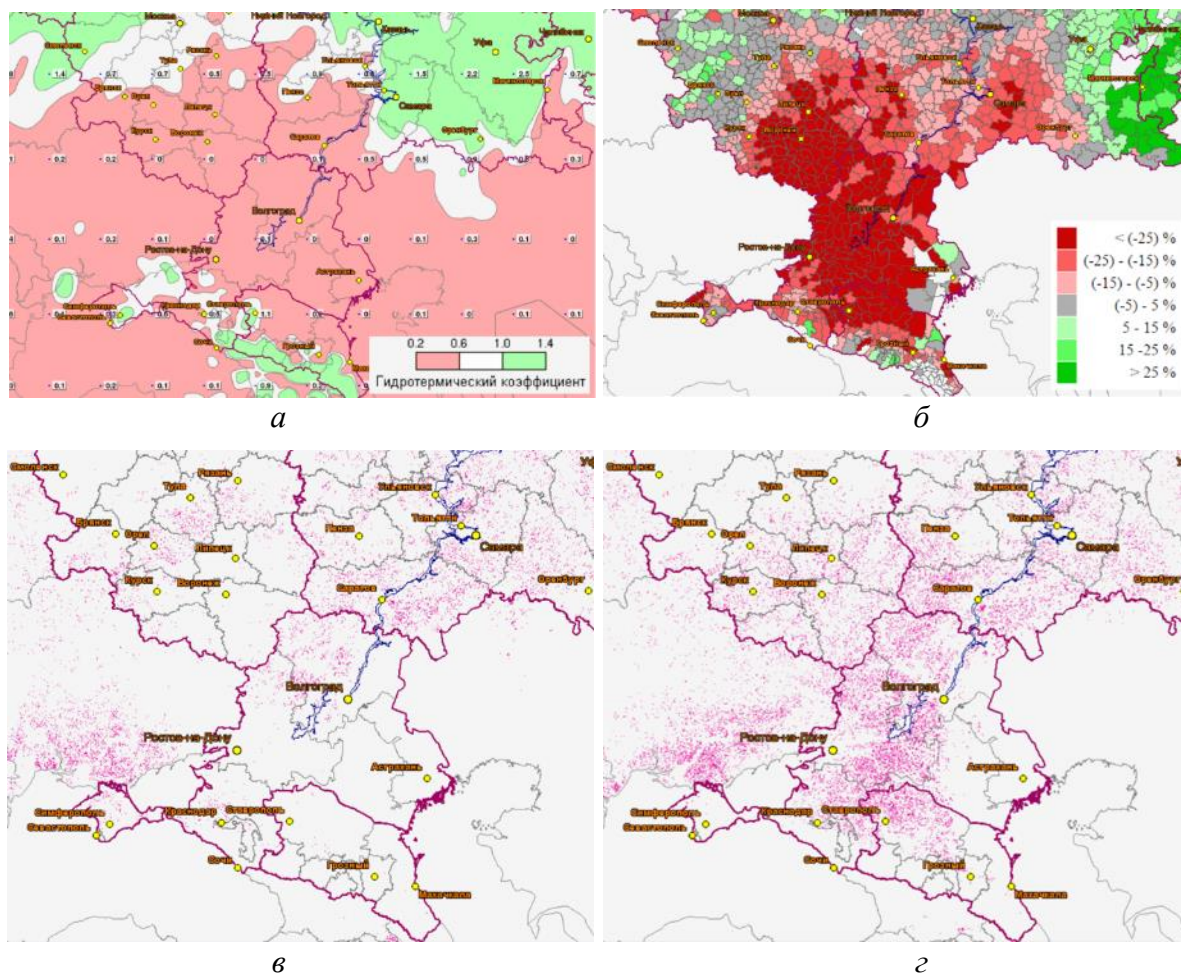


Рисунок 1.1.4.1 — Юг Европейской территории России: *а* — ГТК за месяц на 27.09.2020; *б* — отклонение NDVI пахотных земель от многолетней нормы, 39-я неделя 2020 г. (21–27.09.2020); озимые культуры, детектированные по спутниковым данным: *в* — 17.12.2020, *г* — 04.12.2019

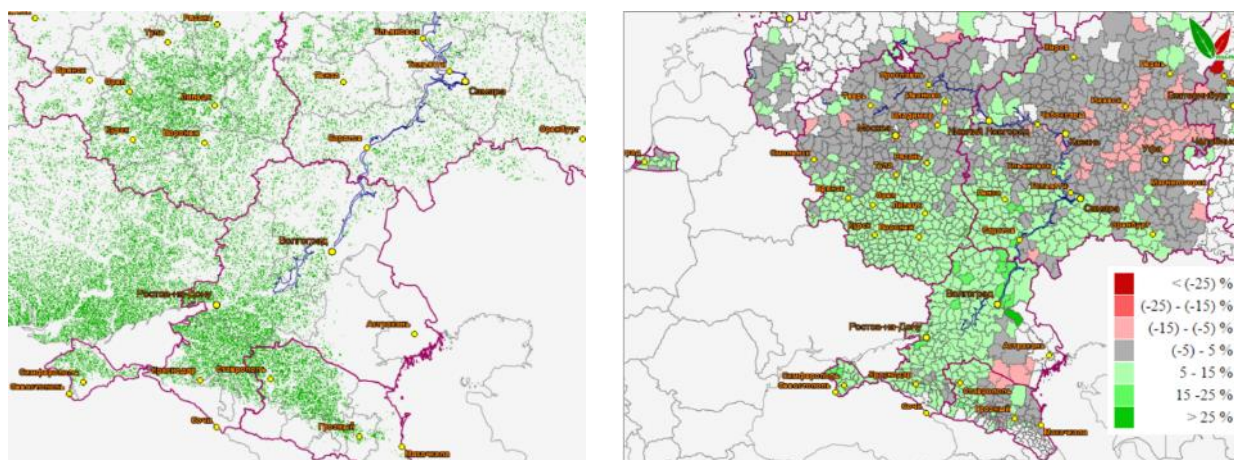


Рисунок 1.1.4.2 — Озимые культуры, детектированные по спутниковым данным 30.06.2021

Рисунок 1.1.4.3 — Порайонные отклонения $NDVI_{max}$ озимых в 2021 г. от среднемноголетних максимумов

1.1.5 Развитие подходов картографирования использования сельскохозяйственных земель

В 2021 г. проводились работы по развитию автоматических методов и технологий обработки спутниковых данных для картографирования различных категорий сельскохозяйственных земель России: пашни (в том числе земель, занятых озимыми и яровыми культурами, а также чистым паром), залежи, сенокосов и пастбищ.

На начальном этапе был подготовлен актуализированный архив спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения для территории России по состоянию как на 2021 г., так и на предшествующие годы. Предварительная обработка данных спутниковых наблюдений России за 2021 г. позволила сформировать безоблачные непрерывные временные ряды данных, характеризующие сезонную динамику спектрально-отражательных свойств сельскохозяйственных земель, которые были использованы в автоматических алгоритмах распознавания типов землепользования, пахотных земель, посевных площадей и чистого пара. В частности, на этом этапе были получены безоблачные ежедневные изображения в красном и ближнем ИК-диапазонах длин волн, а также вегетационные индексы PVI и NDVI, необходимые для распознавания указанных выше тематических классов.

Далее на основе подготовленных временных серий были сформированы спектрально-временные признаки для автоматического распознавания пахотных земель, групп культур и типов землепользования, которые обеспечили возможность автоматической обработки всей территории России. В рамках подготовки тематических продуктов был задействован метод распознавания пашни, который позволяет осуществлять ежегодное картографирование используемых пахотных земель России на основе спутниковых данных MODIS.

На следующем этапе был применён автоматический алгоритм оперативного выявления категорий культур в весенне-летний период вегетации 2021 г. на основе временных серий спутниковых данных MODIS, использующий, в том числе, результаты картографирования используемых пахотных земель. Созданная в результате работы алгоритма карта содержит тематические классы озимых культур, яровых культур и чистых паров (рисунок 1.1.5.1). Карты озимых и яровых культур построены по состоянию на 30.07.2021 (полное созревание всех озимых в России), чистых паров — по состоянию на конец августа 2021 г.

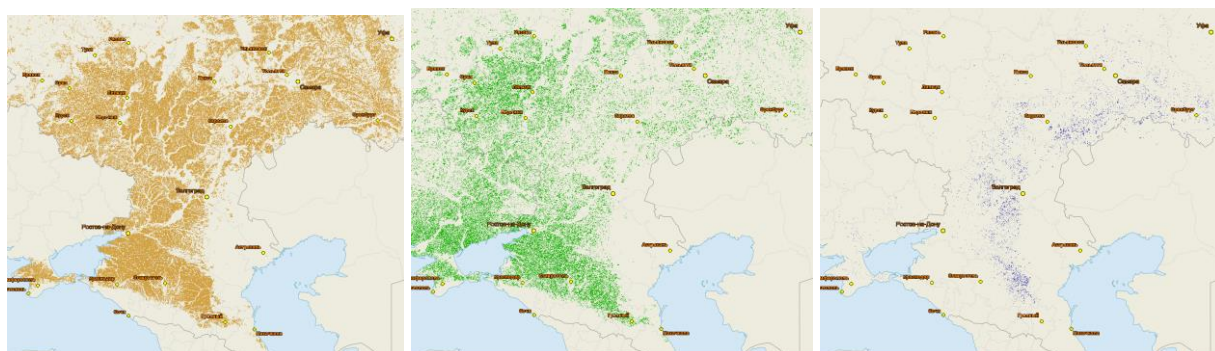


Рисунок 1.1.5.1 — Фрагменты полученных на основе спутниковых данных карт используемых пахотных земель (слева), озимых (в центре) и чистых паров (справа) для 2021 г. мониторинга

Для надёжного распознавания различных категорий землепользования подготовлены построенные на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения вспомогательные тематические картографические продукты о расположении различных типов растительного покрова, включая карты растительного покрова за 2000, 2010 и 2020 гг. наблюдений и карту динамики лесов Восточной Европы начиная с 1985 г. (рисунок 1.1.5.2).

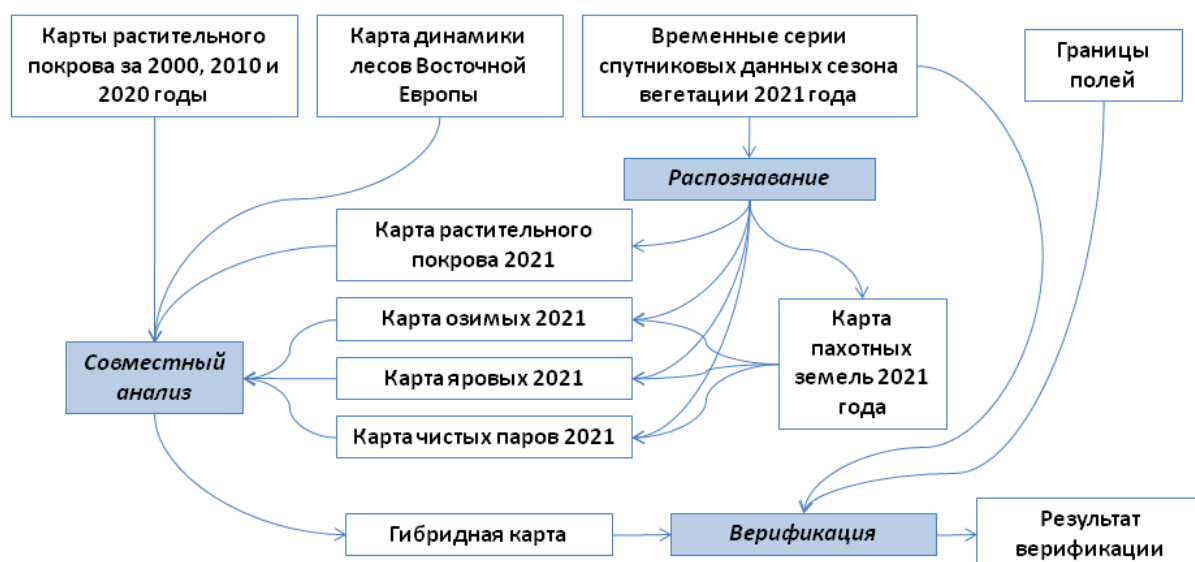


Рисунок 1.1.5.2 — Блок-схема подготовки и анализа основанных на спутниковых данных тематических продуктов

Спутниковые данные высокого пространственного разрешения 2019–2021 гг. наблюдений были использованы для создания вспомогательного векторного слоя путём автоматизированного выявления границ участков земель сельскохозяйственного назначения.

В результате работы автоматических технологий обеспечено построение тематических карт для классов пашня, озимые, яровые и чистые пары, залежь, сенокосы и пастбища.

На последнем этапе проведена автоматическая верификация указанных классов. Извлечённые из тематических карт и присвоенные объектам сельскохозяйственных земель классы были уточнены с использованием восстановленных временных серий спутниковых индикаторов с опорой на вспомогательные векторные слои границ объектов на всю территорию России.

1.1.6 Разработка подходов к организации дистанционного мониторинга динамики речных стоков

При использовании наземных методов контроля речного стока существует ряд факторов, препятствующих объективной оценке этого показателя. Наиболее значимыми из них являются сложность получения информации с достаточно высокой пространственной периодичностью вдоль всего русла наблюдаемых рек. Это связано в первую очередь с высокой стоимостью организации и поддержкой измерительных гидропостов. В такой ситуации технологии ДЗЗ позволяют дополнить, а в некоторых случаях и заменить недостающие наземные измерения показателями, рассчитанными по спутниковым наблюдениям.

В рамках темы «Мониторинг» в настоящее время развивается новый подход для решения данной проблемы. Подход основан на использовании технологии космических гидропостов, или КГП, которые представляют собой полигоны произвольной формы около водных объектов. Как правило, для мониторинга рек необходимо устанавливать такие полигоны в виде нешироких полос перпендикулярно векторам частичных стоков реки. В пределах границ таких полигонов по спутниковым данным могут быть рассчитаны различные показатели, в данном случае — площадь водного зеркала, рассчитанная по индексу MNDWI (modified normalized difference water index), что фактически выражает показатель ширины реки.

В 2021 г. данный подход отрабатывался на примере оценки возможности мониторинга речного стока реки Амударьи. В качестве тестового полигона был выбран район гидропоста Керки, данные с которого были обработаны в совокупности с величинами площади водного зеркала около измерительного пункта. При этом использовались спутниковые изображения сканирующей аппаратуры MSI (Sentinel-2A, -2B), OLI, TIRS (Landsat-8), ETM+ (Landsat-7). Эмпирически установлено, что в непосредственной близости выше по течению от станции Керки наблюдается линейная зависимость суточных стоков и площади водной поверхности. При этом также был исследован вопрос о том, может ли подобная зависимость быть сохранена в каком-либо виде и как работают КГП различной формы и ориентации относительно расположения русла на некотором удалении от Керки. Последовательность полигонов, расположенных выше (как в данной работе) или ниже по течению реки от наземного измерительного пункта в контексте текущего исследования носит названия «сети КГП». Измерения суточного стока, полученные с Керки за 2014, 2016 и 2018 гг., были проанализированы при построении моделей на каждом шаге построения такой сети совместно с временными рядами площади водного зеркала на виртуальных полигонах за те же временные отрезки.

Модель линейной регрессии позволяет определить связь между показателями суточного стока и интегральными показателями площади водного зеркала около Керки. На каждом следующем шаге полиномиальная модель, построенная по показателям площади водной поверхности, нормированных на площадь полигона при удалении от станции, выражает устойчивость всей сети КГП в совокупности. Для межгодовой устойчивости моделей все наблюдения были разделены случайным образом на тренировочное и тестовое множества. В работе также проведены эксперименты по выявлению оптимальной формы гидропостов на каждом шаге формирования сетей КГП согласно сформированным правилам. Каждый следующий гидропост в сети выбирался из группы полигонов различной площади и ориентации, после чего по одинаковой схеме были рассчитаны показатели для каждого КГП. На основе рассчитанных показателей были сформированы требования и правила по установке виртуальных полигонов на реках.

Результаты проведённых в работе исследований позволили установить зависимость межгодовой изменчивости морфологии участков русла Амударьи и качества модели для выявления взаимосвязи двух временных рядов. Изменение гидрографической сети реки напрямую влияет на работу сети КГП, а сдвиг русла и обмеление некоторой его части заметно ухудшает качество модели, что требует либо включения параметров, нивелирующих влияние таких факторов, либо формирование более жёстких требований к выбору космических гидропостов.

Технология КГП автоматизирована и интегрирована в виде ряда онлайн-инструментов анализа в специализированном сервисе спутникового мониторинга EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>), функционирующей на базе Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru>).

1.1.7 Разработка системы обработки данных для оценки испарений и накопленного экологического ущерба

Наблюдение за состоянием растительных экосистем является одной из основных задач мониторинга окружающей среды. Важнейшим фактором лесных экосистем является внутренняя циркуляция влаги (evapotranspiration). Внешним проявлением этого процесса является испарение на верхней границе, которое возможно определять в том числе дистанционными методами.

На основе данных прибора MODIS в центре Land Processes Distributed Active Archive Center производится и распространяется продукт MOD16A2/MYD16A2, который представляет восстановленную суммарную эвапотранспирацию за восемь дней с пространственным разрешением 500 м.

Эти данные, в частности, можно использовать для получения сравнительной количественной характеристики состояния однотипных растительных экосистем и оценки возможного ущерба от негативного воздействия внешних факторов. Рассмотрение лесных экосистем с точки зрения термодинамической модели предложен в ряде научных работ (Горный В.И. и др. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2019t4/124-136.pdf). Испарение на верхней границе растительности при таком подходе выступает прямым показателем её состояния.

В ЦКП «ИКИ-Мониторинг» организовано автоматическое получение этих данных, формирование восьмидневных композитных изображений с информацией о суммарном испарении по всей территории России (рисунок 1.1.7.1), а также формирование сезонных (лето, осень, зима, весна) композитных изображений с информацией о минимальном, среднем и максимальном суммарном испарении по всей территории России за сезон.

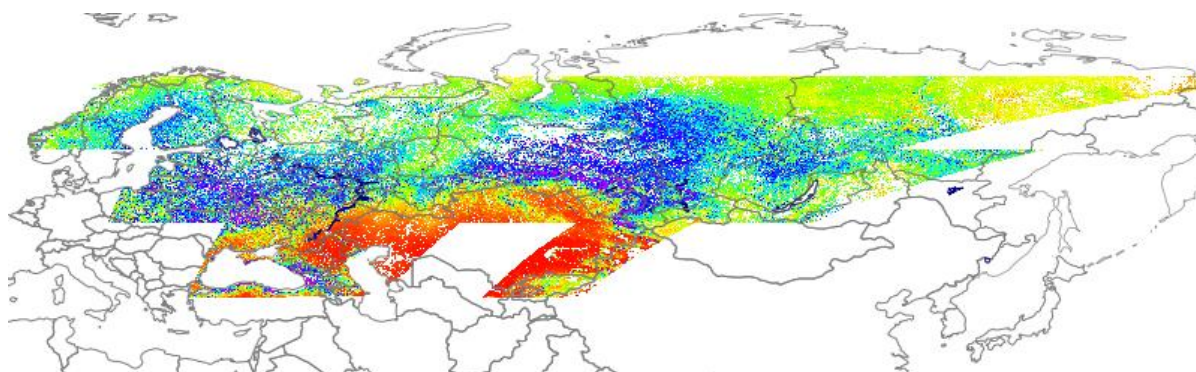


Рисунок 1.1.7.1 — Пример данных эвапотранспирации за 04.08.2020, спутник Terra (MODIS)

В гранулах (это фрагменты территории 10 000×10 000 км) также рассчитывается показатель экологического вреда (ПЭВ) для семи типов лесных экосистем: темнохвойной, лиственной, светлохвойной, смешанной, смешанной с преобладанием хвойных, смешанной с преобладанием лиственных и хвойной листопадной. Показатель вычисляется по формуле

$$D = 1 - E_c/E_{cp},$$

где E_c , E_{cp} — удельные потоки влаги над контролируемой экосистемой и контрольной (здоровой) соответственно.

Для каждого типа из семи экосистем строится гистограмма распределения значений эвапотранспирации внутри гранулы, вычисляются среднее значение и стандартное отклонение этого распределения, на основе которых рассчитывается ПЭВ. В архивах и каталогах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» доступны данные эвапотранспирации, а также карты ПЭВ начиная с 2001 г. по настоящее время.

Для более детального анализа и оценки экологического ущерба, нанесённого экосистеме в составе уникальной научной установки ИС «Bega-Science» реализован инструмент «оценка экологического ущерба». С помощью этого инструмента пользователь может производить расчёт ПЭВ по определённому типу лесной экосистемы в выбранной им произвольной области. Для получения значений скорости испарения фоновой экосистемы также используется «статистический подход». При этом статистики распределения строятся внутри выбранной пользователем области (рисунок 1.1.7.2). Результатом работы инструмента являются карты показателя экологического вреда для семи типов лесных экосистем в выбранной пользователем области. Также, для удобства использования, строится композитное изображение этих карт. Пользователь может переключаться между картами ПЭВ, анализируя каждую из представленных экосистем.

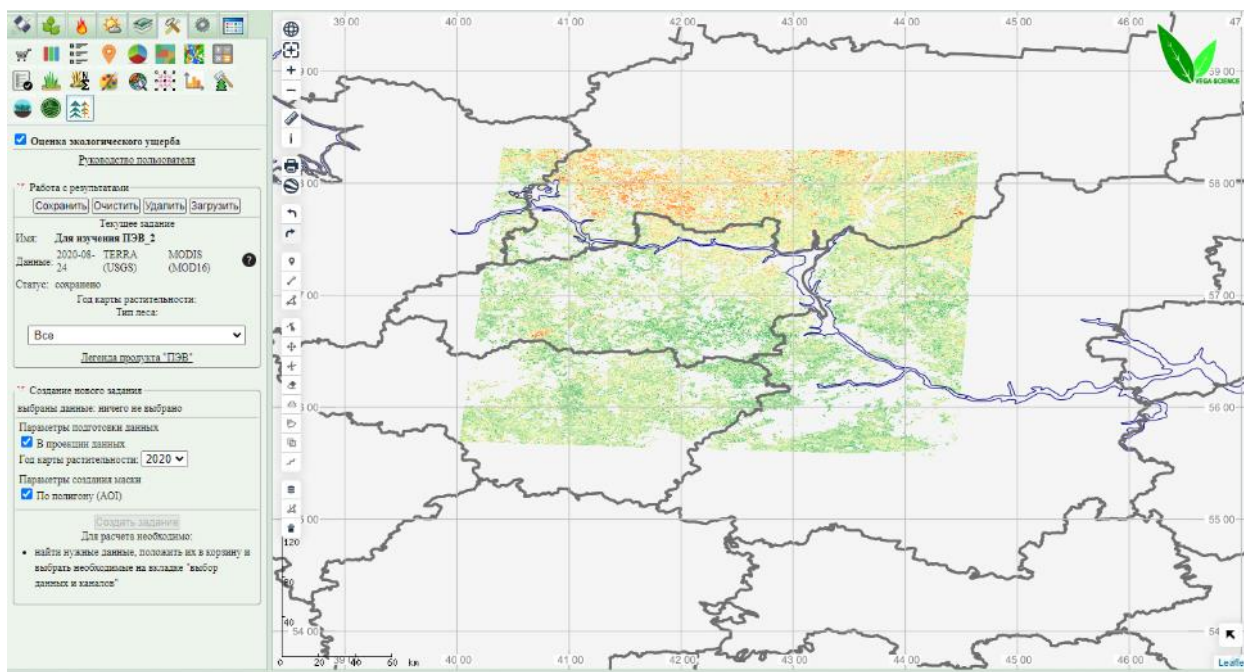


Рисунок 1.1.7.2 — Результат работы инструмента «оценка экологического ущерба» — композитное изображение ПЭВ для всех из семи типов лесных экосистем

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

1.2.1 Разработка подходов к оценке эффективности выполнения работ по тушению лесных пожаров на основе данных дистанционного мониторинга

В связи с глобальным потеплением климата ландшафтные пожары не только оказывают все большее негативное влияние на леса, но и представляют серьёзную угрозу людям и объектам экономики. Поэтому важным аспектом повышения качества организации охраны лесов от пожаров является разработка статистически обоснованных методов оценки результативности принимаемых мер, в том числе для использования в системах поддержки управленческих решений.

Классические методы оценки горимости территорий, основанные на данных региональных лесопожарных служб не всегда объективны, что негативно влияет на качество аналитической обработки. Накопление большого массива данных дистанционного зондирования Земли, точность которых не зависят от человеческого фактора, позволяют вести работы по выявлению взаимосвязи формы распределения значений площади лесных пожаров и уровня организации охраны. Попытки такого анализа формы распределения предпринимались и раньше различными авторами, но, в конечном итоге не давали однозначных результатов, что, в первую очередь было обусловлено достаточно малыми объёмами используемых данных.

Для проведения данного исследования использовался более чем 20-летний ряд данных наблюдения активного горения, получаемых на основе прибора MODIS (шестая коллекция — MC6), которые прошли объединение горячих точек в «пожары» с использованием алгоритмов и методики, разработанных в ИКИ РАН. При этом анализировались только лесные пожары (пожары затронувшие территории, покрытые лесом). При этом проводился анализ только площадей, покрытых лесом, пройденных огнём.

С учётом структуры лесопожарного зонирования в Российской Федерации, с использованием данных ИСДМ-Рослесхоз (<https://nffc.aviales.ru/>), были сформированы выборки площадей лесных пожаров по четырём группам, существенно отличающиеся по

уровню воздействия со стороны лесопожарных формирований (в порядке убывания уровня охраны):

- зона наземной охраны;
- зона лесоавиационных работ;
- зона контроля (до 2016 г. зоны космического мониторинга первого и второго уровней) лесных пожаров (где значительная часть пожаров только фиксируются, но не тушатся);
- лесные пожары, по которым есть достоверные сведения, что пожар не тушился по решению комиссии чрезвычайных ситуаций.

Использование графического (диаграмма плотности распределения) и численного (с использованием критерия Колмогорова – Смирнова) методов показал, что форма распределения значений площадей лесных пожаров на больших выборках значительно отличается по группам (рисунок 1.2.1.1).

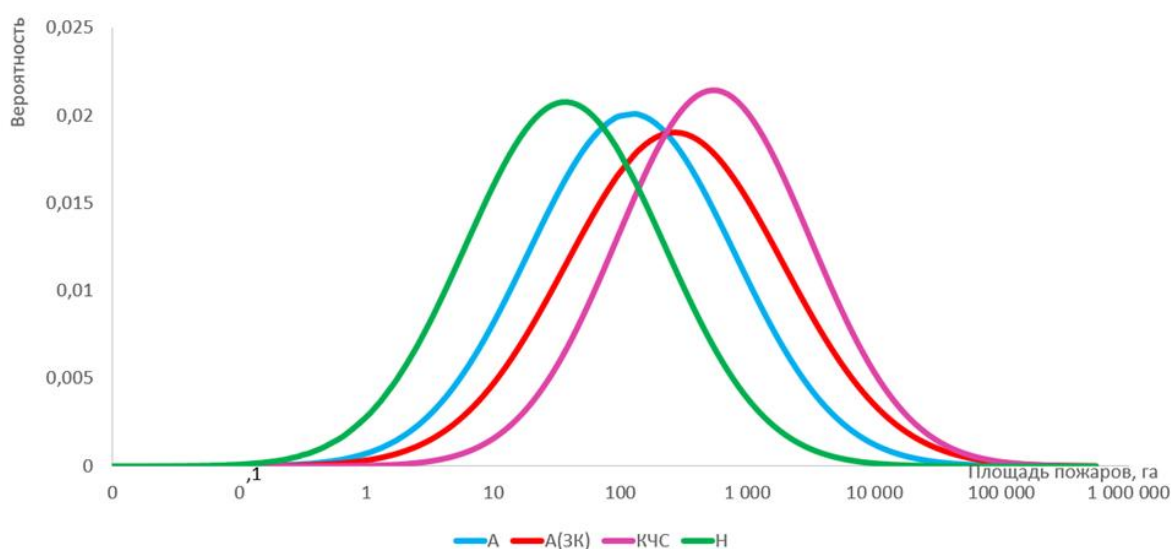


Рисунок 1.2.1.1 — Распределение пожаров по площадям (логнормальная аппроксимация) с различным уровнем организации тушения пожаров (А — авиационная зона, А(ЗК) — зона контроля, КЧС — закрытые по решению КЧС, Н — наземная зона)

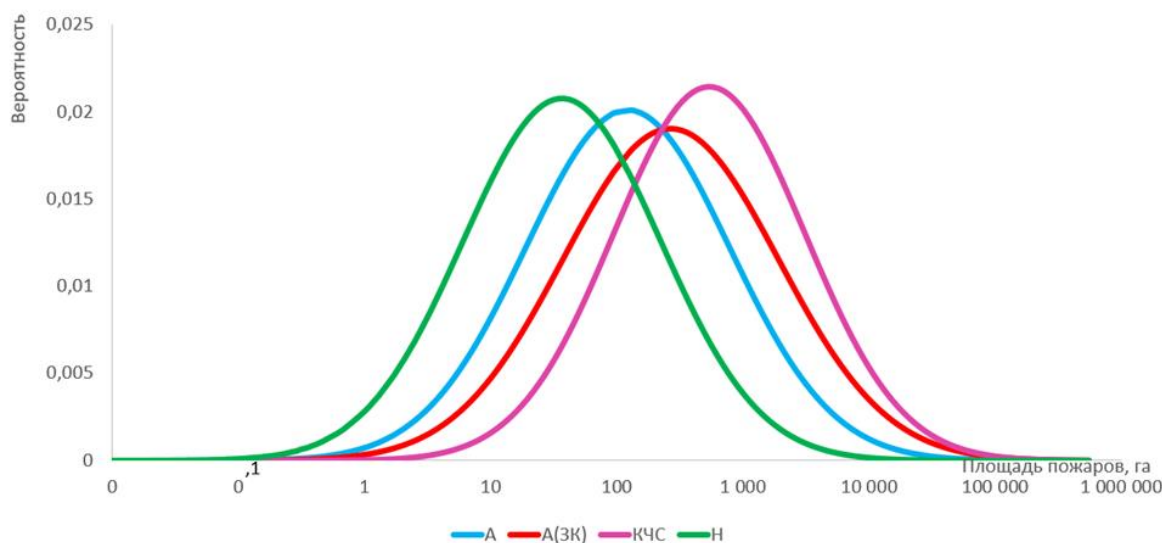


Рисунок 1.2.1.2 — Q/Q-диаграмма. Цвета соответствуют цветам на рисунке 1.2.1.2

Различие в наблюдаемых распределениях пожаров с различным уровнем организации тушения хорошо также видна на Q/Q-диаграмме (рисунок 1.2.1.2), на которой происходит сравнение вероятности наблюдения площади пожара меньше заданного значения для пожаров в различных зонах охран по сравнению с пожарами, которые заведомо не тушились (пожары закрытые по решению КЧС).

Таким образом хорошо видны отличия в распределении лесных площадей, пройденных пожарами, на территориях с различным уровнем охраны. Следует отметить, что, судя по полученным результатам, на основе анализа таких распределений в перспективе могут разрабатываться методы оценки эффективности мер, направленных на борьбу с пожарами на различных территориях.

В заключение настоящего раздела отметим, что данная работы выполнена ИКИ РАН совместно с Центром лесной пирологии, Красноярск (Филиал ВНИИЛМ).

1.2.2 Развитие подходов оперативного представления информации дистанционного мониторинга природных пожаров

Сервисы, предоставляемых ЦКП «ИКИ-Мониторинг», реализуют в настоящее время концепцию геопространственных информационных веб-сервисов, обеспечивающих специалистов в области ДЗЗ широкими аналитическими возможностями. Несмотря на то, что существует возможность доступа к сервисам для незарегистрированных пользователей («демо»-доступ), возможности сервиса по обработке большого количества одновременных запросов ограничены. Кроме этого, картографические интерфейсы ориентированы на пользователей, имеющих специализированную подготовку и получение даже простых информационных продуктов может быть затруднительным для широкого круга потенциальных пользователей.

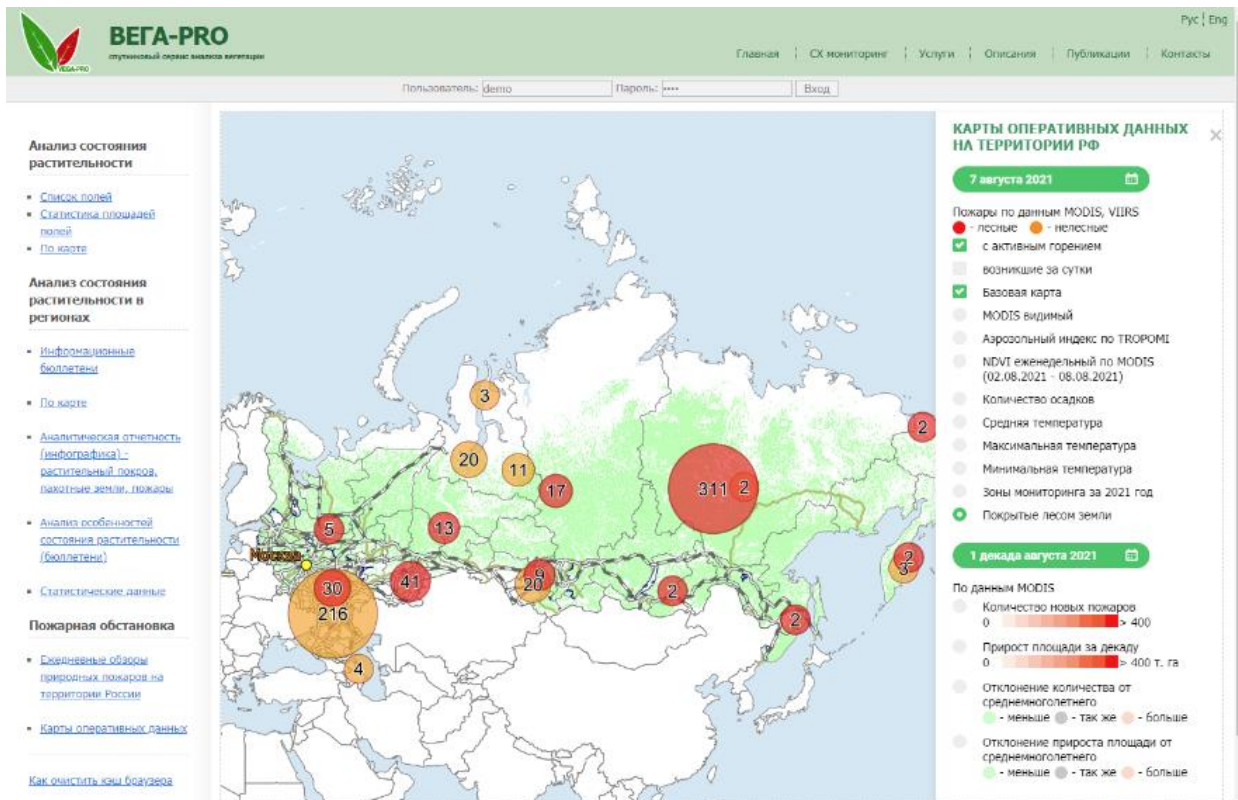


Рисунок 1.2.2.1 — «Кластерная» карта пожаров с активным горением

Предоставление доступа к оперативным данным, в частности, для задачи мониторинга природных пожаров требуют других подходов, ориентированных на использование широким кругом неподготовленных пользователей.

В 2021 г. на основе новых подходов оперативного предоставления информации был создан публичный интерфейс карт оперативных данных. В рамках нового интерфейса реализованы:

- «кластерная» карта предоставления информации о природных пожарах на обзорном масштабе, представленная на рисунке 1.2.2.1;
- карты декадных районные статистик по многолетним данным дистанционного мониторинга природных пожаров (рисунок 1.2.2.2), включая карты отклонений оперативных данных от среднесноголетних;
- специализированная схема конфигурации слоёв, метаданных, формирования статических тайлов растровых карт, необходимых для работы публичного интерфейса;
- веб-интерфейс, интегрированный в стартовые страницы сервисов «Вега-PRO» и УНУ «Вега-Science», позволяющий широкому кругу пользователей, без регистрации в системе, простым образом получать оперативный доступ к информации дистанционного мониторинга природных пожаров, в том числе, карт оперативных данных и данных многолетних наблюдений.

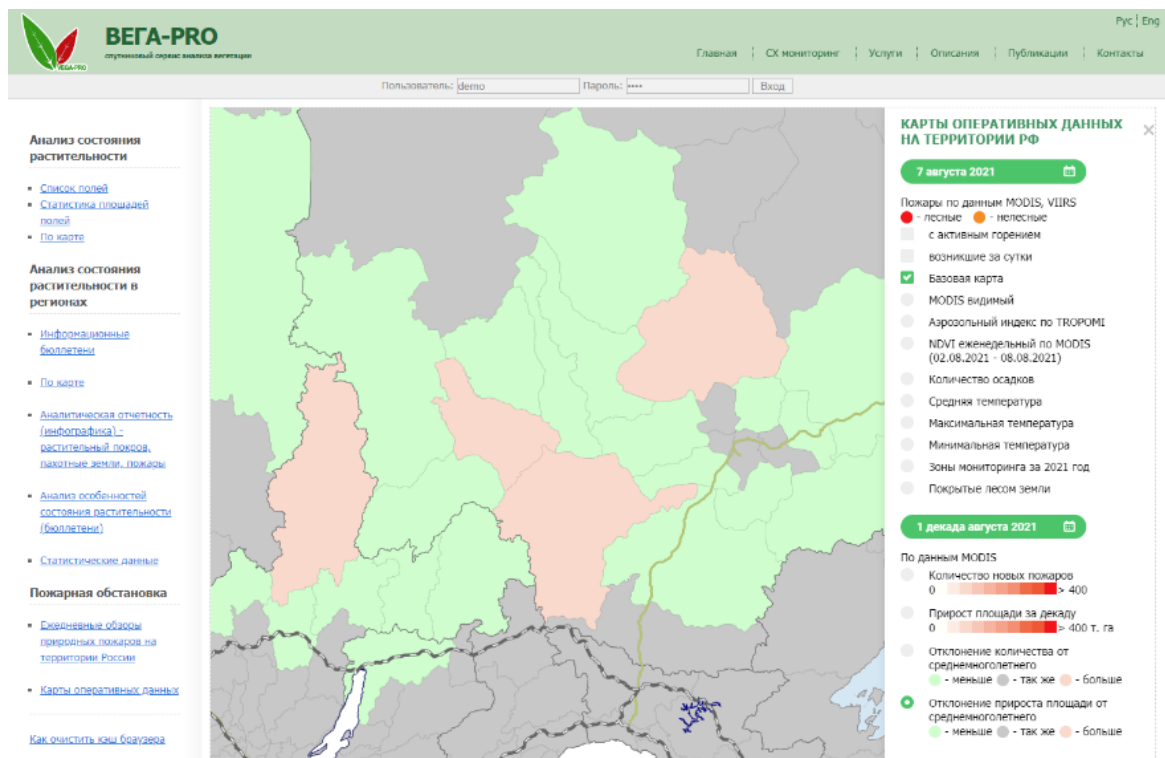


Рисунок 1.2.2.2 — Доступ к картам отклонений оперативных данных от среднесноголетних

Интерфейс реализован с применением открытой библиотеки карт Leaflet совместно с технологиями GEOSMIS и UNISAT, созданными в ИКИ РАН, с использованием архивов данных и возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

1.2.3 Развитие подходов мониторинга подвижных объектов

Учитывая, что на обеспечение информационной безопасности систем мониторинга в настоящее время выделяются большие ресурсы, представляется необходимым оценить, насколько эффективны данные финансовые вложения.

В качестве примера рассмотрим позиционные данные в отраслевой системе мониторинга водных биологических ресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью промысловых судов (далее — ОСМ), которая является эффективным инструментом информационной поддержки принятия управленческих решений для обеспечения продовольственной безопасности государства и безопасности мореплавания,

Одним из основных источников спутниковой информации о позициях судов в ОСМ является Автоматическая идентификационная система (АИС) AIS Automatic Identification System.

Приёмопередатчики — АИС-транспондеры — устанавливаются на судах и на береговых станциях, которые образуют цепь береговых станций. Передача данных осуществляется на международных каналах связи AIS 1 и AIS 2 в диапазоне FM-частот (161,975 и 162,025 МГц). Обмен информацией происходит на основе TDMA (Time Division Multiple Access — множественный доступ с разделением по времени). Однако, сигналы транспондеров AIS достаточно мощные, чтобы обеспечить уверенный приём сигнала спутниками на высоте до 1000 км.

Основные провайдеры SatAIS: ExactEarth, Orbcomm, Lemur. В спутниковой группировке Lemur (США) непрерывно функционирует более ста спутников АИС.

Ранее было показано, что с помощью машинного обучения можно по трекам судов восстанавливать информацию о добыче (вылове) судов. Таким образом, можно утверждать, что до тех пор, пока нет возможности обеспечить защиту позиционной информации от спутниковых иностранных систем, становится сомнительным приложение сверх усилий по обеспечению информационной безопасности системы мониторинга в целом.

На рисунке 1.2.3.1 приведён пример, как явно выделяются фрагменты приложения промысловых усилий на гистограмме скоростей промысловых судов. В случае тралового промысла (красная линия) большая часть операций осуществляется на скорости несколько меньшей четырёх узлов, в то время как при крабовом промысле, основные операции производятся на скорости меньше двух узлов

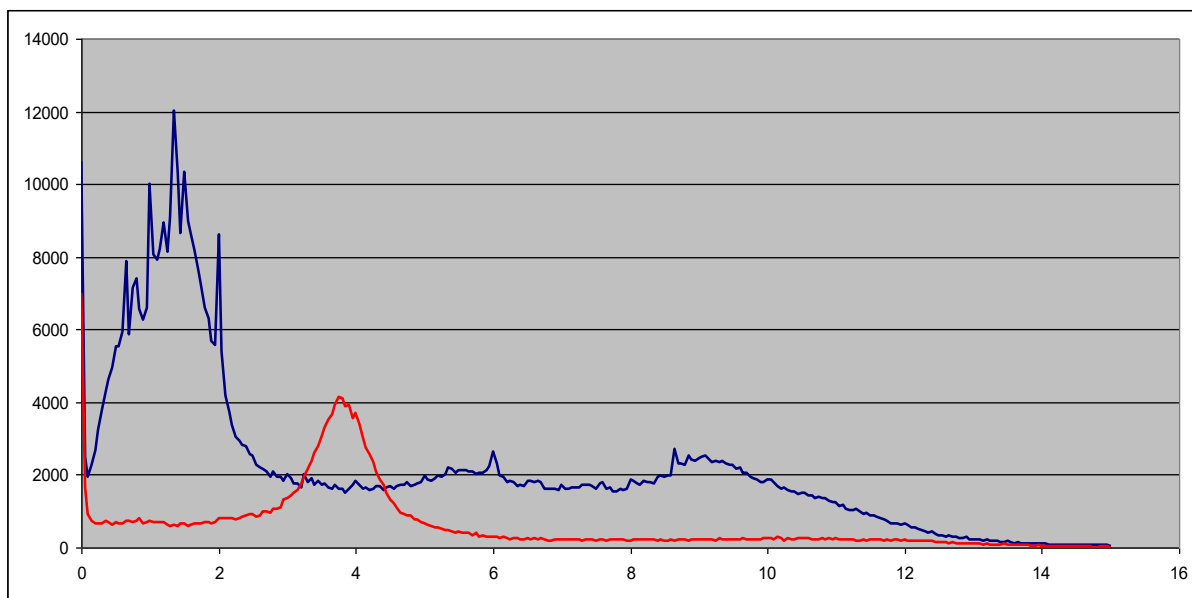


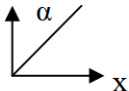
Рисунок 1.2.3.1 — Гистограммы скоростей при траловом (красная линия) и крабовом ловушечном промысле

Поэтому актуальна задача перехода на альтернативные отечественные системы позиционирования, но параллельно должна решаться задача модернизации транспондеров

AIS. Так чтобы сигналы были доступны окружающим, но не были доступны спутниковым системам.

Для обеспечения направленности сигнала используются антенны, размеры которых сравнимы с длиной волны. В случае используемых в АИС частот длина волны несколько меньше двух метров. Для размещения на больших морозильных рыболовных траулерах (БМРТ) и средних рыболовных траулерах-морозильщиках (СРТМ) длина которых более 50 метров препятствий для размещения антенны, размер которой около двух метров и вес не превышает ста килограмм нет. Отметим, что судами данного типа обеспечивается вылов более 90 процентов всей морской добычи водных биологических ресурсов России.

Для рассмотрения вариантов предлагаемых к внедрению антенн приведём оценки для сравнения с излучением диполя Герца, которое хорошо описывает излучение используемых в АИС круговых всенаправленных антенн. Отметим, что в рассматриваемой проблеме нет необходимости добиваться очень высокой направленности. Учитывая волнение в котором движется судно, в нашем случае нет необходимости добиваться расхожимости лучше чем 0,2 рад:



$$I(\alpha) = \frac{I(\pi)}{4/3} \int_0^{\alpha} \sin^3(\theta) d\theta = \frac{I(\pi)}{4/3} \left(\frac{2}{3} - \cos(\alpha) + \frac{\cos(\alpha)^3}{3} \right)$$

тогда в «полезные» 15° попадает 20% излучаемой энергии,
в «паразитные» 75° попадает 30% излучаемой энергии.

То есть нам необходимо добиться соотношения мощностей попадающих в «полезную» и «паразитную» часть сферы существенно лучше чем 3/2.

Антенна Янга-Уда — волновой канал, имеющая характерные размеры длины волны, заведомо выполняет такое требование. Но такой вариант предусматривает направленное излучение не только по вертикальному углу, но и по горизонтали. Поэтому необходимо использование либо модификаций антенны Янга-Уда, либо их многоэтажную комбинацию.

В рамках второго варианта организации излучения в горизонтальной плоскости, в среде с высоким показателем преломления можно компактно создать хорошо направленный луч (самый лучший гауссов пучок). При выходе в воздух будет дифракция и расхожимость резко увеличится. Численным экспериментом было показано, что можно управлять с помощью распределения диэлектрической проницаемости на границе раздела распределением электрического поля в поперечном сечении в волновой зоне.

В обоих рассмотренных вариантах организации горизонтальной направленности излучения устройство будет существенно компактнее в случае использования частот в два или даже в три раза выше, чем 160 МГц. Переход АИС на более высокие частоты позволит также увеличить скорость передачи данных и тем самым обеспечить более надёжную трансляцию информации.

После проработки возможности изменения нормативных требований АИС можно будет разрабатывать предложенные варианты обеспечения информационной безопасности систем мониторинга подвижных объектов, или искать другие возможности построения систем мониторинга.

Таким образом, определены серьёзные проблемы обеспечения информационной безопасности систем мониторинга подвижных объектов. Сформулированы возможности их решения как технические, так и организационные.

1.3 Поддержка и развитие ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений, в том числе решения междисциплинарных задач

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 2021 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.

Подсистема сбора данных 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.

Подсистема архивации данных 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 многопоточковой обработки спутниковых данных.

Подсистема обеспечения доступа к данным реализует три основных функциональных блока:

- спутниковый информационный сервис «Bera-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 и контроля предназначена для обеспечения 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, а в качестве HTTP-сервера — Apache, 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 2021 г. были продолжены работы по совершенствованию используемых нами для задач ведения долговременных архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» технологий и программного обеспечения. Были внедрены новые схемы контроля наполнения архивов данными различных степеней обработки, скорости поступления из различных источников и обработки. Также были внедрены специализированные интерфейсы интерактивного контроля состояния архивов для данных регулярных пространственных разбиений. Кроме того, программного обеспечение для реализации технологии UNISAT и программное обеспечение для реализации технологии GEOSMIS в 2021 г. были зарегистрированы в едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных, ссылки на реестр: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/308380/> и <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/388546/> соответственно.

Функционирование ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в настоящее время обеспечивает сложный программно-аппаратный комплекс, состоящий более чем из 130 серверов различного назначения, работающих под управлением операционных систем семейств UNIX и Windows. Для хранения файлов спутниковых данных используется 27 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 UNIX-серверов. 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 2021 г. было введено в строй 19 серверов различного назначения, а также дисковая система хранения, суммарная дисковая ёмкость, доступная для хранения данных в настоящее время составляет около 7 Пбайт.

1.3.3 Архивы спутниковых данных и их наполнение в 2021 году

В настоящее время архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» содержат данные более чем 40 различных приборов наблюдения, получаемых с более чем 50 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 2021 г. в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» поступило более 1,2 Пбайт новых спутниковых данных. Было реализовано поступление геопривязанных данных космических экспериментов (КЭ) «Ураган» и «Сценарий», проводящихся на борту РС

МКС, а также данных PlanetScope. С российского спутника гидрометеорологического обеспечения «Арктика-М» № 1 в этом году в архивы стали поступать данные прибора МСУ-ГС-ВЭ.

В настоящее время суммарный объём архивов спутниковых данных, доступных пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг», превысил 5,3 Пбайт, а ежедневно в архивы поступает около 3 Тбайт новых данных. Информация о составе архивов спутниковых данных, доступных пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг», по состоянию на 08.12.2021 приведена в таблицах 1.3.3.1 и 1.3.3.2. Актуальная информация о наличии данных в архивах может быть получена по ссылке <http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6>. Все вышеупомянутые данные доступны в режиме непосредственного доступа в информационной системе «Vega-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 NCER/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).

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

№	Прибор	Спутник	Диапазон дат		Кол-во	Размер, Гбайт
1	ASAR 12,5м	Envisat	2003-03-19	2011-07-31	1 546	205
2	ASAR 75м	Envisat	2002-08-21	2012-04-08	11 152	2 074
3	ASTER	Terra	2015-06-05	2016-07-20	1 645	11
4	ASTERGDEM	Terra	2011-02-28	2019-08-05	2	982
5	AVHRR	Noaa 18	2012-12-24	2020-12-04	66 083	1 076
6	C_SAR_EW	Sentinel-1A	2014-10-03	2021-12-07	111 701	14 274
		Sentinel-1B	2016-09-26	2021-12-07	79 458	10 343
7	C_SAR_IW	Sentinel-1A	2014-10-03	2021-12-07	848 199	422 753
		Sentinel-1B	2016-09-26	2021-12-07	665 612	319 543
8	DEIMOS	Deimos	2009-12-17	2015-05-08	427	36
9	ETM+	Landsat-7	1999-06-29	2021-12-07	3 129 937	183 852
10	ETM+ (атм. кор.)	Landsat-7	2014-01-30	2016-12-30	6 987	804
11	HYPERION	EO-1	2001-05-03	2016-08-07	15 000	4 745
12	KMCC-100	«Метеор-М» № 2	2018-03-31	2021-11-19	2 780	9 681
13	KMCC-101	«Метеор-М» № 1	2011-12-09	2013-01-14	14 746	543
		«Метеор-М» № 2	2014-08-06	2021-11-23	69 581	4 318
14	KMCC-102	«Метеор-М» № 1	2011-12-09	2013-01-14	14 477	571
		«Метеор-М» № 2	2015-02-12	2021-11-27	71 894	4 392
15	KMCC2-102	«Метеор-М» № 2-2	2020-07-01	2021-11-17	2 538	181
16	MODIS	Aqua	2002-05-24	2021-12-05	2 241 193	94 955
		Terra	2000-01-09	2021-12-05	2 420 251	134 346
17	MSI	Sentinel-2	2018-01-02	2021-12-02	4 069	9 393
		Sentinel-2A	2015-07-08	2021-12-07	5 121 723	1 596 608
		Sentinel-2B	2017-05-15	2021-12-07	3 880 810	1 222 991

№	Прибор	Спутник	Диапазон дат		Кол-во	Размер, Гбайт
18	MSI (атм. кор.)	Sentinel-2	2019-05-01	2021-11-01	246	14 070
		Sentinel-2A	2018-03-26	2021-12-06	513 635	131 334
		Sentinel-2B	2018-03-26	2021-12-06	519 230	132 913
19	MCC	«Канопус-В»	2014-02-22	2015-04-23	8	1
		«Канопус-В-ИК»	2018-05-20	2019-04-06	12	0
		«Канопус-В» №3	2018-06-02	2020-06-10	58	1
		«Канопус-В» №4	2018-05-01	2020-06-19	66	1
		«Канопус-В» №5	2019-04-05	2019-05-25	30	0
		«Канопус-В» № 6	2019-04-03	2019-04-20	18	0
20	МСУ-ИК-СРМ	«Канопус-В-ИК»	2017-08-08	2017-11-29	32	1
21	MTB3A	«Метеор-М» № 2-2	2020-02-05	2021-07-08	118	9
22	OLCI	Sentinel-3A	2016-06-04	2021-12-07	38 436	2 206
		Sentinel-3B	2019-01-23	2021-12-07	22 192	1 274
23	OLI	Landsat-8	2013-04-01	2020-11-14	6 957	1 151
24	OLI атм кор	Landsat-8	2014-01-15	2017-09-02	57 258	9 980
25	OLI-TIRS	Landsat-8	2013-03-19	2021-12-07	2 540 059	465 485
26	OMI	Aura	2001-01-01	2021-12-06	3 230 263	265
27	OMPS	Suomi NPP	2018-01-01	2020-04-02	210	0
28	ORBVVIEW-3	OrbView-3	2003-09-17	2007-03-04	79 761	20 656
29	PRISM	ALOS	2007-06-03	2011-01-01	10	458
30	ПСС	«Канопус-В»	2012-10-02	2018-09-09	50	10
		«Канопус-В-ИК»	2018-08-26	2019-04-06	68	3
		«Канопус-В» № 3	2018-04-30	2020-06-10	344	19
		«Канопус-В» № 4	2018-05-01	2020-06-19	342	20
		«Канопус-В» № 5	2019-04-05	2019-05-25	72	3
		«Канопус-В» № 6	2019-04-03	2019-04-20	54	2
31	SAR 12.5 m	ERS	1999-03-16	1999-07-06	75	11
32	SAR 75m	ERS	2009-02-13	2011-07-04	469	35
33	SLSTR	Sentinel-3A	2016-11-16	2021-12-07	529 914	1 994
		Sentinel-3B	2019-01-14	2021-12-07	406 370	1 497
34	SSUSI	DMSP	2010-04-14	2021-12-07	228 784	766
35	TM	Landsat 4	1987-06-29	1993-07-16	44 974	2 083
		Landsat 5	1984-03-06	2012-04-25	1 722 341	82 326
36	TROPOMI	Sentinel-5P	2018-01-01	2021-12-07	1 800 276	555
37	Ураган	МКС	2007-04-28	2020-08-18	651	81
38	PROBA-V	PROBA-V	2014-03-12	2018-04-30	2 411	10 398
39	VIIRS	Suomi NPP	2012-07-02	2021-12-07	142 742	8 077
Итого:			1984-03-06	2021-12-07	30 670 347	4 926 362

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

№	Прибор	Спутник	Диапазон дат		Кол-во	Размер, Гбайт
1	AHI	Himawari-8	2015-09-01	2021-12-08	2 290 026	77 204
2	AVHRR	NOAA 15	2011-12-22	2019-07-02	52 382	687

№	Прибор	Спутник	Диапазон дат		Кол-во	Размер, Гбайт
		NOAA 16	2011-10-28	2014-06-06	47 619	856
		NOAA 18	2011-09-20	2021-12-08	354 657	6 306
		NOAA 19	2011-11-24	2021-12-08	326 271	5 866
3	Геотон-П	«Ресурс-П» № 1	2014-06-24	2020-06-28	734	151
		«Ресурс-П» № 2	2015-03-23	2017-12-20	465	153
		«Ресурс-П» № 3	2016-05-26	2017-02-06	442	189
4	Imager	GOES-E	2013-05-23	2018-04-28	38 587	1 038
		GOES-W	2013-05-23	2018-04-28	57 379	648
		MTSAT 2	2013-05-23	2015-12-04	29 254	511
5	KMCC-101	«Метеор-М» № 1	2011-10-01	2014-09-23	35 257	1 474
		«Метеор-М» № 2	2014-09-17	2021-12-07	512 863	50 211
6	KMCC-102	«Метеор-М» № 1	2011-10-01	2014-09-23	38 535	2 079
		«Метеор-М» № 2	2014-09-17	2021-12-07	491 213	52 942
7	KMCC-50	«Метеор-М» № 2	2016-04-10	2016-04-19	900	37
8	KMCC2-101	«Метеор-М» № 2-2	2019-12-09	2021-12-07	79 230	11 656
9	KMCC2-102	«Метеор-М» № 2-2	2019-12-09	2021-12-07	78 643	11 092
10	MODIS	Aqua	2011-11-24	2021-12-07	1 416 189	58 227
		Terra	2011-12-23	2021-12-08	1 512 602	64 294
11	MCC	«Канопус-В»	2011-12-30	2020-02-15	47 709	719
		«Канопус-В-ИК»	2013-10-06	2021-04-06	702	9
		«Канопус-В» № 3	2018-07-15	2021-05-27	208	2
		«Канопус-В» № 4	2018-07-23	2021-05-28	134	1
		«Канопус-В» № 5	2020-06-30	2021-04-15	202	2
		«Канопус-В» № 6	2020-06-15	2021-01-29	182	2
12	МСУ-ГС	«Арктика-М1»	2019-07-10	2021-10-16	23 955	5 801
		«Электро-Л-1»	2013-10-31	2020-07-05	17 595	557
		«Электро-Л-2»	2016-04-14	2021-10-16	564 662	3 584
13	МСУ-ИК-СРМ	«Канопус-В-ИК»	2017-08-08	2020-12-21	11 523	3 192
14	МСУ-МР	«Метеор-М» 1	2014-03-07	2014-12-12	10 319	162
		«Метеор-М» 2	2014-07-31	2021-12-05	1 881 010	42 790
		«Метеор-М» 2-2	2019-07-19	2021-12-07	140 051	1 607
15	МТВ3А	«Метеор-М 2-2	2020-02-05	2021-10-16	23 718	544
16	МТВ3А 2	«Метеор-М» 2-2	2021-05-29	2021-07-18	4 035	67
17	MVIRI	Meteosat 7	2013-05-23	2017-01-25	97 293	2 072
18	OLCI	Sentinel-3A	2020-08-24	2021-12-07	9 509	530
		Sentinel-3B	2020-07-16	2021-12-07	9 491	527
19	ПСС	«Канопус-В»	2011-12-30	2020-01-21	41 155	2 625
		«Канопус-В-ИК»	2013-10-06	2021-04-26	594	35
		«Канопус-В» № 3	2018-07-02	2021-05-27	224	11
		«Канопус-В» № 4	2018-07-31	2021-05-28	202	11
		«Канопус-В» № 5	2020-06-30	2021-02-02	252	12
		«Канопус-В» № 6	2020-06-30	2021-04-02	218	11
20	SEVIRI	Meteosat-10	2017-10-04	2021-10-16	651 599	9 088

№	Прибор	Спутник	Диапазон дат		Кол-во	Размер, Гбайт
		Meteosat-8	2017-07-03	2020-11-18	461 677	6 476
		MSG	2013-05-23	2018-04-28	152 080	8 442
21	КШМСА-СР	«Ресурс-П» № 2	2015-03-17	2016-12-18	50	13
22	КШМСА-ВР	«Ресурс-П» № 1	2014-04-01	2020-11-13	1 120	538
		«Ресурс-П» № 2	2015-03-17	2017-12-15	606	165
		«Ресурс-П» № 3	2016-05-11	2017-02-11	216	42
23	SLSTR	Sentinel-3A	2018-01-01	2021-12-07	184 470	685
		Sentinel-3B	2020-06-08	2021-12-07	180 802	676
24	TROPOMI	Sentinel-5P	2018-04-30	2021-12-07	710 280	17
25	VIIRS	JPSS1 (NOAA 20)	2018-01-10	2021-12-07	136 834	8 830
		Suomi NPP	2013-02-27	2021-12-08	335 766	22 672
Итого:			2011-09-20	2021-12-08	13 063 691	468 138

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 получают 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 500 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,
- дым 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 2021 г. состав доступных пользователям информационных продуктов был расширен за счёт добавления данных, получаемых с МКС, группировки PlanetScore, прибора МТВ3А КА серии «Метеор-М», а также КА «Арктика-М» № 1.

В 2021 г. было также реализовано в архивы поступление целого ряда новых композитных информационных продуктов, основные из которых приведены ниже:

- ежедневные интерполированные композиты отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, а также индекса NDVI по данным приборов КМСС;
- многодневные (за 30, 45, 90 дней) безоблачные композиты по данным MSI/Sentinel-2;
- еженедельные композиты 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 2021 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 состояние 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.

Основной модификации в 2021 г. подвергся многофункциональный картографический веб-интерфейс, переведённый на использование тайлового подхода к отображению данных с использованием библиотеки Leaflet. Такой подход позволил

обеспечить повышенную производительность работы с данными за счёт активного использования механизмов тайлового кэширования данных при их предоставлении и анализе.

Кроме того, в 2021 г. был существенно расширен список доступных информационных продуктов, приведённых в п. 1.3.4 настоящего отчёта.

В 2021 г. была также существенно расширена функциональность предоставляемых пользователям инструментов для анализа и обработки спутниковых данных. В частности, были реализованы инструменты для расчёта показателя экологического вреда (ПЭВ) для получения сравнительной количественной характеристики состояния однотипных растительных экосистем и оценки возможного ущерба от негативного воздействия внешних факторов на основе термодинамического подхода. ПЭВ представляет собой отношение значения скорости испарения влаги с поверхности нарушенной экосистемы к фоновой (ненарушенной) экосистеме. Реализованный инструмент «оценка экологического ущерба» позволяет производить расчёт ПЭВ по определённому типу лесной экосистемы. Инструмент обеспечивает возможность расчёта ПЭВ для следующих типов леса: темнохвойный, лиственный, светлохвойный, смешанный, смешанный с преобладанием хвойных, смешанный с преобладанием лиственных и хвойный листопадный. ПЭВ строится на основе данных эвапотранспирации, получаемых на основе данных прибора MODIS, установленного на спутниках AQUA и TERRA. Для расчёта ПЭВ используются стандартные продукты, предоставляемые центром Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC <https://lpdaac.usgs.gov>) (восьмидневные композитные изображения с информацией о суммарном испарении) и на их основе сезонные карты испарений: карта минимальной, средней и максимальной скорости испарения за летний, весенний, зимний и осенний сезоны. Реализованный инструмент позволяет проводить расчёт ПЭВ по выбранной пользователем произвольной области. Для выбранной области для каждого типа из семи экосистем строится гистограмма распределения значений эвапотранспирации, вычисляются среднее значение и стандартное отклонение этого распределения. В качестве значения скорости испарения ненарушенной экосистемы выбирается величина, равная сумме математического ожидания и трех величин стандартного отклонения. Результатом обработки являются карты показателя экологического вреда для семи типов лесных экосистем в выбранной пользователем области, а также композитное изображение этих карт. Пользователь может переключаться между картами ПЭВ, анализируя экологический ущерб каждой из представленных экосистем. Имеется также возможность сохранять и загружать ранее рассчитанные результаты обработки для последующего анализа.

1.3.6 Научные и прикладные информационные системы, использовавшие возможности ЦКП в 2021 году

На основе предоставляемых ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ресурсов по доступу и обработке спутниковых данных в 2021 г. функционировало более 14 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, используемые 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.

В 2021 г. на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» были продолжены работы по развитию и применению технологии контроля данных сельскохозяйственной микропереписи (ТКДСМП, информационный сервер по адресу <http://agrocensus21.geosmis.ru/>). В рамках работ решались следующие задачи:

- повышение уровня достоверности данных сельскохозяйственной микропереписи о площадях различных видов сельскохозяйственных угодий (пашни, сенокосов, пастбищ, залежи) и о посевных площадях на уровне

муниципальных районов субъектов Российской Федерации за счёт использования объективного источника информации – спутниковых данных ДЗЗ;

- повышение оперативности решения задачи объективного контроля данных, собираемых в ходе сельскохозяйственной микропереписи, за счёт оперативного получения данных спутникового наблюдения и результатов их обработки;
- сокращение временных затрат на проведение работ по объективному контролю данных, собираемых в ходе сельскохозяйственной микропереписи, за счёт автоматизации процессов получения и обработки данных спутникового наблюдения;
- упрощение доступа специалистов Федеральной службы государственной статистики и её территориальных органов к информации о пространственном распределении и площадях сельскохозяйственных угодий и посевов, полученной на основе данных спутникового наблюдения, а также к результатам их сопоставления со статистическими данными (текущей сельскохозяйственной статистики, пилотного обследования, сельскохозяйственной микропереписи).

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 для 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 2021 г. возможностями ЦКП «ИКИ-Мониторинг» пользовались более 110 организаций (<http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=7>). При этом новыми пользователями ЦКП стали 15 организаций:

1. ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск;
2. ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»), Новокубанск;
3. ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН» (ИГЭ РАН), Москва;
4. Краевое государственное автономное нетиповое образовательное учреждение «Краевой центр образования» (КГАНОУ КЦО), Хабаровск;
5. Государственное казенное учреждение Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики» (ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»);
6. ФГБНУ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (ФГБНУ «Росинформагротех»), р.п. Правдинский (Пушкино);
7. ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА, Академия);
8. ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России);
9. Университет геологических наук Министерства среднего и специального образования и госкомгеологии Республики Узбекистан;
10. ФГБУН «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН);
11. ФГБУН «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН);
12. ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина» (ФГБОУ ВО Омский ГАУ);
13. ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ);
14. РГП на ПХВ «Институт информационных и вычислительных технологий» КН МОН РК, г. Алматы, Республика Казахстан;
15. ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ).

1.3.8 Научные проекты, выполняемые с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в 2021 году

В 2021 г. возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг» использовались для решения задач 17 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;
- РНФ 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 0024-2019-0014, Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера, Руководитель: Прошин А.А., канд. техн. наук, 2019–2021 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- Тема «Мониторинг» № 01.20.0.2.00164, Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности, Руководитель: Лупян Е.А., д-р техн. наук, 2003–2021 гг., Головная организация - Институт космических исследований Российской академии наук;
- РФФИ 19-37-90114, Разработка подходов и методов дистанционного мониторинга водных ресурсов в регионах Средней Азии на примере контроля состояния рек

- бассейна Амударьи, Руководитель: Лупян Е.А., д-р техн. наук, 2019–2021 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, 2018–2021 гг., Головная организация — Университет имени Аристотеля в Салониках;
 - РФФИ 19-45-343001, Пространственно-временные особенности теплового поля урбанизированных территорий засушливой зоны по данным спутниковой съёмки, Руководитель: Кошелева О.Ю., 2019–2021 гг., Головная организация — Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук;
 - РФФИ 20-37-70008, Разработка нейросетевых алгоритмов анализа вулканической активности по данным видеонаблюдения, Руководитель: Камаев А.Н., канд. техн. наук, 2019–2021 гг., Головная организация — ФГБУН Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДО РАН;
 - 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 630 результатов работ, которые выполнялись с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Из них 90 статей были опубликованы в 2021 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 определенных 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) и Самарский Государственный Университет.

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.

1.4 Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса

1.4.1 Построение сезонных временных серий безоблачных ежедневных измерений КМСС на территорию России

Данные с приборов серии КМСС, находящихся на борту спутников Метеор-М и Метеор-М-2, удобны для решения широкого комплекса задач дистанционной оценки характеристик земной поверхности, оперативного мониторинга и оценки растительного покрова России с достаточно высоким пространственным разрешением. До недавнего времени большая часть значительного потенциала этих данных с редким сочетанием характеристик «пространственное разрешение-повторяемость наблюдений» не могла быть использована для решения этих задач ввиду ограничений совместимости со стандартными методами, используемыми для предварительной и тематической обработки данных действующих и исторических спутниковых систем для оптико-электронной съёмки, таких как Terra\Aqua(MODIS), Landsat (ETM+, OLI), Sentinel (MSI) и многих других. Отмечалась недостаточная точность и нестабильность географической привязки как разновременных, так и разнотональных снимков при наличии погрешностей в сопутствующей навигационной информации, невозможность применения существующих методов выявления мешающих факторов на изображениях КМСС-М из-за межканального параллакса и временного лага. Указанные особенности, а также отсутствие в свободном доступе коллекций атмосферно-скорректированных измерений и погрешности абсолютной радиометрической калибровки камер делали невозможным построение однородных временных рядов дистанционных индикаторов для их использования во множестве имеющихся автоматических алгоритмов для распознавания объектов земной поверхности и мониторинга состояния растительного покрова.

Разработанные в ИКИ РАН методы были направлены на устранение указанных недостатков данных КМСС-М и их производных, последовательно делая возможным автоматическое получение и практическое использование производных данных различных уровней обработки. В частности, в результате проведённых работ введена гранулярная (тайловая) система пространственной организации и распространения данных для всех получаемых по данным КМСС-М продуктов, реализованы и отработаны методы устранения аномалий географической привязки разнотональных изображений КМСС-М, устойчиво работающие в широком диапазоне физико-географических условий и геометрических условий съёмки. Разработаны и внедрены автоматические методы выявления мешающих факторов (облачности, теней и снега) на разнотональных

изображениях КМСС-М. Для минимизации влияния атмосферы был адаптирован метод атмосферной коррекции на основе приведения гистограмм (Histogram Matching). Описанные выше подходы делают акцент на углублённое использование пространственной информации и опираются на актуализированный во времени и географически привязанный спектральный эталон, полученный по данным среднего пространственного разрешения и обладающего максимальной наполненностью данных на любую необходимую дату съёмки прибором КМСС-М. В качестве такого эталона используются восстановленные на любой произвольный день мультиспектральные безоблачные изображения-срезы MODIS (Terra\Aqua), полученные путём весовой интерполяции временной серии сеансов продукта MOD09 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod09gav006/>). Рассчитанный таким способом эталон характеризуется наиболее оптимальным сочетанием требуемых характеристик, а именно, точной географической привязкой изображения, наличием радиометрической и атмосферной коррекции, а также полным пространственным покрытием максимально актуализированными на текущую дату измерениями коэффициентов спектральной яркости земной поверхности.

В результате работы построенной на основе указанных автоматических методов технологии была построена технология (рисунок 1.4.1.1) и сформирована коллекция скорректированных спутниковых данных КМСС-М уровня L2A (измерения КСЯ на уровне земной поверхности), а также производных и вспомогательных продуктов, обеспечивающих возможность количественной оценки земной поверхности на больших территориях.

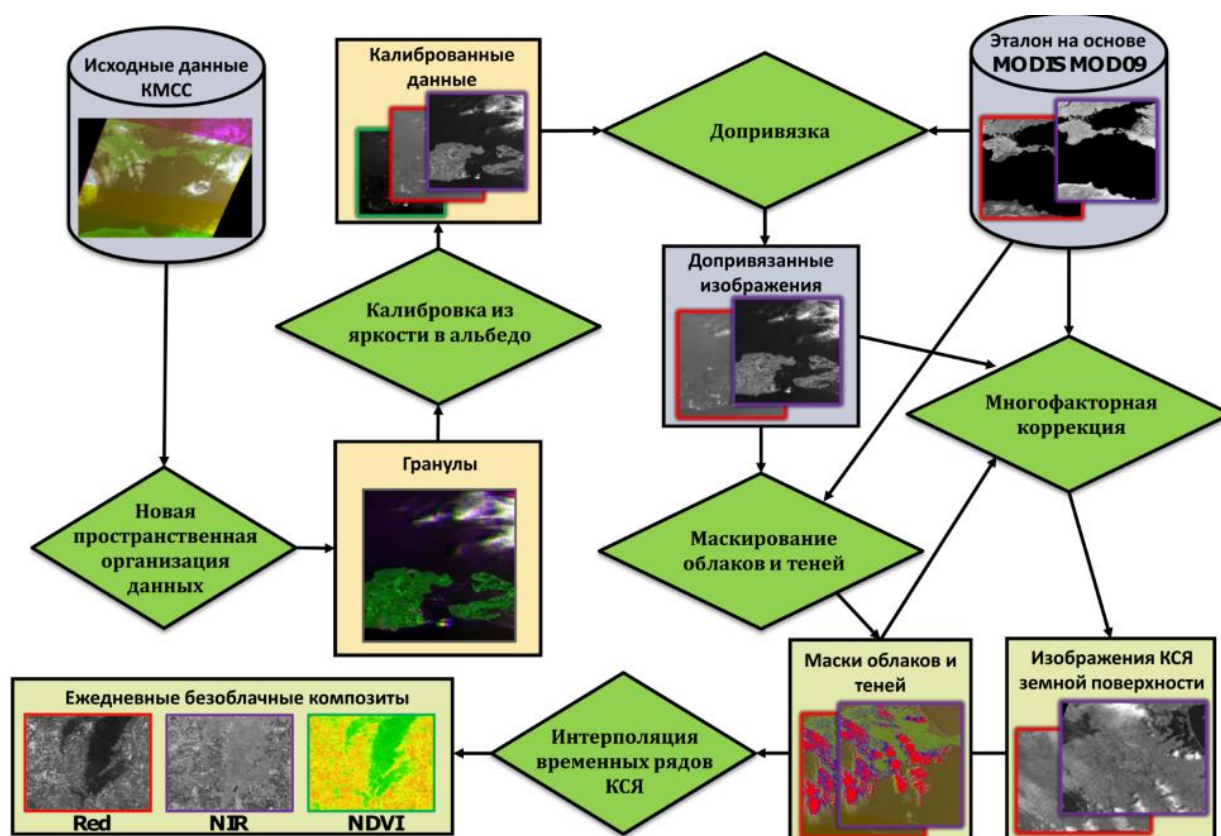


Рисунок 1.4.1.1 — Блок-схема автоматической технологии обработки данных КМСС-М

Технология построения безоблачных временных серий измерений прибором КМСС-М включает в себя несколько связанных друг с другом блоков, основанных на отдельных методах предварительной обработки данных.

Метод двухэтапной компенсации нелинейных искажений географической привязки изображений КМСС-М предусматривает, на первом этапе, поиск систематического смещения изображения, а на втором этапе — поиск локального смещения небольших квадратных участков изображения КМСС-М (блоков размером ~6 км) путём максимизации значения пространственной корреляции Пирсона между парой изображений КМСС-М и эталона, сравниваемых в единой географической проекции на дату съёмки в одинаковом спектральном диапазоне длин волн. Помимо обеспечения географической привязки, в результате такого поиска также формируется вспомогательное изображение максимума пространственной корреляции, характеризующее наличие и интенсивность мешающих факторов для каждого блока изображения и используемое в дальнейшем для создания масок облачности, теней, а также на этапе восстановления ежедневных безоблачных изображений-срезов по данным КМСС-М. Описанный метод географической привязки обеспечивает возможность автоматического устранения аномалий географической регистрации изображений, в том числе, суммарных смещений вплоть до 15 км в любую сторону от корректного положения. Изображение найденного максимума пространственной корреляции используется для предварительного выделения безоблачных участков исходного изображения (высокие значения максимальной локальной корреляции) и облачных участков (низкие значения максимальной локальной корреляции), на основе которых формируются локальные гистограммы классов облачности и чистой поверхности в каждом канале. Анализ разности локальных гистограмм этих классов позволяет автоматически установить локализованный адаптивный порог на выделение облачности, несмотря на отсутствие радиометрической калибровки и атмосферной коррекции обрабатываемых данных. Тени выявляются в зоне геометрических теней от выявленной облачности с дальнейшим уточнением их фактических границ на основе сравнения яркостей пикселей из анализируемой области со спектральным эталоном.

Поскольку эффекты атмосферного рассеяния, вариабельность геометрии освещения и наблюдения в пределах сцены смещает и деформирует гистограмму яркостей объектов земной поверхности, разработанный метод многофакторной радиометрической и атмосферной компенсации производит локализованный анализ и пересчёт свободных от мешающих факторов значений пикселей изображения до достижения максимального соответствия распределения пересчитанных значений с эталоном. В процессе анализа рассчитываются коэффициенты линейной связи между локальными распределениями яркостей КМСС-М и эталона внутри скользящего окна, которое позволяет адаптивно учитывать возможную нестабильность калибровки, изменение состояния атмосферы, геометрии наблюдения и освещения. Разработанный метод многофакторной компенсации указанных эффектов обеспечивает возможность дальнейшего корректного сравнения разновременных обработанных измерений КМСС-М. Остаточное влияние мешающих факторов устраняется на этапе восстановления безоблачных сезонных временных серий изображений КСЯ на каждый день целевого сезона вегетации.

Пример полученных на каждый день 2020 г. и опубликованных в интерфейсе систем семейства Вега безоблачных изображений-срезов на территорию Европейской РФ и количественное сравнение с данными MODIS (продукт MOD09) приведено на рисунке 1.4.1.2.

В настоящее время с помощью разработанной технологии на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» сформирован общедоступный архив восстановленных географически привязанных атмосферно-скорректированных мультиспектральных изображений КМСС (включая также значения индекса NDVI) на весь зерновой пояс России за каждый день бесснежного периода 2020 г. с пространственным разрешением 60 м. Общая площадь зоны охвата этими данными в настоящий момент превышает 14 млн км² и также включает в себя часть территории приграничных с Россией стран (рисунок 1.4.1.3).

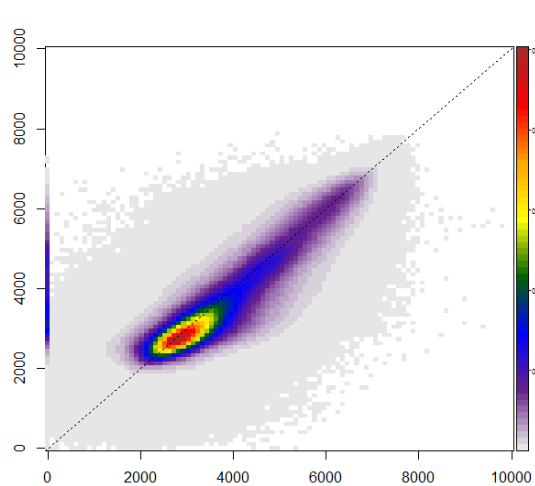
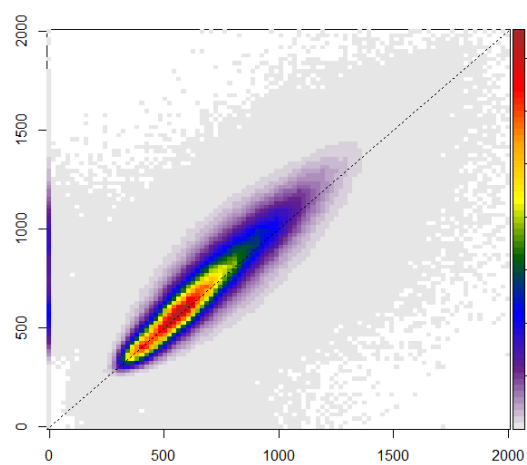
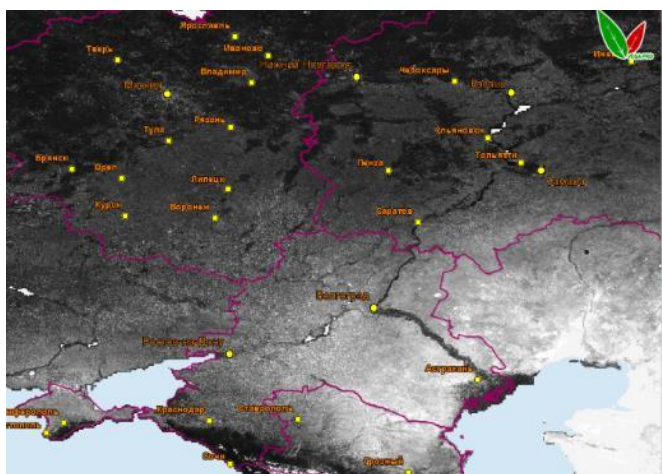
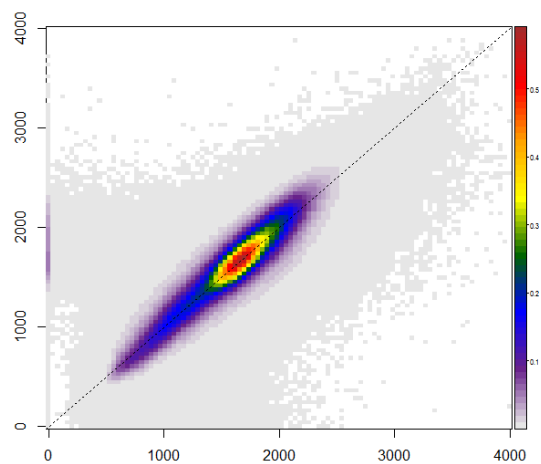
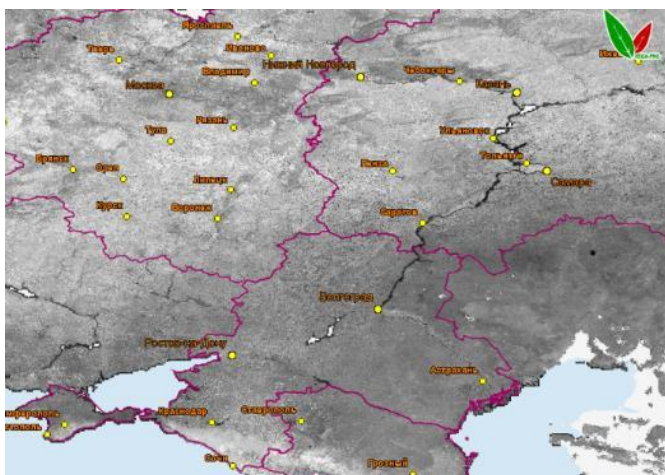


Рисунок 1.4.1.2 — Примеры ежедневных безоблачных изображений КМСС в интерфейсе «Вега» (левый ряд) и диаграммы рассеивания при сравнении с композитным изображением MODIS (правый ряд) на приведённую территорию за 1 августа 2020 г. для КСЯ в ближнем ИК-канале (верхний ряд), красном канале (средний ряд) и NDVI (нижний ряд), значения нормированы

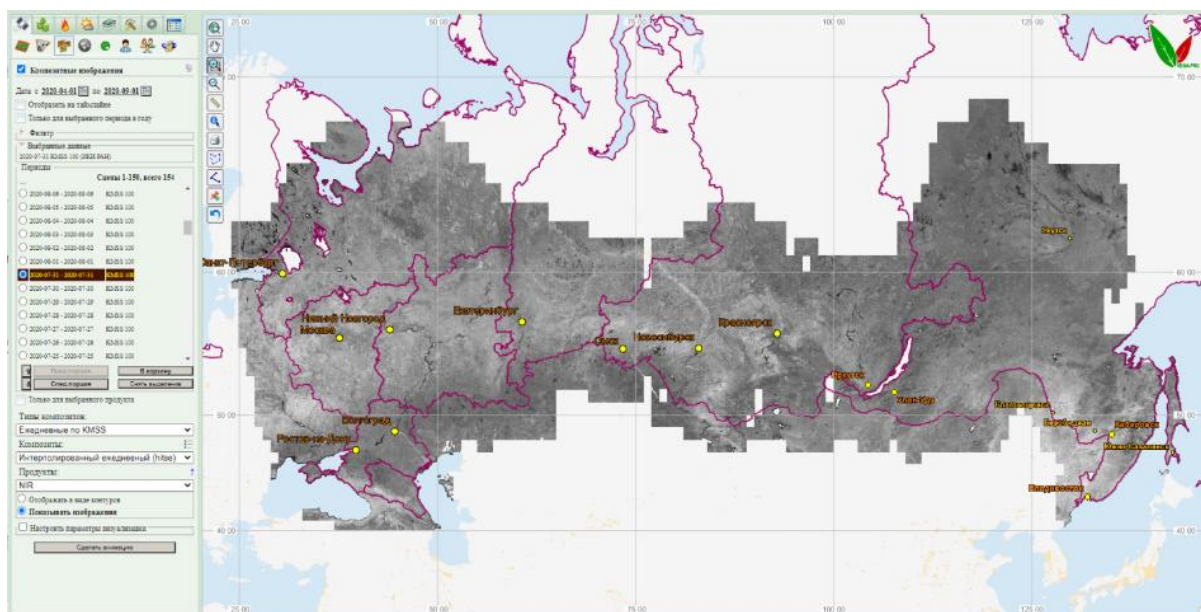


Рисунок 1.4.1.3 — Пример восстановленного безоблачного изображения в канале NIR прибора KMCC-M на 31 июля 2020 г. для территории зернового пояса России с пространственным разрешением 60 м

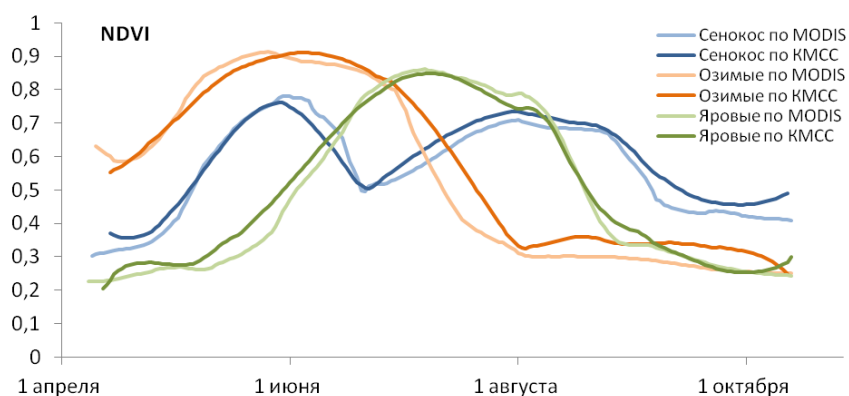
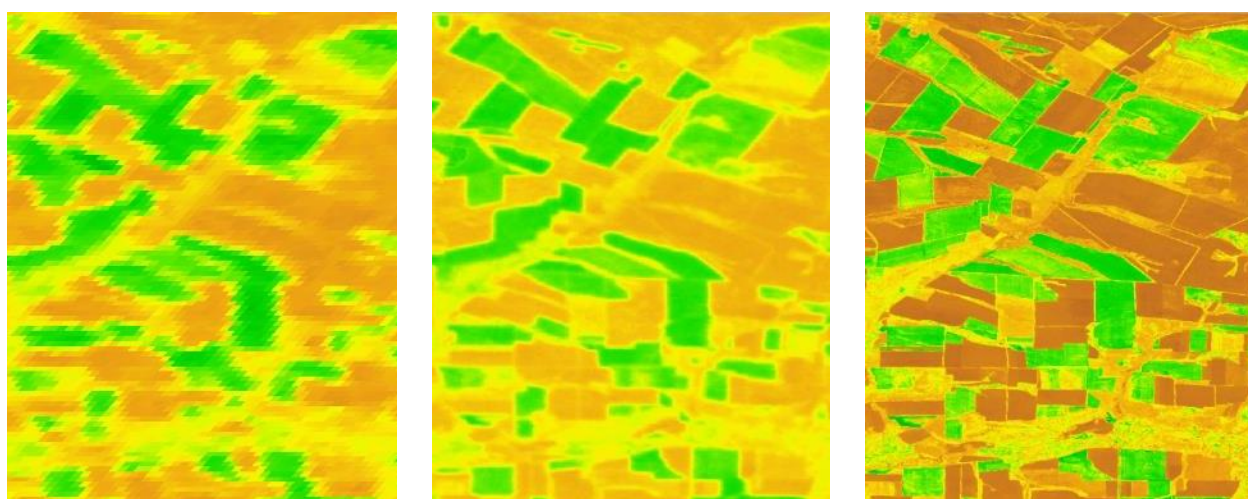


Рисунок 1.4.1.4 — Фрагменты ежедневных изображений NDVI за 1 мая 2020 г., полученные по данным уровня обработки L2A для MODIS (слева), KMCC-M (в центре) и MSI (Sentinel-2) в одном масштабе и единой цветовой палитре, а также восстановленные сезонные временные серии ежедневных значений NDVI различных сельскохозяйственных культур полученные на уровне пикселя KMCC-M (внизу)

Помимо ежедневных восстановленных измерений КСЯ в красном и ближнем ИК-диапазонах, а также значений NDVI, указанный архив включает в себя формируемые в процессе работы технологии обработанные снимки прибором КМСС-М, прошедшие этапы географической привязки и атмосферной коррекции, сопровождаемые масками облачности и теней, а также сформированный на их основе вегетационный индекс NDVI, отображаемый для всех пар измерений в каналах, одновременно относящихся к классу чистой поверхности. На рисунке 1.4.1.4 приведены восстановленные однодневные изображения NDVI, полученные на основе данных трех различных спутниковых систем: MODIS (Terra/Aqua), КМСС-М («Метеор-М» № 2) и MSI (Sentinel-2), а также временные серии NDVI по данным приборов КМСС и MODIS для трех классов быстроменяющейся сельскохозяйственной растительности. Сформированные в результате описанной работы сезонные серии дистанционных измерений прибором КМСС высокого временного разрешения совместимы с имеющимися и перспективными методами и технологиями распознавания и оценки растительного покрова, используемыми для данных других спутниковых систем.

1.4.2 Оценка точности географической привязки временных рядов предварительно обработанных изображений КМСС.

Точная географическая привязка спутниковых данных является необходимым условием для построения и анализа временных серий разновременных и мультисенсорных наблюдений и построения на их основе тематических продуктов необходимой точности.

Разработанный и описываемый в настоящем разделе метод географической допривязки основан на поиске оптимального локального смещения части корректируемого изображения при сравнении с эталонным изображением путём максимизации значения корреляции Пирсона. Универсальность и технологическое удобство разработанного метода заключается в том, что корректируемое изображение может не быть радиометрически калибровано, а используемое при допривязке эталонное изображение может иметь кратно более низкое пространственное разрешение, ускоряя и упрощая организацию потоковой обработки больших объёмов спутниковых данных, что особенно актуально для автоматической предварительной обработки данных отечественных спутниковых систем, включая данные приборов серии КМСС («Метеор-М», «Метеор-М» № 2) на национальном уровне пространственного охвата.

В ходе подготовки вспомогательных (эталонных) данных на произвольную дату создаётся используемое для привязки эталонное мультиспектральное изображение, которое свободно от влияния мешающих факторов, таких как облачность и тени и характеризуется ежедневной временной актуализацией. Привязываемое изображение должно иметь близкие или аналогичные по отношению к эталону спектральные каналы и должно быть подготовлено в единой с эталоном картографической проекции с кратно более высоким пространственным разрешением (в данном случае коэффициент кратности равен 4): в работе в качестве эталонного используются подготовленные описанным выше способом эталонные изображения MODIS с разрешением 240 м и изображения КМСС-М с разрешением 60 м.

Поиск оптимального локального компенсирующего смещения осуществляется посредством закругления группы пикселей корректируемого изображения высокого пространственного разрешения до соответствующего размера пикселя эталонных данных и подсчёте значения пространственной корреляции по закруглённому и эталонному изображению. Перебор групп пикселей и поиск смещения, при котором достигается наибольшее значение корреляции, осуществляется с шагом в один пиксель корректируемого изображения. На рисунке 1.4.2.1 приведена блок-схема технологии привязки, которая разделяется на несколько этапов. Первоначально осуществляется пространственная реорганизация корректируемых изображений КМСС-М и эталонных данных. Эталонные данные переводятся из синусоидальной проекции в географическую,

при этом данные преобразуются таким образом, чтобы пространственное разрешение было кратным и сетка границ пикселей сравниваемых изображений совпадала.

Для оценки эффективности метода были проведены три эксперимента, позволяющие получить численные оценки ошибок привязки по данным результатов обработки большого числа изображений на территорию России за весь бесснежный период 2020 г. наблюдений. Первый эксперимент включал в себя оценку эффективности метода на основе модельных репрезентативных наборов данных, полученных на основе изображений Sentinel-2 (MSI), второй эксперимент позволил оценить абсолютную ошибку привязки эталонных изображений MODIS на основе сравнения с данными Sentinel-2 (MSI), а в третьем эксперименте были получены результаты оценки ошибки потоковой автоматической привязки данных KMCC-M, осуществлённых с помощью эталона MODIS, в сравнении с данными Sentinel-2 (MSI).

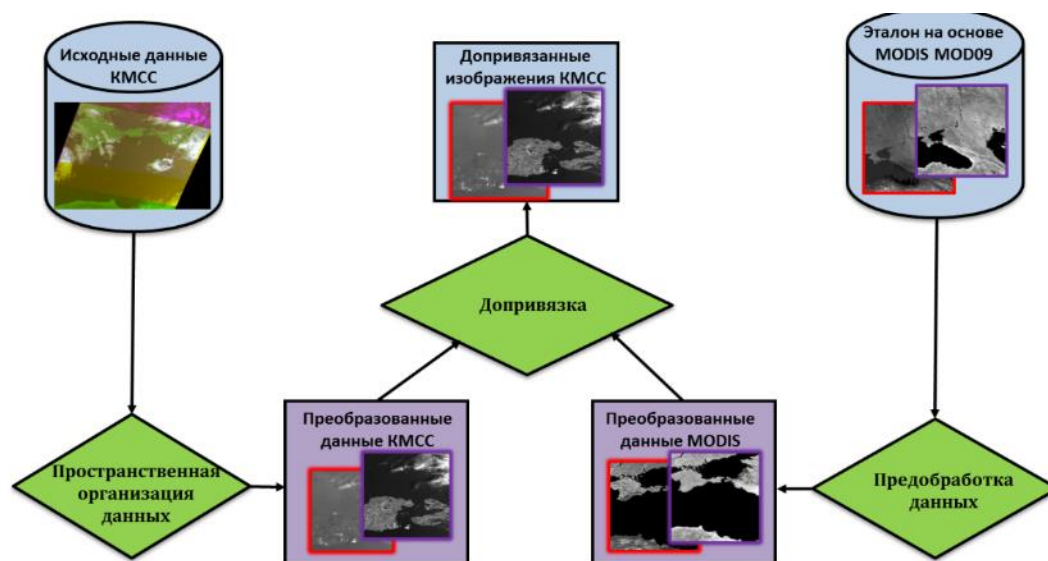


Рисунок 1.4.2.1 — Блок-схема метода автоматической допривязки изображений KMCC на основе эталона MODIS

В рамках первого эксперимента с целью получения оценки эффективности метода на основе модельных данных были использованы изображения Sentinel-2 (MSI), с разрешением 10 м в красном и ближнем инфракрасном каналах, преобразованные, соответственно, до 60 и 240 м, т.е. до пространственного разрешения KMCC-M и MODIS, соответственно.

Подготовленные указанным образом модельные данные позволили исключить влияние на оценку точности привязки комплекса посторонних факторов, проявляющихся в процессе кросс-сенсорного сопоставления мультиплатформенных спутниковых данных, таких как различия состояния атмосферы, аппаратных функций спектральных каналов, геометрии освещения и наблюдения на различные моменты времени съёмки одной территории.

Эксперимент заключался в случайном выборе областей размером 100×100 пикселей (около 6×6 км) на случайно выбранных безоблачных изображениях Sentinel-2, приведённых к разрешению 60 м (аналог KMCC-M), и смещении этих областей в случайном направлении в диапазонах от −1200 до +1200 м, формируя модельное искажение локальной привязки. Далее описанным выше методом автоматически находилось смещение, при котором достигалось максимальное значение пространственной корреляции с изображениями Sentinel-2, приведёнными к разрешению 240 м (аналог MODIS). Таким образом, для каждого модельного искажения автоматически определялось компенсирующее смещение и оценивался модуль их абсолютных различий.

Результаты модельного эксперимента, полученные на основе анализа более 1100 случайно выбранных указанным образом модельных участков в различных частях территории России за различные даты бесснежного периода 2020 г., позволили получить среднее значение ошибки определения внесённых искажений в красном и инфракрасном каналах, равной 6 % от размера пикселя (аналога КМСС-М с разрешением 60 м), что составляет 3,6 м. Таким образом, результаты первого эксперимента указали на принципиальную возможность привязки модельных данных высокого пространственного разрешения по низкодетальным изображениям с практически нулевой ошибкой автоматического определения искажений привязки изображений для широкого диапазона физико-географических условий и сезона наблюдений.

Во втором эксперименте была произведена автоматическая оценка абсолютной ошибки привязки подготовленных данных MODIS, которые выступают в качестве эталона при автоматической допривязке изображений КМСС-М. В рамках этого эксперимента предполагалось, что изображения MODIS содержат ошибки привязки, которые должны быть измерены путём сопоставления этих данных с соответствующими изображениями Sentinel-2 (MSI) разработанным методом.

Изучаемые мультиспектральные безоблачные изображения MODIS были ранее получены с помощью ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с ежедневной временной детализацией путём весовой интерполяции временной серии сеансов продукта MOD09 с последующим перепроецированием из синусоидальной проекции в географическую с ожидаемой максимальной ошибкой проецирования не более 12 м (выбранным методом геометрического преобразования). Полученные прибором MSI изображения с разрешением 10 м в соответствующих спектральных каналах были использованы в качестве эталонных, обладая декларируемой средней погрешностью привязки пикселя не более 3 м. Оценка точности привязки осуществлялась на основе участков размером 25×25 пикселей MODIS (6×6 км). В рамках второго эксперимента было обработано 736 случайно выбранных на территории России участков изображений MODIS в инфракрасном канале и 680 участков в красном канале, при этом среднее значение ошибки привязки данных MODIS составило 18 м в инфракрасном канале и 19 м в красном (менее 8 % размера пикселя). Таким образом, погрешность привязки подготовленных изображений MODIS, оценённая на основе случайно выбранных дат за бесснежный период 2020 г. позволяет обеспечить привязку снимков КМСС-М с субпиксельной точностью и не представляет существенного препятствия для использования MODIS в качестве эталона при коррекции снимков КМСС-М.

Наконец, в рамках третьего эксперимента была проведена оценка искажений географической привязки данных КМСС-М, допривязанных ранее в рамках разработанной технологии на основе эталонных данных MODIS. Оценка ошибок привязки осуществлялась на основе изображений Sentinel-2 (MSI) в соответствующих спектральных каналах на базе подхода, использованного в двух предыдущих экспериментах. Для этого автоматически подбирались пары снимков КМСС-М и MSI за одинаковые даты и на одинаковые территории, свободные от влияния облачности и теней на обоих изображениях. Всего было обработано 3842 тестовых участка размером 100×100 пикселей КМСС-М (6×6 км), случайно выбранных на территории России за бесснежный период 2020 г. Среднее значение ошибки привязки данных КМСС-М по сравнению с эталоном в виде MSI составило 43 м в красном и инфракрасном каналах при пространственном разрешении привязываемых изображений 60 м. Субпиксельная точность привязки изображений КМСС-М обеспечивает возможность построения временных серий мультиспектральных измерений спектральной яркости земной поверхности, необходимых для решения научных и практических задач дистанционного мониторинга растительного покрова.

Таким образом, в рамках разработанных в настоящем исследовании методов для решения задач автоматической корреляционной географической привязки с

субпиксельной точностью обеспечена возможность использования в качестве эталона данных кратно более низкого пространственного разрешения, чем разрешение привязываемых изображений. Технологическим преимуществом разработанного метода является отсутствие необходимости использования данных измерений в других спектральных диапазонах, помимо целевого, и возможность работы с данными, не прошедшими радиометрическую калибровку, что обеспечивает его применимость к данным практически любых спутниковых систем для оптического дистанционного зондирования Земли.

1.4.3 Разработка методов и подходов работы с данными КА «Арктика М»

В феврале 2021 г. выведен на орбиту первый спутник из серии «Арктика-М», предназначенных для исследования арктического климата и окружающей среды. Спутники этой серии располагаются на высокоэллиптических орбитах (наклонение 63°, апогей 40 000 км). Наблюдение северных полярных регионов производится каждые 15 мин на рабочих участках (~6,5 ч на виток, съёмка на высотах 27 000–40 000–27 000 км). Период обращения 12 ч.

На космическом аппарате (КА) для целей мониторинга установлена аппаратура МСУ-ГС-ВЭ с тремя видимыми и семью ИК-каналами со средним разрешением в подспутниковой точке 1 и 4 км соответственно.

Совместным сотрудничеством специалистами НИЦ «Планета» и ИКИ РАН организована автоматическая оперативная обработка поступающих в Центры приёма НИЦ «Планета» данных и их поступление в Объединённую систему работы с данными центров НИЦ «Планета». На сегодняшний день система представляет собой распределённую, модульную веб-ГИС, совмещённую со сверхбольшими архивами данных ДЗЗ прямого доступа, обеспечивающую онлайн-сервисы данных для ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и большого количества прикладных информационных систем.

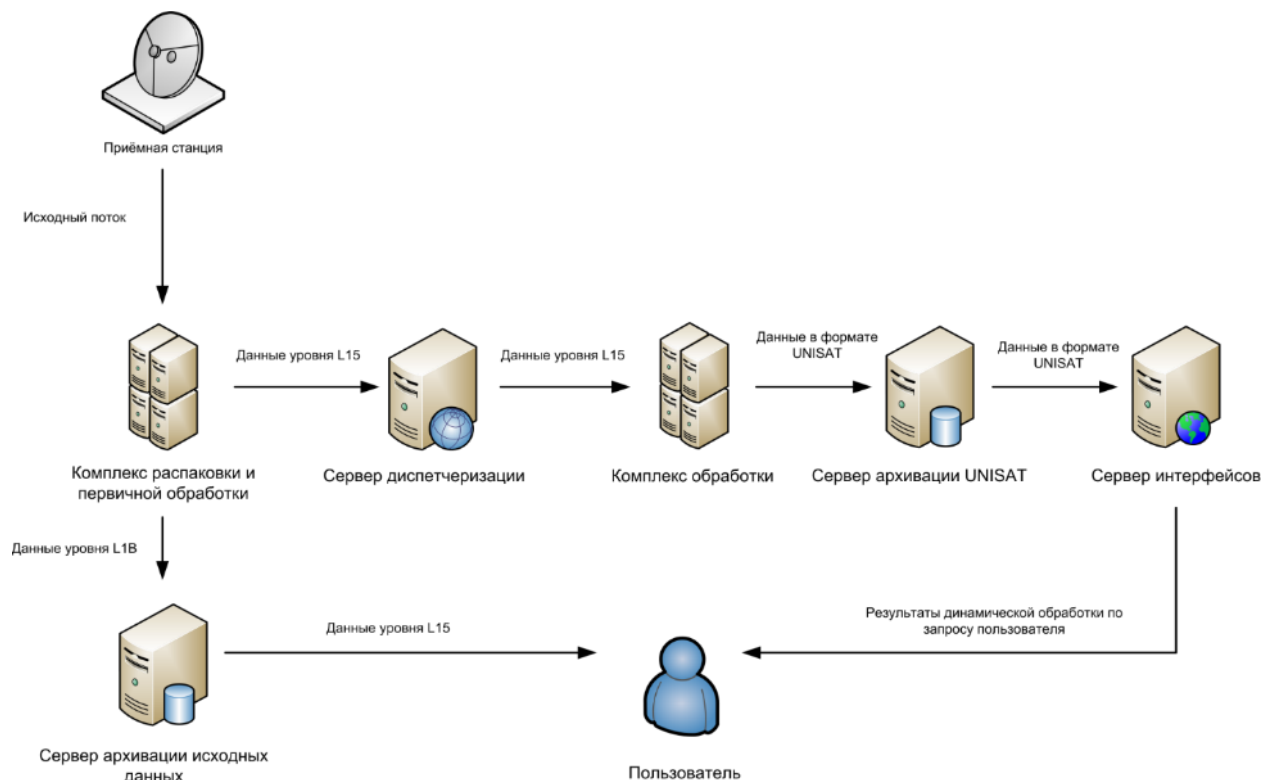


Рисунок 1.4.3.1 — Схема потоков данных со спутника «Арктика-М»

Схема потоков данных, от Центра приёма до формирования формата хранения, принятого в ЦКП «ИКИ-Мониторинг», достаточно стандартная и представлена на рисунке 1.4.3.1.

Данные после первичной обработки до уровня L15 (включают собственно данные, калибровочные таблицы, данные о позиционировании спутника и аналитическую схему для географической привязки каждого элемента изображения) хранятся в так называемой проекции «виртуального спутника», учитывающей изменения разрешения между сеансами. Оптимальная результирующая проекция для хранения и представления данных на веб-ресурсах — полярная стереографическая.

В работе со спутниковой информацией для географической привязки и преобразований используется связка программных пакетов GDAL/PROJ (поддерживается и развивается мировым сообществом для работы с геоданными). Проекция «виртуального спутника» крайне близка к ближней перспективной проекции Near-Sided Perspective (nsper), поддерживаемой Proj (пакет для работы с картографической информацией). Однако хороший результат привязки с исходной точностью достигается только в подспутниковой точке, из-за текущей реализации работы в пакете с этой проекцией только на сфероиде. Геометрически привязка данных в L15 организована на эллипсоиде.

Для сохранения точности географической привязки данных используется подход перепроецирования на основе указания набора контрольных точек исходного изображения с точными координатами (GCP – ground control point) вплоть до указания координат для каждой точки. В связке пакетов GDAL/PROJ есть ограничение на максимальное количество используемых точек GCP на изображение, поэтому реализована схема с фрагментацией исходных данных и перепроецированием каждого фрагмента по GCP в результирующую полярную стереографическую проекцию.

Данные в архивы Системы заносятся калиброванными, для видимых каналов это коэффициент спектральной яркости, для ИК — эквивалентная температура чёрного тела.

Состав инструментов обработки данных непосредственно в интерфейсе Системы позволяет решать существенный спектр задач по подготовке статических и динамических отчётных материалов, в том числе на регулярной автоматической основе, а также осуществлять интеграцию с действующими специализированными информационными системами. Пример совмещения данных различных систем ДЗЗ на рисунке 1.4.3.2.

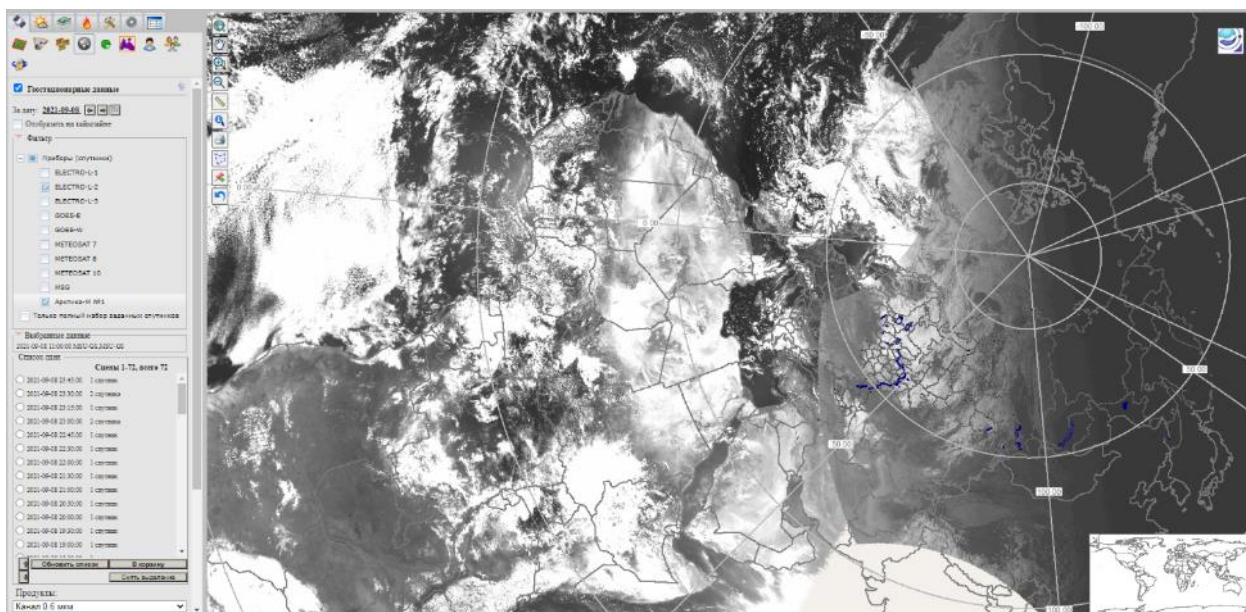


Рисунок 1.4.3.2 — Динамический композит по данным группировок «Электрон-Л» и «Арктика-М», канал 0,6 мкм, 28.09.2021, 11:00:00 UTC

1.4.4. Формирование архива геопривязанных данных МКС на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Космические эксперименты (КЭ) «Ураган» и «Сценарий», проводимые на борту Международной космической станции (МКС), предназначены для регистрации потенциально опасных явлений, и своевременная обработка данных этих экспериментов позволит более оперативно реагировать на такие ситуации. Кроме того, полученные снимки представляют интерес из-за высокого пространственного разрешения, очень большого временного диапазона накопленных данных, а также частоты съёмки определённых территорий. Однако данные, полученные в ходе КЭ, не содержат информации о своей географической привязке, что существенно осложняет дальнейшую работу с такими снимками в геоинформационных системах (ГИС), а также приводит к высокой сложности автоматизации обработки этой информации.

Классические методы привязки на основе как строгих, так и общих моделей сенсора требуют наличия информации о параметрах КА, которую для поставленной задачи нельзя определить достаточно точно, так как отсутствует информация о точном положении фотокамеры на борту МКС, неизвестны угол визирования и азимутальный угол фотокамеры во время съёмки. Поэтому для решения этой проблемы и формирования архива геопривязанных данных, полученных в рамках КЭ «Ураган» и «Сценарий», проводимых на МКС, была разработана и реализована двухступенчатая схема подготовки снимков с первичным определением грубой привязки изображения и последующим уточнением привязки по опорным данным.

Привязка производится в два этапа: сначала определяется первичная привязка путём нахождения подспутниковой точки и, исходя из координат подспутниковой точки, выбираются опорные данные, затем по найденным опорным данным производится уточнение полученной привязки.

Для грубой географической привязки вычисляются координаты подспутниковой точки, исходя из времени, полученного из метаданных снимка, а также орбитальных элементов МКС на это время.

Опорное изображение подбирается из архивов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») с учётом грубой привязки исходного изображения и полученной ранее оценки её точности, вычисленной с помощью усреднения модуля разности координат точной привязки и подспутниковой точки для снимков, привязанных ранее. В качестве опорных данных использовались снимки спутников Landsat-5 и Landsat-8 в силу широкой полосы захвата, хорошего пространственного и спектрального разрешения, а также доступности таких данных.



Рисунок 1.4.4.1 — Результат работы различных алгоритмов поиска контрольных точек: SURF (слева), SIFT (справа)

Для уточнения первичной привязки используются алгоритмы поиска и описания контрольных точек (в том числе BRISK, KAZE, ORB и SIFT) на имеющемся опорном изображении и на исходном, полученном с МКС, а также дополнительные преобразования для лучшей корреляции этих снимков друг с другом. Для решаемой задачи выбор был сделан в пользу алгоритма SIFT, так как он показал наиболее стабильную работу на исследуемых изображениях (рисунок 1.4.4.1).

Многие алгоритмы поиска контрольных точек заявляют инвариантность относительно поворота, масштаба, изменения яркости и т.д. Однако было выявлено, что существенное различие в пространственных разрешениях изображений приводит к некорректной работе алгоритмов поиска контрольных точек. Соотношение пространственных разрешений снимка с МКС и опорного изображения Landsat-8 оказалось критическим параметром в рассматриваемом случае. Разрешение данных с МКС варьируется от 3 до 50 м, данных Landsat — 30 м, поэтому необходимо уменьшить разницу между снимками для корректной работы алгоритмов поиска контрольных точек (в частности, используемого в работе алгоритма SIFT, рисунок 1.4.4.2).



Рисунок 1.4.4.2 — Результаты работы алгоритма SIFT для снимка, уменьшенного до 15 % (слева), 35 % (справа) от исходного размера изображения

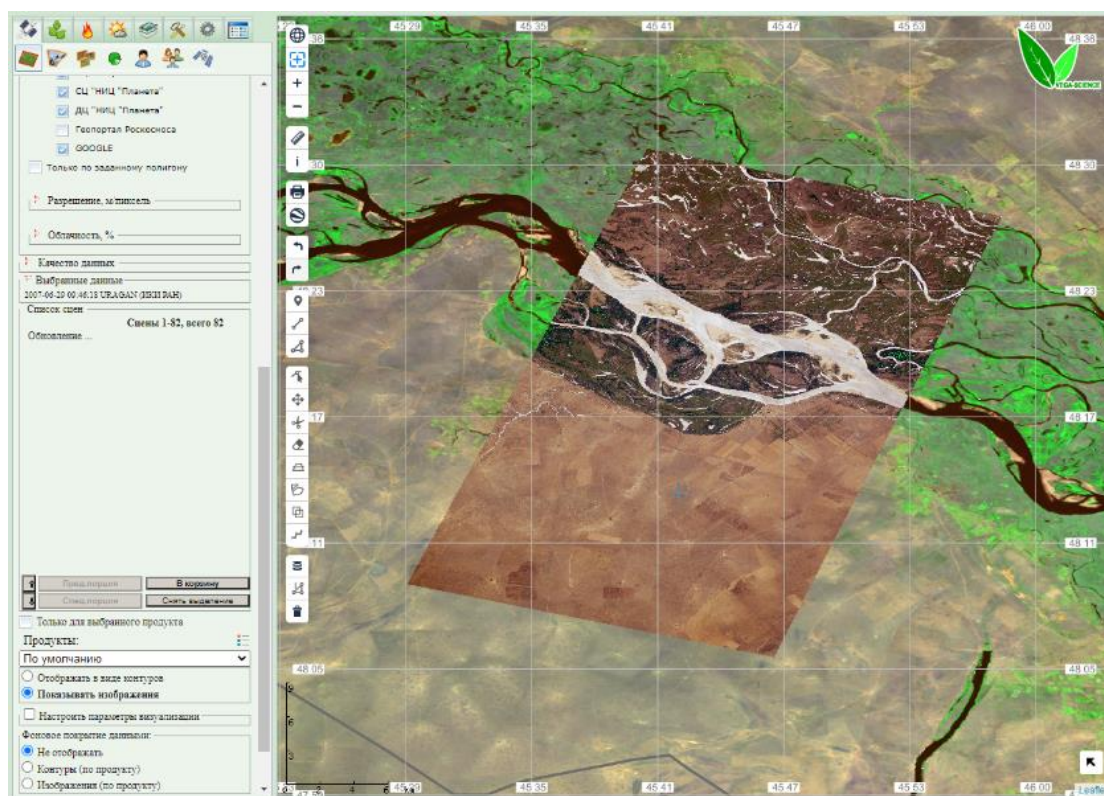


Рисунок 1.4.4.3 — Пример интеграции данных в систему «Вега-Science»

Итоговая схема реализации привязки данных, полученных с РС МКС, приведена на рисунке 1.4.4.4.

Необходимым для интеграции в ГИС и последующей обработки этапом подготовки данных является запись информации о привязке в изображение. Для этого к метаданным снимка в исходном разрешении добавляется информация о GCP (ground control points) – контрольных точках с географической привязкой.

Опорные изображения являются геопривязанными, для любого их пикселя можно определить географические координаты, в том числе и для полученных ранее контрольных точек. Каждой такой опорной точке соответствует точка на снимке с МКС. Набор сопоставленных контрольных точек исходного и опорного снимков позволяет поставить в соответствие точную широту и долготу опорной точки контрольной точке изображения, полученного с МКС. GCP предоставляют входные данные для трансформации изображения (например, средствами библиотеки GDAL) для последующей интеграции в картографические сервисы (рисунок 1.4.4.3).

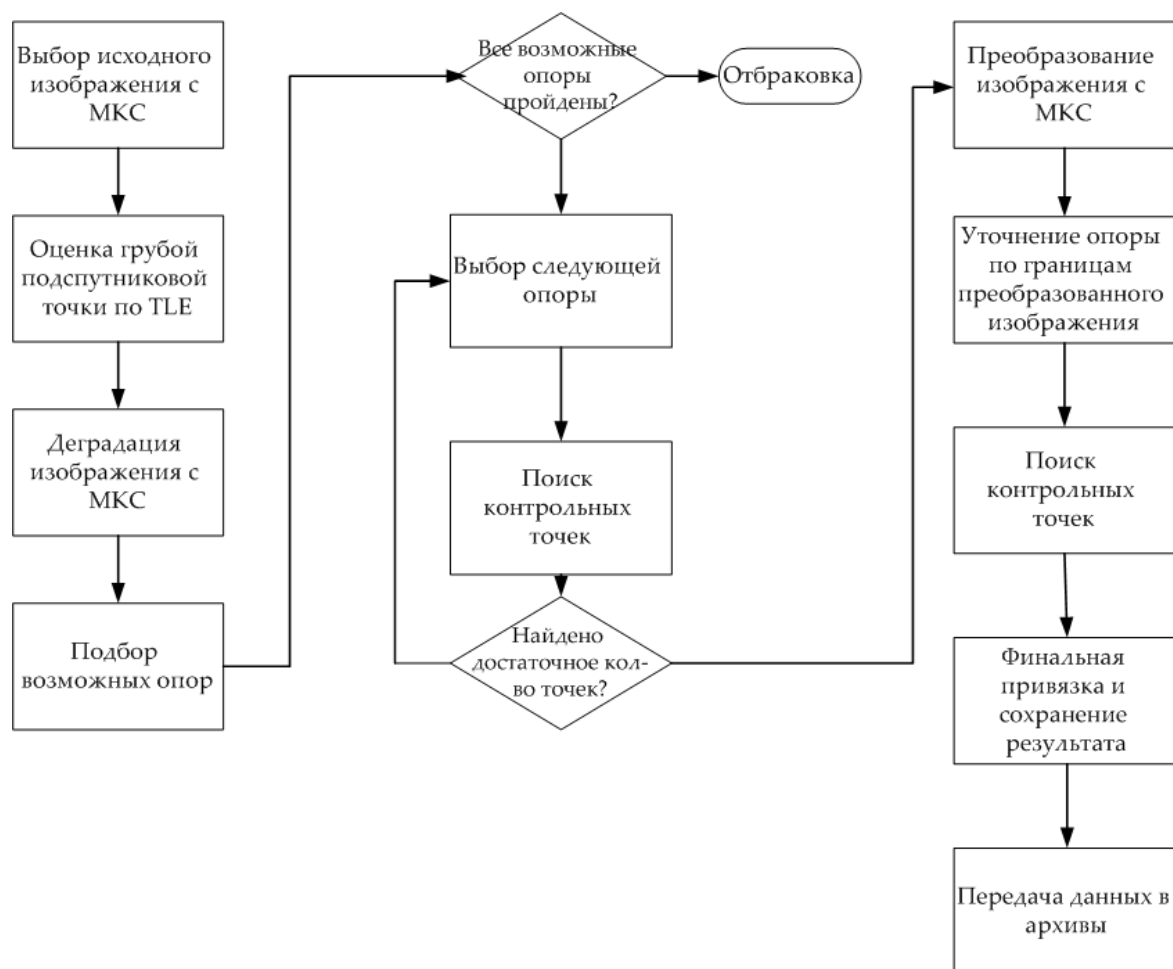


Рисунок 1.4.4.4 — Блок-схема привязки данных

В результате выполнения работы было разработано и реализовано решение для автоматизации привязки спутниковой информации по опорным данным и сформирован архив геопривязанных снимков с МКС, оценены параметры для подбора опорных данных, проанализированы результаты работы различных алгоритмов поиска контрольных точек, а также влияние соотношения пространственных разрешений снимков на работу выбранного алгоритма.

В настоящее время ведутся работы по исследованию возможностей использования данных спутника Sentinel-2A, -2B в качестве опорных данных, а также по уточнению полученной привязки.

Реализация предлагаемых методов и подходов существенно расширит возможности использования данных, получаемых с РС МКС, для решения различных научных и прикладных задач. Также такое программное решение может быть применено и для географической коррекции данных, полученных с автоматических КА, но не обладающих достаточно качественной привязкой.

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;
- разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса.

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 2021 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 2 МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА

Введение

Раздел «Мониторинг-Биосфера» посвящён решению задач исследования растительного покрова с помощью методов и технологий обработки спутниковых данных разных сенсоров. Растительный покров, являясь одним из главных компонентов биосферы планеты, подвергается непрерывному воздействию природных и антропогенных факторов. Изменение климата и деятельность человека приводят к изменению границ и структуры растительности, которые необходимо учитывать ввиду экономических причин, оптимального управления природными ресурсами, поддержания устойчивости наземных экосистем и сохранения биоразнообразия.

Необходимость регулярной оценки состояния и динамики растительного покрова на протяжённых территориях, в том числе на уровнях национального и континентального масштаба, определяет развития методов его мониторинга, отличающихся высоким уровнем автоматизации обработки данных космической съёмки. Основными чертами разрабатываемых методов и технологий обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются их универсальность по отношению к внешним условиям спутниковой съёмки, применение алгоритмов машинного обучения для возможности адаптации к конкретной территории и использование временных рядов данных многоспектральных спутниковых наблюдений взамен одиночных сцен. Современные исследования в области разработки методов и технологии автоматизированной обработки данных ДЗЗ направлены на комплексный анализ данных различного пространственного разрешения (от десятков метров до километров) и предполагают создание на выходе готовых продуктов картографирования структурных и биофизических параметров растительности.

Выполненные исследования в области спутникового мониторинга растительного покрова были сфокусированы 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 экосистем;
- 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 [25, 26, 30, 37-39, 41–42, 44, 75, 103–106, 109, 145–150].

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 Развитие методов предварительной обработки данных MODIS, VIIRS

Данные дистанционного зондирования Земли позволяют осуществлять непрерывный глобальный мониторинг состояния растительного покрова. Для анализа

вегетационных характеристик распространено использование наблюдений, полученных в красном (RED), ближнем инфракрасном (NIR), коротковолновом инфракрасном (SWIR) спектральных диапазонах, и построенных на их основе индексах. На информативность большинства данных, отражающих состояние растительного покрова влияют такие факторы, как облачный и снежный покров, тени от облаков, атмосферная дымка и т.д.

В ИКИ РАН разработана и используется технология предварительной обработки данных спутниковых наблюдений, полученных приборами Terra/Aqua-MODIS и NPP-VIIRS. Предварительная обработка данных включает в себя формирование маскирующих изображений облачного и снежного покрова, построение теней от облаков, фильтрацию наблюдений, полученных при некорректных углах съёмки и создание разновременных композитных изображений. В результате фильтрации измерений, искажённых под влиянием мешающих факторов, в изображениях остаются пропуски, остаточные шумы и выбросные значения. Разработанный в ИКИ РАН интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутникового наблюдения позволяет восстанавливать пропуски, корректировать остаточные искажения и сглаживать временные ряды наблюдений.

На первом этапе предварительной обработки происходит формирование маскирующих изображений облачного и снежного покрова, включающих в себя все неудовлетворительные измерения сеансов наблюдений. Для создания масок облачного и снежного покрова используются значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в каналах b01, b02, b03 и b06 для MODIS и I-1, I-2, M-3, I-3 для VIIRS.

Таблица 2.1.1.1. Спектральные каналы VIIRS и MODIS для построения масок облачного и снежного покрова

	MODIS		VIIRS	
	band	λ , мкм	band	λ , мкм
RED	b01	0,620–0,670	I-1	0,597–0,679
NIR	b02	0,841–0,876	I-2	0,842–0,881
BLUE	b03	0,459–0,479	M-3	0,477–0,496
SWIR	b06	1,628–1,652	I-3	1,570–1,629

При детектировании снежного и облачного покрова используется разностный нормализованный индекс снега NDSI. Для расчета NDSI могут браться разные спектральные каналы. Как правило индекс отражает разность КСЯ в одном из видимых спектральных каналов и КСЯ коротковолнового инфракрасного диапазона. При создании маски облачного покрова применяются индексы NDSI, построенные с использованием красного по формуле (2.1.1.1) и голубого (2.1.1.2) каналов:

$$NDSI(R) = \frac{B01 - B06}{B01 + B06}, \quad (2.1.1.1)$$

$$NDSI(B) = \frac{B03 - B06}{B03 + B06}. \quad (2.1.1.2)$$

Значения индексов NDSI(R) и NDSI(B), а также КСЯ в каналах, перечисленных в таблице 2.1.1.1, используются для предварительного порогового маскирования облачного и снежного покрова.

На рисунке 2.1.1.2 приведён пример построения предварительной маски облачного и снежного покрова. Пример содержит множество мелких облаков, размер которых сопоставим с пространственным разрешением данных. Такие облака сложно детектировать из-за спектрального смещения с подстилающей поверхностью. Для фильтрации смешанных пикселей на предварительном этапе используется оконтуривание матрицей 3×3 пикселя для облаков типа CLD и SLD (рисунок 2.1.1.3).

Таблица 2.1.1.2. Набор пороговых значений для предварительного маскирования облаков

Маркер	Характеристика	Условия маркирования
BAD	Темные объекты: водная поверхность, тени, ошибки	$B01 < 0$, $B02 < 0$ $B03 < 0$, $B06 < 0$
SNOW	Снег, сильная облачность	$B01 > 700$, $NDSI(R) > 0,1$ $B03 > 700$, $NDSI(B) > 0,1$
CLD	Высокая облачность	$B01 > 700$, $NDSI(R) > -0,2$ $B03 > 700$, $NDSI(B) > -0,2$ Оконтуривание: 3×3 пикселя
SLD	Средняя облачность	$B01 > 700$, $NDSI(R) > -0,35$ $B03 > 700$, $NDSI(B) > -0,35$ Оконтуривание: 3×3 пикселя
MLD	Дымка, смешанные пиксели	$B03 > 700$, $NDSI(B) > -0,45$

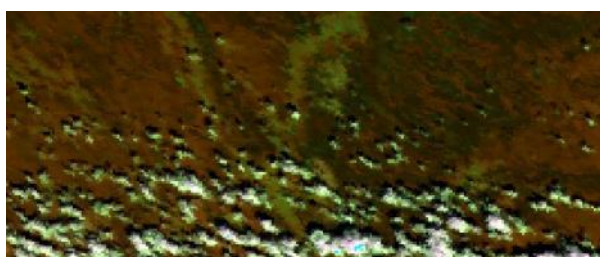


Рисунок 2.1.1.1 — Исходные данные. RGB синтез каналов: R — b02, G — b06, B — b01

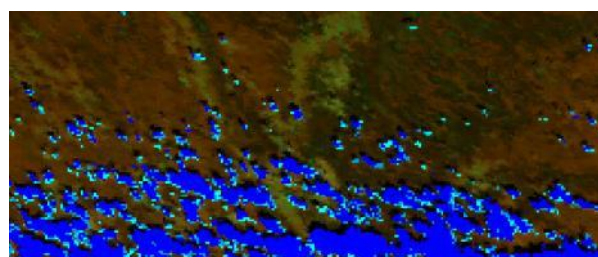


Рисунок 2.1.1.3 — Предварительное маскирование облачного покрова. Тёмно-синий цвет — облака типа CLD, синий — облака типа SLD, голубой — облака типа MLD

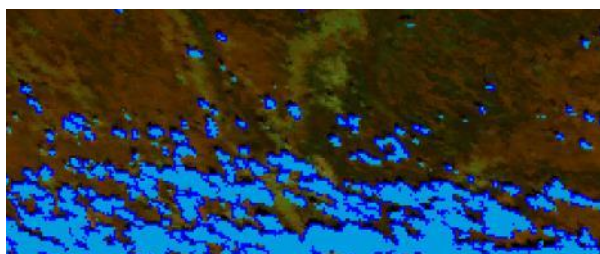


Рисунок 2.1.1.3 — Оконтуривание облаков типа CLD и SLD. Голубой цвет — все маркеры предварительной маски облачного покрова, синий — оконтуривание облаков

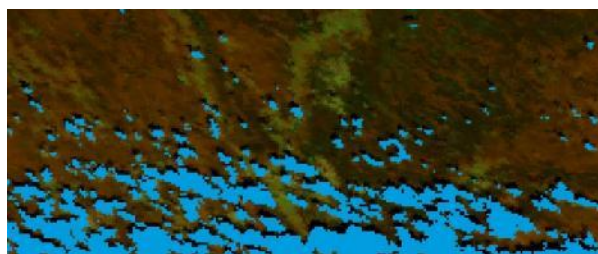


Рисунок 2.1.1.4 — Предварительное маскирование облачного покрова

Недостатком порогового метода является высокий процент ошибок детектирования: ложное детектирование и пропуск цели. Возможность достоверного разделения чистых наблюдений и облачного покрова варьируется в зависимости от специфики и плотности облаков, времени года, типа и состояния растительного покрова. Для уточнения маскирующих изображений и повышения адаптивности метода в целом используется пространственный гистограммный анализ значений КСЯ в голубом канале и индекса NDSI.

Для каждого класса облаков строится буферная зона (рисунок 2.1.1.5). Гистограммы распределения значений внутри класса «облако» (рисунок 2.1.1.7) и «буфер» (рисунок 2.1.1.8) частично накладываются. На рисунке 2.1.1.9 представлена нормализованная разница гистограмм распределения значений КСЯ в голубом канале для облаков типа SLD и соответствующего буфера.

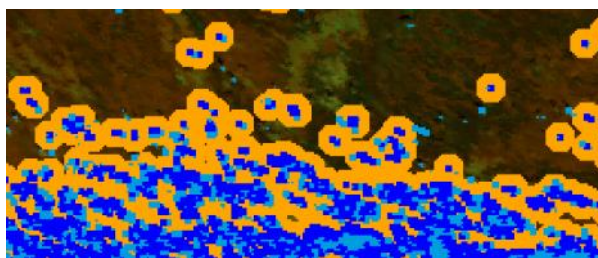


Рисунок 2.1.1.5 – Построение буферной зоны (оранжевый) вокруг облаков типа CLD(синий)

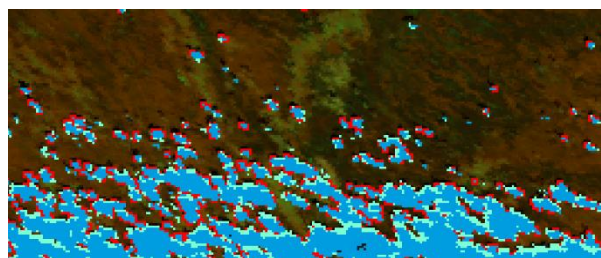


Рисунок 2.1.1.6 – Коррекция (красный) облачного покрова

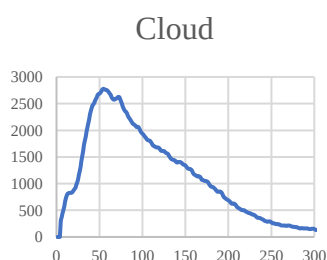


Рисунок 2.1.1.7 — Гистограмма распределения значений в голубом канале b03 для облаков типа SLD

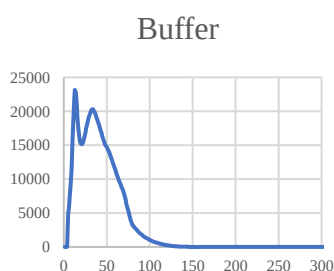


Рисунок 2.1.1.8 — Гистограмма распределения значений в голубом канале b03 для буферной зоны

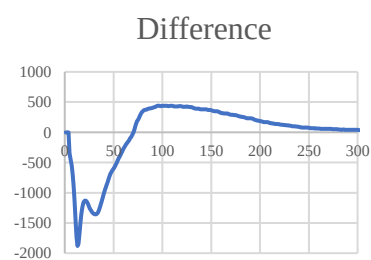


Рисунок 2.1.1.9 — Разностная гистограмма объектов класса «облако» и «буфер»

Точка перемены знака разностной гистограммы позволяет уточнить порог разделения классов для конкретного изображения. Полученный порог рассчитывается дважды: для фильтрации ошибок ложного детектирования внутри класса «облако», и, после перестроения буферной зоны, для детектирования облачности внутри буфера.

На рисунке 2.1.1.6 приведена маска облачного покрова после пространственной гистограммной коррекции. Красным цветом на ней выделены облака, которые удалось добавить к предварительной маске облачного покрова.

Следующий этап предварительной обработки данных спутниковых наблюдений включает в себя фильтрацию наблюдений, полученных при величине зенитного угла Солнца выше 75° и величине зенитного угла наблюдения выше 44° для данных MODIS и выше 67° для данных VIIRS, а также построение теней от облаков. При этом также используется информация о геометрии наблюдения. Направление теней вычисляется исходя из положения Солнца и спутника во время съемки. Длина участка, возможного для присутствия теней, зависит от высоты облачного покрова. На предварительном этапе при построении высота облаков принимается равной 8000 м.

На рисунке 2.1.1.10 приведён пример построения теней с использованием маски облачного покрова и данных об азимутальных и зенитных углах Солнца и сенсора. При этом область потенциальных теней заведомо избыточна и может превышать реальную в несколько раз.

Приведённый выше пространственный гистограммный анализ используется для коррекции класса «тени». Для класса «тени» также строится буферная зона (рисунок 2.1.1.11). Разностные гистограммы распределения значений КСЯ в NIR и SWIR каналах позволяют получить пороги разделения классов «тени» и «подстилающая поверхность» для выбранного изображения. При этом исправляются только ошибки ложного детектирования.

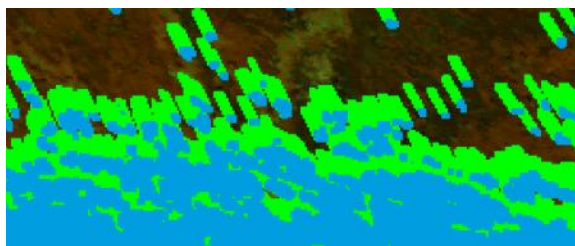


Рисунок 2.1.1.10 — Построение теней (зелёный цвет) от облаков (голубой)

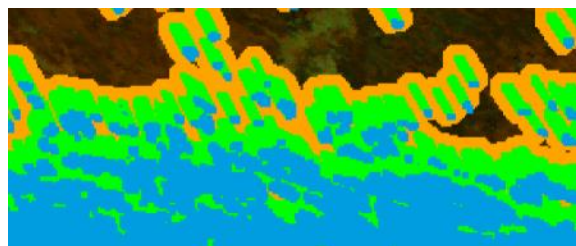


Рисунок 2.1.1.11 — Построение буферной зоны (оранжевый цвет) вокруг теней (зелёный)

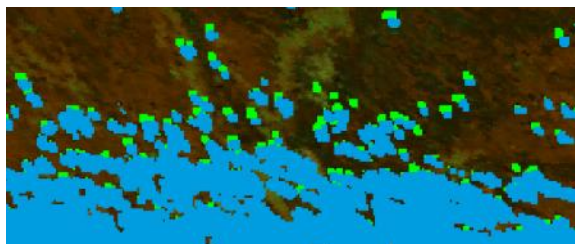


Рисунок 2.1.1.12 — Маскирующее изображение облачного и снежного покрова, теней от облаков, шумов и т.д.

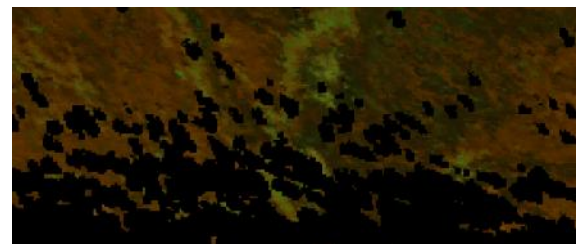


Рисунок 2.1.1.13 — Фильтрация искажённых данных (чёрный цвет)

На рисунке 2.1.1.12 приведён окончательный результат построения маскирующего изображения облачного и снежного покрова, теней от облаков, шумов и т.д. Маски используются для фильтрации наблюдений, непригодных для анализа растительного покрова. При этом как видно на рисунке 2.1.1.13, получают пропуска в данных.

Третьим этапом предварительной обработки является построение композитных изображений. На каждую дату может быть несколько сеансов наблюдений, и создание композитных изображений позволяет частично заполнить «пропуски» в данных. Для различных задач дистанционного зондирования могут использоваться однодневные, четырёхдневные, недельные и месячные композиты.

Для построения композитов используются данные сеансов наблюдения внутри выбранного временного интервала построения композита, а также наблюдения в расширенном временном диапазоне для сбора статистики в каждой точке наблюдения.

На рисунке 2.1.1.14 приведены исходные сеансы наблюдения в RGB синтезе ближнего инфракрасного, коротковолнового и красного каналов и построенные для них маскирующие изображения облачного покрова для ближайших дат к наблюдению на рисунке 2.1.1.13. В двухнедельный промежуток времени один и тот же объект может несколько раз классифицироваться как облако, тень или чистая земная поверхность. Статистический анализ позволяет корректировать классы «облака» и «тени» в масках облачного покрова с учётом значений КСЯ в спектральных каналах.

Для объектов класса «тени» за разные дни вычисляется среднее и стандартное отклонение. Каждое наблюдение, маркированное как «тени», сравнивается со средним значением КСЯ теней в этой точке. При выходе за пределы одного стандартного отклонения наблюдение маркируется как «открытая поверхность». Аналогично проверяются наблюдения открытой поверхности на принадлежность к классу облаков.

На основе чистых наблюдений строится композитное изображение. Если чистых наблюдений больше одного, вычисляется среднее значение и выбирается реальное наблюдение, наиболее близкое к среднему.

Построенные композитные изображения в зависимости от выбранного временного разрешения все ещё содержат пропуски в данных и остаточные искажения. На

заключительном этапе предварительной обработки данных происходит анализ временных рядов для фильтрации выбросов, заполнения пропусков и сглаживания данных.

Алгоритм восстановления данных включает в себя построение интерполирующих полиномов второй степени в скользящем окне динамического размера в p значащих точек. Число значащих точек зависит от временного разрешения исходного набора данных, а длина полинома по оси абсцисс зависит от числа пропусков. На рисунке 2.1.1.15 приведён пример в виде набора аппроксимирующих полиномов для временного ряда недельных композитных изображений вегетационного индекса NDVI за один календарный год.

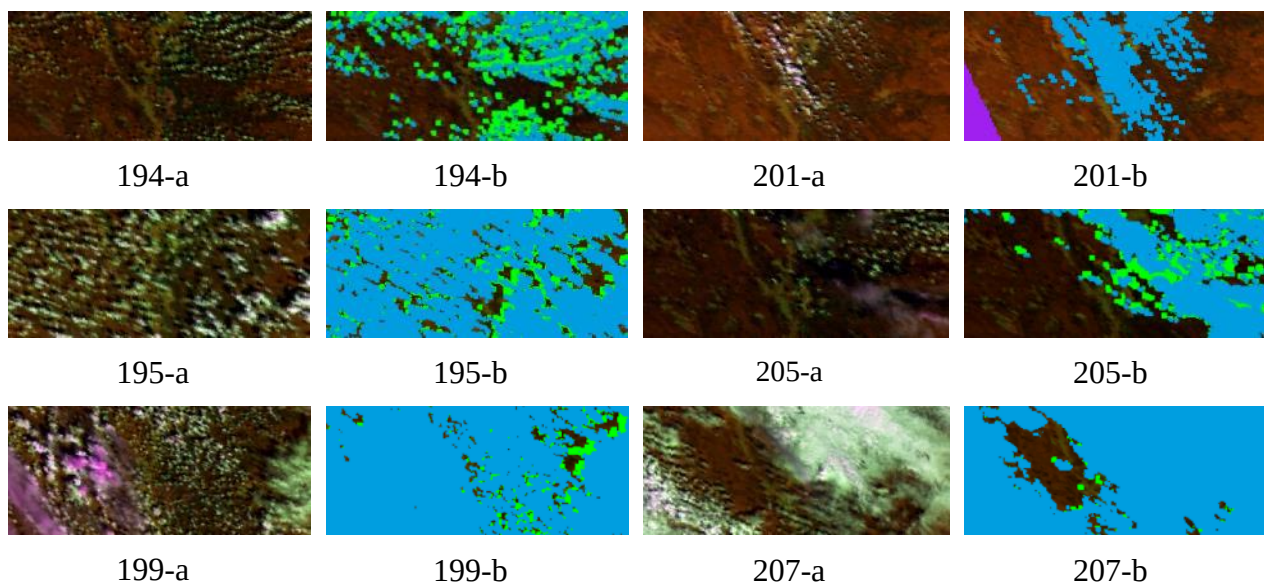


Рисунок 2.1.1.14 — Несколько наблюдений в диапазоне 194–207 день года; а — RGB синтез каналов: R — b02, G — b06, B — b01; б — маски облачного покрова

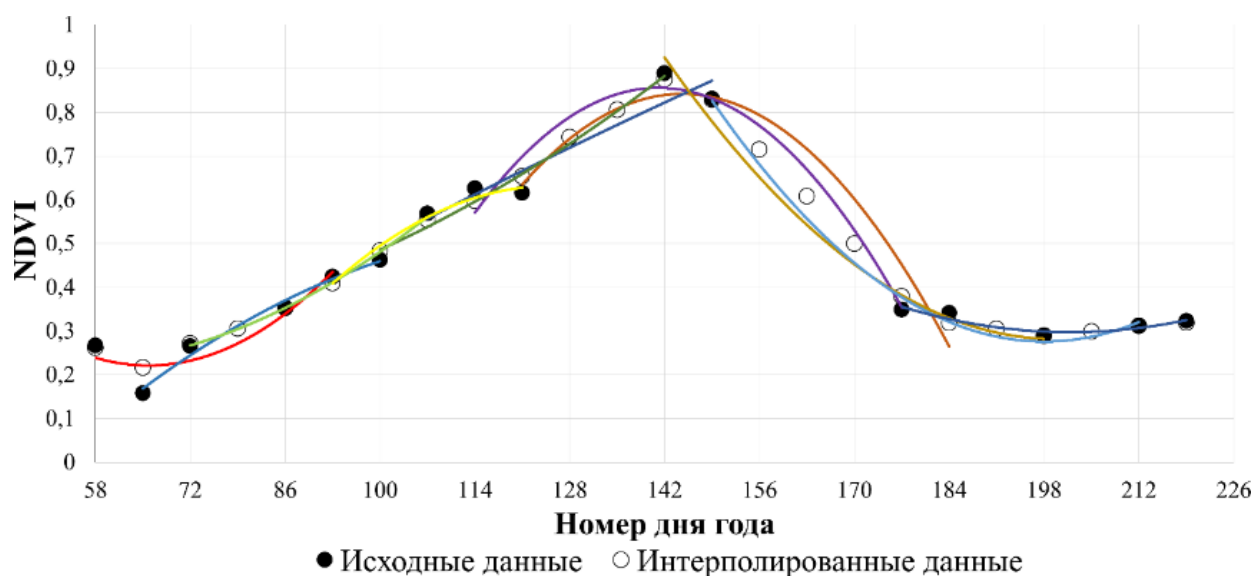


Рисунок 2.1.1.15 — Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутникового наблюдения

Результаты интерполяции записываются в интерполяционную матрицу IM . Для каждой точки временного ряда получается набор интерполяционных оценок значения вегетационной характеристики в каждой временной точке: при $p = 5$ до четырёх оценок для пропуска и до пяти для значащей точки во временном ряду.

$$IM = \begin{vmatrix} a_1^{11} & a_2^{21} & b_3^1 & a_4^{31} & a_5^{41} & a_6^{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & a_2^{12} & b_3^2 & a_4^{22} & a_5^{32} & a_6^{42} & a_7^{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & a_4^{13} & a_5^{23} & a_6^{33} & a_7^{43} & b_8^3 & a_9^{53} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5^{14} & a_6^{24} & a_7^{34} & b_8^4 & a_9^{44} & a_{10}^{54} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_6^{15} & a_7^{25} & b_8^5 & a_9^{35} & a_{10}^{45} & a_{11}^{55} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_7^{16} & b_8^6 & a_9^{26} & a_{10}^{36} & a_{11}^{46} & a_{12}^{56} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (2.1.1.3)$$

Реальные наблюдения сравниваются с интерполяционными оценками. При отклонении в две дисперсии от среднего наблюдение считается искаженным и фильтруется. После фильтрации выбросов интерполяционная матрица оценок перестраивается, и пропуски заполняются усреднёнными значениями интерполяционных оценок.

В матрице IM элементы a_T^{ij} соответствуют полученным оценкам в значащих точках, а элементы b_T^i — пропущенным данным. T соответствуют порядковому номеру наблюдения во временном ряду, i — положение значащей точки в окне интерполяции, j — шаг окна интерполяции (совпадает с номером строки), а величина окна выбрана $p = 5$.

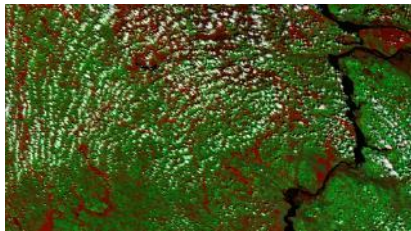


Рисунок 2.1.1.16 — Исходные данные MODIS

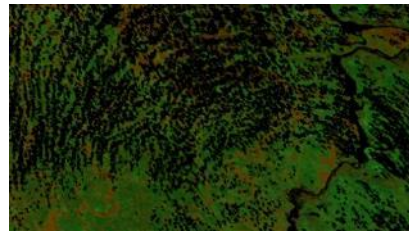


Рисунок 2.1.1.17 —
Однодневный композит
MODIS

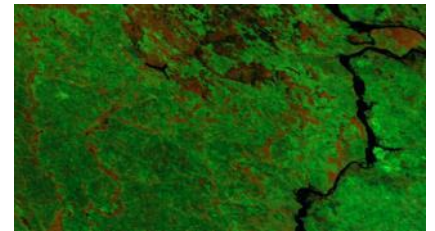


Рисунок 2.1.1.18 —
Интерполированное
изображение MODIS

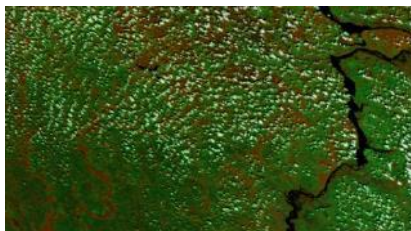


Рисунок 2.1.1.19 — Исходные данные VIIRS

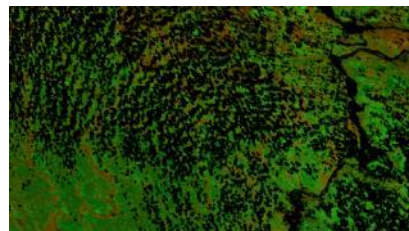


Рисунок 2.1.1.20 —
Однодневный композит VIIRS

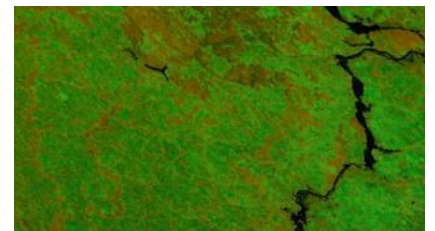


Рисунок 2.1.1.21 —
Интерполированное
изображение VIIRS

На рисунках 2.1.1.16–2.1.1.21 проиллюстрированы ключевые этапы предварительной обработки данных приборов VIIRS и MODIS для отдельно выбранных дней года. Предварительная обработка данных спутниковых наблюдений, описанная выше, позволяет получать изображения, очищенные от влияния шумов, облачного и снежного покрова, теней, а также влияния их краевых эффектов и других мешающих факторов. В результате обработки временных серий и восстановления данных интерполяционным алгоритмом удаётся восстановить информацию, недоступную для прямого использования. При этом получают восстановленные пространственно однородные изображения и непрерывные временные ряды, что важно при дальнейшем мониторинге и анализе состояния растительного покрова.

2.1.2. Развитие методов построения и нормализации зимних композитных изображений покрытой снегом земной поверхности по данным Terra-MODIS

В рамках выполненных работ в отчётном году, направленных на получение временных серий зимних композитных изображений снежного покрова, был разработан метод их построения и взаимной яркостной нормализации. В условиях высокой яркости фона усиливается проявление зависимости спектрально-отражательных характеристик лесов от геометрических условий их освещения и наблюдения, в первую очередь, от зенитных углов Солнца и визирования спутникового инструмента. Это, в свою очередь, диктует необходимость адекватного учёта при построении композитных изображений даты и времени проведения спутниковой съёмки, непосредственно определяющих высоту Солнца и, следовательно, относительный вклад теней от деревьев в интегральные значения спектрально-отражательных характеристик лесного покрова в поле зрения спутниковой съёмочной системы.

Необходимо также отметить, что определённый вклад в пространственно-временную вариабельность значений спектральной яркости покрытых лесом территорий может вносить изменчивость высоты снежного покрова и его отражательных характеристик, вызванная влиянием различных факторов, включая, наличие ледяной корки, уровень влагосодержания снега и степень шероховатости его поверхности. Очевидно, что для построения однородных рядов композитных изображений необходима минимизация влияния факторов изменчивости спектрально-отражательных свойств земной поверхности, не связанных с характеристиками лесного покрова. Это может быть достигнуто путём взаимной радиометрической нормализации на основе значений спектрально-отражательных характеристик свободных от лесного покрова территорий, используемых в качестве опорных участков для определения коэффициентов нормализующих отношений.

Необходимость учёта упомянутых выше и некоторых других особенностей требует разработки специализированных методов построения и радиометрической нормализации композитных изображений земной поверхности с наличием снежного покрова, способных обеспечить максимально возможную информативность и временную однородность получаемых продуктов данных для решения задач оценки характеристик и мониторинга лесов.

Алгоритм построения безоблачных композитных изображений покрытой снегом земной поверхности включает в себя следующую последовательность основных этапов обработки спутниковых данных ДЗЗ:

- пороговая классификация одномоментных спутниковых изображений временного ряда с выделением облаков, теней от облаков и свободных от снега участков земной поверхности, а также двух классов земного покрова, включая открытый снег и лесной покров с наличием снега на земной поверхности и/или на кронах деревьев;
- статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ со взаимной переклассификацией пикселей, ошибочно отнесённых на предыдущем этапе обработки к классам открытого снега и лесного покрова, а также последующей фильтрацией пикселей на основе критериев внутриклассовой изменчивости спектрально-отражательных характеристик;
- статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ для пикселей класса «лесной покров» с фильтрацией измерений, соответствующих наличию снега на кронах деревьев;
- реконструкция временных рядов данных ДЗЗ с восстановлением спектрально-отражательных характеристик земной поверхности в пикселях спутниковых изображений, находящихся под влиянием облаков или исключённых из

рассмотрения по результатам статистической фильтрации на предыдущих этапах обработки;

- выбор наиболее статистически репрезентативных в заданном временном интервале значений спектрально-отражательных характеристик покрытой снегом земной поверхности и формирование соответствующих композитных изображений.

Выполняемая на первом шаге алгоритма пороговая классификация одномоментных спутниковых изображений направлена на выделение таких классов как (1) облака, (2) тени от облаков и свободная от снега земная поверхность, (3) открытый снег и (4) лесной покров с наличием снега на земной поверхности и/или на кронах деревьев. Для проведения первичной (начальной) классификации используется двумерное распределение значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), измеренных в голубом и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. В данном пространстве признаков пиксели, соответствующие снегу, в том числе, находящемуся под кронами деревьев, характеризуются высокой отражательной способностью в видимой области спектра с её снижением в ИК-диапазоне длин волн. На двумерном распределении значений КСЯ классов объектов, подлежащих разделению по спутниковым изображениям, можно выделить следующие характерные области (рисунок 2.1.2.1):

- «снег», если $R_b > 0,05$ и $0,03 < R_{sw} < 0,2$;
- «облачность, тени и прочие территории», если $R_{sw} < 0,03$ или $R_{sw} > 0,2$ или $R_b < 0,05$,

где R_b и R_{sw} — КСЯ в голубом и в среднем ИК спектральных диапазонах соответственно.

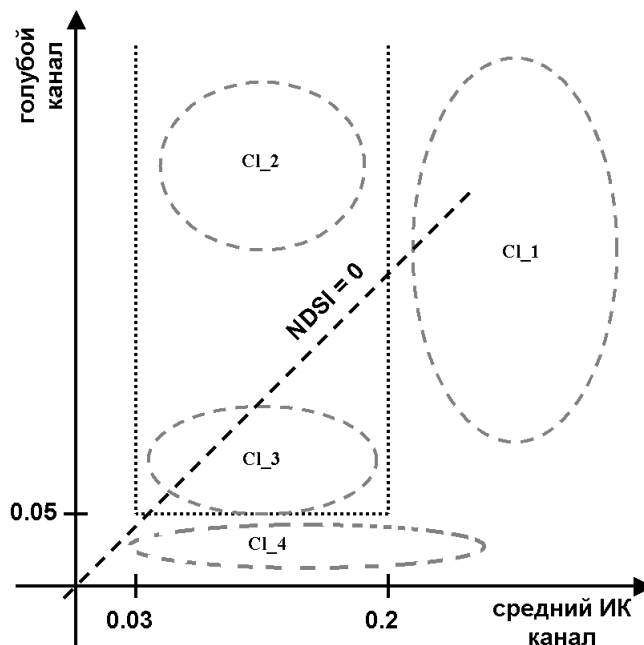


Рисунок 2.1.2.1 – Пороговая классификация одномоментных спутниковых изображений

Дальнейшее решение задач разделения указанных объектов и фильтрации пикселей покрытых лесом территорий с наличием снега на кронах деревьев достигается на основе анализа временных рядов спектрально-отражательных характеристик участков, отнесённых на первом этапе классификации изображений к снежному покрову. Непосредственное использование для этой цели в качестве признака нормализованного разностного индекса снега NDSI не является оптимальным, поскольку леса высокой сомкнутости (прежде всего, хвойных вечнозелёных пород) и лишённые снежного покрова безлесные территории характеризуются близкими его значениями:

$$NDSI = (R_b - R_{sw}) / (R_b + R_{sw}). \quad (2.1.2.1)$$

Следует отметить, что в выбранном пространстве признаков использование NDSI в качестве параметра может быть выражено в виде:

$$R_b = R_{sw}(1 + NDSI) / (1 - NDSI), R_b = R_{sw} \text{ при } NDSI = 0. \quad (2.1.2.2)$$

Предварительное построение гистограммы двумерного распределения в пространстве признаков R_b и R_{sw} с участием большого числа наблюдений зимнего периода позволяет достаточно точно оценить пороговые значения, разделяющие классы подстилающей поверхности.

Статистический анализ данных временного ряда измерений КСЯ сезонного снежного покрова основан на предположении, что число свободных от маскирующего влияния облаков наблюдений снега в точке $R(x, y, t)$ значительно превосходит число наблюдений, подверженных такому влиянию. При этом при наличии многолетнего ряда спутниковых наблюдений целесообразно использование данных зимнего периода предыдущего и последующего годов. Эти данные используются для оценки средней величины $M_R(x, y, t_1:t_2)$ и стандартного отклонения $\sigma_R(x, y, t_1:t_2)$ значений КСЯ в точке за период времени с t_1 по t_2 . Необходимость использования буферных во времени интервалов спутниковых наблюдений обусловлена невозможностью разделения в зимний период в двумерном пространстве признаков R_b и R_{sw} устойчивого снежного покрова на земной поверхности и снежного облачного фронта в атмосфере. Выделение участков с высоким уровнем случайного шума в точке $R(x, y, t)$ осуществляется отдельно по данным измерений КСЯ в красном (R_{red}) и в ближнем ИК (R_{NIR}) спектральных диапазонах на основе критерия 3:

$$|R(x, y, t) - M_R(x, y, t_1:t_2)| > 2\sigma_R(x, y, t_1:t_2). \quad (2.1.2.3)$$

Необходимо отметить, что прошедшие пороговую и статистическую фильтрацию временные ряды данных спутниковых наблюдений могут существенно отличаться в различные годы характером внутригодового распределения очищенных измерений КСЯ снежного покрова. Указанные отличия в датах спутниковых измерений, в свою очередь, проявляются в вариациях значений КСЯ земной поверхности, прежде всего, за счёт влияния различий зенитного угла Солнца. Характерные для зимнего периода года низкие значения последнего приводят к повышенному вкладу данного фактора в межгодовые различия спектрально-отражательных характеристик земного покрова. Для компенсации этого фактора в разработанном методе построения композитных изображений покрытой снегом земной поверхности предусмотрена процедура восстановления временных рядов данных на участках пропусков, образовавшихся в результате предшествовавшей фильтрации зашумлённых измерений.

В результате выполнения этапов предварительной обработки данных значительно снижается влияние мешающих факторов, что даёт возможность построения композитных изображений покрытого снегом земного покрова. Для широкого спектра задач наиболее востребованными являются композитные изображения, получаемые по данным измерений КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах спектра. В силу особенностей образования устойчивого снежного покрова на территории России, в данной главе рассматриваются композитные изображения, построенные по данным спутниковых наблюдений за период с января по апрель отдельного года. Пример полученного по данным системы ДЗЗ Proba-V композитного спутникового изображения, отражающего спектрально-яркостные характеристики покрытой снегом земной поверхности, представлен на рисунке 2.1.2.2. Приведённый пример наглядно демонстрирует высокий контраст между покрытыми лесом и безлесными территориями при наличии снежного покрова на земной поверхности.

Описанный выше метод позволяет получать многолетние временные ряды очищенных от маскирующего влияния облачности композитных спутниковых

изображений, характеризующих спектрально-отражательные свойства покрытой снегом земной поверхности. Вместе с тем, анализ ежегодных композитных изображений показывает наличие межгодовых вариаций значений КСЯ, обусловленных, как отмечалось выше, изменчивостью высоты снежного покрова и его отражательных характеристик, вызванных влиянием различных факторов, включая, наличие ледяной корки, уровень влагосодержания снега и степень шероховатости его поверхности. Наличие такого рода факторов вариабельности значений КСЯ может приводить к искажению результатов многолетнего анализа композитных изображений, в частности, при решении задач дистанционного мониторинга и оценки характеристик лесов. Кроме того, к числу факторов потенциально способных приводить к искажению результатов анализа многолетних спутниковых данных можно отнести и изменение радиометрических характеристик сенсора съёмочной системы ДЗЗ, вызванных, как правило, постепенным снижением его чувствительности на протяжении жизненного цикла эксплуатации.

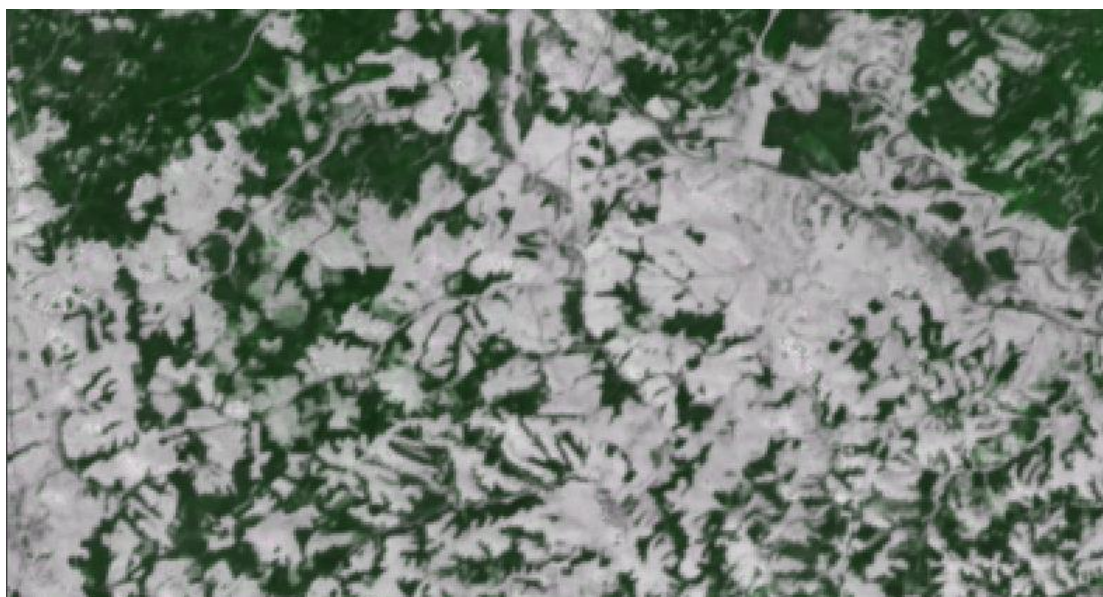


Рисунок 2.1.2.2 — Пример композитного изображения снежного покрова, полученного по данным Proba-V. Синтез (R, G, B) каналов (R_{red} , R_{NIR} , R_{red})

Для компенсации влияния вышеуказанных факторов межгодовой вариабельности композитных изображений покрытой снегом земной поверхности разработан метод их взаимной радиометрической нормализации. В основе метода лежит локально-адаптивная оценка на свободных от леса территориях спектрально-отражательных характеристик открытого снега в предположении постоянства значений КСЯ последнего и полного покрытия им участков, соответствующих пикселям изображений. При этом из используемого для радиометрической нормализации композитных изображений множества пикселей должны быть исключены участки с наличием древесной растительности, поскольку процессы роста последней потенциально могут вносить искажения в результаты межгодовой радиометрической нормализации многолетних рядов данных.

Локально-адаптивная оценка яркостных характеристик безлесных участков осуществляется плавающим окном в узлах регулярной пространственной сети методом LAGMA. В качестве опорных территорий используются открытые участки покрытой снегом поверхности, выявленные с помощью ежегодно обновляемых спутниковых карт растительного покрова. По ежегодным композитным изображениям в красном и ближнем ИК диапазонах спектра определяются максимальные значения КСЯ на занятых лесом территориях с последующим исключением из рассмотрения пикселей с более низкими величинами КСЯ. Дополнительная пространственная фильтрация также исключает из

рассмотрения участки, находящиеся в непосредственно примыкающей к покрытым лесом территориям 500 метровой буферной зоне. Для повышения качества взаимной радиометрической нормализации многолетних композитных изображений в качестве опорных территорий используются только участки открытого снега, остающиеся свободными от лесного покрова на протяжении всего многолетнего периода спутниковых наблюдений.

На вход LAGMA поступают опорная выборка пикселей, соответствующая непокрытым лесом территориям, и временной ряд композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности. На основе этих данных для каждого года производится вычисление локализованных средних значений КСЯ E_{year} в узлах регулярной сети ячеек с шагом заданного размера, которой покрыта исследуемая территории. При этом размер окрестности узла, по которой проводится локализованный сбор статистики значений КСЯ по опорной выборке пикселей, должен заведомо превышать заданные размеры шага регулярной сети. На основе полученных средних значений КСЯ открытого снега проводится вычисление коэффициентов взаимной радиометрической нормализации многолетних композитных изображений k_{year} . При этом коэффициенты радиометрической нормализации временного ряда изображений вычисляются относительно одного из них, выбранного в качестве опорного, на основе соответствующих последнему средних значений КСЯ E_{ref} согласно формуле:

$$k_{year} = \frac{E_{ref}}{E_{year}}. \quad (2.1.2.4)$$

Последующая процедура радиометрической нормализации композитных изображений каждого (отличного от опорного) года временного ряда выполняется согласно следующей формуле:

$$R_{year}^* = R_{year} k_{year}, \quad (2.1.2.5)$$

где R_{year} и R_{year}^* — исходное и приведённое (радиометрически нормализованное) значение КСЯ композитного изображения.

Описанный выше метод был применён для радиометрической нормализации временного ряда композитных изображений покрытой снегом земной поверхности, полученных по данным Terra-MODIS. Для проведения радиометрической нормализации изображений в качестве опорного был выбран 2010 г. Оценка результатов радиометрической нормализации изображений проводилась по стабильным участкам тундры на территории России, отобранных с использованием соответствующих карт растительного покрова. В каждом пикселе изображений были рассчитаны величины стандартного отклонения КСЯ в красном в ближнем ИК каналах до радиометрической нормализации $\sigma_R(x, y, 2001:2019)$. и после неё $\sigma_R^*(x, y, 2001:2019)$. Влияние проведённой радиометрической нормализации композитных изображений может характеризоваться коэффициентом снижения их межгодовой вариабельности, вычисляемого на основе соотношения величин стандартных отклонений $\sigma_R(x, y, 2001:2019)$ и $\sigma_R^*(x, y, 2001:2019)$. согласно приведённого ниже выражения:

$$D = \frac{\sigma_R(x, y, 2001:2019)}{\sigma_R^*(x, y, 2001:2019)}. \quad (2.1.2.6)$$

Гистограмма распределения величины D для изображений, полученных по данным измерений КСЯ в красном и ближнем ИК спектральных каналах, построенная по территории стабильных во времени тундровых участков (рисунок 2.1.2.3), свидетельствует о том, что разработанный метод радиометрической нормализации

позволил снизить межгодовые вариации КСЯ. Подавляющее большинство (93 %) пикселей композитных изображений рассматриваемой территории соответствует области гистограммы, лежащей по оси абсцисс справа от порогового значения $D = 1$. Анализ композитных изображений для покрытых лесом территорий, также показывает снижение межгодовых вариаций КСЯ в результате проведённой радиометрической нормализации.

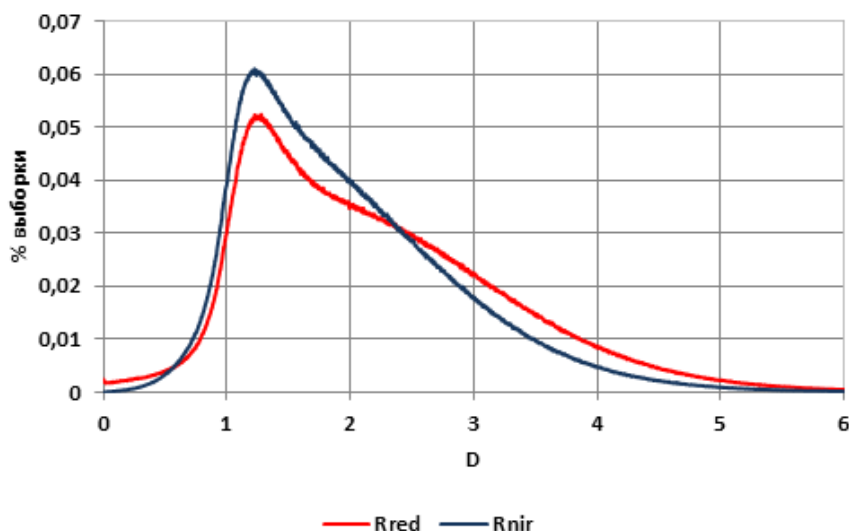


Рисунок 2.1.2.3 — Гистограмма распределения величины D для двух спектральных каналов, построенная по территории стабильных участков тундр

Метод построения и взаимной нормализации зимних композитных изображений снежного покрова позволяет использовать общий подход для получения композитных изображений зимнего периода наблюдений для ряда систем, имеющих соответствующий набор спектральных каналов. Реализация метода позволила получить временные ряды композитных изображений по данным Terra-MODIS и Proba-V. Однородность временных рядов наблюдений позволяет использовать композитные изображения снежного покрова в широком спектре задач, касающихся картографирования лесных насаждений и оценки ряда количественных характеристик, таких как запас стволовой древесины, доля покрытой лесом площади, преобладающая порода лесов.

2.1.3 Разработка методов предварительной обработки данных высокого пространственного разрешения

В настоящее время веб-платформа Google Earth Engine (GEE) является одним из наиболее простых и удобных инструментов для базовой предварительной обработки, тематического анализа и визуализации открытых спутниковых данных различного пространственного разрешения на всех масштабных уровнях вплоть до глобального. Такие возможности достигаются благодаря сочетанию облачного программного интерфейса с постоянно пополняемым архивом, максимально оптимизированным для автоматизированной обработки. На пользователя в данном случае не ложатся задачи формирования и хранения архивов данных. В отчётный период были проанализированы возможности GEE по формированию зимних спутниковых композитных изображений высокого пространственного разрешения для тематического картографирования лесов России.

Оптические мультиспектральные изображения Sentinel-2 на данный момент являются одним из наиболее массовых и регулярно пополняемых источников данных высокого пространственного разрешения (10–20 м), имеющих глобальное покрытие и свободно распространяемых. Для данных Sentinel-2 характерна высокая периодичность съёмки (с 2015 г. периодичность составляет 5 дней). Архив интегрирован и пополняется в

облачном хранилище GEE, в виде нескольких «коллекций», сформированных по степени предварительной обработки. В настоящее время ведётся работа с архивом L2A Sentinel-2, содержащим значения коэффициентов спектральной яркости на уровне земной поверхности. Сопутствующим продуктом является маска облачности, теней, снега и зашумлённых пикселей. К сожалению, в данном продукте присутствует ряд недостатков, к которым относится недостаточное разделение классов снег-облачность, что не позволяет рассматривать безоблачный снежный покров в контексте информативного признака. Также присутствует маскирование светлых объектов и городов на постоянной основе, что приводит к отсутствию информативности в окрестности этих территорий. Вследствие этого в систему GEE была интегрирована адаптированная версия предварительной обработки, разработанная в ИКИ РАН для данных среднего пространственного разрешения.

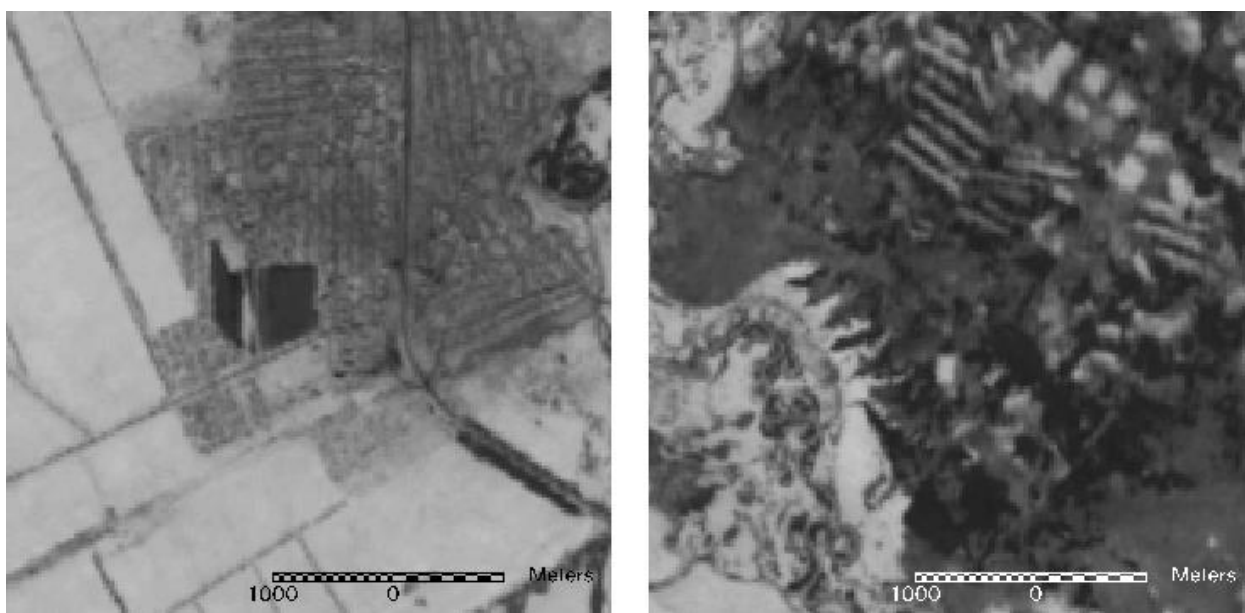


Рисунок 2.1.3.1 — Примеры композитных изображений снежного покрова.
Слева — ближний ИК-канал, справа — красный канал данных Sentinel-2

Работа с функционалом платформы GEE в большей степени основана на последовательности ограничивающих исходную коллекцию данных фильтров. Таким образом, последовательность действий для построения композитных изображений снега выглядит следующим образом:

- выбор данных Sentinel-2 и области интереса (с учётом ограничений на текущие вычислительные мощности GEE используется регулярная сеть $5 \times 5^\circ$, которая покрывает территорию России);
- выбор спектральных каналов, необходимых для обработки: голубого, красного, ближнего ИК и среднего ИК каналов;
- выбор диапазонов дат наблюдений за три года, которые характеризуются устойчивым снежным покровом на рассматриваемой территории (с 1 января по 30 апреля);
- формирование пороговой функции маскирования облачности и зашумлённых пикселей, а также определение пороговых значений на основе подхода, используемого для построения композитных изображений снежного покрова по данным MODIS;
- вычисление пороговых значений на основе средних значений и стандартных отклонений для красного, ближнего ИК каналов по времени и статистическая фильтрация данных с помощью оценённых значений;

- формирование композитного изображения на основе медианных значений статистики центрального года каждого из выбранных спектральных каналов;
- выгрузка набора каналов с заданным пространственным разрешением.

Результирующие композитные изображения по мере завершения построения скачиваются из облачного хранилища на локальный компьютер. Примеры композитных изображений снежного покрова, полученного по данным Sentinel-2, представлены на рисунке 2.1.3.1. Следует отметить, что использование данных высокого разрешения сопряжено с многократным увеличением объёма хранения данных, поэтому величина пространственного разрешения от 10 м и ниже выбирается на этапе выгрузки данных с целью применения в конкретных задачах мониторинга.

Сервис технологии облачной обработки данных GEE позволяет, минуя задачи формирования и хранения архивов данных, строить зимние композитные изображения высокого пространственного разрешения по данным Sentinel-2 для тематического картографирования лесов России. В настоящее время построены изображения снежного покрова за периоды январь – апрель 2019–2021 гг. на территорию страны.

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

2.2.1 Развитие метода оценки проективного покрытия древесного полога леса

Проективное покрытие древесного полога леса (ППДПЛ) является одной из ежегодно оцениваемых характеристик растительного покрова в результате обработки спутниковых данных MODIS. За отчётный период предложенный ранее метод оценки ППДПЛ претерпел существенные изменения. Изменения коснулись построения опорной выборки значений ППДПЛ, метода восстановления регрессии и используемого набора данных при постобработке результатов восстановления характеристик. Текущая версия метода оценки ППДПЛ представляет собой последовательное выполнение трех этапов: построение обучающей выборки, настройки и применения регрессионной модели и постобработки результата.



Рисунок 2.2.1.1 — Недостатки исходных опорных данных Tree Cover 2010

Проведён анализ построенных рядов ППДПЛ и их сравнение с другими источниками данных о пространственном распределении лесов. Оказалось, что большие по площади массивы редкой лиственницы и кустарника имеют нулевое проективное покрытие полог леса по данным Tree Cover 2010, используемых в качестве опорных при оценке ППДПЛ (рисунок 2.2.1.1).

Такого рода участки расположены достаточно локально. Поэтому несмотря на проводимую локальную статистическую фильтрацию исходных опорных данных, указанные особенности существенно влияют на получаемый результат и приводят к недооценке проективного покрытия и лесистости на территориях, покрытых редкой лиственницей и кустарником. Для исключения подобных участков из опорной выборки использовано композитное изображение с пространственным разрешением 30 м, построенное для территории нашей страны на основе ежедневных данных Sentinel-2 с наличием снежного покрова на земной поверхности. Метод построения изложен в п. 2.1.3 и для его создания были использованы данные 2018, 2019 и 2020 гг. с начала января по конец апреля.

Схема построения опорной выборке ППДПЛ представлена на рисунке 2.2.1.2. Основным приёмом построения обучающей выборки по уже имеющимся непрерывным опорным данным ППДПЛ является пространственная статистическая фильтрация. Она представляет собой просеивание выборки, собранной на некоторой заданной территории на основе порогов, построенных по распределению анализируемых признаков. Первый шаг метода построения обучающей выборки состоит в использовании глобальной статистической фильтрации для построения маски согласованных с данными высокого пространственного разрешения пикселей. Исходные значения ППДПЛ из карты Tree Cover 2010 группируются с шагом 5 % в 20 классов. Для каждого класса строится плотность распределения значения признака, на основе которого вычисляются пороги для отсеивания выбросов. Из исследуемого класса удаляются пиксели, значения в которых выходят за построенные пороги. В качестве признаков были использованы красный и ближний инфракрасный каналы композитного изображения Sentinel-2.

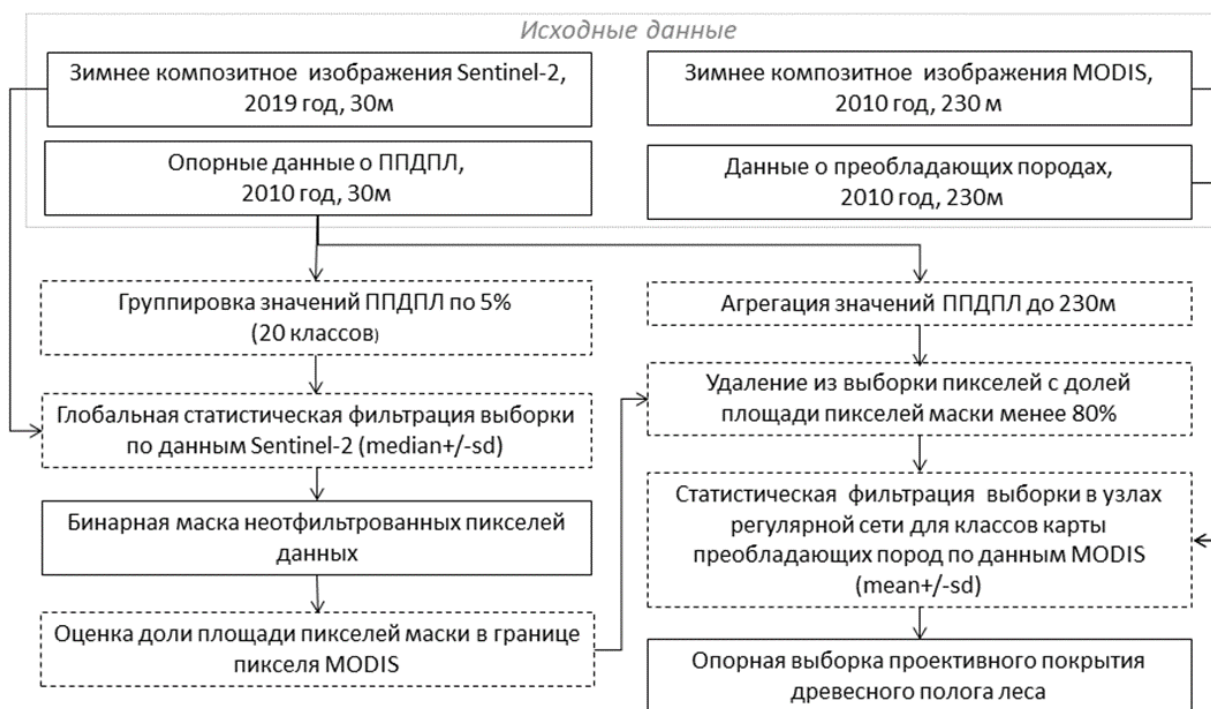


Рисунок 2.2.1.2 — Блок-схема метода построения опорной выборки ППДПЛ

Построенная после глобальной фильтрации маска пикселей высоко разрешения применяется для удаления из обучающей выборки по данным MODIS (230 м) тех пикселей, в которых доля отфильтрованных по данным Sentinel-2 пикселей велика (превышает 20 % площади) (см. рисунок 2.2.1.2).

Вторым этапом формирования обучающей выборки является локализованная статистическая фильтрация в узлах регулярной сети. Территория страны покрывается сетью ячеек с узловыми точками в их центре с шагом 46 км. Для каждого узла сети в некоторой в окрестности собирается обучающая выборка, на основе которой аналогично фильтрации на предыдущем этапе строится распределение значений признаков и вычисляются пороги. С помощью построенных порогов происходит удаления элементов из выборки. Ранее этот этап проходил без участия данных о преобладающих породах. Теперь фильтрация производится независимо для каждого класса карты пород и для нелесных территорий, что позволяет обеспечить локальную пространственную представительность малочисленных классов в результирующей выборке. В результате вычислений, выполненных на данном этапе строится очищенная опорная выборка значений ППДПЛ, используемая при построении регрессионной модели. В финальную опорную выборку после проведения фильтрации попало около 30% территории (15,67 % занимают леса, 24,3 % — нелесные земли).

Схема метода настройки и применения регрессионной модели для оценки ППДПЛ представлена на рисунке 2.2.1.3. Для оценки ППДПЛ используется пространственно-распределённая по территории страны регрессионная модель. Территория страны покрывается сетью ячеек с шагом 46 км. Настройка модели происходит независимо для каждой ячейки на основе опорной выборки, собранной в некоторой окрестности от её центра. В качестве модели регрессии используется широко известный метод случайного леса, предложенный Л. Брейманом и А. Катлер. Метод случайного леса представляет собой построение ансамбля решающих деревьев и агрегацию полученных на их основе прогнозов оценок. Использование метода случайных лесов вместо линейной модели для восстановления регрессионных зависимостей позволяет существенно повысить точность настройки модели, а также даёт возможность использовать не только количественные, но и тематические признаки в качестве входных параметров.



Рисунок 2.2.1.3 — Блок-схема настройки и применения регрессионной модели для оценки ППДПЛ

Построение оценок ППДПЛ происходит двухактно, с участием и без участия данных о породном составе. В качестве признаков используются красный и ближний инфракрасный каналы данных MODIS 2010 г. Введение данных о преобладающих породах в качестве признака на этапе построения регрессионной модели помогает компенсировать различия между проективным покрытием полога леса листопадных пород в летний и зимний периоды по сравнению с вечнозелёными лесами, а также учесть различия между сомкнутостью полога для лесов разными преобладающими древесными породами. В таблице 2.2.1.1 показаны значения статистики распределения коэффициента детерминации для построенных моделей регрессии.

Таблица 2.2.1.1 — Статистики ошибки out-of-bag error (OOBE) и коэффициента детерминации R^2 для регрессионных моделей ППДПЛ

Статистики	Минимум	Максимум	Среднее значение	Медиана
R^2				
без учёта карты пород	0,66	0,96	0,95	0,957
с учётом карты пород	0,69	0,97	0,955	0,96
OOBE				
без учёта карты пород	5,5	8,5	6,86	6,74
с учётом карты пород	5,8	9,2	7,16	7,04

Два временных ряда оценок объединяются на этапе пост обработки. Схема этапа постобработки представлена на рисунке 2.2.1.4. Выбор метода слияния двух временных рядов был продиктован принципом, что результирующее изображение должно быть пространственно-непрерывно, но при этом важно учитывать породный состав территории на тех лесных территориях, где он сильно оказывает влияние на результат оценки проективного покрытия. Поэтому выбрана следующая модель коррекции: значения корректируются только на лесных пикселях или пограничных с лесом территориях, где разница между полученными оценками существенна. Величина коррекции пропорциональна доле ППДПЛ в данном пикселе (см. рисунок 2.2.1.4).

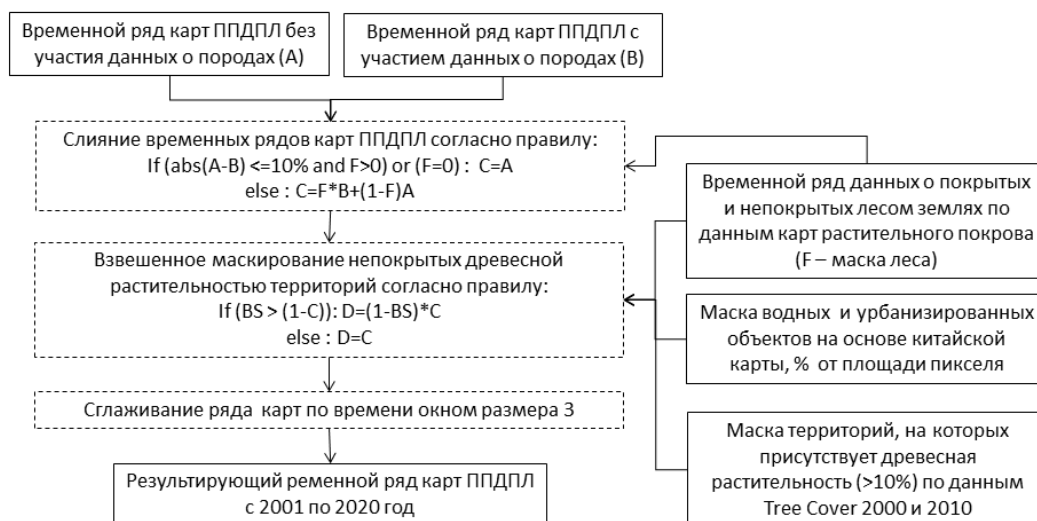


Рисунок 2.2.1.4 – Пример зависимости КСЯ спектральных каналов MODIS и проективного покрытия крон

Маскирование непокрытых лесов территорий является вынужденной мерой, корректирующей влияние рельефа местности в горных районах, а также компенсирующей недостатки композитных изображений с наличием снежного покрова на юге России и в

Крым. Для построения непокрытых лесов территорий используются карты растительного покрова России, построенные в ИКИ РАН, карты GlobeLand30 2010 и 2020 гг., данные Tree Cover 2000 и 2010. На основе перечисленных источников данных строится попиксельная маска непокрытых лесом территорий с пространственным разрешением 30 м. Полученная маска приводится к пространственному разрешению данных MODIS для получения оценки доли площади пикселя заведомо непокрытой лесом. Затем выполняется коррекция оценок ППДПЛ в зависимости от полученных значений оценок ППДПЛ и доли площади непокрытой лесом в пикселе. На финальном шаге производится сглаживание построенного ряда карт ППДПЛ по времени с окном размером три года.

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

2.2.2. Развитие методов получения однородных временных рядов индекса листовой поверхности на основе данных MODIS

Был предложен ряд усовершенствований продукта индекс листовой поверхности (Leaf Area Index, LAI), получаемого в рамках автоматизированной обработки данных MODIS (далее ИКИ MODIS LAI продукт). Основные изменения теоретической базы и алгоритма обработки за отчётный период включают следующие шаги:

1. Проведены разработка и исследование стохастического варианта закона Бера – Ламберта – Бюггера (часть модели переноса радиации SRT). Точность SRT модели была оценена с помощью широко известной на международном уровне 3D-модели DART, симулирующей рассеяние фотонов на 3D-объектах, в том числе для неоднородного растительного покрова;

2. На основе усовершенствованной модели SRT рассчитана новая версия опорных модельных данных. Расчёт был проведён для расширенного диапазона зенитного угла Солнца, необходимого для охвата Арктической территории России. Используя новые валидационные наземные измерения LAI были оптимизированы модельные данные для сельскохозяйственных территорий на юге России;

3. Обнаружены аномалии в красном канале MODIS данных — полосы аномально низких значений LAI в северных широтах. Разработан метод фильтрации аномалий, существенно минимизирующий данный эффект.

Также за прошедший год проведена работа, направленная на актуализацию временных рядов ИКИ MODIS LAI продукта с учетом перечисленных выше изменений алгоритма. Рассчитаны временные ряды ИКИ MODIS LAI продукта для всех MODIS гранул по территории России за период 2000-2020 г. Расчёт продукта за 2021 г. продолжается на текущий момент.

Помимо вышеперечисленного проведена оптимизация кода для потокового расчёта следующей версии продукта. В частности, оптимизирован код интерполяции недельных композитов, скорость расчёта увеличена в 8–10 раз. Разработан новый скрипт для оперативной обработки продукта в режиме близком к реальному времени, улучшена стабильность построения временных рядов. Расширена битовая глубина продукта — от 8-битной версии произведён переход к 16-битной.

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 между верхним и нижним ярусом лесов России

Вертикальная структура леса существенно влияет на ключевые процессы обмена энергии и углерода между атмосферой и растительным покровом. Оценка вертикальной

структуры требуется в многочисленных приложениях в экологии, лесоустройстве, моделирование климата и других.

Одной из фундаментальных задач в данной области является разделение фитомассы между верхним (кроны деревьев) и нижним ярусом (кустарник, напочвенное покрытие). На протяжении последних десятилетий данной задаче посвящён ряд практических работ, которые включают как анализ наземных измерений, так и разработку ДЗЗ-продуктов. Однако в целом не существует общепринятого решения задачи, имеющиеся оценки распределения фитомассы по ярусам имеют низкую точность. Особую сложность составляет оценка фитомассы нижнего яруса, для которого ввиду высокой вариабельности видового состава и сложной структуры отсутствует даже устоявшаяся методология измерений. В литературе документированы результаты ряда локальных экспериментов, где на основе отражательного спектра и с использованием уравнения переноса восстанавливается фитомасса нижнего яруса. Эксперименты крайне затратные, методология имеет ограниченную точность и не может быть распространена на региональном уровне. Также разработан ряд ДЗЗ продуктов оценки фитомассы ярусов, которые хотя и имеют практическую ценность, но также ряд существенных недостатков. Данные продукты ограничены по временному и пространственному покрытию, кроме того в них используется ряд эмпирических соотношений и предположений о соотношении спектральных характеристик и фитомассы ярусов. В тоже время широко распространены ежегодно строящиеся на региональном и глобальном уровне ДЗЗ-продукты, которые предоставляют собой оценку полной фитомассы без разделения на ярусы.

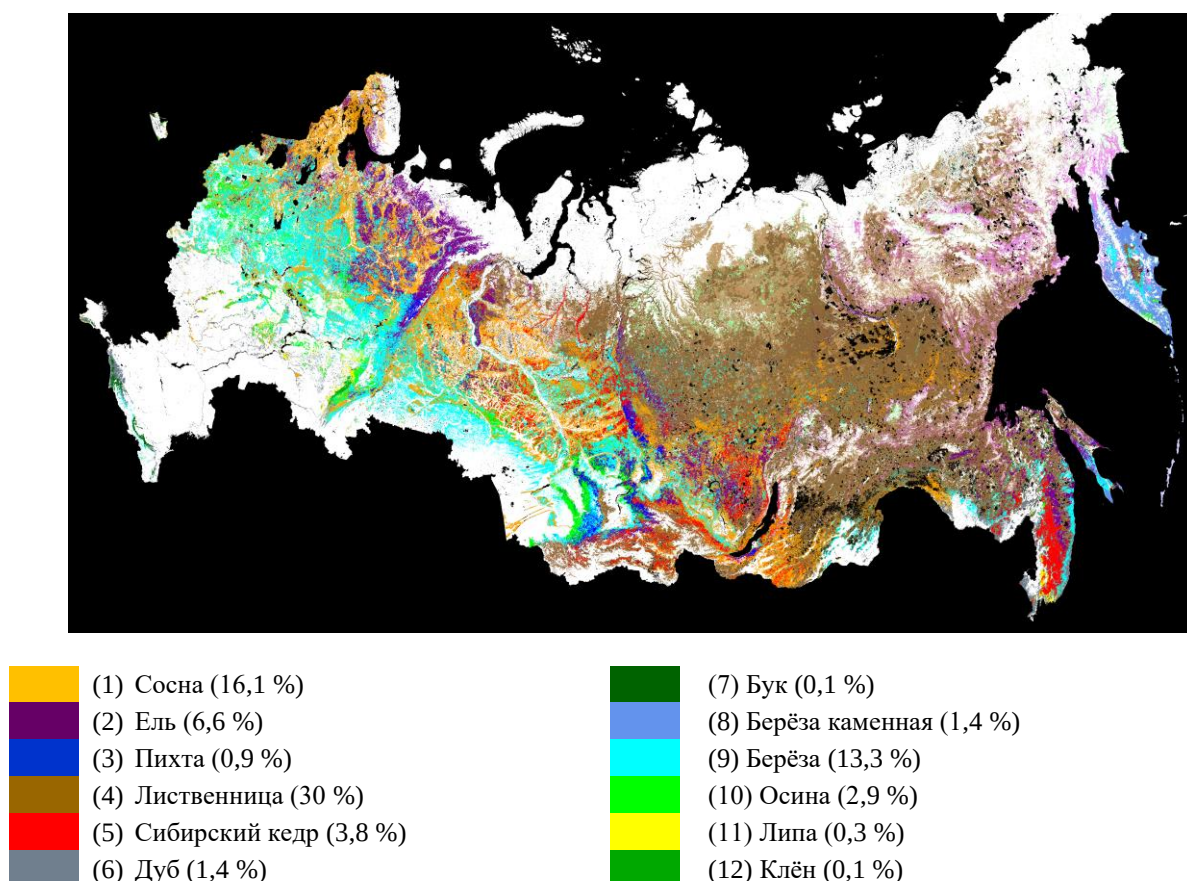


Рисунок 2.3.1.1 — Пространственное распределение преобладающих пород в лесах России.
Указана доля площади породы по отношению ко всей площади лесов России

В отчётный период был разработан алгоритм разделения индекса листовой поверхности (LAI) между верхним и нижним ярусом растительного покрова. Алгоритм

реализован с использованием двух продуктов ДЗЗ на основе спутниковых данных сенсора MODIS: индекса листовой поверхности и проективного покрытия древесного полога леса (crown fraction, f). Тестовая версия карт разделения LAI на фракции, соответствующие ярусам древостоя, построена для лесов России за 2010 г. Территория России исключительно информативна для анализа благодаря широкому динамическому диапазону фитомассы — от разреженных лесов на севере к сомкнутым лесам на юге и разнообразию представленных древесных пород (рисунок 2.3.1.1). Методология разделения на компоненты основана на статистическом подходе. Рассмотрим пиксел, в котором верхний ярус представлен кронами деревьев с проективным покрытием f , нижний ярус занимает долю $1 - f$. Полное LAI такой системы (LAI^T) можно разделить на компоненты

$$LAI^T(f) = LAI^C(f) + LAI^U(f), \quad (2.3.1.1)$$

где LAI^C — это индекс листовой поверхности верхнего яруса (крон) и LAI^U соответственно LAI нижнего яруса.

Для моделирования соотношения между LAI крон и долей межкрупных просветов $1 - f$ используется широко-известное полуэмпирическое соотношение,

$$1 - f(LAI^C) = \exp(-k \cdot LAI^C), \quad (2.3.1.2a)$$

или, обратив соотношение,

$$LAI^C(f) = \frac{1}{k} \ln(1 - f). \quad (2.3.1.2b)$$

Здесь k — это свободный параметр. Для моделирования $LAI^U(f)$ использовались следующие принципы. С одной стороны, LAI^U должен быть пропорционален LAI^C , так как при низких значениях сомкнутости крон ограничения (климат и почвы) на рост верхнего яруса также влияют и на рост нижнего. С другой стороны, при высокой сомкнутости крон лимитирующим фактором для роста нижнего яруса является световой поток, необходимый для процессов фотосинтеза. Таким образом, LAI^U пропорционален $(1 - f)$ или выражен полиномом от $(1 - f)$. Комбинируя оба предельных случая получим, что

$$LAI^U(f) = \rho \cdot LAI^C(f) [1 - f]^\gamma, \quad (2.3.1.3)$$

где ρ и γ — свободные параметры. Из уравнений (2.3.1.2a) и (2.3.1.3) следует соотношение между ППДПЛ и полным LAI:

$$LAI^T(f) = \frac{1}{k} \ln(1 - f) \{1 + \rho [1 - f]^\gamma\}. \quad (2.3.1.4)$$

В соотношении (2.3.1.4) величины свободных параметров определяются путём приближения кривой к данным (curve fitting), в данном случае, MODIS LAI и MODIS f . Статистические свойства обоих наборов данных показаны на рисунке 2.3.1.2.

Карты LAI^T и f (рисунок 2.3.1.2a–б) демонстрируют вертикальные градиенты обоих параметров, вызванные широтными изменениями климата (и частично почв и т.д.). Гистограмма LAI^T имеет два чётко выделенных пика, соответствующих разреженному лесу на севере и сомкнутому на юге. Гистограмма проективного покрытия имеет пик только на высоких значениях, пик на низких значениях отсутствует, что выражается в отсутствии широтных градиентов в европейской части России и более плавных широтных градиентах по остальным территориям в продукте f по сравнению с LAI^T . Двумерная диаграмма рассеяния (LAI^T, f) показывает нелинейное соотношение между двумя параметрами. Эффект нелинейности возникает из-за того, что рост LAI происходит не только за счёт увеличения ППДПЛ, но также за счёт увеличения объёмной плотности листвы.

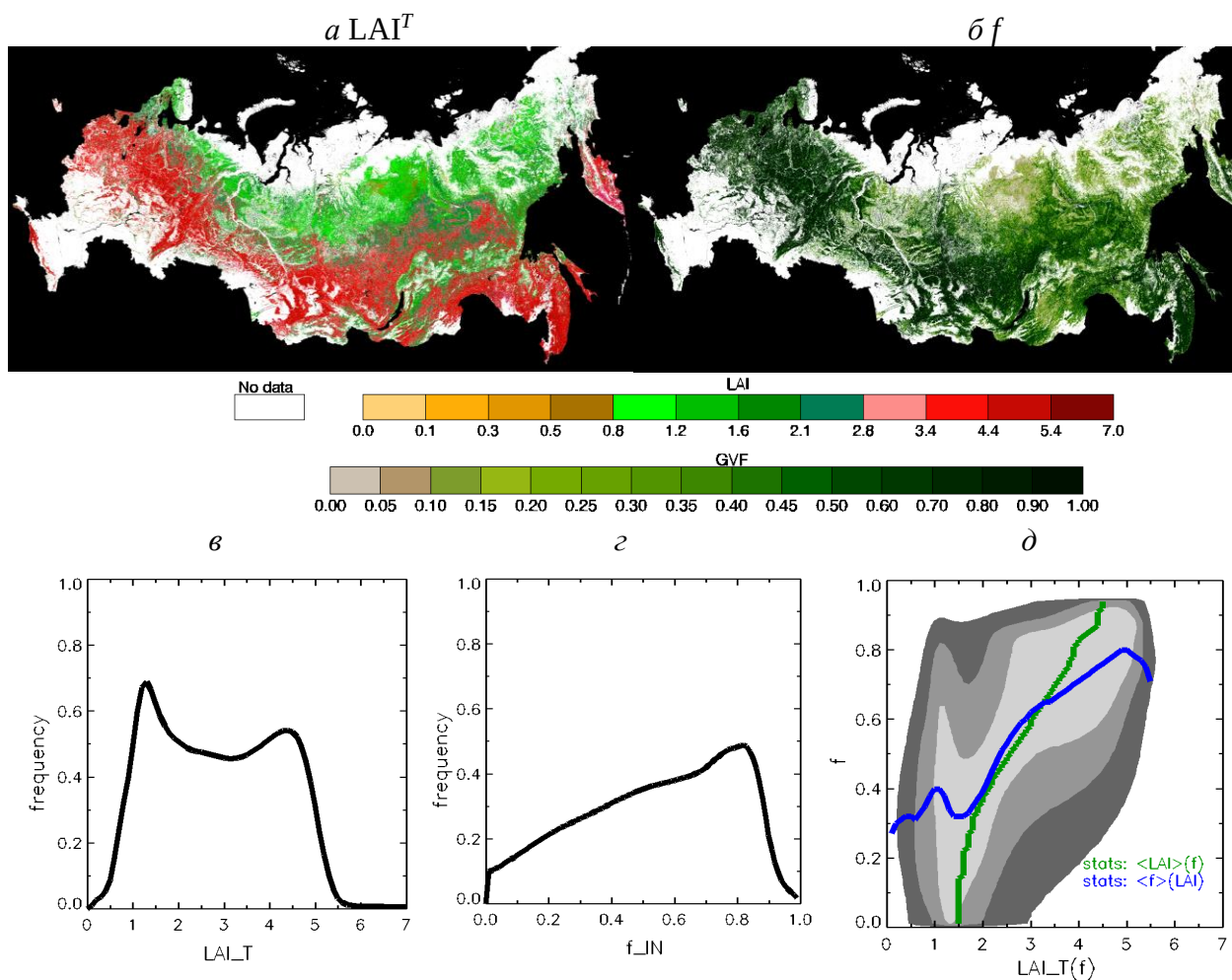


Рисунок 2.3.1.2 — Статистическое соотношение между полным LAI лесного полога (LAI^T) и ППДПЛ (f): *a* — карта среднего LAI^T за летний период (июнь – июль – август, JJA); *b* — карта ППДПЛ (f); *v* — гистограмма распределения LAI^T ; *z* — гистограмма распределения f ; *d* — двумерная диаграмма рассеяния (LAI^T , f)

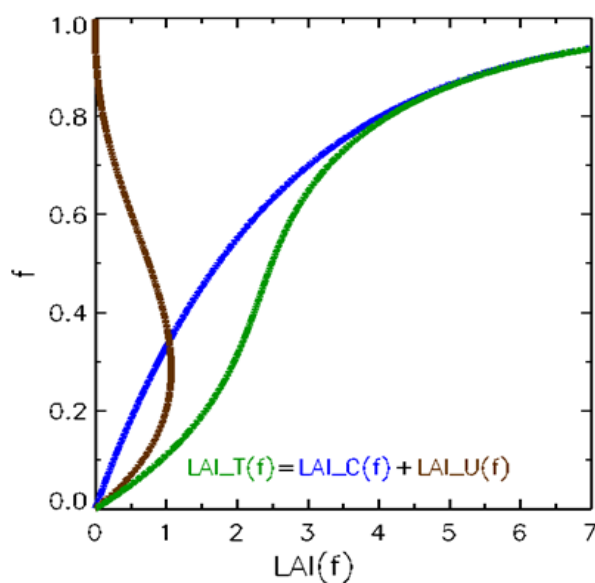


Рисунок 2.3.1.3 — Моделирование соотношения между полным LAI лесного полога (LAI^T) и сомкнутостью крон (f). LAI^T разделено на компоненты LAI^C и LAI^U — LAI и нижнего яруса

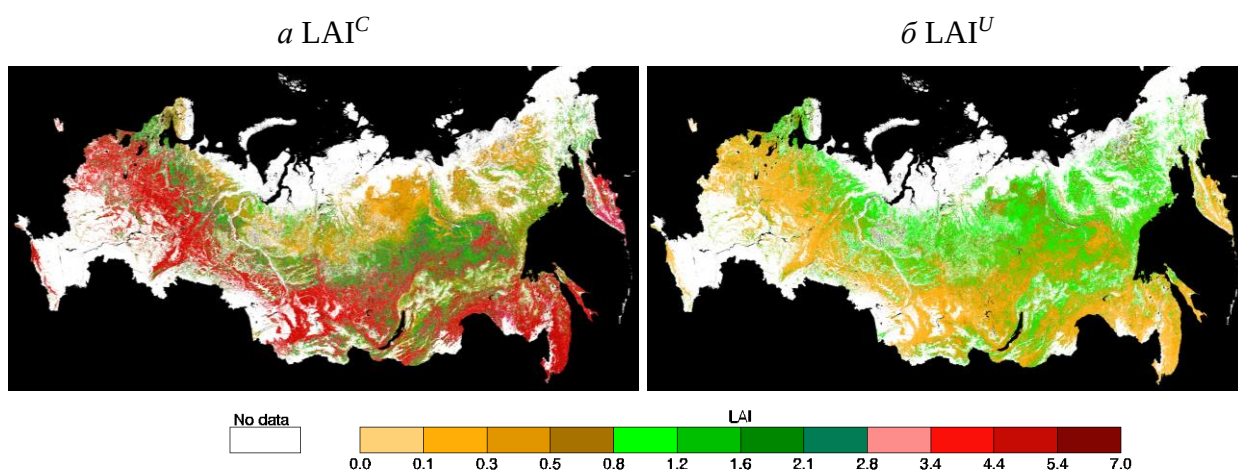


Рисунок 2.3.1.4 — Пространственное распределение компонент LAI^C и LAI^U , рассчитанное на основе применения модели (см. рисунок 2.3.1.3) к полному LAI лесного полога (LAI^T)

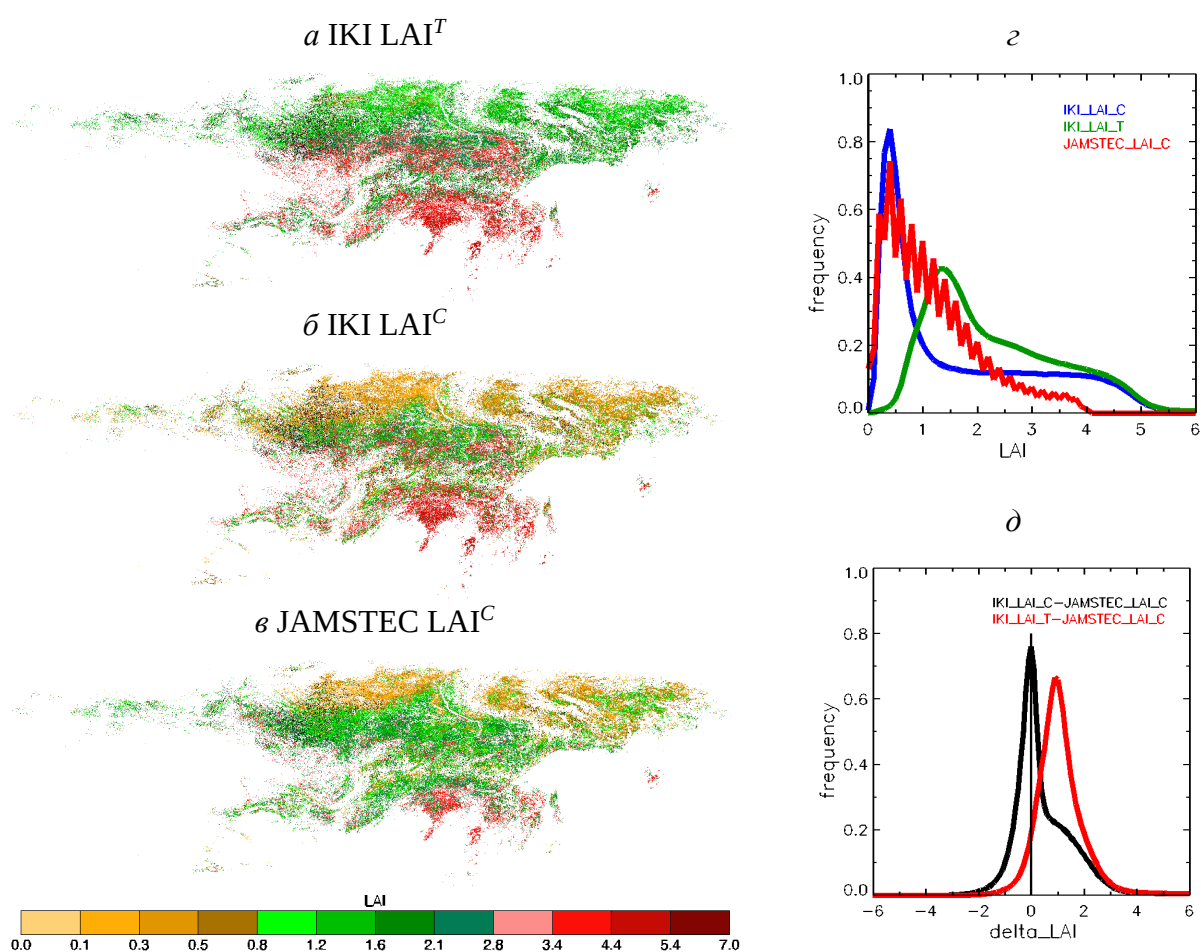


Рисунок 2.3.1.5 — Сравнение оценок ИКИ MODIS LAI^T (а), ИКИ MODIS LAI^C (б) и JAMSTEC LAI^C (в). Карты представлены в географической проекции ($1/112^\circ$) по территории Восточной Сибири за 2010 г. Гистограммы распределений и гистограмма разницы ИКИ MODIS LAI^C и JAMSTEC LAI^C приведены на графиках (г) и (д)

Используя статистическую связь между продуктами LAI^T и f были оценены значения свободных параметров в соотношении (2.3.1.4): $k = 0,8$, $\rho = 3,5$ и $\gamma = 3$. Полученные кривые $LAI^T(f)$, $LAI^C(f)$ и $LAI^U(f)$ приведены на рисунке 2.3.1.3. График демонстрирует, что соотношение $LAI^T(f)$ не является экспоненциальным, благодаря вкладу нижнего яруса кривая имеет S-образную форму. LAI^U достигает наивысшего

значения при значениях просвета 0,75, т.е. когда возникает баланс между благоприятными для роста условиями (температурой и влажностью) и достаточным количеством радиации, проходящей через разреженный верхний ярус. Уравнение (2.3.1.4) не может быть решено аналитически, поэтому было решено численными методами. Алгоритм численного решения основан на применении опорных таблиц (Look Up Tables, LUTs) при осуществлении расчётов. Зная значение LAI^T из соотношения (2.3.1.4) можно определить значения ППДПЛ и LAI для обоих компонент.

Пример применения метода разделения LAI показан на рисунке 2.3.1.4, на нём приведены рассчитанные карты LAI^C и LAI^U за 2010 г. Подчеркнём взаимно противоположные широтные градиенты у обоих фракций LAI: LAI^C увеличивается с север на юг, в то время как LAI^U уменьшается из-за возрастания сомкнутости. Заметим, что в основном нижний ярус имеет существенное значение в районе Арктики, хотя имеются значительные отступления от данного правила, в особенности на юге в районе о. Байкал и горных массивов.

Таблица 2.3.1.1 — Сравнение средних значений продукта LAI по породам с данными из литературы. LAI^T — полное LAI растительного покрова, LAI^C — LAI верхнего яруса древостоя

IGBP классы	Средние значения LAI для классов IGBP	Преобладающие породы леса	LAI из лит.	Средние значения LAI из лит.	IKI LAI^T (LAI^C)
Вечнозелёные хвойные леса	3 = [2,5; 3,5]	(1) Сосна	2,41–3,20 (Y) 1,8–2,0 (N)	2,5	2,8 (2,3)
		(2) Ель	6,03–5,79 (Y) 2,5–3,9 (N)	3,5	2,9 (2,5)
		(3) Пихта	7,2 (Y)	4,5	3,9 (3,7)
		(5) Сибирский кедр			3,4 (3,1)
Листопадные хвойные леса	4.5 = [2,5; 5,5]	(4) Лиственница	1,43 (Y) 0,26–1,28–2,70 (O)	1,5	2,6 (2,1)
		(13) Редкая лиственница	2,0 (V) 1,5 (H)		1,4 (0,6)
Листопадные широколиственные леса	5 = [4; 6]	(6) Дуб	3,27–4,52 (Y) 1,9–5,1 (N)	4,0	4,1 (3,9)
		(7) Бук	5,46–5,60 (Y) 3,0–5,3	5,0	4,8 (4,7)
		(8) Берёза каменная			4,8 (4,7)
		(9) Берёза	4,51–4,68 (Y) 2,5 (N)	4,0	4,1 (3,8)
		(10) Осина	2,91–3,15 (Y)	4,0	4,3 (4,1)
		(11) Липа	3,78–4,13 (Y)	4,0	4,5 (4,4)
		(12) Клён	2,01–4,68 (Y)	4,0	4,6 (4,6)

Заключительная часть проведённых работ посвящена сравнению продукта с имеющимися аналогами и литературными данными. Обзор литературы выявил крайне ограниченное количество наземных измерений LAI верхнего и нижнего полог лесов для территории России. Сравнение проводилось с обзором (<https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x>), в котором приведены средние значения LAI для обобщённых классов лесов. Также для сравнения использовались данные измерений LAI в лесах России из

работы Уткина и других исследователей. Результаты сравнения представлены в таблице 2.3.1.1. Для сравнения построенных спутниковых продуктов использовались средние значения LAI^T и LAI^C . Необходимо заметить, что влияние нижнего яруса (различие между LAI^T и LAI^C) наиболее сильно в разреженных лесах, в особенности для таких пород как лиственница, сосна, ель и пихта

Ранее в нескольких работах по валидации MODIS LAI продукта по наземным данным отмечалось, что для хвойных пород наблюдается эффект завышения значения LAI спутниковыми продуктами. Однако наземные данные включают только LAI крон, в то время как продукт на основе спутниковых данных даёт оценку полного LAI. Разделение спутникового продукта LAI^T на компоненты приводит к хорошей согласованности LAI верхнего яруса с наземными измерениями.

Кроме того, проведено сравнение построенных карт LAI ярусов с продуктом LAI верхнего яруса, разработанным японским институтом JAMSTEC. Временные ряды 10-дневного продукта LAI верхнего яруса были рассчитаны для лесов Восточной Сибири за период 1998–2013 гг. Данные представлены в географической проекции с разрешением $1/112^\circ$. Разделение на LAI по ярусам имеет существенное значение для территории Восточной Сибири из-за большой площади не полностью сомкнутых лесов. Для сравнения с построенными картами LAI были использованы данные за 2010 г. Карты и гистограммы распределения LAI^C для обоих продуктов, а также гистограмма разницы приведена на рисунке 2.3.1.5. Также для контраста показано сравнение с ИКИ MODIS LAI продуктом ($IKI\ LAI^T$). Графики демонстрируют, что существует хорошее соответствие между двумя продуктами. Наиболее существенным различием между ними является верхняя граница значений LAI: для JAMSTEC LAI^C он ограничен четырьмя, $IKI\ LAI^C$ допускает вариации вплоть до семи. Вопрос о возникновении расхождения необходимо изучать отдельно, так как в известно, что NASA MODIS LAI продукт (базовый для ИКИ MODIS LAI) занижает максимально допустимое значение.

2.3.2 Исследование изменений спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов засушливой зоны России и сопредельных территорий при пирогенном воздействии

Для анализа закономерностей изменения спектрально-отражательных характеристик использовались данные дистанционного зондирования MODIS: информационные продукты MODIS NDVI (MOD13Q1), MODIS Land Surface Temperature (MYD11A1) и BRDF-Albedo (MCD43A1). Первый продукт является 16-дневным композитом вегетационного индекса NDVI разрешения 250 м, второй продукт — радиометрическая температура поверхности пространственного разрешения 1000 м и временного — 8 дней. Продукт MCD43A1 содержит данные об альбедо поверхности в трех диапазонах: видимом, ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах разрешения 500 м, усреднённые за 16 дней. Данные о температурах поверхности были приведены к 16-ти дневному разрешению. Именно временное разрешение данных альбедо и температуры подстилающей поверхности послужило основанием для выбора источника данных NDVI. На каждый год рассчитаны данные с 21 марта по 31 октября, так как в оставшийся период данные альбедо, температуры поверхности и NDVI характеризуются очень низким качеством. Использование геоинформационного слоя ландшафтной карты СССР позволило определить полупустынные и пустынные типы пастбищных ландшафтов региона исследований, включающего юго-восток европейской части России и Западный Казахстан. Пастбища от прочих земель были отделены на основе информационного продукта USGS Land Use/Land Cover System, включающего следующие категории: «пастбища», «закустаренные пастбища» и «редкая растительность», имеющего сходное разрешение с продуктом очагов горения MCD14ML. Точечный векторный слой очагов горения был пересечён с указанными электронными картами, благодаря чему каждому очагу горения были присвоены атрибуты типа ландшафта и земного покрова, по которым

проведена выборка данных (рисунок 2.3.2.1). Также были отфильтрованы очаги горения, соответствующие техногенным источникам, например, факелам сжигания попутных газов.

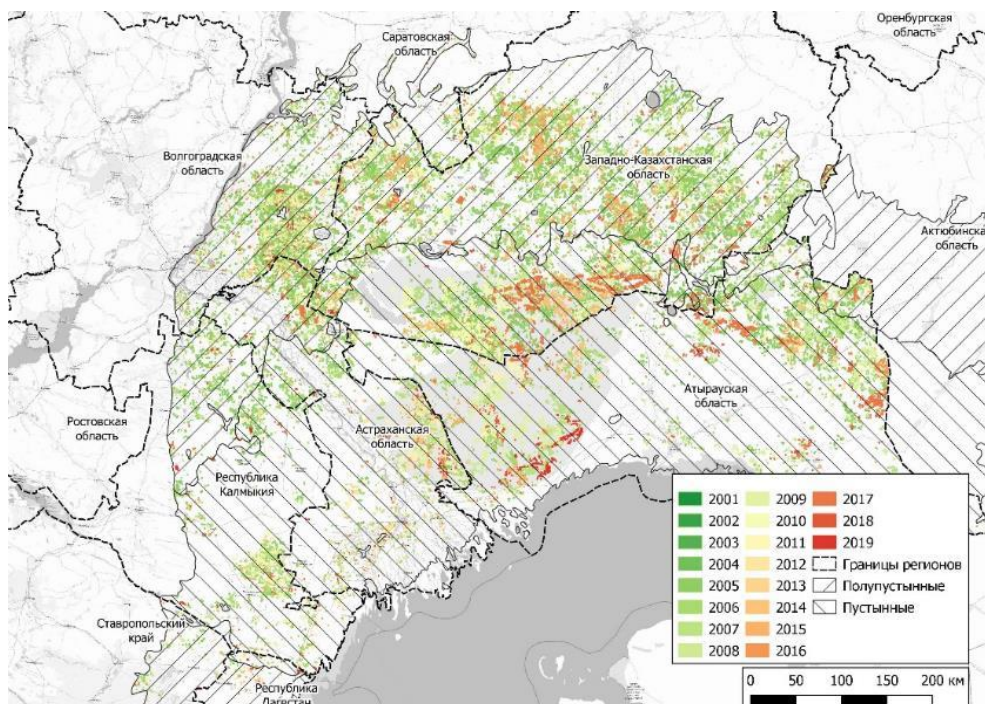


Рисунок 2.3.2.1 — Пространственно-временное распределение очагов горения MODIS в регионе исследований

Для сравнительного анализа сезонной динамики горевших и негоревших территорий для каждого типа ландшафта было рассчитано средневзвешенное значение показателей NDVI, LST и альbedo на каждую дату сезона. Использование для анализа негоревших территорий только массива очагов горения обосновано следующим соображением. На территории исследований кроме ландшафтных условий очень сильно различается степень антропогенного воздействия, выраженного в пастбищных нагрузках. Данная территория подвержена деградации и опустыниванию в результате перевыпаса. Кроме того, велика доля сорных понижений, солончаков и существующих массивов открытых песков, которые должны быть исключены из анализа, для чего необходима их предварительная идентификация. Таким образом, использование архива очагов горения как объектов анализа даёт возможность вычленить сходные по природным условиям и степени антропогенного воздействия земли. При этом подходе возможна неопределённость оценки, вызванная разницей разрешения продуктов детектирования активного горения, альbedo, температуры и NDVI. Кроме того, сложно учесть повторяющиеся на одних и тех же участках пожары. Также, пиксели очагов горения могут захватывать лишь частично выгоревшие площади.

Взвешивание осуществлялось на основе оценки критерия достоверности детектирования очага активного горения (confidence). В результате получены данные отношения NDVI, температуры и альbedo поверхности горевших и негоревших пикселей, усреднённые на каждую дату с 16-ти дневным интервалом 2001-2019 гг. для каждого типа ландшафта.

$$\frac{Y'}{Y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} (Y_i' \cdot K_i) \cdot N_0}{\sum_{i=1}^{N_0} Y_{0i} \cdot \sum_{i=1}^{N'} K_i \cdot N'}$$

где Y' — показатель для выгоревшей площади; Y_0 — показатель для негоревшей площади; Y_i — показатель для i -го очага горения, выгоревшего в данный год; Y_{0i} — показатель для i -го очага горения, не горевшего в данный год; N' — количество выгоревших пикселей; N_0 — количество негоревших пикселей; K_i — достоверность детектирования очага горения (от 0 до 100).

На рисунках 2.3.2.2 и 2.3.2.3 показана сезонная динамика среднееголетних значений отношения NDVI, температуры поверхности и альbedo горевших и негоревших территорий в полупустынных и пустынных ландшафтах соответственно.

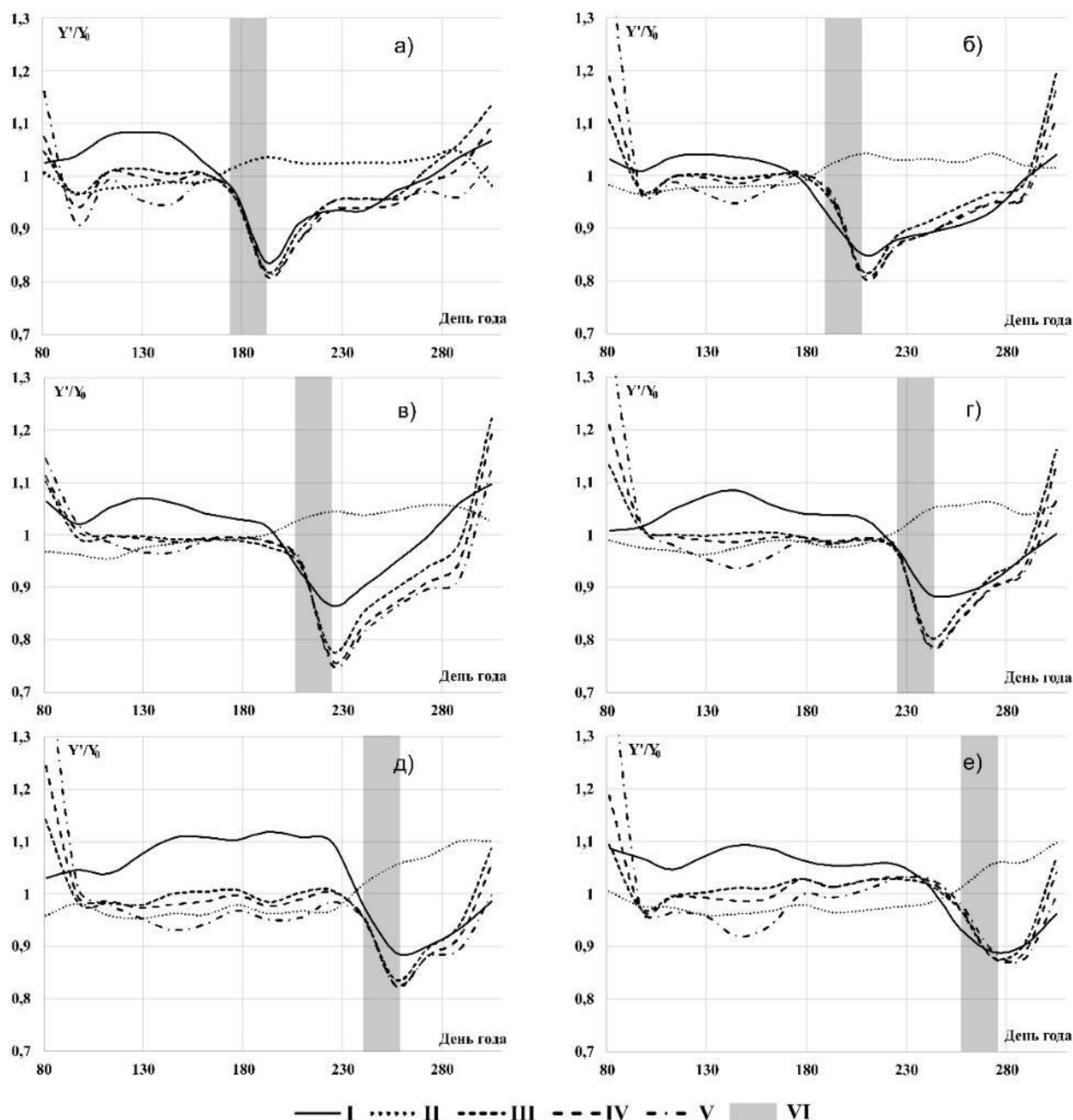


Рисунок 2.3.2.2 — Сезонная динамика отношения NDVI (I), температура поверхности (II), альbedo в БИК (III), коротковолновом ИК (IV) и видимом (V) диапазонах выгоревших и не горевших полупустынных морских аккумулятивных ландшафтов; VI — даты пожаров: а — 26 июня – 11 июля; б — 12–27 июля; в — 28 июля – 12 августа; г — 13–28 августа; д — 29 августа – 13 сентября; е — 14–30 сентября

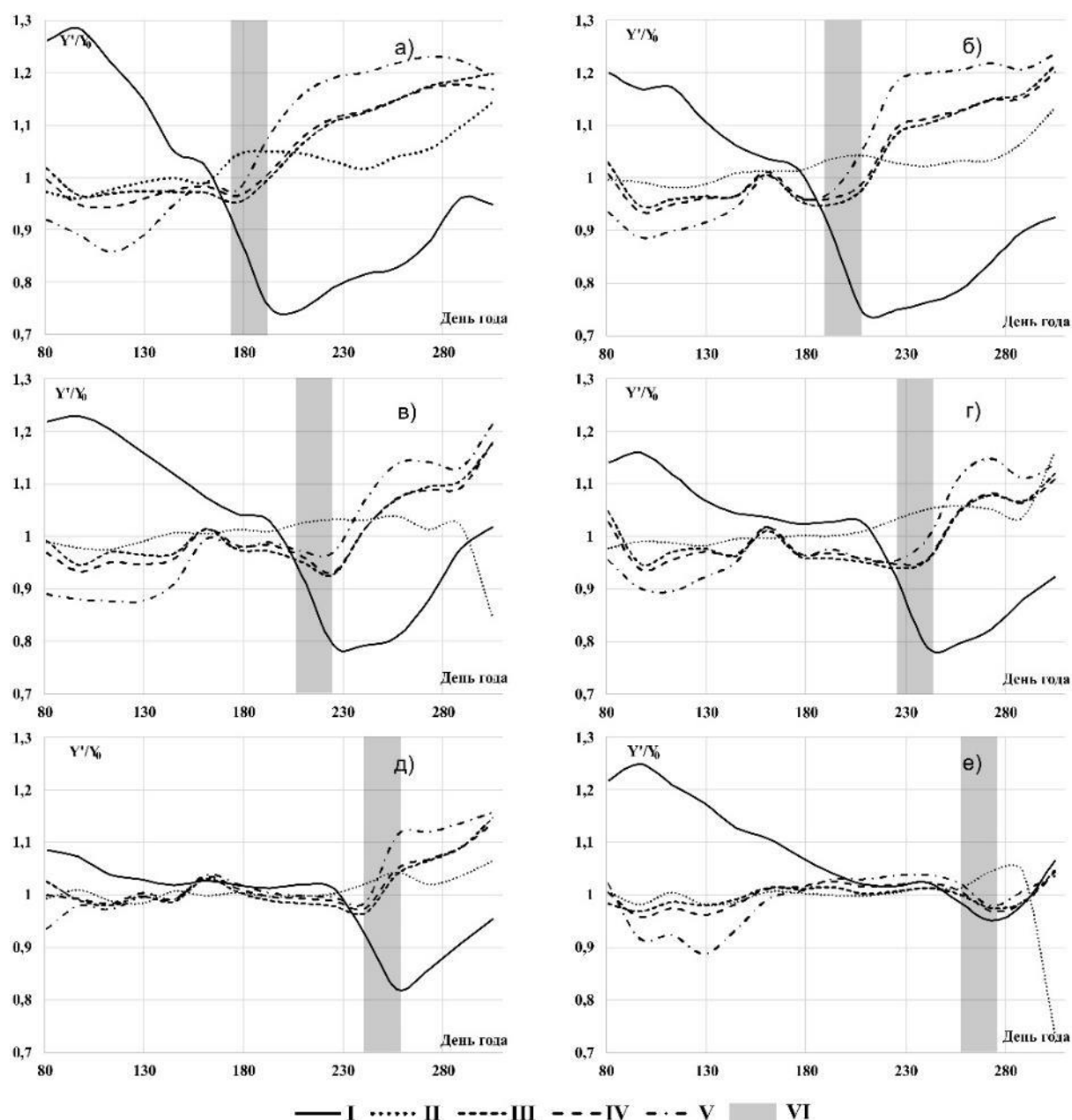


Рисунок 2.3.2.3 — Сезонная динамика отношения NDVI (I), температура поверхности (II), альbedo в БИК (III), коротковолновом ИК (IV) и видимом (V) диапазонах выгоревших и негоревших северопустынных эоловых аккумулятивных ландшафтов; VI — даты пожаров: *а* — 26 июня – 11 июля; *б* — 12–27 июля; *в* — 28 июля – 12 августа; *г* — 13–28 августа; *д* — 29 августа – 13 сентября; *е* — 14–30 сентября

Сразу после пожаров в полупустынных ландшафтах из всех характеристик сильнее снижается альbedo поверхности, причём достаточно равномерно во всех областях спектра, фиксируемого прибором MODIS (на 20–25 % по сравнению с негоревшими). Наиболее выражено снижение альbedo после пожаров первой декады августа, в меньшей степени — после осенних пожаров. Индекс NDVI, напротив, сильнее уменьшается при пожарах в июле. Чем позже пожар, тем меньше снижаются значения этого индекса на горевших участках непосредственно после пожара по сравнению с негоревшими. При этом, к концу октября значения NDVI выравниваются. Это может быть вызвано общим снижением зелёной массы растительности осенью (большая часть растений заканчивает вегетацию), поэтому NDVI негоревшей растительности осенью существенно ниже, чем летом. Альbedo негоревших и выгоревших пикселей уже поздней осенью практически сравнивается, и только при наличии неглубокого снега наблюдаются отличия: альbedo

незакрытого высоким травостоем снега характеризуется большими на 50–80 % значениями.

Для обоих типов ландшафтов характерно превышение значений NDVI выгоревших площадей в предшествующий пожару период по сравнению с негоревшими участками. Причём у пустынных ландшафтов эта закономерность выражена намного сильнее. В начале сезона превышения NDVI составляют 20–30 %. Накопление растительной массы и приводит к возникновению и распространению пожаров. В пустынных ландшафтах, в отличие от полупустынных, практически никогда не происходит восстановления значений NDVI до конца сезона. Для пустынного типа ландшафта характерен рост альбедо после пожаров вплоть до окончания вегетационного сезона. Установленные изменения спектрально-отражательных характеристик могут стать предиктором для идентификации выгоревших площадей в исследуемых типах ландшафтов.

В полупустынных ландшафтах на суглинистых почвах наиболее сильное изменение альбедо наблюдается непосредственно после пожара, в это время доля отражённого солнечного излучения снижается на 20–30 % как в видимом, так и в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах. В пустынных ландшафтах альбедо, наоборот, после незначительного снижения сразу после пожара существенно возрастает. Поскольку альбедо поверхности оказывает влияние на динамику атмосферных процессов, то особенности пирогенного изменения спектрально-отражательных характеристик обязательно должны учитываться при изучении динамики климата на региональном уровне.

Альбедо поверхности является достаточно надёжным предиктором для автоматизированного распознавания выгоревших площадей в аридных ландшафтах. Эта спектрально-отражательная характеристика наиболее сильно реагирует на пирогенные изменения в исследованных типах ландшафтов. Использование альбедо поверхности с учётом ландшафтных особенностей может быть достаточно перспективным направлением для разработки автоматизированных алгоритмов идентификации выгоревших площадей в аридной зоне России и сопредельных территорий. Также ландшафтные условия должны учитываться при разработке алгоритмов идентификации выгоревших площадей на основе других показателей. Кроме того, выявленные закономерности изменения спектрально-отражательных характеристик помогут более точно определить особенности пирогенного воздействия на окружающую среду.

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

2.4.1 Картографирование пахотных земель России на основе сезонных серий данных MODIS высокого временного разрешения

В течение 2020 г. с использованием сервисов семейства «Созвездие-Вега» регулярно осуществлялась оценка развития посевов озимых и яровых сельскохозяйственных культур на территории России. Мониторинг осуществлялся на основе карт размещения посевов и значений вегетационного индекса NDVI, полученных по данным дистанционного зондирования Земли, а также на основе метеорологических параметров. Особенностью подхода, применяемого при оценке состояния культур, является сопоставление показателей сезонной динамики вегетационного индекса NDVI с аналогичными данными предыдущих лет. Это позволяет формировать многолетнюю норму сезонного изменения NDVI, относительно которой проводится анализ отклонений.

Необходимо отметить, что более высокие или низкие значения NDVI не всегда характеризуют более хорошее или плохое состояние и развитие посевов. Они, в частности, могут быть связаны со сдвигом сезона на более ранние или поздние сроки из-за сложившихся метеорологических условий.

Ежегодная оценка используемых в течение сельскохозяйственного сезона пахотных земель необходима для инвентаризации посевных площадей, датировки изменений землепользования, обнаружения вновь распаханых земель и выявления залежей. В ИКИ РАН ранее была разработана и в настоящее время используется технология ежегодного обновления карт используемых пахотных земель по данным шестилетнего периода спутниковых наблюдений прибором MODIS. В основе указанной технологии лежит использование построенных на основе многолетних временных рядов недельных композитных изображений спектрально-динамических признаков распознавания пашни, параметрического метода классификации и подхода к автоматической актуализации обучающей выборки. Получаемые таким образом карты пашни используются для решения задач автоматического оперативного картографирования и оценки состояния сельскохозяйственных культур, однако своевременная оценка динамики землепользования на основе этих карт может быть затруднена.

Разработка в ИКИ РАН унифицированной технологии построения временных серий высокого временного разрешения для различных зарубежных и российских спутниковых систем предоставляет возможность использования сезонных спектрально-временных признаков для распознавания пахотных земель текущего сельскохозяйственного сезона. Технология опирается на весовую реализацию метода локальной взвешенной регрессии полиномами LOESS для восстановления временных рядов безоблачных спутниковых наблюдений без необходимости использования масок облачности и теней. Указанный метод использует сезонную серию всех доступных значений восстанавливаемого индикатора (вегетационного индекса или измерений в отдельном канале), а в качестве метрики весов используются значения индексов и других показателей, которые чувствительны к наличию мешающих факторов, в том числе, облачности и теней от неё. К настоящему моменту на территорию России построены многолетние временные серии ежедневных мультиспектральных безоблачных изображений, полученных прибором MODIS (Terra/Aqua), начиная с 2006 г. по настоящее время, которые доступны в рамках ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Наличие серий дистанционных наблюдений высокого временного разрешения открыло возможность построения новых спектрально-временных признаков распознавания, основанных на описании сезонной фенологической динамики быстроменяющихся типов растительного покрова, а именно, сельскохозяйственной растительности. В частности, на основе восстановленных сезонных временных серий ежедневных безоблачных наблюдений прибором MODIS были построены и исследованы 25 различных спектрально-временных и морфологических признаков для сельскохозяйственного сезона 2020 г.

Для исследования информативности построенных признаков и решения задач распознавания используемой в 2020 г. пашни была создана пространственно-распределённая выборка, целиком покрывающая 105 различных административных районов агропояса России и содержащая информацию о классе приблизительно 200 000 объектов земель сельскохозяйственного назначения, включая класс пашни, залежей, сенокосов и пастбищ. Кроме этого, независимо была создана выборка объектов класса «используемая пашня», включающая более 5000 используемых полей в более чем 1000 районах агропояса России. Выборки создавались экспертами фотоинтерпретацией серий спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения с использованием дополнительных картографических материалов и привлечением данных районной статистики по площадям категорий земель.

Для оценки информативности исследуемых признаков использовалась метрика MDA (Mean decrease in accuracy), посчитанная в скользящем с шагом 250 км окне фиксированного размера (100×100 км). Автоматический анализ информативности признаков происходил, если оба класса были представлены в текущем окне более чем на

10 % от его площади. В результате анализа скользящим окном были покрыты все участки территория России, где описанная выборка была указанным образом представлена. Анализ информативности осуществлялся как независимо для каждого класса, так и совместно, а полученные в рамках отдельных окон значения суммировались. Было обнаружено, что информативность признаков заметно различается между классами (рисунок 2.4.1.1.)

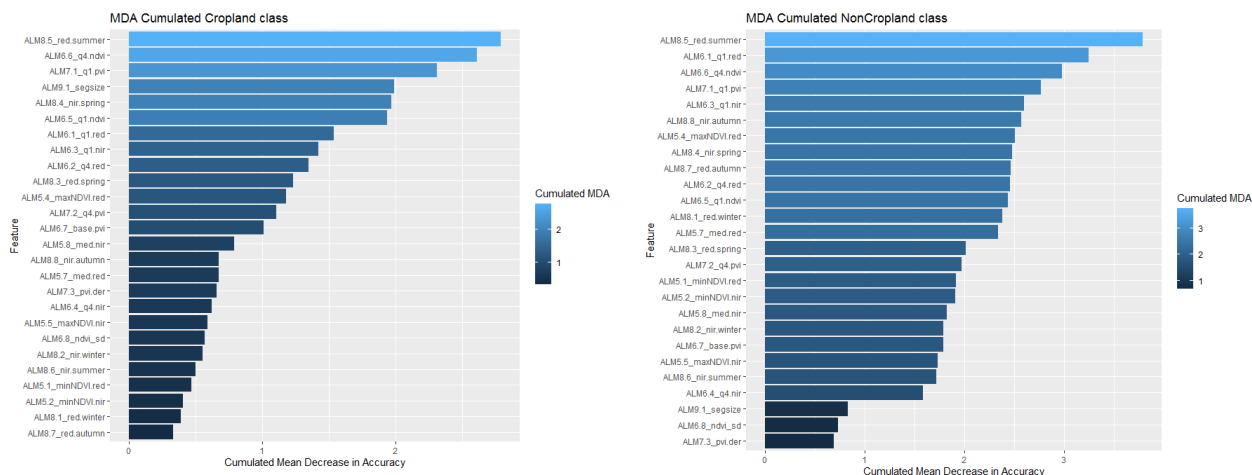


Рисунок 2.4.1.1 — Список исследуемых спектрально-временных признаков распознавания и их уровни значимости по убыванию на основе кумулятивного значения метрики MDA отдельно для класса «пашня» (слева) и «остальное» (справа)

Для распознавания используемой пашни для всей территории России использовался подход, предусматривающий итеративное расширение (экспансию) созданной для 105 исходных районов обучающей выборки на прилегающие административные районы при выполнении ряда критериев. Непосредственно распознавание, а также оценка информативности новых признаков осуществлялись на основе метода Random Forest, реализованного в программной среде R.

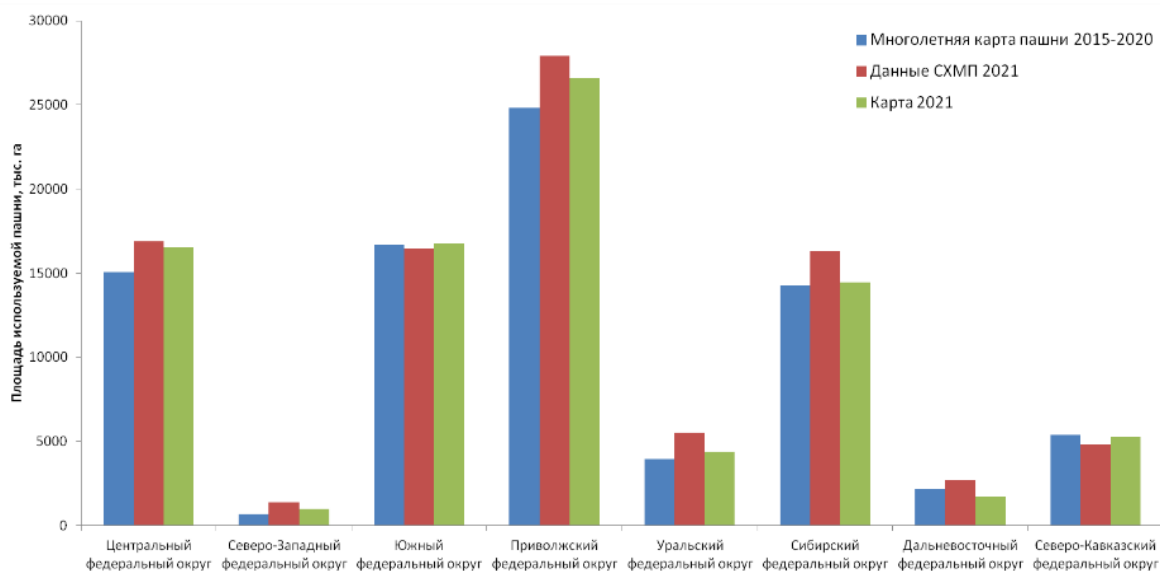


Рисунок 2.4.1.2 — Площади используемых пахотных земель на уровне федеральных округов согласно данным СХМП-2021, на основе карты, полученной с использованием многолетних временных рядов и карты, полученной на основе сезонных спектрально-временных признаков

После завершения экспансии была получена репрезентативная обучающая выборка для территории России, на основе которой и 15 наиболее информативных признаков было осуществлено распознавание используемых пахотных земель страны. Оценка точности полученных результатов проводилась расчётом площадей распознанной пашни в границах административно-территориальных образований и сравнением с данными сельскохозяйственной микропереписи 2021 г. (рисунок 2.4.1.2).

Оценка полученных результатов с использованием опорных данных указывает на повышение достоверности распознавания и уточнение границ используемой пашни на основе сезонных временных рядов высокого временного разрешения. В частности, для полученной в этом исследовании карты используемой пашни ошибка пропуска цели (omission) уменьшилась более чем в два раза (до 6,6 %) по сравнению со значением этой ошибки для карты пашни, полученной на основе шестилетних временных интервалов. Сравнение с данными сельскохозяйственной переписи 2021 г. о площадях используемой пашни указывает на улучшение совпадения спутниковой и наземной оценки практически по всех федеральных округах России.

2.4.2 Разработка методов автоматического картографирования используемой пашни на основе спутниковых данных КМСС

Построение временных серий ежедневных измерений КМСС-М уровня обработки L2A на территорию России впервые позволило использовать разработанные ранее для данных среднего пространственного разрешения Terra/Aqua (MODIS) методы и технологии распознавания используемой пашни и выявления границ рабочих участков полей, засеянных одной культурой. В частности, в рамках эксперимента по автоматизированному картографированию участков используемых пахотных земель на основе восстановленных временных серий ежедневных измерений КМСС-М были построены описанные в предыдущих разделах соответствующие спектрально-временные признаки распознавания для части территории Южного федерального округа РФ за 2020 г. В качестве обучающей выборки была использована бинарная карта используемых пахотных земель, полученная по данным MODIS за 2015–2020 г. наблюдений. Для распознавания пахотных земель был использован метод Random Forest. Разработанные для спутниковых данных MODIS методы сегментации временных серий были применены к сезонным временным сериям ежедневных безоблачных изображений КМСС-М (рисунок 2.4.2.1, справа).

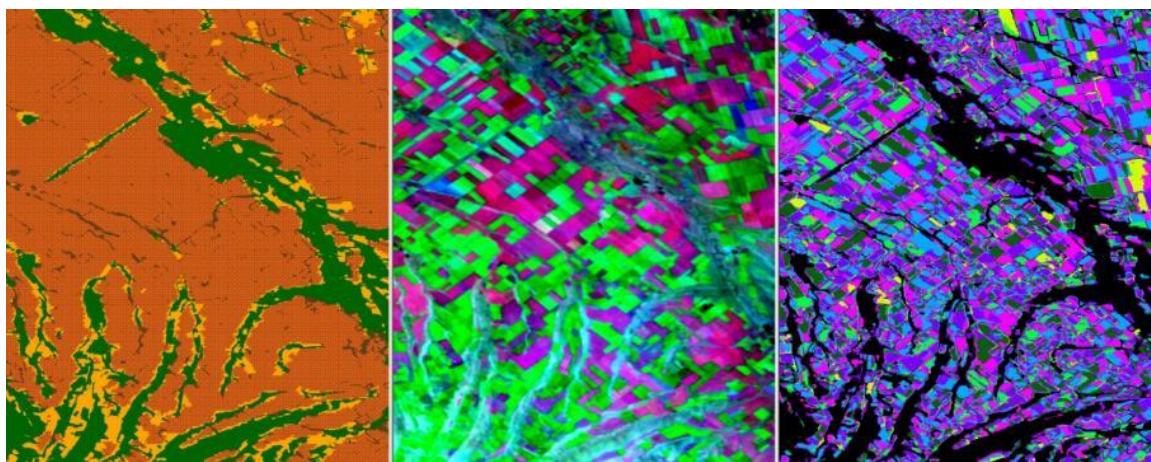


Рисунок 2.4.2.1 — Фрагмент результатов распознавания используемых пахотных земель по данным КМСС-М и MODIS (слева), разновременной синтез изображений атмосферно-скорректированных измерений КСЯ КМСС-М (в центре), границы полей по результатам сегментации сезонной временной серии изображений КМСС-М (справа) для части территории ЮФО

Сопоставление карты используемой пашни, полученной по данным MODIS (красный цвет на рисунке 2.4.2.1, слева), с новой картой пахотных земель, полученной по данным КМСС-М (оранжевый цвет на рисунке 2.4.2.1, слева), указывает на возможности выявления небольших полей и уточнения границ участков используемой пашни. Получение такого рода продуктов на основе спутниковых данных КМСС-М демонстрирует возможность регулярного распознавания используемых пахотных земель и культур, оценки состояния сельскохозяйственной растительности и других типов земного покрова с высоким пространственным разрешением на большие территории с использованием имеющихся и перспективных подходов.

Таким образом, подготовленные с помощью разработанной ранее в ИКИ РАН технологии гармонизированные временные ряды допривязанных, калиброванных и атмосферно-скорректированных наблюдений прибором КМСС-М позволили задействовать автоматические алгоритмы распознавания и анализа растительного покрова, обеспечив успешное автоматическое построение высокодетальной карты используемых в 2020 г. пахотных земель на территории Южного федерального округа по данным КМСС-М с пространственным разрешением 60 м.

2.4.3 Исследование пространственно-временной динамики выгоревших площадей в пойменных ландшафтах засушливой зоны России

Целью работы является анализ закономерностей динамики выгоревших площадей в пойменных ландшафтах на примере Астраханского заповедника, расположенного в дельте Волги. Он состоит из трех кластеров: «Дамчикского» (западный), «Трёхизбинского» (в центральной части дельты) и «Обжоровского» (восточный). Кроме ядра и охранной зоны этой ООПТ анализируется прилегающая территория в 20-километровом радиусе. Большая часть территории исследований представлена водно-болотными угодьями с продуктивностью 4–7 т/га сухой массы в год.

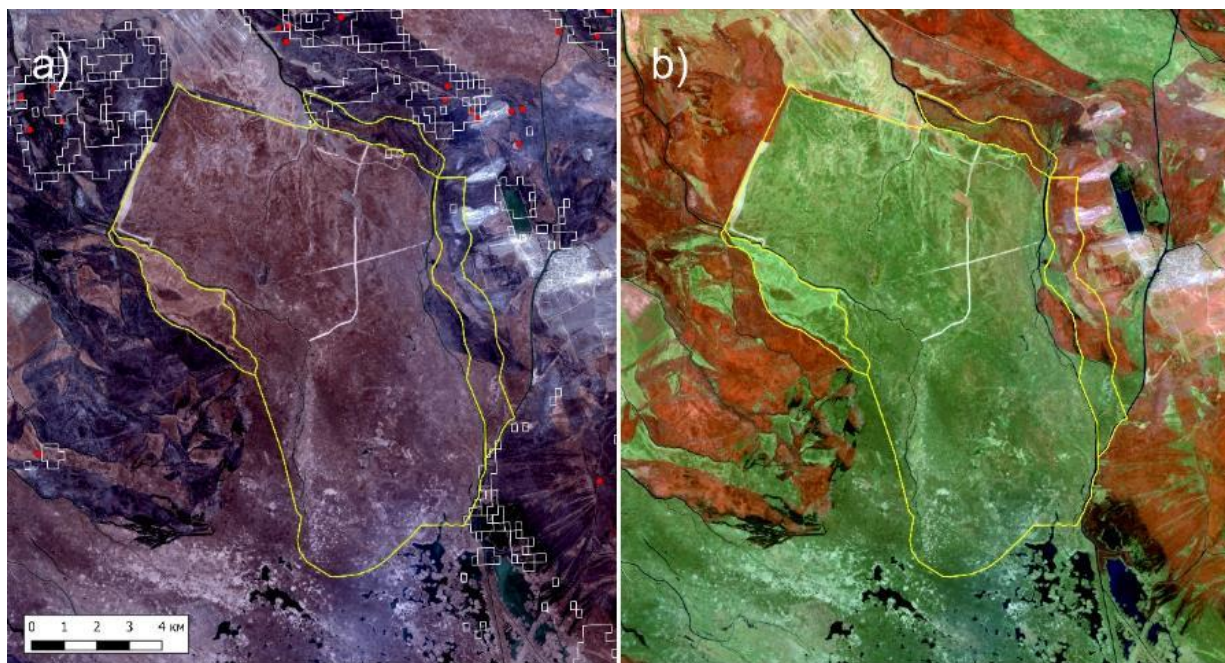


Рисунок 2.4.3.1 Изображения выгоревших площадей в дельте Волги, спутник Sentinel-2A. Трёхизбинский участок Астраханского заповедника: 2 марта 2019 г.: *a* — комбинация 4-3-2; *b* — комбинация 12-8-3; жёлтый контур — границы ООПТ, белый контур — выгоревшая площадь по данным FireCCI51, красные точки — очаги активного горения FIRMS

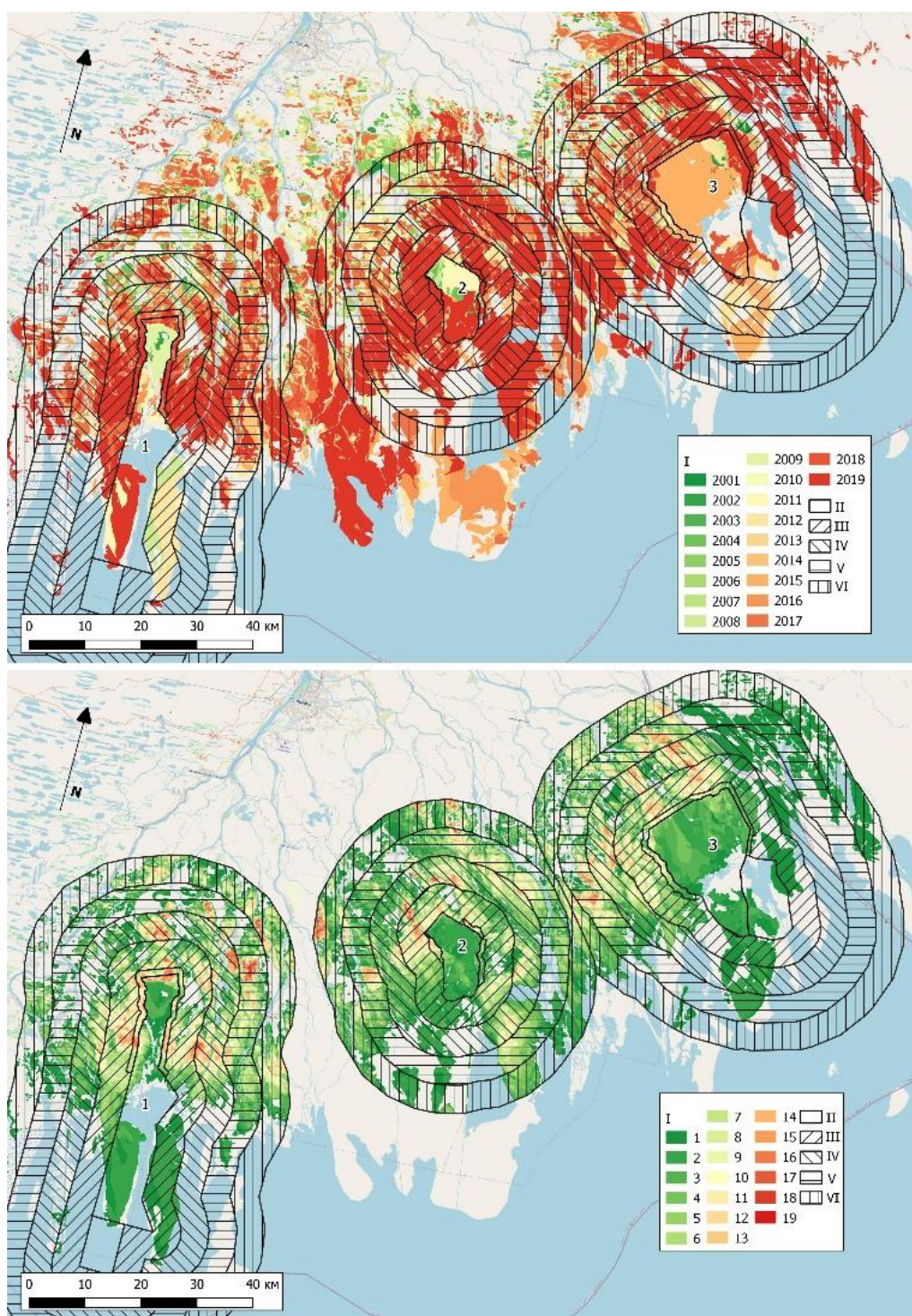


Рисунок 2.4.3.2 — Пространственно-временное распределение пожаров за 2001–2019 гг. на территории ГПБЗ «Астраханский» (кластеры заповедника: 1 — Дамчикский, 2 — Трёхизбинский, 3 — Обжоровский), I — год пожара, II — ООПТ, III — зона 5 км, IV — зона 10 км, V — зона 15 км, VI — зона 20 км) и количество пожаров за 2001–2019 гг. на территории ГПБЗ «Астраханский»

Идентификация выгоревших площадей основывалась дешифрировании RGB-композиций спектрально-временных спутниковых изображений Landsat-5 TM, 7 ETM+, 8 OLI и Sentinel-2A, -2B за 2001–2019 гг. На первом этапе были определены сезонные закономерности пожарного режима ландшафтов на основе анализа архива FIRMS: около 80 % происходят в весенний период. В работе использовались как цветные RGB-композиции в комбинации спектральных каналов «естественные цвета» (каналы 4, 3 и 2 у

Sentinel-2 и Landsat-8; каналы 3, 2 и 1 у Landsat-5, -8), так и комбинации с включением ближнего (8-й канал Sentinel-2, 5-й канал Landsat-8 и 4-й канал Landsat-5, -7) и коротковолнового (12-й канал Sentinel-2, 7-й канал Landsat-5, -7, -8) инфракрасных каналов (рисунок 2.4.3.1).

Всего идентифицировано 9624 пожара общей площадью 2,1 млн га без учёта повторяемости, в том числе 583 пожара общей площадью 207 тыс. га, затронувших ядро или охранную зону заповедника. Для Астраханского заповедника характерно 30 пожаров в год, суммарная выгоревшая площадь в среднем составляет 10,9 тыс. га или около 15 % территории (рисунок 2.4.3.2). Наиболее подверженный пожаров участок расположен в охранной зоне Дамчикского участка и был пройден огнём 18 раз за последнее двадцатилетие. Всего за период исследований пройдено огнём 80,1 % территории заповедника, а на Дамчикском и Трехизбинском участках доля выгоревшей площади превышает 95 %, а охранная зона Дамчикского участка выгорела полностью.

В ядре и охранной зоне заповедника доля единожды пройденной огнём площади составляет 21 %, в окрестностях 5–15 км эта величина сопоставима: 20–26 %. Существенно отличается доля участков, пройденных огнём более трёх раз: на ООПТ это 24 % территории, в том числе 6,8 % горело 10 и более раз. В то время как в 5- и 10-километровом радиусе 50–52 % горело более трёх раз и 15–17 % — 10 и более раз. Это свидетельствует об антропогенных причинах возгораний, поскольку на территории заповедника запрещена хозяйственная деятельность, а его посещение строго регламентировано. Тем не менее 19,4 % всех случаев пожаров начинались внутри ядра или охранной зоны ООПТ.

Сопоставление полученных карт выгоревших площадей с данными детектирования активного горения FIRMS показало, что 76 % от общего количества и 50 % площади пожаров в дельте Волги не охвачены этим продуктом. Это связано с относительно низкой температурой горения, быстрым движением фронта пожара, быстрым остыванием гарей, а также заливанием водой в половодье. По этой причине требуется дальнейшее совершенствование алгоритмов автоматизированного определения выгоревших площадей в условиях нелесных ландшафтов речных пойм.

2.4.4 Моделирование динамики площадей водных объектов засушливой зоны России

В 2020 г. на юге европейской части России сложилась неблагоприятная ситуация с наполнением водохранилищ: Краснодарского, Цимлянского, а также всех водохранилищ полуострова Крым. В 2021 г. проводились работы по оценке динамики площадей водохранилищ Крыма и водоёмов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги. Разработаны уравнения связи площадей и объёмов водохранилищ, которые могут использоваться для оценки водности в условиях недостатка или недоступности данных гидрологических наблюдений.

В работе использовались спутниковые изображения пространственного разрешения 10–30 м, получаемые с космических аппаратов программы Landsat (Landsat-5 TM с 1984 по 2010 г., Landsat-7 ETM+ с 1999 по 2012 г. и Landsat-8 OLI) и Sentinel-2 (2015–2020). Среди различных источников открытых данных спутниковые изображения Landsat имеют достаточно высокое пространственное разрешение (30 м) при максимальном временном охвате. Изображения Sentinel-2 были приведены к разрешению 30 м. Выделение водного зеркала основано на контролируемой классификации многоспектральных спутниковых изображений с включением данных, получаемых в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах спектра. В этих диапазонах находятся максимум поглощения водой и максимум отражения растительного покрова, благодаря этому прибрежная растительность достаточно чётко отделяется от водной поверхности. После классификации границы водных объектов проходят экспертную верификацию по спутниковым цветовым RGB-композициям с включением

панхроматического канала Landsat, и в случае необходимости границы корректируются вручную (например, в зоне мелководья и свежих осушек). Далее границы полученных полигональных объектов проходят генерализацию для сглаживания их границ, а также устраняются ошибки геометрии. Поскольку площадь водохранилищ связана с их объёмами и уровнями, то возможно их определение через площадь поверхности, определяемой по спутниковым данным, с помощью аппроксимации.

Всего проанализировано около 400 безоблачных изображений Landsat и около 100 — Sentinel-2A, -2B за май – ноябрь 1984–2020 гг. из общего архива примерно в 2900 и 1100 изображений соответственно. Большая часть водохранилищ (22 из 23) охватываются одним изображением Landsat (path/row 177/29), западная часть полуострова также отображается на изображениях path/row 178/29. Только Сокольское водохранилище не попадает на указанные изображения, поэтому оно в данной работе не анализировалось. На основе обработки спутниковых изображений определены максимальные и минимальные площади водного зеркала крымских водохранилищ (таблица 2.4.4.1, рисунок 2.4.4.1). Полученные значения максимальных площадей несколько отличаются от проектных (при НПУ) как в меньшую, так и в большую стороны. Это может свидетельствовать о превышении НПУ в отдельные периоды.

Таблица 2.4.4.1 — Максимальная и минимальная площади водохранилищ Крыма ДЗЗ

№	Название	Площадь по ДЗЗ, га/% от НПУ		Дата наблюдения по ДЗЗ		Площадь при НПУ, га
		Максимум	Минимум	Максимум	Минимум	
Естественного стока						
1	Альминское	83,9/98	21,4/25	10.05.1997	22.08.2012	86,0
2	Аянское	40,2/96	2,1/5	10.05.1997	22.08.1994	42,0
3	Балановское	49,8/112	11,3/28	10.05.1997	03.07.2020	40,7
4	Бахчисарайское	100,1/101	12,6/13	10.05.1997	21.09.2020	99,5
5	Белогорское	212,3/94	52,9/24	10.05.1997	03.10.1986	225,0
6	Загорское	161,4/103	14,4/9	22.09.1997	09.10.1994	156,0
7	Изобильненское	61/100	5,1/7	10.05.1997	09.10.1994	61,0
8	Кутузовское	10,1/107	0,5/5	10.05.1997	11.09.1984	9,4
9	Льговское	24,1/87	0,4/1	26.06.1998	03.10.1986	27,8
10	Партизанское	212,1/96	35,2/16	22.09.1997	23.09.1994	220,0
11	Симферопольское	309/97	58/18	10.05.1997	09.10.1994	317,0
12	Старокрымское	41,9/97	4,7/11	30.08.1997	03.10.1986	43,0
13	Счастливенское	71,5/102	7,7/11	10.05.1997	09.10.1994	70,0
14	Тайганское	197,4/100	13/7	10.05.1997	09.10.1994	196,8
15	Чернореченское	588,8/97	50,8/8	10.05.1997	22.08.1994	604,0
Наливные						
16	Зеленоярское	39,7/78	11,2/22	14.09.1988	21.06.2018	51,0
17	Керченское	245,6/91	110,2/41	10.06.1988	09.09.2018	270,0
18	Межгорное	408,4/102	15,7/4	08.10.1997	08.11.2020	400,0
19	Самарли	128,1/95	78,4/58	16.07.2001	04.05.2018	135,0
20	Сокольское	–	–	–	–	65,0
21	Феодосийское	216,3/89	107/44	03.10.1986	16.10.2020	242,0
22	Фронтное	635,6/99	131,1/20	04.10.2001	14.09.2020	645,0
23	Юзмак	172,5/81	65,7/31	15.09.1997	16.10.2020	212,0

Ввиду низкой доступности данных регулярных гидрологических наблюдений (в частности, наблюдений уровней воды), важную роль в мониторинге водных ресурсов крымских водохранилищ могут играть данные ДЗЗ. Зная связь площадей и объёмов водохранилищ, можно определить объём по актуальным спутниковым изображениям. Для этого необходимо сопоставить известные объёмы водоёмов (рисунок 2.4.4.2) и соответствующие им площади (рисунок 2.4.4.3), а затем аппроксимировать полученные кривые.

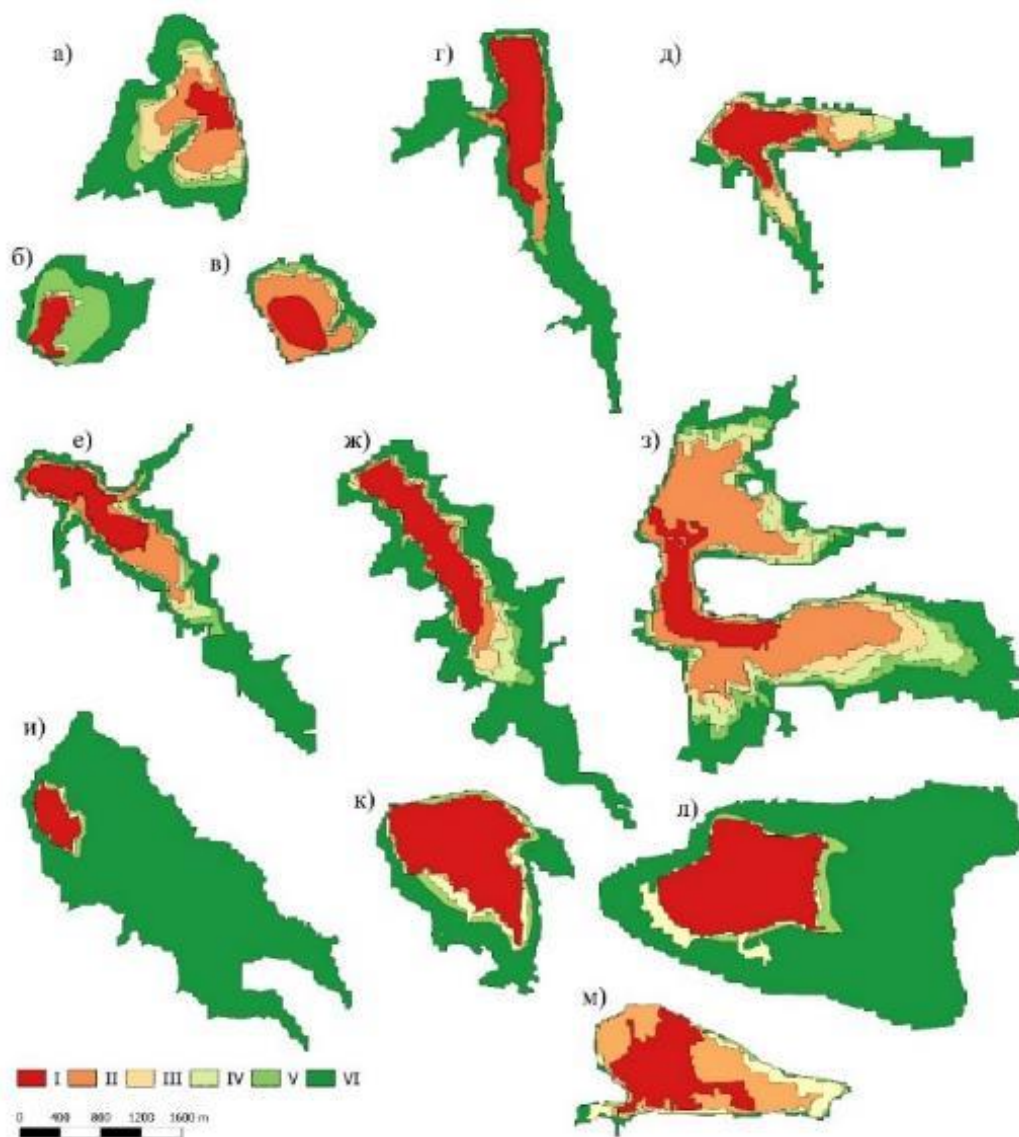


Рисунок 2.4.4.1 — Схемы водного зеркала водохранилищ: *а* — Тайганское; *б* — Бахчисарайское; *в* — Альминское; *г* — Белогорское; *д* — Загорское; *е* — Партизанское; *ж* — Симферопольское; *з* — Чернореченское; *и* — Межгорное; *к* — Феодосийское; *л* — Фронтное; *м* — Юзмак; I — минимальная площадь, II — 08.11.2020, III — 14.09.2020, IV — 12.07.2020, V — 01.05.2020, VI — максимальная площадь)

В таблице 2.4.4.2 представлены уравнения связей объёмов и площадей наиболее крупных водохранилищ Крыма, полученные аппроксимацией экспоненциальным уравнением и полиномом второй степени, а также коэффициенты корреляции при линейной связи. Для Симферопольского водохранилища наиболее тесная связь между площадью и объёмом характерна для линейной зависимости ($R = 0,97$), для остальных предпочтительней полином второй степени (только у Тайганского для обеих зависимостей R^2 практически не отличается). Поскольку в ежегодных отчётах о состоянии и охране

окружающей среды Республики Крым приводятся данные по объёмам по кварталам, а площади определялись с разбегом в 1–2 мес, то возможны расхождения в датах наблюдения этих величин, что может вносить погрешность. При наличии точных объёмов на даты спутниковых наблюдений возможно более точное определение уравнений связи площадей и объёмов. Кроме того, из-за накопления наносов в чашах водохранилищ реальные объёмы могли уменьшиться по сравнению с проектными при одних и тех же уровнях.

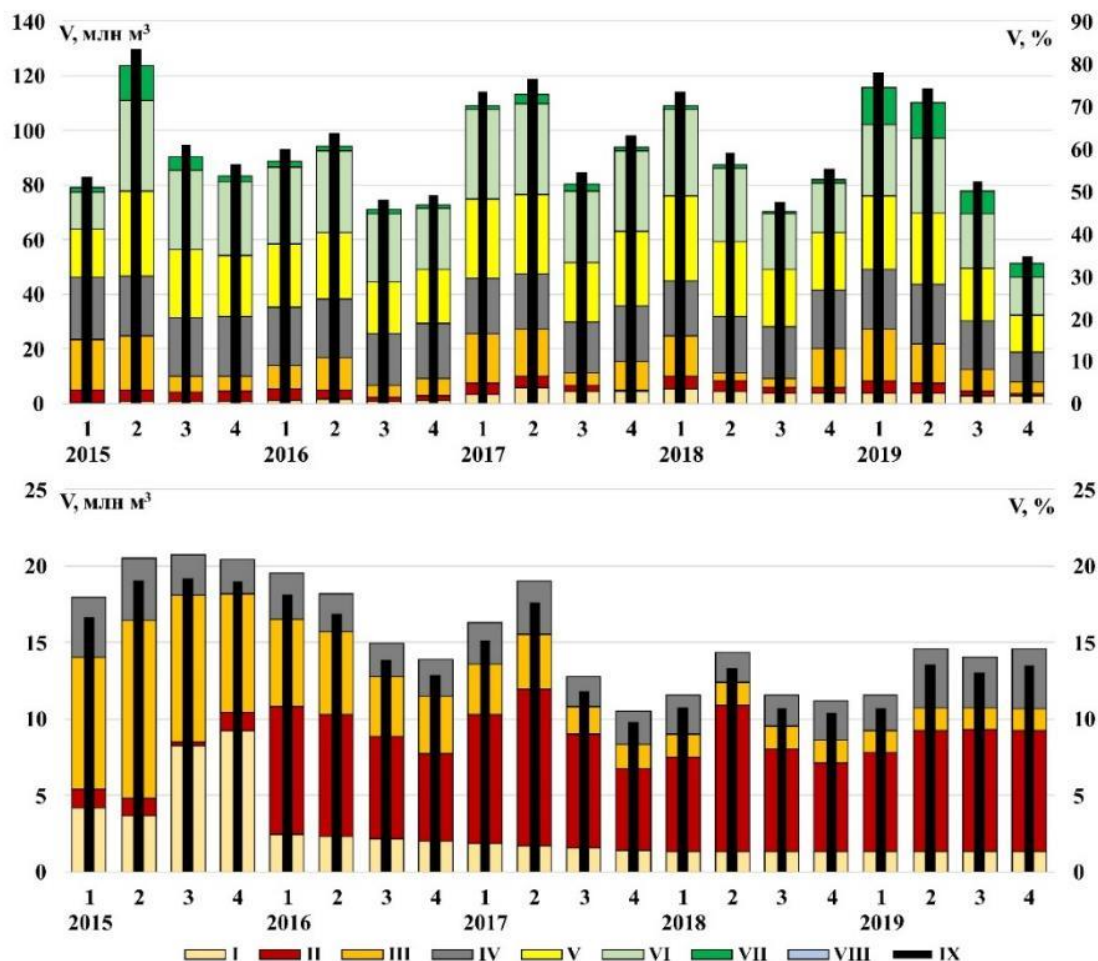


Рисунок 2.4.4.2 — Динамика объёмов водохранилищ Республики Крым естественного стока (вверху, I — Альминское, II — Бахчисарайское, III — Белогорское, IV — Загорское, V — Партизанское, VI — Симферопольское, VII — Тайганское, VIII — доля объёма от НПУ) и наливных (внизу, I — Межгорное, II — Феодосийское, III — Фронтное, IV — Юзбак, V — доля объёма от НПУ) в 2015–2019 гг., 1–4 — кварталы

Таким образом, спутниковые наблюдения площадей водохранилищ могут быть дополнением к традиционным наблюдениям уровней на гидрологических постах. На водоёмах без постоянного гидрологического мониторинга анализ площадей по спутниковым изображениям является единственным вариантом непрерывных наблюдений и ретроспективного анализа. Периодичность спутниковой съёмки высокого разрешения, достаточного для идентификации водного зеркала изучаемых водохранилищ, составляет 7–16 дней. Часть изображений будут непригодны для использования из-за облачности, но эту проблему помогут решить данные микроволновой спутниковой радиометрии, для которой облака не являются препятствием. Например, радарные данные Sentinel-1 находятся в открытом доступе и на территорию Крыма обновляются с периодичностью 2–4 дня, охват с апреля 2014 г. Для этого необходимо провести калибровку и разработать подход идентификации водного зеркала в условиях полуострова Крым на основе

радарных данных. Разработанные карты водного зеркала могут стать опорной выборкой для обучения алгоритма классификации спутниковых радарных данных. Спутниковые изображения могут обрабатываться автоматически, что позволит проводить мониторинг без участия человека.

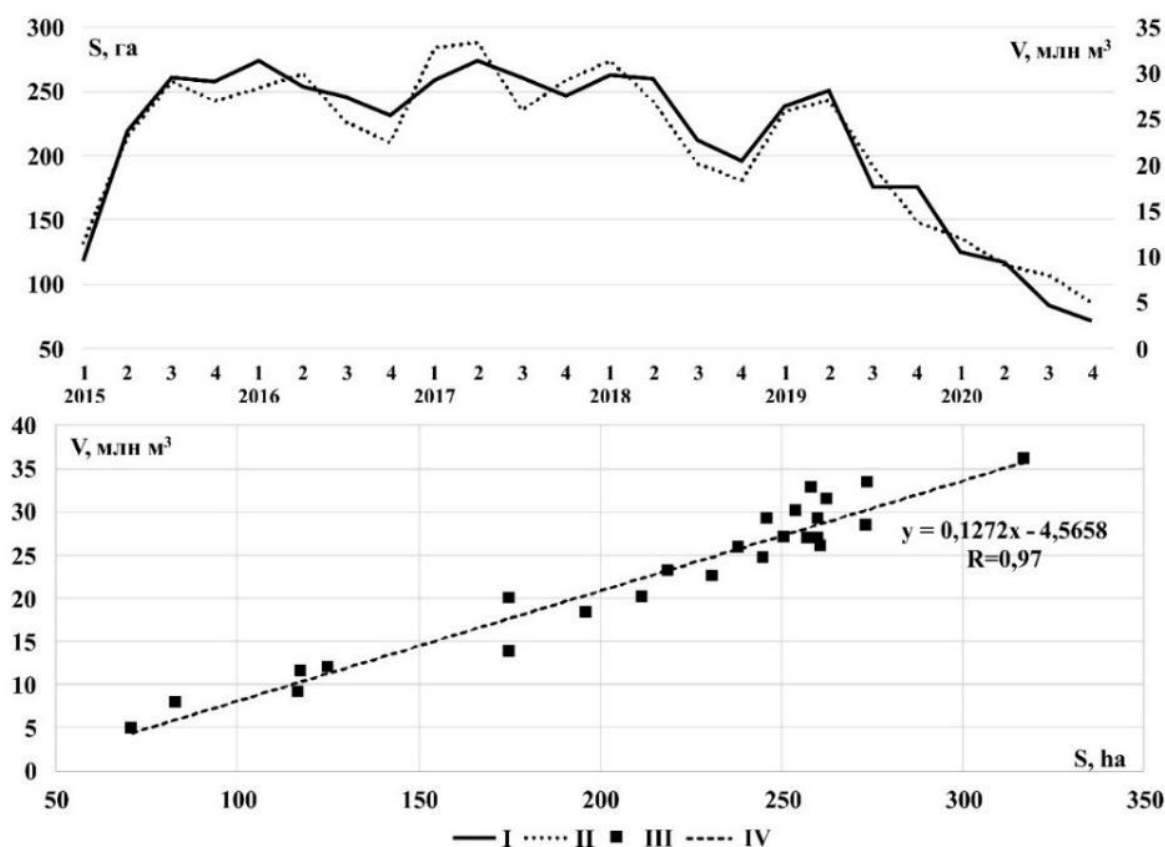


Рисунок 2.4.4.3 — Динамика площади и объёмов Симферопольского водохранилища в 2015–2020 гг. (вверху) и связь объёма и площади водохранилища (внизу), I — площадь, II — объём, III — фактические значения площади и объёма, IV — линейная аппроксимация, 1–4 — кварталы

Таблица 2.4.4.2 Связь площадей и объёмов водохранилищ

Название	R	Экспонента		Полином	
		Уравнение	R ²	Уравнение	R ²
Естественного стока					
Альминское	0,96	0,087e ^{0,0543x}	0,83	0,0004x ² + 0,0857x – 3,5897	0,92
Бахчисарайское	0,93	0,105e ^{0,046x}	0,66	0,0009x ² – 0,0155x – 0,3315	0,62
Белогорское	0,89	3,722e ^{0,0091x}	0,55	–2·10 ^{–5} x ² + 1,1222x – 1,9297	0,41
Загорское	0,84	8,694e ^{0,0071x}	0,13	0,0018x ² – 0,314x + 31,6010	0,33
Партизанское	0,85	5,250e ^{0,0094x}	0,66	–0,0009x ² + 0,5251x – 36,259x	0,73
Симферопольское	0,97	6,814e ^{0,0055x}	0,73	0,0001x ² + 0,0755x + 1,7476	0,74
Тайганское	0,90	0,826e ^{0,0151x}	0,56	0,0003x ² + 0,001x + 0,9513	0,57
Наливные					
Межгорное	0,97	1,077e ^{0,0099x}	0,99	0,0002x ² + 0,0057x + 0,998	0,98
Феодосийское	0,88	2,813e ^{0,007x}	0,59	0,0003x ² – 0,0463x + 7,7057	0,70
Фронтное	0,90	0,834e ^{0,0062x}	0,88	0,0001x ² – 0,0172x + 2,6842	0,89
Юзмак	0,79	1,220e ^{0,0074x}	0,52	0,0002x ² – 0,026x + 2,6083	0,85

Также проводились исследования динамики площадей водоёмов западных подступных ильменей (ЗПИ) дельты Волги. На первом этапе были выявлены водоёмы по

состоянию на 2020 и 1991 гг., в последнем из которых наблюдалось самое высокое половодье за последние 30–40 лет (рисунок 2.4.4.4). Далее для водоёмов, высохших к 2020 г., были определены годы, в которые они были наполнены в последний раз. Расходы воды в створе Волгоградского гидроузла приведены согласно литературным данным и официальному сайту РусГидро (<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer>). Расходы и уровни воды по гидрологическим постам дельты Волги отсутствуют в свободном доступе, поэтому использовались данные для Волгоградского гидроузла. Безусловно, это снижает точность оценки связи между гидрологическими условиями в дельте и площадями ЗПИ, тем не менее, уровень воды в дельте Волги также связан с расходами через Волжскую ГЭС.

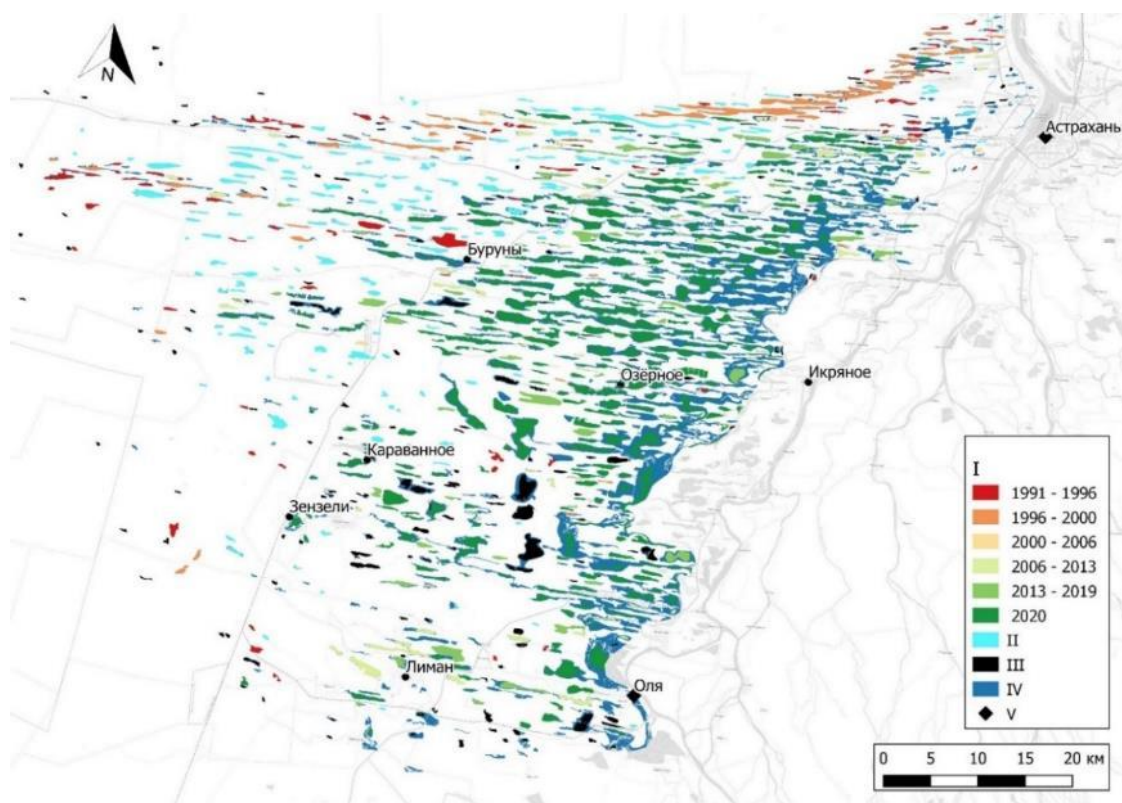


Рисунок 2.4.4.4 — Изменение площадей ильменей в период 1991–2020 гг. (I — последний год наполнения, II — сухие ильмени и солончаки на 1991 г., III — водоёмы, существующие в 2020 г., которых не было в 1991 г., IV — максимальная площадь в половодье 1993–1995 гг., V — гидрологические посты)

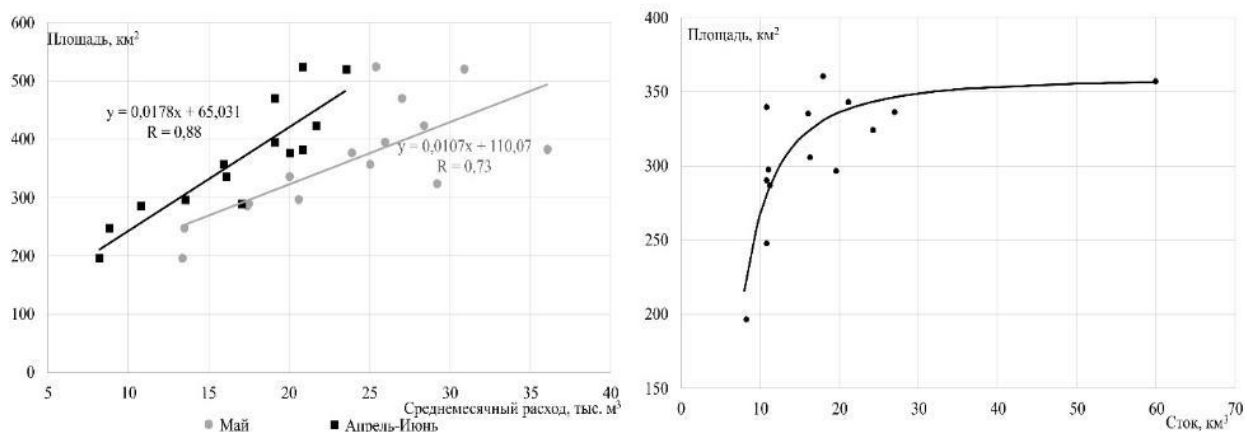


Рисунок 2.4.4.5 — Связь площади ЗПИ, среднемесячных расходов половодья (слева) и объёмом стока за период максимальных расходов воды в половодье (справа)

Обводнение ЗПИ зависит от половодья на Волге, причём важны не только показатели максимальных расходов воды, но и длительность периода максимальных расходов, определяющая уровень воды и сток (рисунок 2.4.4.5). Так коэффициент корреляции между площадью водоёмов и средними расходами мая (период максимального сброса через Волжскую ГЭС) ниже, чем со средними расходами всего периода половодья (апрель – июнь). Это связано с большой протяжённостью ЗПИ: запаздывание подъёма воды в центральной части района по сравнению с руслом Волги составляет 1–2 недели (с. Озёрное), а в западной части — 3–4 недели (с. Буруны) в зависимости от уровня воды в Волге перед началом пика половодья. Поэтому краткосрочное повышение расходов в половодье не приводит к обводнению центральной и западной частей ЗПИ.

Тенденции изменения уровней и продолжительности половодья на Нижней Волге последних десятилетий направлены на их снижение. Причинами этого являются как климатические факторы (частые зимние оттепели, недостаточное промерзание почвы, сезонное перераспределение осадков), так и антропогенные (зарегулирование стока, несоблюдение рекомендаций по организации весенних пусков через каскад плотин). Кроме того, на обводнение ЗПИ влияет и падение уровня Каспия. Это не только снижает подпор водотоков дельты Волги, но и способствует их врезанию. В силу этих причин следует ожидать дальнейшей деградации ЗПИ. Спутниковый мониторинг является единственным инструментом оперативных наблюдений и ретроспективного анализа многолетней и сезонной динамики площадей водоёмов ЗПИ, так как гидрологические посты в Западном ильменно-бугровом районе отсутствуют.

Заключение

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

- 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 экосистем;
- 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.

При этом одними из наиболее значимых результатов, полученных в рамках данного направления, стали:

- В результате выполненных исследований и разработок в области предварительной обработки спутниковых данных для мониторинга растительного покрова получили развитие методы восстановления временных серий мультиспектральных унифицированных дистанционных характеристик земной поверхности по данным MODIS, VIIRS, Sentinel-2 на территорию России. Разработанные методы позволяют формировать безоблачные композитные изображения разной периодичности и сезонов для решения ряда задач картографирования и мониторинга состояния растительного покрова.
- В результате работ, направленных на восстановление биофизических параметров растительности, улучшены алгоритмы оценки проективного покрытия древесного

полога и индекса листовой поверхности, предложен метод разделения последнего на фракции древостоя и подстилающей поверхности.

- Получены результаты исследования спектрально-отражательных характеристик травянистой растительности при пирогенном воздействии, которые могут стать основой разработки автоматизированных алгоритмов детектирования выгоревших площадей в аридной зоне России.
- Для дистанционной оценки состояния и мониторинга сельскохозяйственной растительности проведено картографирование пахотных земель России на основе сезонных серий данных MODIS и KMCC. На основе спутниковых данных был выполнен ретроспективный анализ многолетней и сезонной динамики площадей водных объектов и смоделированы зависимости между площадью водного зеркала и их объёмом для оперативной оценки запасов воды в засушливой зоне России.

Таким образом материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Биосфера» в 2021 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 3 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 тепломассообмена в системе глобальной циркуляции атмосферы Земли на синоптических и климатически значимых масштабах, в том числе, переноса из Атлантики в Арктику и из тропической зоны в антарктические регионы для изучения климатических и погодных изменений арктической и антарктической зон атмосферы Земли. Результаты, полученные по данному направлению, описаны в разделе 3.1 настоящей главы;
- Развитие методов диагностики крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений. Результаты, полученные по данному направлению, описаны в разделе 3.2 настоящей главы.

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2021 г. результаты также изложены в следующих публикациях [3, 7, 8, 10, 24, 27, 36, 45, 50, 51, 53, 54, 55, 63–66, 74, 79–81, 86, 98, 99, 101–102, 107, 108, 113, 114, 116, 121, 122, 126, 128, 143].

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

Следует особо отметить, что потепление, происходящее в Арктике, повлекло за собой гидрологические и климатические изменения, которые проявляются: в сокращении площадей ледяного покрова; позднем ледоставе и раннем вскрытии речного, озёрного и морского льда; уменьшении сезона снежного покрова; интенсивном таянии ледников; уменьшении количества и суммарной площади термокарстовых озёр; более раннем оттаивании и более позднем замерзании тундры и т.п. В результате происходящих изменений резко сокращается площадь арктического ледяного покрова, особенно в летний период; увеличивается частота и мощность наводнений, вызванных обильными осадками и таянием снега; активизируются процессы деградации вечной мерзлоты и тундровой растительности; наблюдаются более сильное прогревание поверхности тундры, возрастание скорости испарения, поступление в атмосферу дополнительного количества водяного пара и метана, способствующих увеличению парникового эффекта. В связи со значительными трансформациями, происходящими в криосфере Земли, большое внимание уделяется анализу изменений характеристик снежного покрова и морского льда, а также гидрологическим параметрам территорий российской Арктики и Субарктики.

Снег — ключевой компонент энергетического баланса Земли, окружающей среды и основной источник пресной воды во многих регионах. Сезонный снег, как правило, покрывает до 30 % площади северного полушария. Основной характеристикой снежного покрова выступает его снегозапас или водный эквивалент (*англ.* Snow water equivalent). Он представляет собой толщину слоя воды (в миллиметрах или сантиметрах), образующейся при растапливании исходного количества снега.

Морской лёд играет важную роль в климатической системе Земли и оказывается одним из важнейших индикаторов климатических изменений. Информация о ледовых условиях играет значительную роль для решения ряда практических и научных задач:

обеспечения судоходства, добычи полезных ископаемых на шельфе, оценки теплообмена между океаном и атмосферой и т.д. Важными характеристиками морского льда являются сплочённость (отношение площади льдин в зоне, где они распределены сравнительно равномерно, к общей площади этой зоны) и ледовитость (процент площади, занятой льдом любой сплочённости по отношению к общей площади региона).

Оперативная информация о гидрологических реакциях на климатические и экологические изменения в Арктическом регионе может быть получена только на основе использования методов дистанционного зондирования. Среди спутниковых данных при изучении изменчивости ледяного и снежного покрова особое место уделяется микроволновой радиометрии. Во-первых, из-за наиболее длинного ряда данных — первые результаты были получены в конце 1978 г. Во-вторых, данные спутниковой микроволновой радиометрии ежедневные, всепогодные и охватывают всю территорию Земли на широтах выше 58° два раза в сутки.

Для расчёта общей сплочённости и площади морского льда, а также снегозапаса снежного покрова по значениям яркостной температуры поверхности, которую определяют спутниковые микроволновые радиометры, уже создано и используется большое число алгоритмов, которые постоянно совершенствуются. Однако при определении общей площади морского ледяного покрова разница в значениях, полученная по разным алгоритмам, может достигать 1,3 млн км², тогда как графики динамики площади ледяного покрова показывают её изменение от 0,534 до 0,978 млн км² за десятилетний период в зависимости от алгоритма. То есть, ошибки данных спутниковой микроволновой радиометрии, по которым определяется площадь морского льда, сопоставимы с межгодовыми изменениями площади льда в Арктике. Ошибка в определении снегозапасов по данным спутниковой микроволновой радиометрии составляет 30–100 % и более в зависимости от сезона и рассматриваемого региона. Это обусловлено, главным образом, разнообразием ландшафтов, изменчивостью структуры снега, его плотности, а также характерного размера снежных кристаллов.

Таким образом, необходимы серьёзные исследования для выявления комплекса причин, приводящих к неоднозначности в определении площади морского льда в летний период, а также установлении факторов, вызывающих большие ошибки при расчёте снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Поэтому в данном разделе в п. 3.1.3 и 3.1.4 уделено особое внимание данному вопросу.

3.1.1 Анализ вертикально интегрированных потоков атмосферного водяного пара по данным спутникового радиотепловидения, метеозондов и реанализа

Атмосферная адвекция водяного пара — один из важнейших компонентов 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. Средняя скорость этого переноса на климатических масштабах времени определяется параметрами глобальной атмосферной циркуляции. В свою очередь климатические изменения способны вызывать изменения этих параметров, ослабляя, усиливая и (или) деформируя циркуляционные ячейки. Так, на протяжении нескольких последних десятилетий анализ дистанционных данных выявляет эффект «расширения тропиков», не вполне адекватно воспроизводимый климатическими моделями. Поэтому крайне актуальной задачей дистанционного зондирования Земли оказывается уточнение и детализация картины глобальной адвекции атмосферной влаги и её регулярный мониторинг. Другим интенсивно развиваемым направлением исследований становится поиск ключевых условий зарождения и развития катастрофических процессов в земной атмосфере. Появление теоретических концепций самоорганизации спиральной турбулентности в устойчивые крупномасштабные структуры существенно повысило требования к знанию пространственно-временного распределения основных геофизических параметров атмосферы.

Для прямого расчёта горизонтального потока водяного пара (или скрытого тепла) в точке с заданными географическими координатами необходимо взять интеграл произведения вертикальных профилей влажности и скорости ветра от поверхности до верхней границы атмосферы. Поэтому наиболее естественным представляется использование измерений метеозондов, содержащих всю необходимую информацию. Однако их данные скудны по пространству и времени. Более полную картину даёт реанализ, усваивающий эти и всевозможные другие данные. Но статистически репрезентативная проверка реаналитических оценок потоков водяного пара вдали от постоянно действующих метеостанций затруднена. Предложенный и разработанный ранее метод спутникового радиотепловидения позволяет восстанавливать вертикально интегрированные адвективные потоки водяного пара по спутниковой СВЧ-радиометрии.

В представленных исследованиях впервые выполнены и продемонстрированы результаты прямых сопоставлений длинных временных рядов зональных вертикально интегрированных потоков водяного пара по данным радиозондов, реанализа и спутникового радиотермического наблюдения. Для сопоставления выбирались расчётные потоки в узлах сеток спутникового радиотепловидения и реанализа, максимально близких к расположению метеостанций. В случае, когда расчёт по методу спутникового радиотепловидения в ближайшем узле был невозможен из-за влияния суши, вместо него выбирался один из ближайших соседних узлов, где расчёт мог быть выполнен. Координаты метеостанций и соответствующих узлов сеток спутникового радиотепловидения и реанализа приведены в таблице 3.1.1.1 и на рисунке 3.1.1.1. Выполнялось сопоставление зональных компонент потоков, так как они в среднем в несколько (до пяти) раз превосходят меридиональные потоки, и следует ожидать больших вариаций этих потоков, разрешаемых каждым из методов.

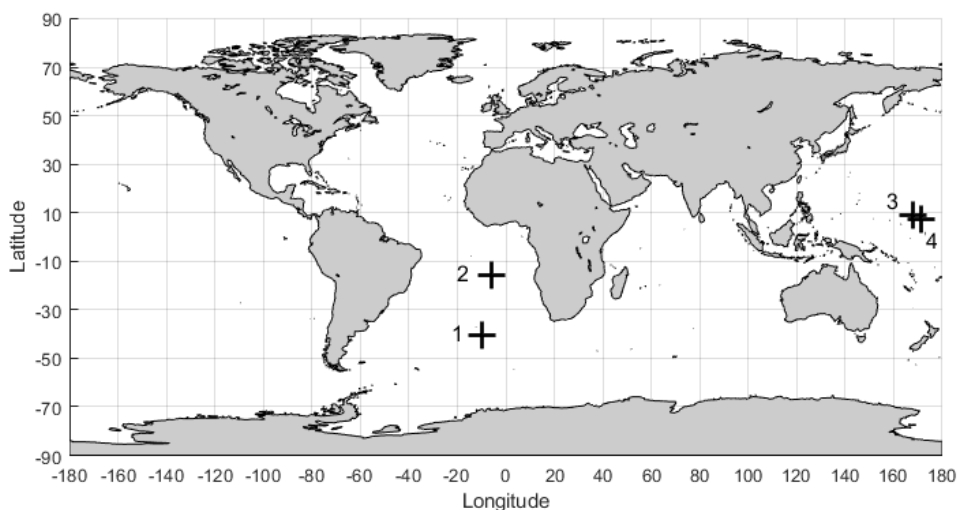


Рисунок 3.1.1.1 — Расположение выбранных метеостанций, отмеченных знаком «+». Цифры рядом соответствуют номерам в таблице 3.2.3.1

Таблица 3.1.1.1 — Координаты отмеченных метеостанций (MS) и узлов сетки реанализа (RA) и спутникового радиотепловидения (SR)

№	MS			RA		SR	
	ID	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.
1	SHM00068906	–40,35	29,88	–40,25	–10,00	–40,38	–9,87
2	SHM00061901	215,94	–5,67	–16,00	–5,75	–15,88	–5,62
3	RMM00091366	8,73	167,73	8,75	167,75	8,38	167,88
4	RMM00091376	7,07	171,29	7,00	171,25	6,87	171,38

Были построены непрерывные временные ряды расчётных величин потоков за 2015–2019 гг. Для совмещения по времени данных всех источников и компенсации возможных различий, связанных с внутрисуточными вариациями, проводилось усреднение по времени. Предварительный анализ рядов данных проводился при суточном усреднении, дающем наиболее детальную картину динамики. Применялось также усреднение на больших интервалах времени, в частности, пятидневных.

Результаты независимых расчётов по спутниковому радиотепловидению и реанализу в целом согласуются между собой и отражают общие тенденции вариаций зональных потоков водяного пара, особенно на крупных временных масштабах. При этом в суточных оценках могут возникать значительные отличия (порядка величины самих потоков). Особый интерес представляет 2019 г., в течение второй половины которого не осуществлялись запуски метеозондов на метеостанции 1.

Рисунок 3.1.1.2 иллюстрирует скаттерограммы потоков радиотепловидения Θ_s и реанализа Θ_r за весь пятилетний интервал, а также за первую и вторую половины 2019 г. в отдельности. Видно, что линейные регрессии Θ_r по Θ_s проходят близко к началу координат и имеют коэффициенты наклона, близкие к 1 с точностью около 10 %, за исключением случая второй половины 2019 г., когда этот коэффициент превышает величину 1,2. Справа на рисунке 3.1.1.2 сопоставлены среднегодовые значения Θ_r и Θ_s и их среднеквадратическое отклонение (СКО).

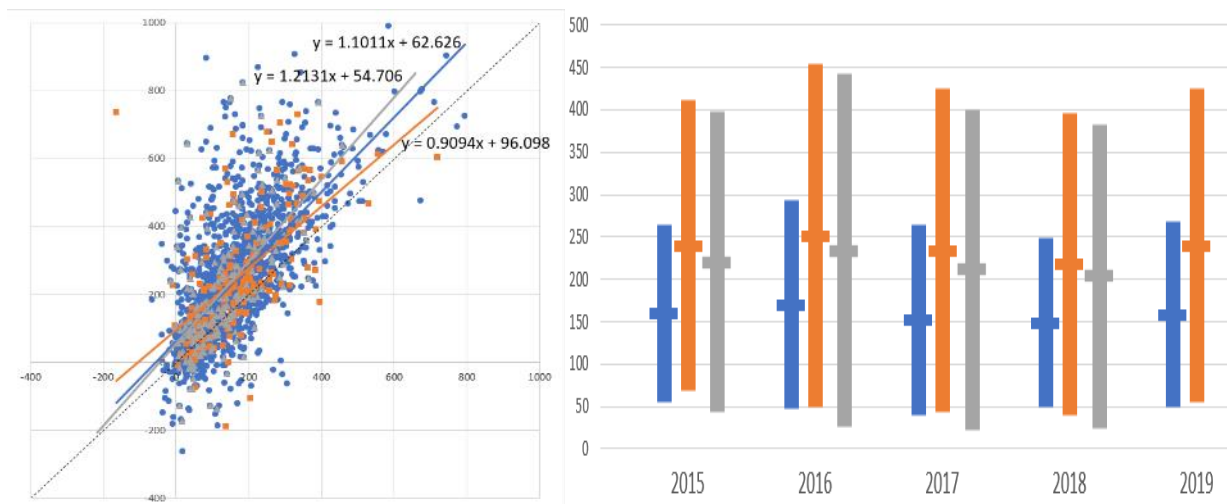


Рисунок 3.1.1.2 — Скаттерограмма Θ_r (вертикальная ось) по Θ_s (горизонтальная ось) (слева), значения потоков в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, положительные значения соответствуют направлению на восток; синие кружки и синяя линия — данные и линейная регрессия (коэффициент наклона 1,1) за 2015–2019 гг.; оранжевые квадраты и оранжевая линия — данные и линейная регрессия (коэффициент 0,91) за первую половину 2019 г.; серые треугольники и серая линия — данные и линейная регрессия (коэффициент 1,2) за вторую половину 2019 г.; чёрный пунктир линия 1:1. Средние за год значения потоков (горизонтальные полосы) и их годовые среднеквадратичные вариации (вертикальные полосы) (справа); Θ_s — синий цвет; Θ_r — оранжевый; Θ_m — серый (не даны для 2019 г. из-за прекращения метеозондовых измерений); шкала слева (в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$)

Расчёт средних за год значений потоков Θ_s и Θ_r (см. рисунок 3.1.1.2, справа) подтверждает наличие систематического сдвига рядов значений на величину около $80 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, которая практически не меняется за рассмотренные годы и оказывается существенно ниже среднегодового стандартного отклонения потоков. Следует отметить, что аналогичный, но меньший (около $20 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) систематический сдвиг есть и между значениями потоков метеозондов Θ_m и Θ_r (среднегодовые значения Θ_r в обоих случаях выше). Это позволило сформулировать гипотезу, объясняющую наблюдаемое систематическое расхождение в величинах Θ_m , Θ_s и Θ_r . Гипотеза состоит в том, что каждый тип данных характеризует поток скрытого тепла в своём диапазоне высот

атмосферы от поверхности до некоторой эффективной верхней границы. В случае метеоданных этой границей становится предельная высота подъёма зонда. Для реанализа эта граница оказывается выше, так как, фактически, моделируется интегральный поток от нуля до бесконечно высокого горизонта. Для спутникового радиотепловидения, очевидно, эта граница, напротив, располагается значительно ниже, так как именно в нижней тропосфере формируются наиболее существенные особенности пространственной структуры поля интегрального влагосодержания. Аргументом в поддержку этой гипотезы выступают результаты сопоставления потоков скрытого тепла, вычисленных по данным метеозондирования для максимальных высот подъёма Θ_m и потоков Θ'_m , вычисленных по тем же данным с ограничением максимальной высоты фиксированным пределом $h_{\max}$ (рисунок 3.1.1.3).

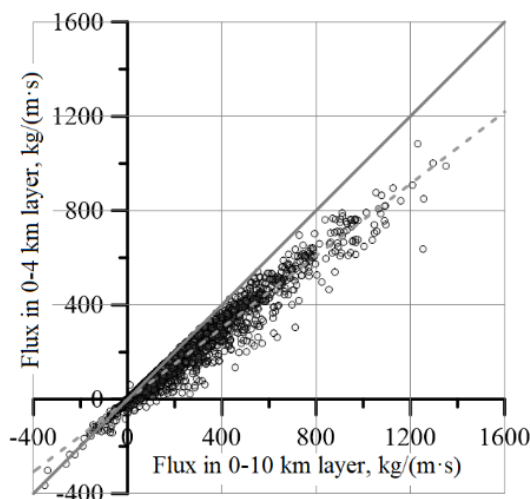


Рисунок 3.1.1.3 — Пример сопоставления при $h_{\max} = 4000$ м. Как видно, величины Θ_m и Θ'_m линейно связаны между собой при коэффициенте корреляции, близком к 1. При этом, однако, величины Θ'_m сдвинуты относительно Θ_m в среднем примерно на $60 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в сторону уменьшения. Близкий по величине сдвиг относительно Θ_m имеют и величины Θ_s

Восстановление атмосферных потоков скрытого тепла по данным фактических спутниковых наблюдений имеет большое значение в задачах краткосрочного прогноза погоды, анализа и прогноза развития экстремальных погодных явлений, исследованиях общей циркуляции атмосферы и климатических вариаций. Ранее предложенные методики, основанные на анализе оптического потока, применимы в основном к данным измерений в видимом и ИК-диапазонах спектра с геостационарных спутников, и дают информацию, в основном, об атмосферных движениях выше 700 гПа (около 3000 м). Спутниковое радиотепловидение предлагает методику восстановления потоков, интегральных по высоте атмосферы, где определяющую роль играют движения в нижней тропосфере, плохо восстанавливаемые в других подходах.

Сопоставление с данными метеозондирования и реанализа показывает, что все три источника дают в целом непротиворечивую картину переноса атмосферного скрытого тепла. Совпадение становится особенно высоким при временном усреднении на характерных синоптических интервалах времени (от одной до нескольких недель). На меньших интервалах времени существенную роль в возникающих расхождениях могут играть мезомасштабные процессы (в частности, в низких широтах — тропические циклоны), а также турбулентные процессы меньших масштабов. Нужно отметить, что данные реанализа, формально относящиеся к ячейке размерами $0,25^\circ$, демонстрируют практически стопроцентную корреляцию с точечными и сравнительно редкими измерениями метеозондов, что может в некоторых случаях быть причиной их заметных отличий от реальных средних потоков в ячейках $0,25 \times 0,25^\circ$.

Ещё одна причина наблюдаемых различий в значениях потоков заключается в том, по-видимому, что спутниковое радиотепловидение восстанавливает значения потоков в нижнем слое атмосферы до некоторой эффективной высоты порядка 4000 м, зависящей от профиля влажности и скорости ветра. По этой причине эффективность этого метода наиболее высока при исследовании атмосферных процессов, в которых определяющую роль играет нижняя атмосфера, например, атмосферных рек. В то же время, высокая корреляция потоков скрытого тепла, интегральных по высоте атмосферы и рассчитанных в некотором нижнем слое (см. рисунок 3.2.3.3), позволяет на основе подхода спутникового радиотепловидения судить и о скоростях адвекции скрытого тепла во всей толще атмосферы. При этом, однако, как видно из рисунка 3.1.1.2, может потребоваться некоторая коррекция абсолютных значений. Возможно, этим обстоятельством отчасти объясняются некоторые особенности широтного распределения меридиональных потоков скрытого тепла (слишком большая ширина ячейки Хэдли), полученные ранее по методу спутникового радиотепловидения.

3.1.2. Расчёт динамики поля интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным МТВЗА-ГЯ

В ИКИ РАН при взаимодействии с НИЦ «Планета», АО «Российские космические системы» и рядом других организаций выработана концепция потоковой обработки данных российского микроволнового многоканального радиометра спутникового базирования МТВЗА-ГЯ. Цель работы заключается в обеспечении широкого научного сообщества долговременными рядами данных МТВЗА-ГЯ и продуктов их обработки в режиме свободного онлайн-доступа через инфраструктуру ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

В рамках анализа возможностей применения данных МТВЗА-ГЯ к задачам погодно-климатических исследований были проведены предварительные оценки качества восстановления по этим данным некоторых геофизических характеристик атмосферы и подстилающей поверхности Земли. Расчёты по предложенным и развиваемым в ИКИ РАН алгоритмам были сопоставлены с оценками по реанализу. Первые результаты такого сопоставления приведены в таблице 3.1.2.1 и проиллюстрированы на рисунке 3.1.2.1.

Таблица 3.1.2.1 — Предварительная оценка среднеквадратических отклонений восстановленных геофизических параметров по данным МТВЗА-ГЯ от данных реанализа

Геофизический параметр ¹	СКО по МТВЗА-ГЯ (диапазон)	Требования ВМО (WMO, 2021)
ТПО, К	<2; (273–305)	<2
СПВ, м/с	<3; (0–22)	<3
ИВА ² , мм	<2,5; (0–75)	<5
ВПТ ^{2,3} , К	<2; (220–310)	<3
ВПВ ^{2,3} , г/м ³	5–30 % (от среднего значения)	< 20 % (от среднего значения)

¹ ТПО — температура поверхности океана; СПВ — скорость приповерхностного ветра; ИВА — интегральное влагосодержание атмосферы; ВПТ — вертикальный профиль температуры; ВПВ — вертикальный профиль влажности.

² Для всех типов подстилающей поверхности.

³ На восьми горизонтах.

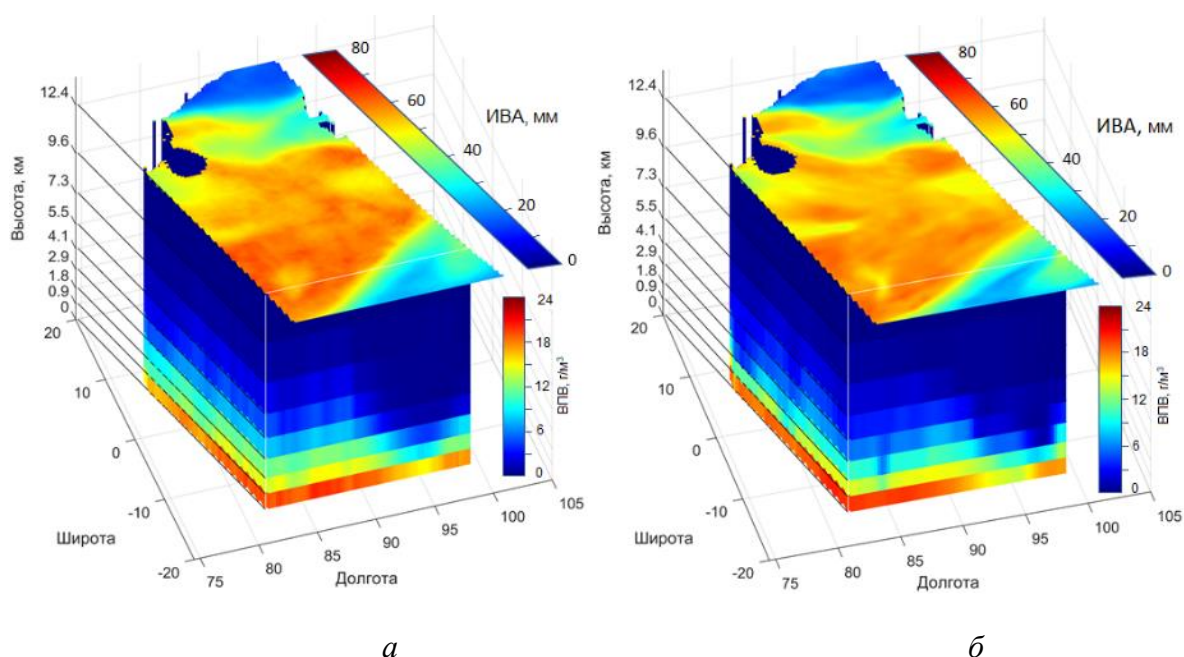


Рисунок 3.1.2.1 — Сопоставление фрагментов полей интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) и вертикальных профилей влажности (ВПВ) по МТВЗА-ГЯ (а) и ECMWF ERA5 (б): верхняя поверхность — поле ИВА, шкала значений (в мм) справа сверху; боковые поверхности — поля ВПВ на соответствующих сечениях, шкала значений (в г/м^3) справа, границы слоёв — на шкале высот слева; на нижних шкалах — географические координаты

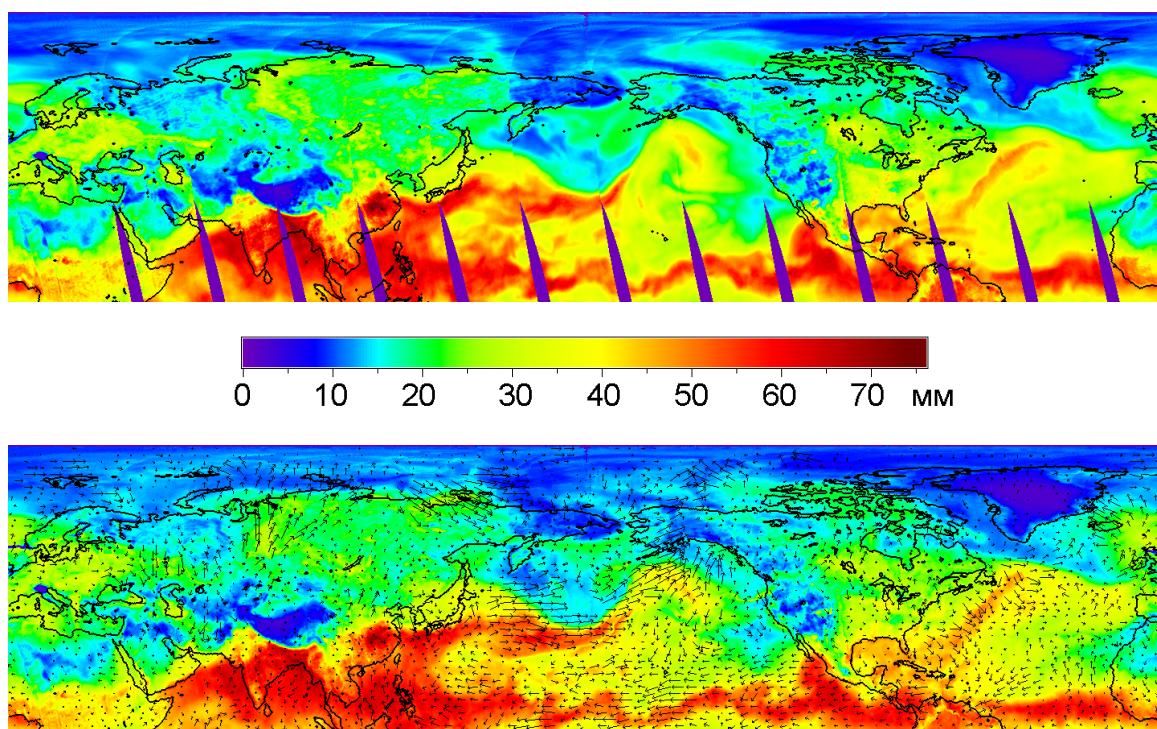


Рисунок 3.1.2.2 — Восстановленное по данным измерений МТВЗА-ГЯ поле интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) над северным полушарием за 28.06.2020 (вверху), цветовая шкала значений ИВА в мм (посередине) и совмещённые поля ИВА (с закрытыми лакунами в низких широтах) и атмосферной адвекции водяного пара (черные стрелки вектора скорости в условном масштабе)

На основе предложенного алгоритма восстановления по данным МТВЗА-ГЯ интегрального влагосодержания атмосферы над сушей выполнена пробная обработка в непрерывном интервале наблюдений, охватывающем июнь – июль 2020 г. К полученным

полям интегрального влагосодержания применены алгоритмы спутникового радиотепловидения, позволившие восстановить атмосферную динамику над всеми типами поверхности в северном полушарии. Пример восстановления показан на рисунке 3.1.1.2.

3.1.3 Анализ факторов, приводящих к большим ошибкам в определении снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии

Работа выполнялась совместно с Институтом водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН, Барнаул) и Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ, Санкт-Петербург)

Анализ был выполнен для четырёх тестовых участков, расположенных в границах основных природных зон Восточно-Европейской равнины (рисунок 3.1.3.1): два участка на Кольском полуострове — в районе Мурманска (68,97° с.ш., 32,80° в.д.) и недалеко от посёлка Ловозеро (68,00° с.ш., 34,80° в.д.); один участок в Архангельской области — недалеко от села Турчасово (63,12° с.ш., 39,23° в.д.) и один участок в Республике Коми — недалеко от посёлка городского типа Троицко-Печорск (62,70° с.ш., 56,20° в.д.). Участки выбирались с относительно ровной поверхностью и с различной плотностью лесной растительности. Данные по климатическим характеристикам и толщине снежного покрова выбранных участков были получены от ближайших метеостанций с сайта «Расписание Погоды» (<https://rp5.ru>).



Рисунок 3.1.3.1 — Тестовые участки: 1 — Ловозеро, 2 — Мурманск, 3 — Турчасово, 4 — Троицко-Печорск

Анализ межгодовой и сезонной динамики яркостной температуры выбранных участков был выполнен за трёхлетний период с 01.01.2014 г по 31.12.2016. В качестве спутниковой информации использованы данные двух микроволновых радиометрических систем: SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) американской программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) и MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with

Aperture Synthesis) спутника Европейского космического агентства SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). Для оценки относительных площадей «видимой» поверхности, покрытой снежным покровом (незакрытой лесной растительностью) в пределах одного пикселя изображения пассивной микроволновой съёмки, были использованы данные спутника Landsat-8.

Данные прибора SSMIS получены из базы данных POLE-RT-Fields, созданной в отделе «Исследование Земли из космоса» ИКИ РАН. Эта база данных содержит фрагменты полей яркостной температуры, измеренной SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) и SSMIS над Северной и Южной полярными шапками Земли — между широтами 60 и 85°. Данные представлены в форматах SWATH (на исходной сетке измерений) и GRID (приведёнными к регулярной сетке осреднением в ячейках 0,5 град широты на 0,5 град долготы). Они охватывают измерения с 1987 г. по настоящее время на частотах 19,35; 37,00 и 85,5 ГГц (91,655 ГГц для SSMIS) вертикальной и горизонтальной поляризации и 22,24 ГГц вертикальной поляризации, полученных в режиме конусного сканирования под углом 53°.

Данные прибора MIRAS были любезно предоставлены сотрудниками Лаборатории физики атмосферно-гидросферных процессов (зав. лабораторией — д-р техн. наук, доцент Романов А.Н.) Института водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН). В настоящей работе использовался продукт L1C SMOS версии v620. Данные продукта L1C привязаны к дискретной гексагональной геодезической сетке DGG ISEA 4H9. Линейный размер ячейки составляет 15 км. Продукт L1C строится на основе данных радиометра MIRAS спутника SMOS с длиной волны 21 см (частота 1,4 ГГц) и разрешающей способностью 35×50 км для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации под углом зондирования 42,5°. Непрерывный архив данных за период с 2012 г. по настоящее время хранится на серверах Европейского космического агентства (ESA) и доступен по подписке.

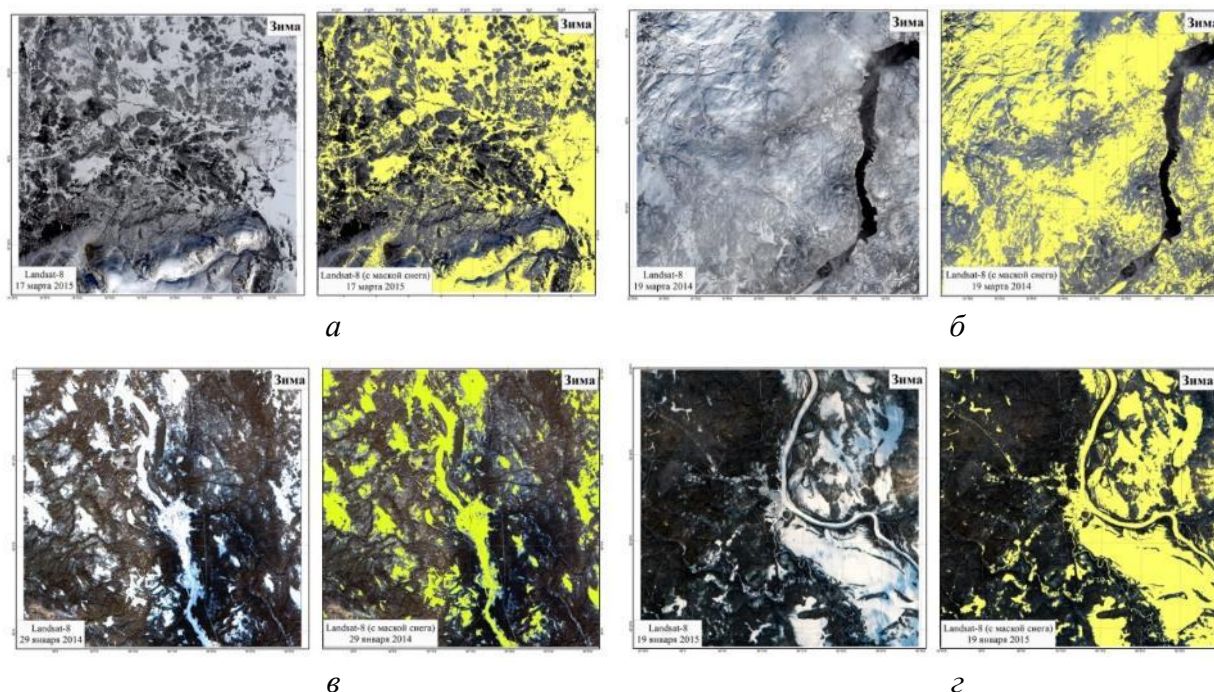


Рисунок 3.1.3.2 — Снимки Landsat-8 четырёх участков: *а* — Ловозеро; *б* — Мурманск; *в* — Турчасово; *г* — Троицко-Печорск. Слева — снимок в комбинации каналов видимого диапазона (Band 4, Band 3 и Band 2), справа — с маской снега (результат классификации каналов Band 2 и Band 3)

Получение данных Landsat-8 осуществлялось с помощью ресурса <https://eos.com/landviewer/>. Landsat-8 — американский спутник дистанционного

зондирования Земли, восьмой в рамках программы Landsat, действующей с 1972 г. Орбита спутника находится на высоте 705 км, полоса съёмки составляет 185 км. На борту спутника находится два сенсора: OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor). OLI позволяет вести съёмку в восьми спектральных каналах с разрешением 30 м в видимом и ИК-диапазонах, а также имеет один панхроматический канал с разрешением 15 м. Сенсор TIRS ведёт съёмку в двух тепловых ИК-каналах с разрешением 100 м. Характеристики всех каналов приведены в таблице 3.2.1.1.

Снимки Landsat-8 подбирались за зимний сезон в период между 2014 и 2016 г. для четырёх тестовых полигонов. Тестовый полигон представляет собой область, ограниченную средним размером пикселя радиометров SSMIS и MIRAS. Центр полигона соответствовал центру выбранного тестового участка, а его размеры — среднему разрешению снимка пассивной микроволновой съёмки: 30×30 км. Каждый снимок был получен в виде многоканального растра (каналы 1–7 из таблицы 3.2.1.1), который затем обрезался по границе тестового полигона. Обрезанные изображения были классифицированы с помощью неконтролируемой классификации методом *k*-средних. Для определения относительной площади открытой поверхности со снегом, незакрытой кронами лесного массива («видимой» поверхности со снежным покровом), использовались синий (Band 2) и зелёный (Band 3) каналы, поскольку в видимом диапазоне снег имеет наибольшую отражательную способность по сравнению с другими типами поверхности. В результате классификации для каждого растра был получен бинарный растр, состоящий из двух классов: 1) земной поверхности, покрытой снегом и 2) поверхности без снежного покрова (рисунок 3.1.3.2). Для каждого полигона была рассчитана общая площадь «видимой» территории со снегом (таблица 3.1.3.2).

Таблица 3.1.3.2 — Рассчитанные площади поверхности со снегом по снимкам Landsat-8

Населённый пункт	Дата снимка	<i>S</i> со снегом, км ²	<i>S</i> со снегом, %
Ловозеро	17.03.2015	362	40
Мурманск	19.03.2014	479	53
Турчасово	29.01.2014	157	17
Троицко-Печорск	19.01.2015	268	30

Количественная оценка площадей разных типов поверхности в пределах одного пикселя изображения пассивной микроволновой съёмки для четырёх тестовых полигонов была выполнена по карте Global Land Cover, предоставляемой сервисом Copernicus Global Land Service в рамках европейской программы по наблюдению за Землёй Copernicus (<https://land.copernicus.eu/global/products/lc>). Карты Global Land Cover составляются ежегодно, начиная с 2015 г., на основе данных прибора Vegetation (PROBA-V) спутника PROBA. Global Land Cover — это растровые карты, полученные в результате классификации данных PROBA-V. Такая растровая карта с пространственным разрешением 100 м содержит 23 класса, которые выделяются в соответствии с Системой классификации земного покрова, разработанной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединённых Наций. Для расчётов площадей типов поверхности был получен фрагмент карты Global Land Cover за 2015 г. размером 20×20°. Этот фрагмент карты затем был обрезан по каждому полигону, в результате чего были получены четыре карты 30×30 км. Далее для тестовых полигонов была рассчитана общая площадь каждого класса. Поскольку оценка соотношения площадей типов поверхности не требовала подробного деления, то некоторые группы классов были объединены в один (например, классы вечнозелёного, смешанного и широколиственного леса были объединены в единый класс; как и разные типы болот). Всего рассматривалось пять классов: водные объекты, лес, болота, поля (естественные и с.-х.) и застройка.

Рассчитанные площади типов поверхностей по классам и их соотношения для тестовых полигонов представлены в таблице 3.1.3.3.

Как видно из таблиц 3.1.3.2 и 3.1.3.3, наиболее безлесными и «снежными» оказываются тестовые участки в районе Мурманска (9,8 % леса и 53 % «видимой» поверхности со снежным покровом) и в районе посёлка Ловозеро (36,2 % леса и 40 % «видимой» поверхности со снежным покровом). Два других участка, наоборот, характеризуются большой площадью лесов и малой площадью «видимой» поверхности со снежным покровом: Троицко-Печорск — 65,3 % леса и 30 % снега, Турчасово — 80,7 % леса и 17 % снега. Необходимо отметить, что на всех тестовых участках преобладает вечнозелёная хвойная растительность (ель, сосна).

Таблица 3.1.3.3 — Площади типов поверхностей для тестовых полигонов

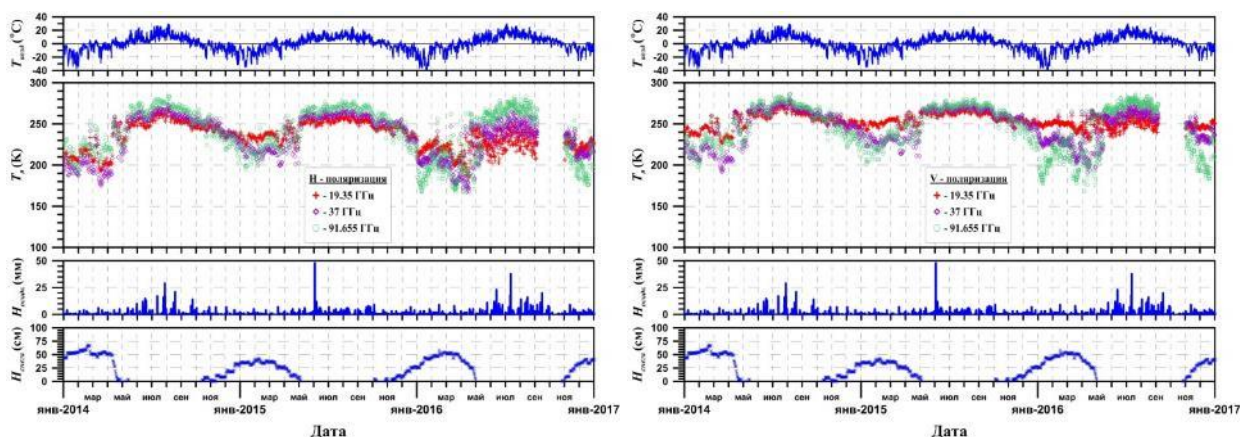
Населённый пункт	Площадь	Водные объекты	Лес	Болота	Травянистая растительность (в том числе с.-х. поля)	Застройка
Ловозеро	км ²	51	326	352	172	0,3
	%	5,6	36,2	39,1	19,1	0,03
Мурманск	км ²	75	88	532	175	28
	%	8,4	9,8	59,3	19,5	3,1
Турчасово	км ²	10	726	136	27	0,2
	%	1,2	80,7	15,1	3,0	0,03
Троицко-Печорск	км ²	13	588	282	12	5
	%	1,4	65,3	31,4	1,3	0,6

Динамика яркостной температуры каналов SSMIS четырёх тестовых участков за период 01.01.2014–31.12.2016 показана на рисунке 3.1.3.3. Там же представлена динамика температуры воздуха, количества выпавших осадков и толщины снежного покрова. Анализ рисунка 3.1.3.3 показывает, что снежный покров достигает своей максимальной величины на участке в районе Троицко-Печорска (превышает 75 см), а минимальной — в районе Турчасово (менее 50 см). На Кольском полуострове в районе Ловозера и Мурманска толщина снежного покрова примерно одинаковая и составляет величину порядка 50–60 см. Динамика яркостной температуры всех каналов SSMIS для четырёх участков в среднем повторяет динамику температуры воздуха. Необходимо отметить одну важную особенность — чем меньше лесной растительности покрывает тестовый участок, тем больше отличаются между собой значения яркостной температуры разных каналов одной поляризации как в зимний, так и в летний период (ср. рисунки 3.1.3.3а, б и в, г). Для тестовых участков, большую площадь которых покрывает лесной покров, значения яркостной температуры для частот 19,35, 37 и 91,655 ГГц одной поляризации практически совпадают. Прослеживается явная зависимость совпадения значений яркостной температуры разных частот одной поляризации от удельной площади тестового участка, занимаемой лесом: от Турчасова (80,7 % леса), где значения практически совпадают, далее Троицко-Печорск (65,3 % леса), затем Ловозеро (36,2 % леса) и Мурманск (9,8 % леса), где значения сильно различаются и в летний, и в зимний сезон (рисунок 3.1.3.3, таблица 3.1.3.3). Аналогичная зависимость, только обратная, прослеживается от площади поверхности со снегом, полученной по снимкам Landsat-8: Турчасово (17 % снега), Троицко-Печорск (30 % снега), Ловозеро (40 % снега) и Мурманск (53 % снега) (рисунок 3.1.3.3, таблица 3.1.3.2).

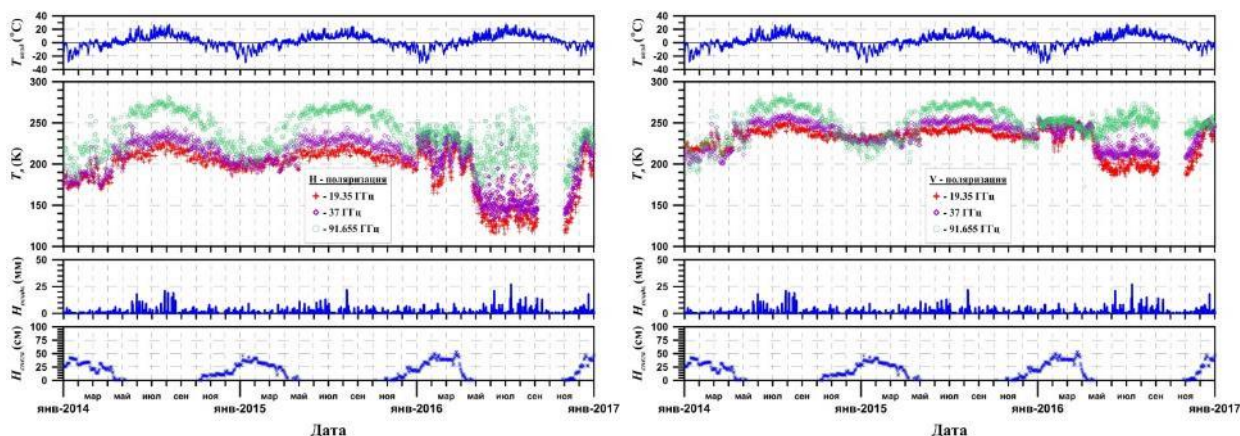
Этот анализ позволяет сделать вывод, что лесной массив практически полностью экранирует собственное микроволновое излучение системы «почва – снежный покров» на частотах радиометра SSMIS. Яркостная температура в данном случае определяется, в основном, собственным микроволновым излучением лесного массива. Этот вывод

подтверждается рисунком 3.1.3.4, где представлены частотные зависимости излучательной способности для различных земных поверхностей. Излучательная способность лесного полога практически постоянна во всём диапазоне частот SSMIS (19–91 ГГц) и составляет величину порядка 0,95 (см. рисунок 3.1.3.4). Таким образом, изменение яркостной температуры вечнозелёного лесного покрова (ель, сосна и т.п.) в данном диапазоне будет определяться, в первую очередь, изменениями температуры воздуха, что и прослеживается на рисунках 3.1.3.3*в* и *г*. Ещё одной характерной особенностью, подтверждающей данный вывод, становятся сильные колебания яркостной температуры на всех каналах в зимний период при краткосрочных изменениях температуры воздуха в районе нуля градусов. Такие колебания связаны с таянием и замерзанием верхнего слоя снежного покрова (появления и замораживания в нём жидкой фазы воды). Процессы таяния и замерзания сильно изменяют диэлектрические свойства снега, что, в свою очередь, приводит к резким колебаниям яркостной температуры. Эти колебания проявляются сильнее на участках с меньшей площадью лесов, или же с большей площадью «видимой» поверхности со снежным покровом (см. рисунок 3.1.3.3, таблицы 3.1.3.2, 3.1.3.3). В летний период яркостная температура более стабильна и её изменения связаны с изменением температуры воздуха и выпадением осадков (см. рисунок 3.1.3.3). Причём эти изменения более существенны на тестовых участках с меньшей площадью лесов (см. рисунки 3.1.3.3*а*, *б*, таблица 3.1.3.3), что связано, с одной стороны, с появлением сезонной болотной растительности, а также изменениями влажности почвы, связанной с наличием или отсутствием осадков.

Таким образом, использование алгоритмов восстановления толщины и снегозапаса снежного покрова построенных на основе данных спутниковых микроволновых радиометров, работающих в диапазоне 19–92 ГГц, должно приводить к существенным ошибкам для лесной зоны с хвойной растительностью. Этот вывод подтверждается многими отечественными и зарубежными работами.



а



б

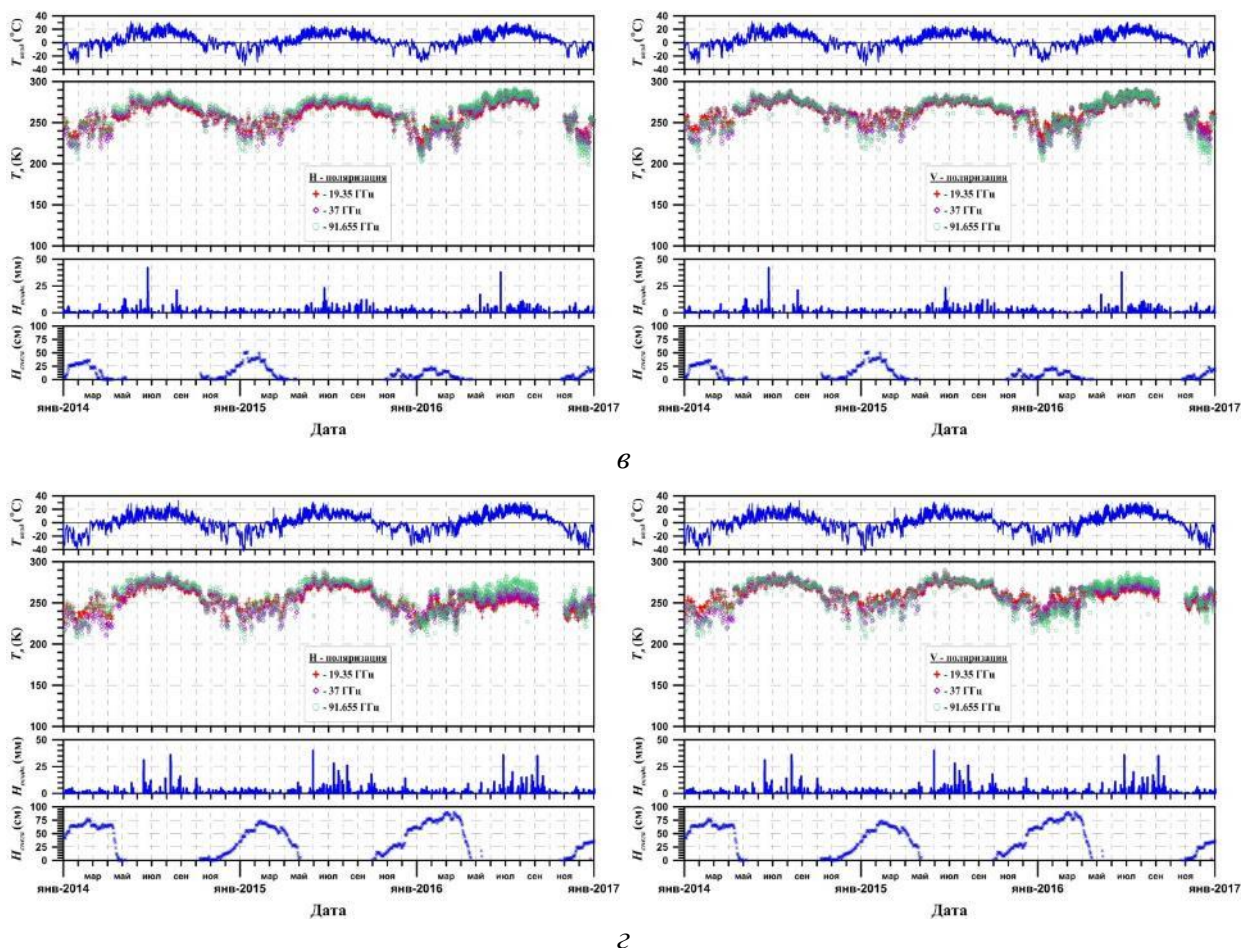


Рисунок 3.1.3.3 — Динамика яркостной температуры каналов SSMIS четырёх тестовых участков: *а* — Ловозеро; *б* — Мурманск; *в* — Турчасово; *г* — Троицко-Печорск. Слева — горизонтальная поляризация, справа — вертикальная поляризация

Динамика яркостной температуры каналов MIRAS спутника SMOS четырёх тестовых участков за период 01.01.2014–31.12.2016 показана на рисунке 3.1.3.5. Сезонная зависимость яркостной температуры на частоте 1,4 ГГц (MIRAS) существенно отличается от таковых зависимостей на более высоких частотах (SSMIS). Главная особенность этого отличия заключается в практически полном отсутствии связи изменения температуры воздуха и яркостной температуры для всех тестовых участков. С другой стороны, прослеживается сильная зависимость яркостной температуры от влажности поверхностного слоя почвы — понижение яркостной температуры в период схода снежного покрова, а также в моменты обильного выпадения дождей; и её повышение в более сухие периоды при отрицательной температуре воздуха зимой и малом количестве дождей летом (см. рисунок 3.1.3.5). Причём зависимость от выпадения дождей сильнее проявляется на тестовых участках с меньшей площадью лесного покрова. Такая зависимость объясняется высокой чувствительностью канала 1,4 ГГц к влажности почвы и большой глубиной формирования излучения в снежном покрове для частоты 1,4 ГГц. Снежный покров той толщины, которая зафиксирована на тестовых участках, даже влажный, практически прозрачен для излучения с частотой 1,4 ГГц. Таким образом, использование радиометра MIRAS спутника SMOS для определения толщины и снегозапаса снежного покрова неэффективно.

Надёжные оценки параметров снежного покрова имеют решающее значение для множества гидрологических, метеорологических и климатических приложений. Снегозапас снежного покрова — одна из ключевых характеристик для таких задач. Несмотря на целый ряд алгоритмов определения снегозапаса по данным спутниковой микроволновой радиометрии, все они имеют невысокую точность и подвержены большим

ошибкам. Эти ошибки возникают из-за влияния растительности и рельефа, а также многообразия самого снежного покрова. Кроме того, за счёт слоистости снежного покрова и существенной вариации характеристик даже близлежащих слоёв (метаморфизм снежного покрова) возникает большая проблема в разделении двух главных параметров, определяющих снегозапас (плотность слоя и его толщина).

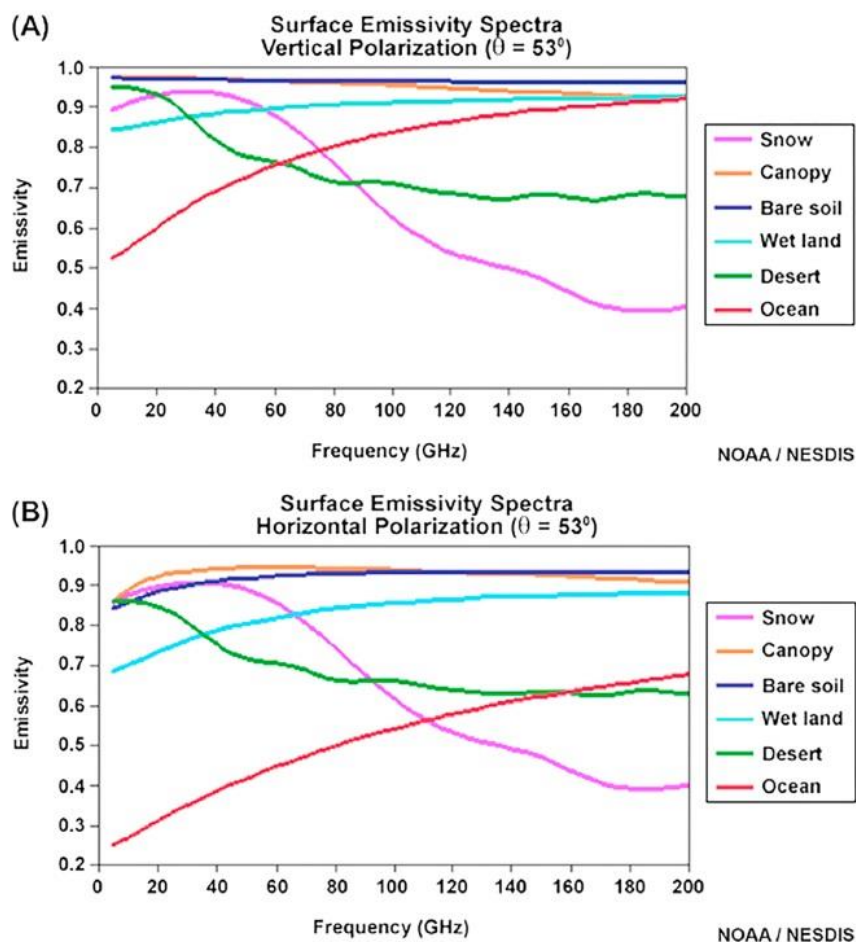


Рисунок 3.1.3.4 — Спектры излучательной способности различных типов поверхности при угле зондирования 53° : Snow — снежный покров, Canopy — полог леса, Bare soil — голая почва, Wet land — влажная земля, Desert — пустыня, Ocean — океан. А — вертикальная поляризация; В — горизонтальная поляризация (Emery W., Camps A. Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Application. Amsterdam: Elsevier, 2017. 856 p.)

В данном случае рассмотрена одна из причин возникновения погрешностей при определении снегозапаса снежного покрова по данным спутниковых пассивных микроволновых измерений. Показано, что использование алгоритмов восстановления толщины и снегозапаса снежного покрова, построенных на основе данных спутниковых микроволновых радиометров, работающих в диапазоне частот 19–92 ГГц (SSM/I, SSMIS), должно приводить к существенным ошибкам для территории, покрытой лесной хвойной растительностью. Поскольку большая часть территории России находится в таёжной зоне, то применение таких алгоритмов для оценки снегозапаса становится неэффективным. Использование радиометра MIRAS спутника SMOS для определения толщины и снегозапаса снежного покрова также становится неэффективным из-за большой глубины формирования излучения данного диапазона (1–4 ГГц).

Предположительно для определения толщины и снегозапаса снежного покрова, перспективным может считаться диапазон 3–20 ГГц, а также анализ угловых зависимостей яркостной температуры снежного покрова в этом диапазоне.

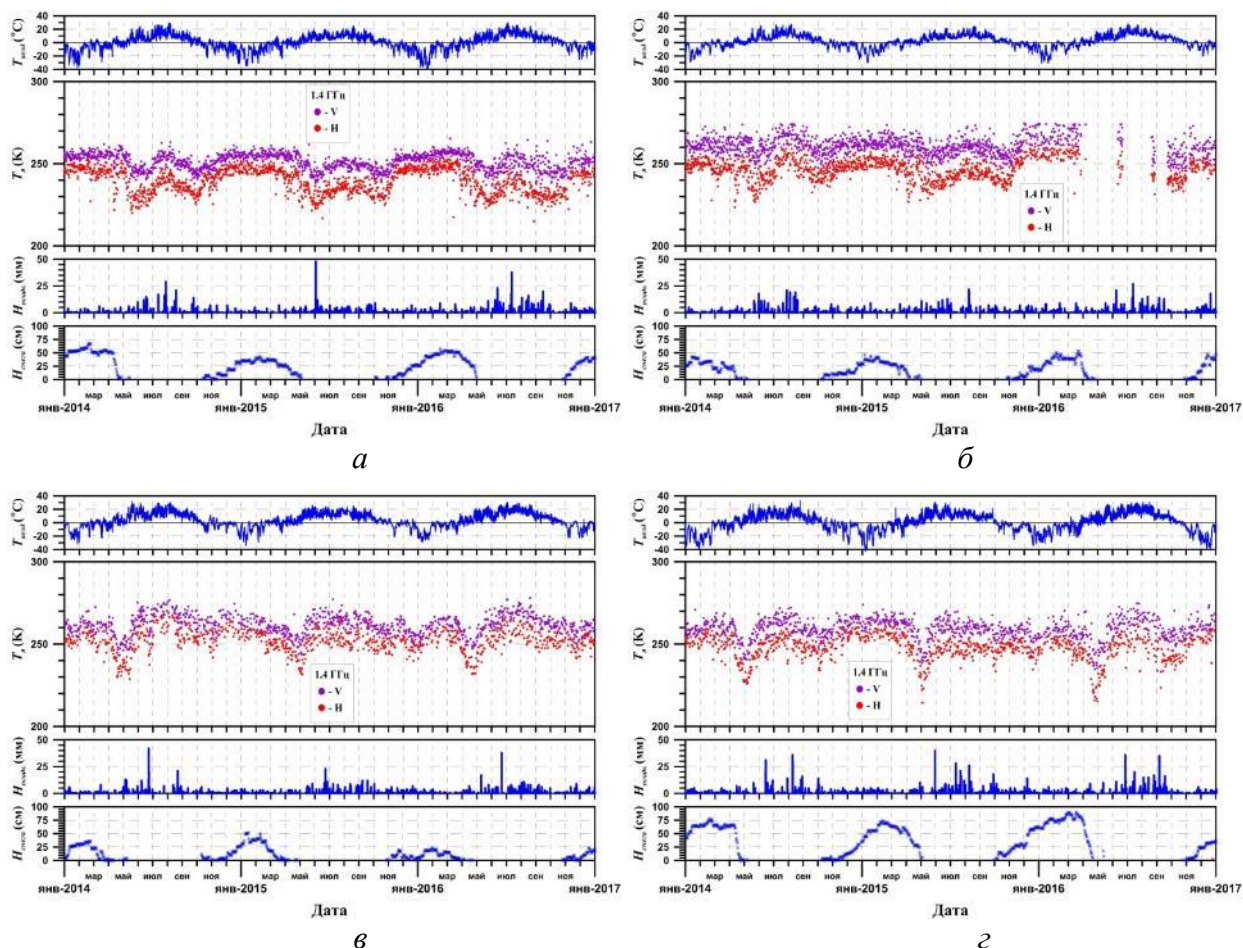


Рисунок 3.1.3.5 — Динамика яркостной температуры каналов SMOS четырёх тестовых участков: а Ловозеро; б — Мурманск; в — Турчасово; г — Троицко-Печорск

3.1.4 Оценка гидрологических изменений заболоченных территорий Арктики и субарктики методами микроволновой радиометрии

Работа выполнялась совместно с Институтом водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН, Барнаул)

На основе ежедневных данных спутникового микроволнового зондирования изучены специфические особенности микроволнового излучения болот и заболоченных территорий Западной Сибири, находящихся в условиях смены времён года. Методика исследований включала в себя обработку спутниковых данных, полевые и лабораторные измерения. Были использованы данные спутника SMOS на частоте 1,41 ГГц. В исследовании использовался продукт L1C SMOS, полученный при измерении восходящего излучения на горизонтальной поляризации под углом зондирования $42,5^\circ$ с пространственным разрешением около 40 км. Кроме того, были задействованы данные спутников MODIS, Landsat, Sentinel (оптический диапазон). Совмещение массивов спутниковых данных в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах позволило установить радиояркостные характеристики подстилающей поверхности и соотнести их с её конкретными участками.

На выбранных тестовых участках, попадающих в пиксель SMOS, измерялись физические параметры подстилающей поверхности, а также отбирались образцы растительности и воды для лабораторных измерений их диэлектрических характеристик. Рассчитанные по результатам диэлектрических измерений зависимости коэффициентов излучения почв, воды, растительности сравнивали с яркостной температурой (T_y) подстилающей поверхности, определённой по данным спутника SMOS и

термодинамической температурой (T), определённой по данным MODIS. Подобный алгоритм позволил провести калибровку спутниковых микроволновых данных, оценить их пригодность для определения физических характеристик подстилающей поверхности. Для пикселей SMOS с ландшафтно-однородной подстилающей поверхностью с известными закономерностями поведения её радиоизлучательных характеристик от физических параметров определяли сезонную динамику $T_{\text{я}}$, на основе которой выявляли характерные периоды изменений микроволнового излучения подстилающей поверхности. На основе многолетней сезонной динамики $T_{\text{я}}$ определяли сдвиги дат резких изменений радиоизлучательных характеристик, а также продолжительности выявленных периодов, которые затем использовали для оценки временных сдвигов в сроках замерзания/оттаивания заболоченной территории.

В результате анализа ежедневных данных SMOS установлено, что для большинства арктических и субарктических территорий, находящихся в условиях выраженной сезонности времён года, в качестве дистанционных радиофизических маркеров гидрологических изменений могут быть использованы:

- 1) продолжительность холодного и тёплого периодов, определяемых по резким изменениям $T_{\text{я}}$ подстилающей поверхности;
- 2) скорость образования на подстилающей поверхности сезонно-мёрзлого слоя толщиной, равной скин-слою, рассчитанная по резкому изменению $T_{\text{я}}$;
- 3) сезонные тренды $T_{\text{я}}$ подстилающей поверхности, характеризующие изменения физических свойств подстилающей поверхности;
- 4) многолетние тренды сроков оттаивания/замерзания верхнего слоя подстилающей поверхности, продолжительности холодного и тёплого периодов, определённые по кардинальным изменениям $T_{\text{я}}$ и характеризующие гидролого-климатические изменения.

Для заболоченных территорий Арктики и Субарктики экспериментально установлены широтные различия сезонной динамики $T_{\text{я}}$ для территорий, расположенных на разных широтах. Выделены специфические периоды в сезонной динамике $T_{\text{я}}(\text{JD})$ (JD — юлианский день, отсчитываемый от начала года) подстилающей поверхности, связанные с сезонным промерзанием верхнего слоя подстилающей поверхности.

Для тундры (как многослойной системы с сезонно-талым верхним слоем) выделены:

- 1) «зимняя» тундра (без сезонно-талого слоя) (холодный период);
- 2) сезонное оттаивание верхнего слоя многолетнемерзлой почвы;
- 3) «летняя» тундра с сезонно-талым слоем почвы (тёплый период);
- 4) промерзание верхнего сезонно-талого слоя до вечной мерзлоты.

В качестве дистанционных радиофизических критериев обосновано использование продолжительности периодов: 1) зимней тундры, 2) летней тундры с оттаявшим верхним слоем, 3) промерзания сезонно-талого слоя до вечной мерзлоты.

Для болот и заболоченных территорий выделены следующие пять периодов (рисунок 3.1.4.1):

- 1) 1–2 — «зимнее» плато: период примерно с начала ноября по конец марта, в течение которого значения $T_{\text{я}}$ составляют величину порядка 255 К и практически постоянны (в пределах доверительных интервалов) или обнаруживают слабовыраженный положительный тренд в течение этого периода;
- 2) 2–3 — «весеннее таяние»: быстрый (10–30 дней) спад $T_{\text{я}}$ до 220 К, связанный с обильным увлажнением большей части подстилающей поверхности в результате таяния сезонного снежного покрова, а также вскрытия рек ото льда. Минимальные значения $T_{\text{я}}$ держатся, как правило, не более 2–5 дней, т.е. отрицательная динамика

достаточно резко сменяется положительной. Рост $T_{\text{я}}$ происходит чуть медленнее и не во всех случаях монотонно;

- 3) 3—4 — «летний период 1»: в разные годы наблюдается разная динамика $T_{\text{я}}(\text{JD})$, вид которой зависит от вегетационных циклов болотной растительности (точка 4) — максимальное значение $T_{\text{я}}$ может соответствовать максимальному усыханию заболоченной территории или максимальному развитию болотной растительности и экранированию ею водной поверхности;
- 4) 4—5 — «летний период 2»: увядание растительности;
- 5) 5—1 — «осенне-зимнее промерзание» болотной толщи. Вид сезонной динамики $T_{\text{я}}$ зависит от особенностей промерзания болотной толщи как многослойной системы, состоящей из слоёв живой растительности, отмершей растительности и почвы.

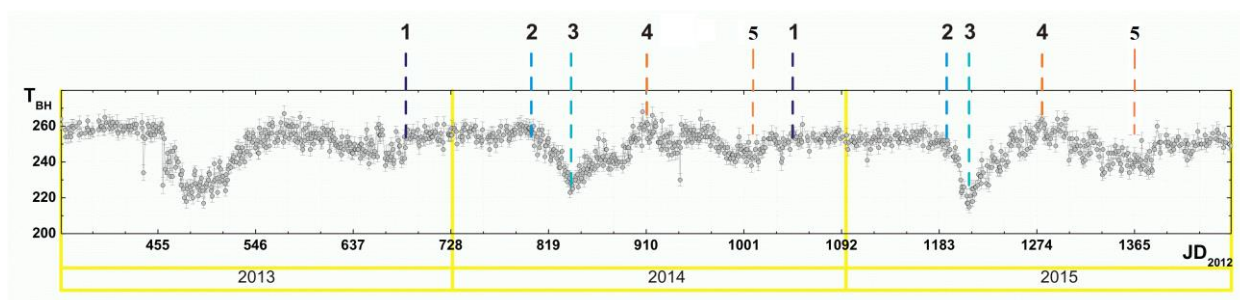


Рисунок 3.1.4.1 — Вариации радиояркостной температуры подстилающей поверхности для болота

Сезонная динамика $T_{\text{я}}(\text{JD})$ болота в летне-осенний период связана с изменением диэлектрических и радиоизлучательных характеристик надводной травяной растительности (в результате увядания). В качестве дистанционных радиофизических критериев обосновано использование продолжительности периодов: 1) не промёрзшей болотной толщи, 2) образования сезонно-мёрзлого слоя (до толщины скин-слоя), 3) сезонно-мёрзлого слоя с толщиной, большей скин-слоя. Причиной такого своеобразного поведения оказываются: 1) особенности промерзания болотной толщи, представляющей собой сложную многослойную многокомпонентную систему, состоящую из воды, живой и отмершей растительности (рисунок 3.1.4.2), 2) различия диэлектрических характеристик разных видов болотной растительности (живой и отмершей) при вариациях температуры и влажности.

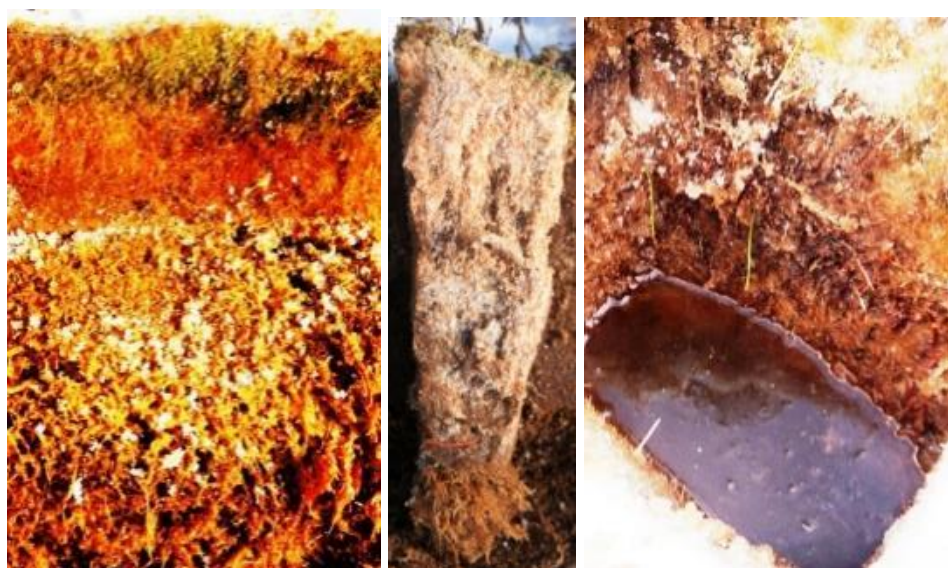


Рисунок 3.1.4.2 — Примеры структуры болотной толщи

Проведённые исследования позволили выявить некоторые специфические особенности сезонной динамики $T_{\text{я}}$ заболоченных территорий Арктики и Субарктики, существенным образом отличающиеся от сезонной динамики радиояростной температуры для акваторий морей, пресноводных озёр и сезонно-мёрзлых почв степной зоны. Причиной такого своеобразного поведения выступают особенности промерзания болотной толщи, представляющей собой сложную многослойную многокомпонентную систему, состоящую из живой и отмершей растительности, находящейся в условиях переувлажнения. Полученные результаты открывают новые возможности в использовании спутниковых данных микроволнового диапазона для изучения происходящих в природе сезонных динамических процессов, а также прогнозирования опасных гидрологических явлений.

3.2 Развитие методов диагностики крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений

3.2.1 Анализ масштабов аномальной горимости лесов России в 2021 году

Выполнены первые оценки результатов пожароопасного сезона 2021 г. На основе спутниковых данных наблюдения активного горения проведена оценка площадей, пройденных лесными пожарами в 2021 г. Оценка проведена на основе методики, разработанной в ИКИ РАН, позволяющей учитывать особенности достаточно низкого пространственного разрешения приборов, использующихся для детектирования горения и получать оценки лесных площадей, пройденных пожарами, на уровне страны с точностью порядка 5 %.

Анализ показал, что покрытая лесом площадь, пройденная огнём на территории России, составила около 13 млн га. При этом максимальный суточный прирост лесной площади, пройденной огнём, составил 570 тыс. га, что является рекордным в 21 в. Средняя площадь пожара (в том числе лесная) составил 775 га (526 га)

По предварительным оценкам погибло (5-й класс СКС) около 2,5 млн га леса. Для сравнения ситуации, наблюдавшейся в 2021 г., с предыдущими годами был использован однородный ряд наблюдений лесных пожаров, полученный на основе информации о детектировании активного горения по данным шестой коллекции прибора MODIS. При этом была проведена оценка площадей, покрытых лесом, пройденных пожарами в 21 в. (период с 2001 по 2021 г.). Представленный анализ данных показал, что 2021 г. стал третьим по горимости лесов в 21 в. (после 2003 и 2012 гг.).

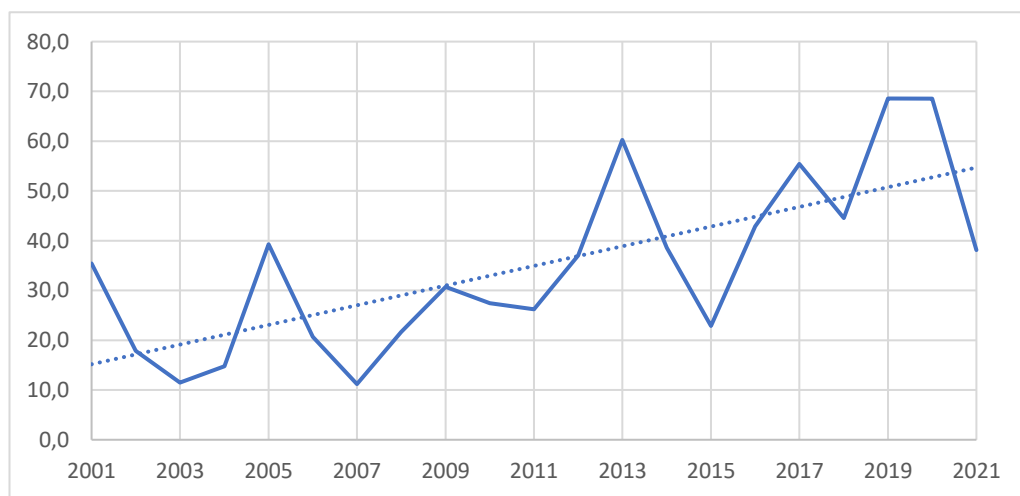


Рисунок 3.2.1.1 — Процент лесных площадей, пройденных пожарами в зоне контроля, от общей лесной площади, пройденной пожарами, на территории РФ

Также был проведён анализ тенденций, наблюдаемых в динамике развития лесопожарной обстановки на территории РФ в период с 2001 по 2021 г. Особое внимание отмечается анализу изменений лесопожарной обстановки, которые происходили за рассматриваемые годы на труднодоступных и неохраняемых от пожаров территориях. В первую очередь на территориях, относящихся в последние годы в части организации охраны лесов к «зоне контроля» (ранее к зонам космического мониторинга первого и второго уровней), т.е. фактически неохраняемым от пожаров территориям. Показано, что именно в «зоне контроля» наблюдаются значительные площади, пройденные лесными пожарами (в некоторые годы на эти территории приходится до 60 % всех площадей, покрытых лесом, пройденных пожарами на территории России). Именно в этой зоне в последние годы наблюдается рост площадей, покрытых лесом, пройденных огнём (рисунок 3.2.1.1.)

Также проведён анализ причин, которые могут приводить к такой ситуации. К ним фактически относятся только два значимых фактора: грозовая активность и антропогенное воздействие. Для выяснения значимости каждой из причин было проведено сравнение данных грозопеленгации с информацией о точках возникновения лесных пожаров, полученных по данным спутниковых наблюдений. Всего было проанализировано 14 355 точек возникновения пожаров и 1 318 299 грозовых разрядов, в период с 2010 по 2012 г. Анализ показал, что «потенциально» от гроз могло возникнуть 2218 пожаров (~15 % от проанализированных случаев возникновения). В том числе:

- в наземной зоне 197 случай (~8 % от проанализированных точек возникновения в зоне);
- в авиационной зоне 1341 случай (~16 % от проанализированных точек возникновения в зоне);
- в зоне контроля (зонах космического мониторинга 1-го и 2-го уровней) 561 случай (~21 % от проанализированных точек возникновения в зоне).

Данные результаты проведённого анализа позволяют считать, что основной причиной пожаров на обсуждаемых территориях является антропогенное воздействие.

Исходя из изложенных фактов следует признать, что организация борьбы с пожарами на труднодоступных территориях в последние годы приобретает все большее значение. В то же время организация «сплошной» охраны этих огромных территорий видимо не представляется возможным в силу необходимости задействования значительных ресурсов для организации такой охраны. В то же время эффективная борьба с пожарами на этих территориях может позволить существенно сократить потерю лесов. Исходя из этого можно сделать вывод, что, видимо, следует искать новые подходы к организации лесопожарной охраны труднодоступных территорий. При этом следует учитывать, что проведённый анализ показал, что наиболее перспективный путь минимизации ущерба от пожаров в «зонах контроля» является создание условий для минимизации источников возгорания, в том числе организация эффективного контроля достаточно ограниченных групп людей, находящихся на обсуждаемых территориях, что на наш взгляд сегодня является технически реализуемым.

3.2.2 Непрерывный мульти-спутниковый мониторинг вулканов для обнаружения извержений на примере бокового прорыва вулкана Ключевской в феврале 2021 года

Ключевской — один из активнейших вулканов мира, его продуктивность достигает в среднем 60 млн т в год. Вулкан относится к Ключевской группе вулканов, расположен в 30 км от п. Ключи на правом берегу р. Камчатки, в 360 км от Петропавловска-Камчатского. Эруптивная деятельность вулкана известна с 1697 г. С 2014 г. постоянный спутниковый мониторинг вулкана Ключевской ведётся, в том числе и использованием

информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил», которая создана и поддерживается ИВиС СО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДВ НИЦ «Планета». Для мониторинга вулканов в VolSatView имеются оперативно обновляемые данные спутниковых систем: NOAA-18/19, Terra и Aqua, Suomi NPP, Sentinel-3A, -3B. С марта 2016 г. в ИС поступают данные с геостационарного спутника Himawari-8, обновляемые каждые 10 мин. Детальное изучение извержений в VolSatView возможно с помощью спутников Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2 и др. В настоящее время в рамках мониторинга влк. Ключевской доступны для анализа около 200 спутниковых снимков в сутки.

Вершинное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана происходило с 30 сентября 2020 г. по 8 февраля 2021 г. Анализ полученных по нему дистанционных данных был проведён специалистами ИВиС СО РАН, ИКИ РАН, ВЦ ДВО РАН и ДВ НИЦ «Планета».

Казалось, что вулкан успокоился (температура термальной аномалии в районе вершины постепенно снижалась), но 17 февраля на северо-западном склоне вулкана примерно на высоте 2,8 км н.у.м. на спутниковых снимках среднего разрешения была обнаружена новая термальная аномалия, температура и размер которой начали ежедневно повышаться. Например, хотя наблюдения за извержением и осложняла циклоническая активность в районе Камчатки, выяснено, что температура аномалии на склоне вулкана начала повышаться с 17 февраля, разность температур аномалии и фона в районе прорыва к 18 февраля повысилась до 82,9 °C (в 15:36 GMT на снимке JPSS-1), а к 20 февраля — до 112,2 °C (в 16:39 GMT на снимке JPSS-1). Стало ясно, что произошёл прорыв лавы на склоне вулкана, об этом 21 февраля была опубликована первая информация на сайте KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2021-28>).

19 февраля на спутниковом снимке Landsat-7 было отмечено, и затем 21 февраля на снимке Sentinel-2A в ИС VolSatView подтверждено, что прорыв имеет два центра — более мощный верхний и слабый нижний (рисунок 3.2.2.1). 18 февраля на спутниковом снимке Sentinel-2A в 00:30 GMT в районе прорыва отмечалась повышенная парогазовая эмиссия (см. рисунок 3.2.2.1a).

Сразу после образования двух трещин, из них начала изливаться лава, на верхней трещине стал формироваться шлако-лавовый конус. К 23 февраля лавовые потоки растопили значительное количество снега и льда, и грязевые потоки полосой в 400 м спускались в районе р. Крутенькая по склону вулкана. Грязевые потоки по этой реке прошли в 7 км от п. Ключи. 21–22 февраля основные лавовые потоки начали внедряться в ледник Эрмана – самого мощного ледника Ключевской группы вулканов, занимающего плато между вулканами Ключевской – Камень и Ушковский – Крестовский и спускающегося с перевала крупным языком на 11 км в сторону р. Камчатки.

Площадь лавовых потоков, оценённая в ИС VolSatView по снимкам Sentinel-2, составляла: 21 февраля — 0,5 км², 23 февраля — 0,91 км², 26 февраля — 1,36 км² (см. рисунок 3.2.2.1). На протяжении 10 дней активность извержения постоянно росла — увеличивалась площадь лавового поля, подрастал шлаковый конус на верхней трещине — на спутниковых снимках отмечалась крупная высокотемпературная термальная аномалия (см. рисунок 3.2.2.1).

Динамика активности извержения бокового прорыва влк. Ключевской хорошо прослеживается по изменению величины яркостной температуры в точке постоянных наблюдений со спутника Himawari-8 (рисунок 3.2.2.2). Хотя 19 и 26–28 февраля вулкан накрывала непогода, величина яркостной температуры аномалии быстро росла вплоть до 24 февраля и оставалась достаточно высокой в другие дни. Когда погода наладилась (2 марта), величина яркостной температуры уменьшилась на 20 К относительно максимальной величины 24 февраля — 320 К, и в дальнейшем понемногу снижалась (см. рисунок 3.2.2.2).



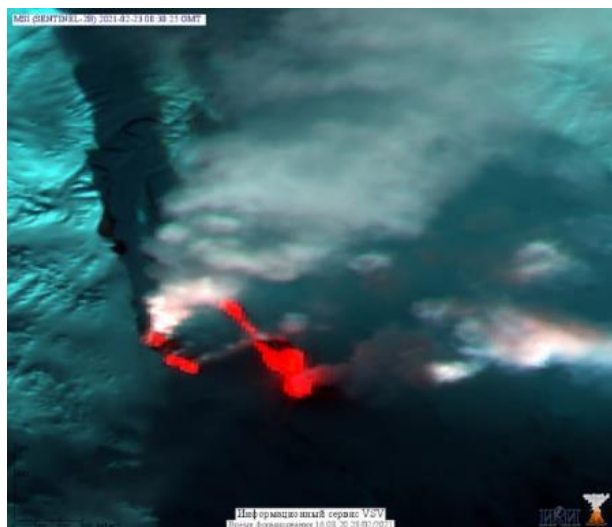
a



б



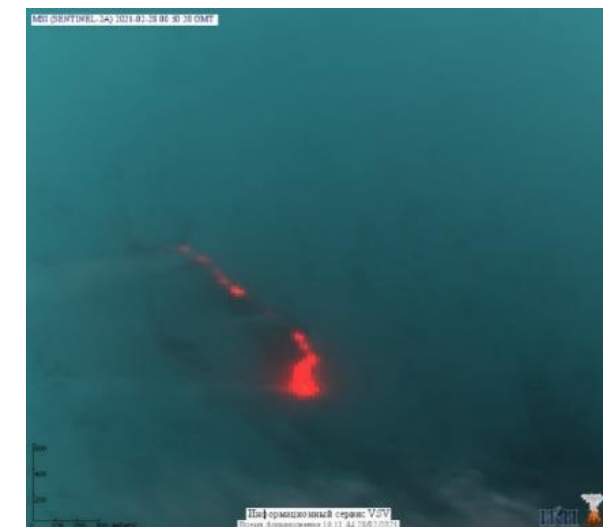
в



г



д



е

Рисунок 3.2.2.1 — Район бокового прорыва на северо-западном склоне влк. Ключевской на высоте 2,8 км н.у.м. вблизи ледника Эрмана на спутниковых снимках из ИС VolSatView в 2021 г.: *a* — парогазовая эмиссия в районе прорыва на Sentinel-2A, 18.02.2021, 00:30 GMT; две трещины прорыва на данных: *б* — Landsat-7, 19.02.2021, 23:29 GMT; *в* — Sentinel-2A, 21.02.2021, 00:40 GMT; *г* — Sentinel-2B, 23.02.2021, 00:30 GMT; *д* — Sentinel-2B, 26.02.2021, 00:40 GMT; *е* — Sentinel-2A, 28.02.2021, 00:30 GMT

Это хорошо согласуется со спутниковыми данными высокого разрешения: изначальная высокоинтенсивная эффузивная деятельность обеих трещин (истечение лавовых потоков), фонтанирование лавы на верхней кромке крупной трещины, благодаря которому шлак и вулканические бомбы наращивали шлаковый конус; постепенное снижение расхода лавы из нижней трещины и прекращение её работы к 28 февраля; снижение теплового потока с поверхности лавового поля в связи с его некоторым остыванием (см. рисунки 3.2.2.1, 3.2.2.2).

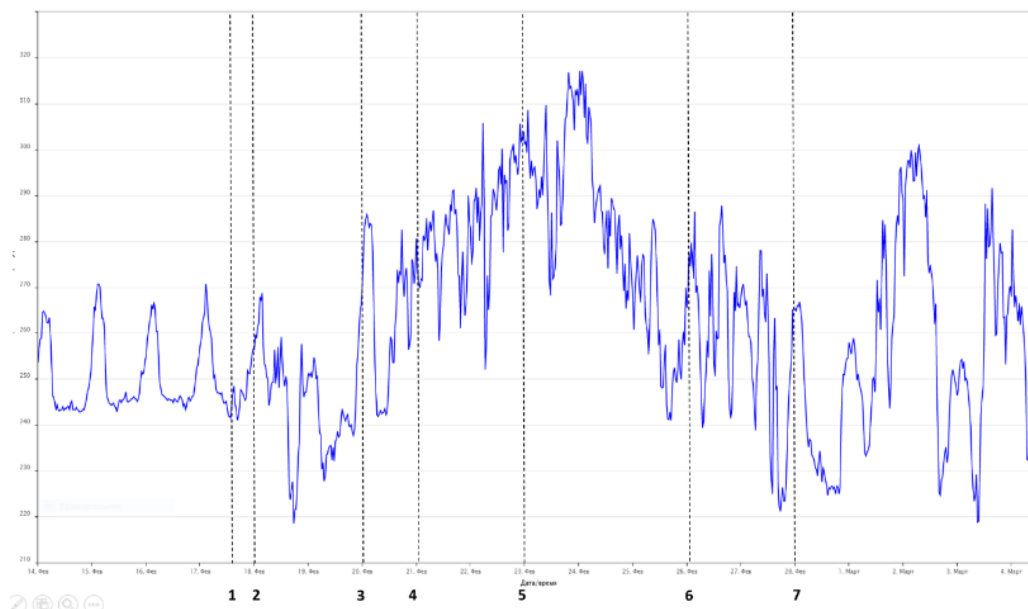


Рисунок 3.2.2.2 — Изменение величины яркостной температуры в канале 3,9 мкм прибора АНІ спутника Himawari-8 в районе бокового прорыва влк. Ключевской с 15 февраля по 4 марта 2021 г.: 1 — первые признаки изменения температуры в зоне прорыва; 2 — парогазовая эмиссия в районе прорыва на Sentinel-2A, 18.02.2021, 00:30 GMT (здесь и далее см. рисунок 3.2.2.1); две трещины прорыва на данных: 3 — Landsat-7, 19.02.2021, 23:29 GMT; 4 — Sentinel-2A, 21.02.2021, 00:40 GMT; 5 — Sentinel-2B, 23.02.2021, 00:30 GMT; 6 — Sentinel-2B, 26.02.2021, 00:40 GMT; 7 — Sentinel-2A, 28.02.2021, 00:30 GMT (продолжается работа верхней трещины прорыва)

2 марта на изображениях с видеокамер наблюдался парогазовый столб над верхним шлако-лавовым конусом прорыва и фреатические взрывы над фронтом его лавового потока, внедрявшегося в ледник Эрмана. Пепел при фреатических взрывах поднимался до 3,5–4,0 км н.у.м. 2 марта вулканологи, в том числе соавтор статьи Д. Мельников, побывали на прорыве. Высота шлакового конуса достигала 50 м, длина агломератового (типа а-а) лавового потока от конуса до ледника Эрмана составляла 1,2 км.

Обнаружение побочного извержения вулкана Ключевской стало возможным благодаря ежедневному мониторингу вулкана с помощью спутниковых данных в ИС VolSatView и видеонаблюдений. Работа ИС VolSatView осуществляется благодаря ресурсам Дальневосточного центра НИЦ «Планета», Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» и ЦКП «Центр данных ДВО РАН»

3.2.3 Создание методов оперативной оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе анализа интенсивности горения

Спутниковый мониторинг в настоящее время позволяет получать достоверные оценки целого ряда характеристик земной поверхности для решения различных задач. Одним из актуальных и востребованных направлений является оценка различных характеристик лесного покрова. В число таких характеристик входят как оценки повреждений лесного покрова связанные, в том числе, с действиями природных пожаров.

Подобные оценки, в частности, могут выполняться на основе анализа рядов наблюдения гарей, возникающих в результате лесных пожаров. Для выполнения подобных оценок требуется получение временных рядов наблюдений, поэтому они выполняются со значительной задержкой после окончания действия пожаров. В то же время представляет интерес и получение оперативных оценок возможных повреждений, которые потенциально могут быть выполнены на основе анализа интенсивности горения, наблюдаемого на конкретном пожаре. Проведённые в этом направлении исследования были посвящены оценке возможности использования информации об интенсивности горения (FRP, Fire Radiative Power). Основной задачей исследования было определение зависимости между FRP и степенью повреждения различных типов лесов. Определение такой зависимости позволит создать методики оперативной оценки степени повреждения лесного покрова пожарами. При этом следует отметить, что до настоящего времени исследования в этом направлении ограничивались лишь анализом очень ограниченных наборов данных о интенсивности горения и повреждениях, основанных в основном на наземных наблюдениях.

Для выполнения данной работы в качестве исходных данных об FRP был использован однородный ряд данных о пожарах и горячих точках, имеющийся в ЦКП ИКИ-Мониторинг (<http://ckp.geosmis.ru/>). Этот ряд сформирован на основе продукта Collection 6 MODIS Active Fire / Hotspot Data (MCD14DL). Имеющиеся данные покрывают территорию РФ с 2001 г. по настоящее время и проаннотированы (привязаны) по картам типов территорий, ежегодно формируемых в ИКИ РАН.

В качестве данных о повреждении лесов, сопоставление которых проводилось с информацией об FRP, был взят ряд с 2012 по 2019 г. на территорию РФ, полученный с использованием метода оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS, разработанный в ИКИ РАН. Данные представляют собой полигоны повреждений с указанием даты определения и степени повреждения лесов. Степень повреждения определяется одним из пяти классов средневзвешенной категории состояния (СКС): первый класс — здоровые насаждения, второй — ослабленные, третий — сильно ослабленные, четвёртый — усыхающие, пятый — погибшие).



Рис. 3.2.3.1 – распределение FRP горячих точек по сопоставленным классам СКС

Для исследования зависимости между энергетическими характеристиками пожаров и постпожарными повреждениями была разработана методика сопоставления информации о наблюдаемых FRP с данными об СКС, основанная на использовании постпожарных карт

FRP. Следует отметить, что при сравнении использовались не значения FRP (интегральный поток, получаемый от одного пикселя), а значение FRP, нормированное на площадь пикселя (поток, идущий с единицы площади). На рисунке 3.2.2.1 представлены полученные зависимости значения FRP горячих точек и классов СКС.

Распределение показывает выявленные зависимости значений FRP между классами. На основе распределения установлено, что класс погибших хорошо выделяется по распределению средних значений FRP. Для того, чтобы перейти к оценкам площадей, была построена зависимость вероятности гибели лесного покрова (наблюдения 4-го и 5-го классов повреждений) в точках постпожарных карт FRP для их конкретных значений. Полученная зависимость приведена на рисунке 3.2.3.2.



Рисунок 3.2.3.2 — Доля горячих точек, отнесённых к 4-му и 5-му классам, по диапазонам FRP

На приведённом графике шкала FRP разбита на интервалы, внутри каждого из которых рассчитана доля горячих точек 4-го и 5-го классов. Пятый класс рассматривается в объединении с четвертым в связи с тем, что во многих исследованиях к погибшей растительности относят именно покров с разрушениями 4-го и 5-го классов. Видно, что начиная со значения FRP в около 80 МВт/км², во всех последующих диапазонах доля таких точек превышает 50 %, а значит разрушения от пожаров с большим FRP вероятнее будут относиться к классам усыхающей и погибшей растительности.

Полученные результаты в настоящее время используются для разработки методики оценки площадей усыхающих и погибших лесов по данным об FRP отдельных пожаров.

3.2.4 Разработка методов оперативной оценки площадей, пройденных огнём

Использование обновлённого ряда данных о термических аномалиях Modis Collection 6, как было показано в отчёте 2020 г., имеет ряд особенностей. Интегральные площади пожаров и их количество отличались от данных, получаемых по предыдущей коллекции MC5, используемой для оценки площадей пожаров до 2016 г., и требовали проведения дополнительных уточнений. Для этого были проведены работы, направленные на получение обновлённой функции коэффициента коррекции площадей и сформированы предварительные оценки площадей, в том числе, в сравнении с многолетним рядом по данным MC5.

Разработка методов оперативной оценки площадей, пройденных огнём, требует проведения оценки эффективности разработанного алгоритма коррекции площадей. При этом основным критерием эффективности такого алгоритма является точность

определения площадей пожаров. Далее была проведена оценка точности обновлённой функции коэффициента коррекции площадей и разработан метод оперативной оценки.

Для оценки точности определения площадей использовался созданный на предыдущем этапе набор уточнённых площадей пожаров – гарей, построенных по результатам классификации спутниковых данных высокого пространственного разрешения с приборов MSI (КА Sentinel-2), ETM+ (КА Landsat 7) и OLI-TIRS (КА Landsat-8). Набор содержит очищенные и верифицированные данные для 5474 пожаров 2009–2020 гг. общей уточнённой площадью 9,06 млн га.

Особенности соотношения геометрических площадей пожаров, полученных по данным детектирования активного горения, и площадей соответствующих им гарей хорошо видны на двумерной диаграмме, представленной на рисунке 3.2.4.1. Видно, что абсолютные расхождения двух оценок зависят от площади конкретного пожара. При этом геометрическая площадь, полученная по данным активного горения, даёт завышенную оценку. Систематическая ошибка такой оценки фактически определяется отклонением среднего значения геометрических площадей пожаров в заданном диапазоне от линии $y = x$, (показана на графиках серой линией). Данная линия соответствует точному совпадению значений оценок площадей, получаемых на основе данных наблюдения активного горения и площадей, полученных на основе данных высокого пространственного разрешения. При этом видно, что по мере увеличения площади пожаров ошибка её оценки по геометрической площади пожара по данным активного горения падает. То есть площади крупных пожаров достаточно хорошо оцениваются и по информации, полученной на основе детектирования активного горения.

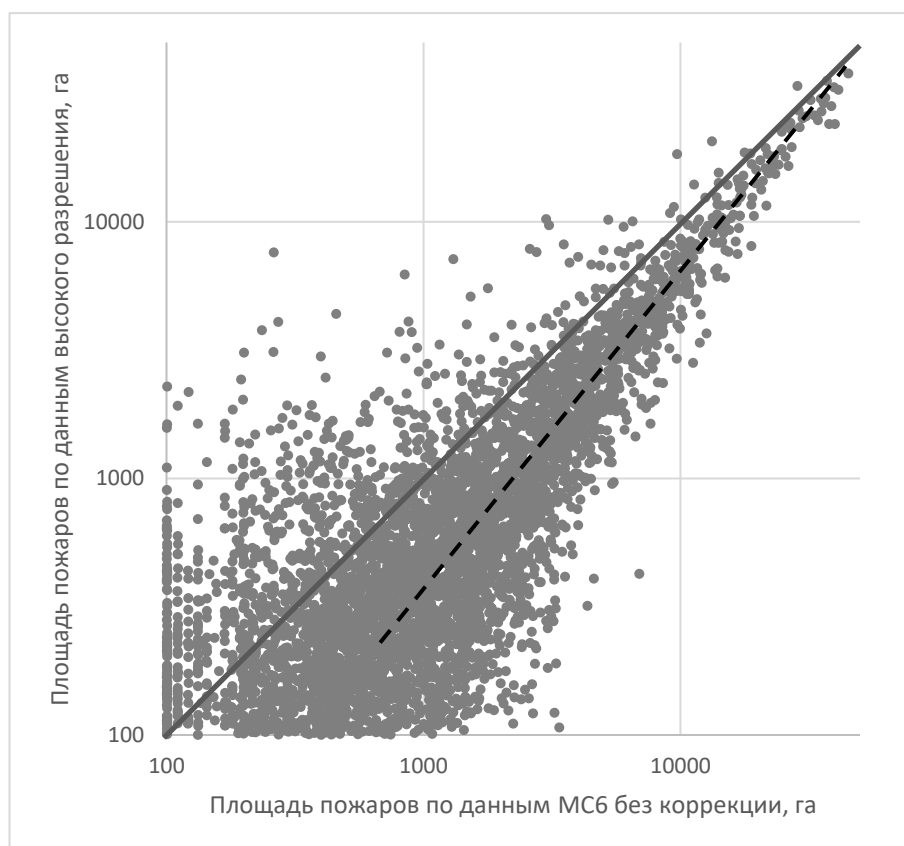


Рисунок 3.2.4.1 — Ошибка определения площадей пожаров по результатам дистанционного детектирования по данным МС6 и площадей соответствующих им гарей

После применения предложенного коэффициента коррекции к площадям пожаров из уточнённой выборки на рисунке 3.2.4.2 представлена гистограмма распределения откорректированных геометрических площадей пожаров и площадей гарей.

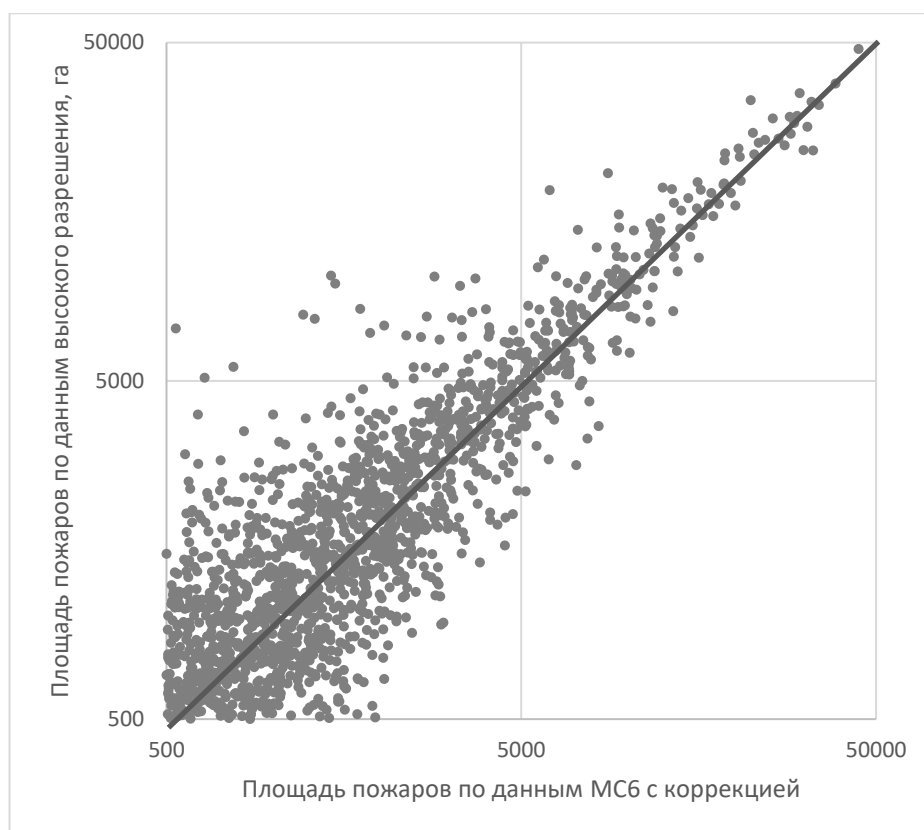


Рисунок 3.2.4.2 — Гистограмма скорректированных геометрических площадей и площадей гарей анализируемой выборки

Хорошо видно, что скорректированный набор данных фактически сгруппирован вокруг диагональной линии $y = x$. Это фактически означает, что проведение предложенной коррекции позволяет исключить систематическую ошибку. Полученная при этом интегральная скорректированная геометрическая площадь пожаров используемой выборки составила 8,77 млн га, что всего на 3,6 % расходится с интегральной площадью гарей в используемой выборке (9,06 млн га). При этом следует отметить, что общая геометрическая площадь пожаров используемой выборки составляет 13,58 млн га, т.е. она почти на 50 % превышает интегральную площадь гарей. Также были рассчитаны среднеквадратические отклонения в каждой используемой группе площадей. Фактически это позволило оценить случайную ошибку определения площади пожара в конкретной группе. С использованием этой информации была произведена оценка точности интегральной скорректированной площади пожаров. Она составила примерно 1,5 %. Расхождение в оценке ошибок интегральных площадей, видимо, можно объяснить тем, что при построении зависимости для коэффициента коррекции явно не учитывались пропуски пожаров, которые, как уже отмечалось, могут возникать из-за не очень высокой частоты их наблюдения с использованием только данных прибора MODIS и составлять 2,3 %. Суммарная ошибка, определяемая случайными ошибками и ошибками пропуска пожаров, составляет примерно 3,8 %, что хорошо согласуется с расхождениями, получаемыми при сравнении интегральных площадей гарей и откорректированных площадей пожаров, полученных на основе данных детектирования активного горения.

С учётом того, что для построения коэффициента коррекции геометрических площадей пожаров, получаемых на основе данных детектирования активного горения с использованием коллекции МС6 и проверок точностей оценок интегральных площадей, использовался достаточно репрезентативный набор данных (объем выборки соответствует площадям, проходимым лесными пожарами в годы средней горимости), можно

утверждать, что получаемые таким образом оценки площадей лесных пожаров на территории РФ имеют ошибку порядка 4 %.

Таким образом, подобная точность позволила разработать метод для оперативной оценки площадей, пройденных огнём, по данным прибора MODIS коллекции 6. В настоящее время разработанный метод используется для оперативной оценки площадей пожаров во всех проектах созвездия Вега, включая УНУ «Вега-Science» и «Вега-Лес», а также в системе дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ-Рослесхоз.

Реализованный метод был так же применён для оценки площадей, пройденных огнём, для всего многолетнего ряда данных с 2001 по 2021 г. Общие и лесные площади, пройденные огнём на территории РФ, представлены на рисунке 3.2.4.3.

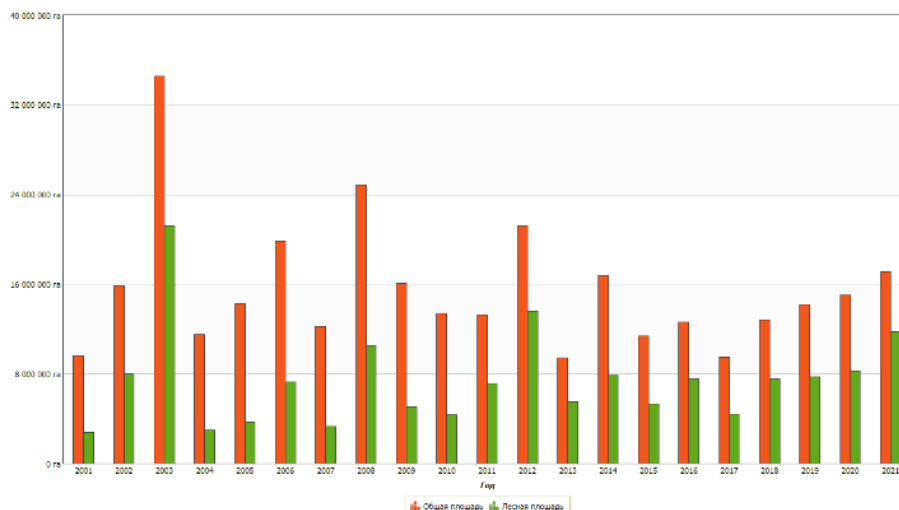


Рисунок 3.2.4.3. Площади, пройденные огнём, с применением разработанного метода оценки

3.2.5 Анализ извержения грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море 4 июля 2021 года

Юго-западный район Каспийского моря по количеству грязевых вулканов, их разнообразию и весьма активной деятельности является уникальным, не имеющий равных в мире. Грязевые вулканы в море делятся на подводные и островные. В результате грязевулканической деятельности в морских условиях образуются острова, банки, мели и подводные хребты. Несмотря на то, что поверхностные проявления грязевого вулканизма в Каспийском море наблюдаются регулярно, зафиксировать момент самого извержения удаётся крайне редко, а тем более из космоса. Такое извержение в виде взрыва, которое по сообщениям СМИ (<https://nplus1.ru/news/2021/07/05/caspian-mud-volcano>) произошло вечером 4 июля 2021 г. у восточного побережья Азербайджана на необитаемом о. Дашлы, было заснято с судов, а также отразилось в данных радиометров SLSTR Sentinel-3A, -3B в виде тепловой аномалии. Этот остров расположен примерно в 30 км от берега и в 6 км от морской газовой платформы «Умид». Координаты острова 39,62° с.ш. и 49,71° в.д.

Выброс грязевого вулкана был зафиксирован в 17:50 GMT в виде взрыва и огненного столба, а в 18:08 GMT этот же выброс был зарегистрирован спутником Sentinel-3B (рисунок 3.2.5.1а). По данным радиометра SLSTR (в канале 3,5–3,9 мкм) на месте выброса грязевого вулкана наблюдалась тепловая аномалия, которая на рисунке 3.2.5.1а видна на представленном изображении как черная точка (зона повышенной температуры). В этот же момент хорошо виден выброс образовавшийся в результате взрыва (белое пятно на изображении). Разнос выброса был также зарегистрирован в 18:48 GMT прибором SLSTR спутника Sentinel-3A (рисунок 3.2.5.1б) и в 19:15 GMT прибором MODIS спутника

Terra (рисунок 3.2.5.1в). На последующих данных метеорологических спутников следов выброса уже не зарегистрировано.

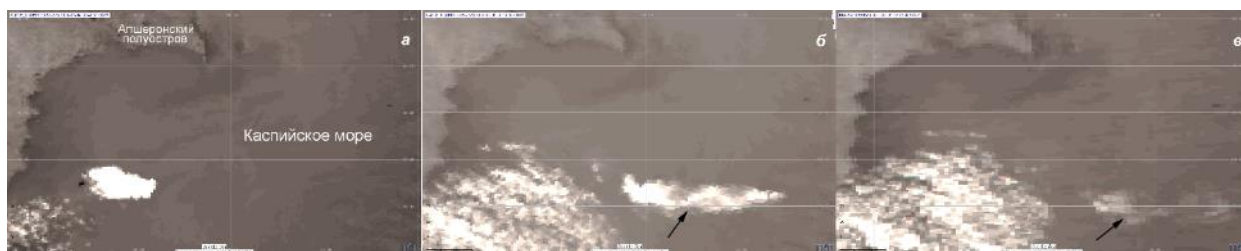


Рисунок 3.2.5.1 — Проявление выброса грязевого вулкана на о. Дашлы 4 июля 2021 г. в данных: а — SLSTR Sentinel-3B (18:08 GMT), чёрная точка — тепловая аномалия, связанная с взрывом; б — SLSTR Sentinel-3A (18:48 GMT); в — MODIS Terra (19:15 GMT). Стрелки указывают на разнос выброса

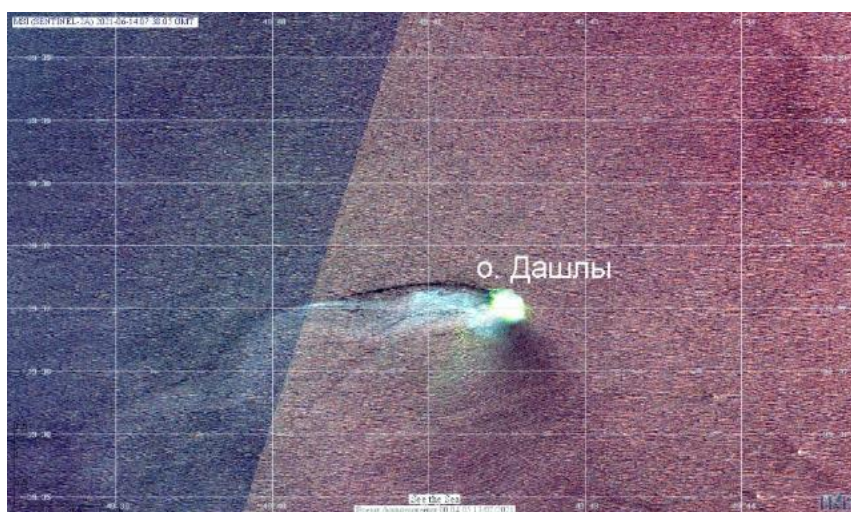


Рисунок 3.2.5.2 — Проявление плёнок естественных выходов нефтеуглеводородов на MSI Sentinel-2A изображении от 14 июня 2021 г. в районе о. Дашлы

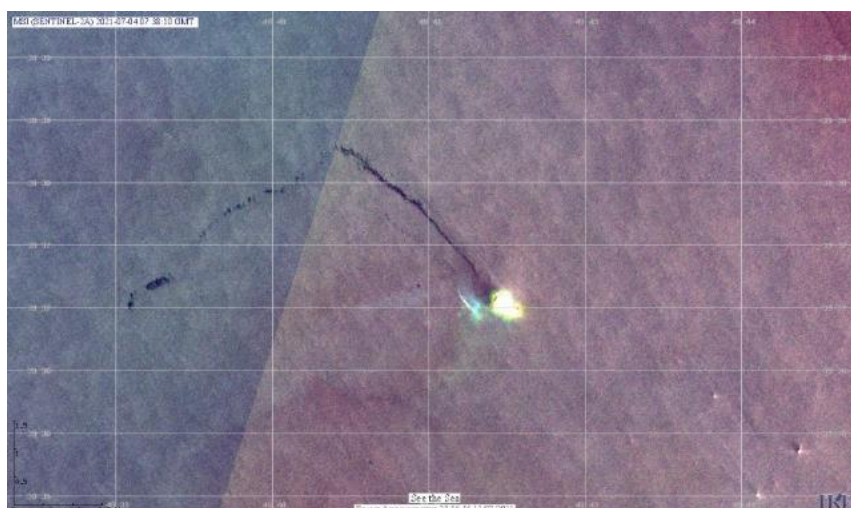


Рисунок 3.2.5.3 — Проявление плёнок естественных выходов нефтеуглеводородов на MSI Sentinel-2A изображении от 4 июля 2021 г. накануне взрыва

В районе о. Дашлы периодически наблюдаются плёнки естественных выходов нефтеуглеводородов, как у многочисленных морских платформ, так и непосредственно тянущихся от самого острова (рисунок 3.2.5.2). Утром 4 июля, накануне взрыва, на

изображении MSI Sentinel-2A особенно отчётливо проявилась сликовая полоса, связанная с наличием выброса нефтеуглеводородов, что, по всей видимости, свидетельствовало об интенсификации грязевого вулканизма (рисунок 3.2.5.3).

Как показали спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ), полученные до и после извержения грязевого вулкана, площадь о. Дашлы после взрыва увеличилась в 2,4 раза с 0,0904 км², определённая по РЛИ от 14 июня до 0,22 км², по РЛИ от 8 июля, т.е. после взрыва (рисунок 3.2.5.4). Причём на РЛИ от 8 июля 2021 г. видно распространение сликовой полосы, вызванной наличием нефтеуглеводородов, что возможно свидетельствует о продолжении активности грязевого вулканизма.

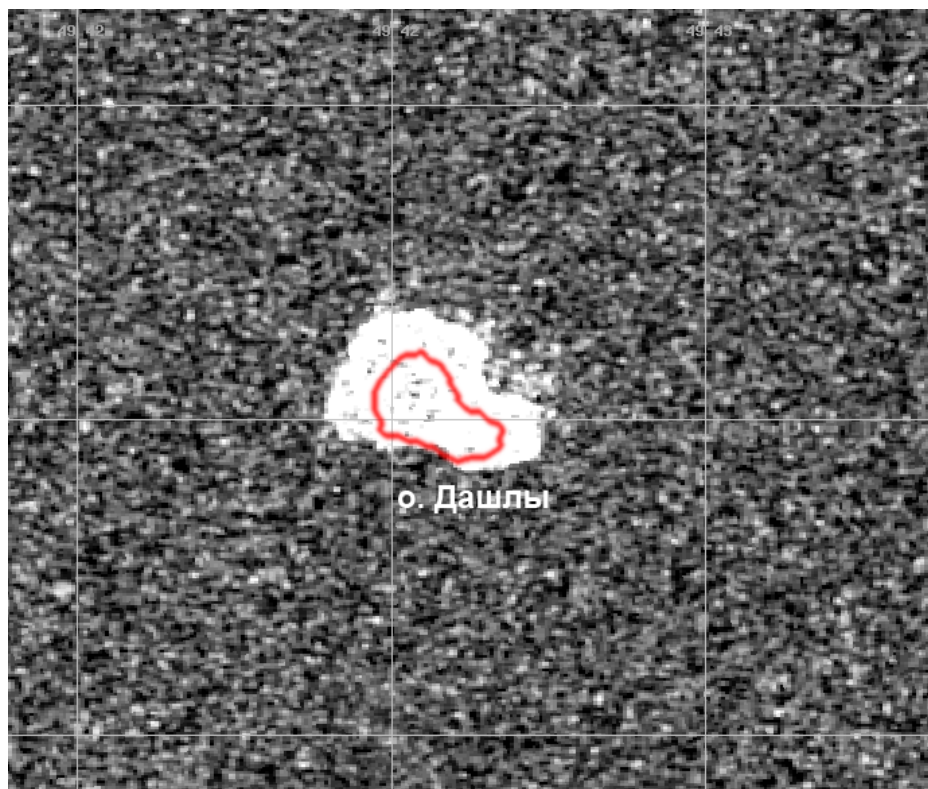


Рисунок 3.2.5.4 — Увеличение площади о. Дашлы в 2,4 раза после взрыва. РЛИ SAR-C Sentinel-1A, полученное на перекрёстной поляризации 8 июля 2021 г. (после взрыва). Красная линия отмечает контуры острова, определённые по РЛИ от 14 июня 2021 г. (до взрыва)

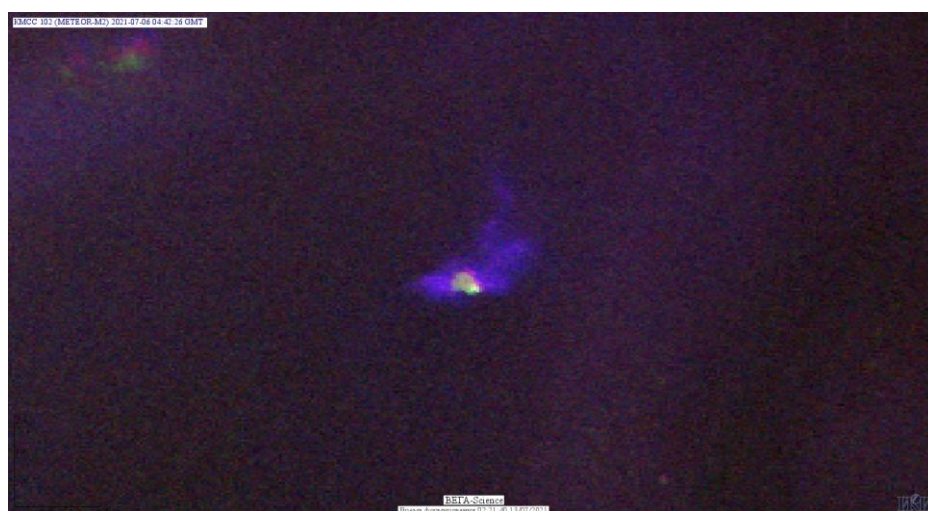


Рисунок 3.2.5.5 — Изображение о. Дашлы 06.07.2021, данные прибора ММСС (спутник «Метеор-2М»)

Следует также отметить, что после произошедшего взрыва активность вулкана продолжилась это хорошо видно на данных съёмки полученной спутником «Метеор-М» № 2 (прибор (КМСС). Эти данные представлены на рисунке 3.2.5.5. Светлое пятно соответствует выбросу газов в атмосферу в районе о. Дашлы, где произошёл взрыв.

3.2.6 Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых по данным спутниковой микроволновой радиометрии

Работа выполнялась совместно с Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ, Санкт-Петербург)

В исследовании использовался готовый продукт по сплочённости морского льда (уровня Level 3) Бременского университета, рассчитанной с помощью алгоритма ASI (ARTIST Sea Ice). Алгоритм ASI базируется на расчёте разности яркостных температур высокочастотного канала 89 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Ежедневные расчёты сплочённости по Арктике доступны на сайте <https://seaice.uni-bremen.de>. Для анализа были взяты результаты обработки данных радиометра AMSR-2 (ASI v.5.4) с разрешением 6,25 км.

Карты сплочённости, построенные по алгоритму ASI, подбирались таким образом, чтобы даты измерений совпадали с датами составления ледовых карт АНИИ, которые использовались в качестве эталона для сравнения площадей ледяного покрова. Сплочённость, определённая с помощью алгоритма ASI, разбивалась на интервалы, соответствующие стандартным интервалам сплочённости, принятыми в АНИИ: <1 балла, 1–3, 4–6, 7–8, 9–10 баллов (или <10 %, 10–30, 40–60, 70–80, 90–100 %).

Выделение зон различной сплочённости и форм полей для обширных регионов проводилось по данным радиометра MODIS метеорологических спутников Terra и Aqua (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>). Для дешифрирования использовались композитные изображения с разрешением 250 м, составленные из каналов видимого диапазона (Band 1: 0,62–0,67 мкм, Band 4: 0,545–0,565 мкм, Band 3: 0,459–0,479 мкм).

Для более детального дешифрирования форм полей и загрязнённости морского льда привлекались данные более высокого разрешения со спутника Landsat-8 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Композитные изображения составлялись из каналов видимого диапазона (Band 4: 0,64–0,67 мкм, Band 3: 0,53–0,59 мкм, Band 2: 0,45–0,51 мкм), разрешение снимков — 30 м (таблица 3.2.6.1).

Таблица 3.2.6.1 — Характеристики каналов спутника Landsat-8

Прибор	Номер (название) канала	Диапазон длин волн, мкм	Пространственное разрешение, м
OLI	Band 1 (Visible)	0,43–0,45	30
	Band 2 (Visible)	0,450–0,51	30
	Band 3 (Visible)	0,53–0,59	30
	Band 4 (Red)	0,64–0,67	30
	Band 5 (Near-Infrared)	0,85–0,88	30
	Band 6 (SWIR 1)	1,57–1,65	30
	Band 7 (SWIR 2)	2,11–2,29	30
	Band 8 (Panchromatic — PAN)	0,50–0,68	15
	Band 9 (Cirrus)	1,36–1,38	30
TIRS	Band 10 (TIRS 1)	10,6–11,19	100
	Band 11 (TIRS 2)	11,5–12,51	100

Еженедельные обзорные ледовые карты АНИИ для всей акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) обобщают все имеющиеся и доступные данные (спутниковые, а также оперативные данные с судов и полярных станций). Для построения обзорных

региональных карт, доступных на официальном сайте ААНИИ (<http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17>) и в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду (<http://wdc.aari.ru/datasets/d0004>), используется информация, собранная за 2–3 сут, поскольку получить ледовую карту целого бассейна за одни сутки, как правило, невозможно из-за наличия облачности на оптических снимках и неполного суточного покрытия акватории радарными данными. Обобщение спутниковой информации за 2–3 сут даёт возможность составить обзорную карту, которая, как мозаика, состоит из отдельных частей, привязанных к разным моментам времени. Приоритетной становится наиболее свежая информация. Если на дату составления карты нет информации по какому-то району, то берётся информация за предыдущую дату и так далее. Все накопленные за 2–3-дневный период изображения подгружаются в ГИС в виде слоёв и далее интерпретируются ледовым экспертом. В первую очередь используются данные в видимом и инфракрасном диапазоне, а также радиолокационные данные (NOAA, MetOp, Terra, Aqua, Suomi NPP, Fengyun, Sentinel-1) и только в случае полного отсутствия в отдельных районах этих данных ледовый эксперт использует данные спутниковой микроволновой радиометрии (СМР) из открытых источников. Общая ледовая карта СЛО, еженедельно выпускаемая на сайте ААНИИ (www.aari.ru), составляется «склеивкой» обзорных региональных карт всех морей, каждое из которых рисуется одним ледовым экспертом.

Для анализа загрязнённости морского льда в Арктике использовались карты, составленные для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря по данным ледовых авиаразведок ААНИИ за период 1950–1980 гг. Ледовые авиаразведки выполнялись в период с 20-х по 90-е гг. XX в. В ходе первых авиаразведок данные о состоянии ледяного покрова наносились наблюдателем на бумажный бланк непосредственно на борту во время полёта. Позднее помимо визуальных наблюдений стали выполняться инструментальные измерения параметров ледяного покрова. Сначала они ограничивались средствами аэрофотосъёмки, а затем с начала 1950-х по 1980 г. был протестирован и внедрён в практику ряд приборов, включавший в себя панорамные радиолокационные станции, авиационные ИК-радиометры, радиолокационные станции бокового обзора, радиолокационные измерители толщины льда, лазерные профилографы и СВЧ-радиометры.

Загрязнённость льда — это площадь загрязнённого льда, выраженная в процентах от наблюдаемой общей площади льда. Поверхность ледяного покрова в результате воздействия различных факторов подвергается естественному и искусственному загрязнению. Наиболее значительное количество веществ органического происхождения попадает на лёд из морской воды в процессе её замерзания и таяния. Частицы неорганического происхождения попадают в лёд со дна морей на мелководье, а также в результате материкового стока и ветрового разрушения суши. Часть грязи на льду появляется в результате хозяйственной деятельности человека (районы интенсивного судоходства, устья рек, районы портов и городов). Грязь на поверхности льда обычно распространена неравномерно, и количество её меняется в течение года. Загрязнённость ледяного покрова определяется визуально по 3-балльной шкале.

При дешифрировании морского льда по спутниковым данным и составлении ледовых карт в период интенсивного таяния в арктических морях в летний период выявляются обширные зоны льдов, хорошо видимые на снимках в видимом диапазоне, но не идентифицируемые методами СМР.

Загрязнённость оказывает существенное влияние на интенсивность таяния льдов. Как показали модельные эксперименты, интенсивность таяния загрязнённых льдов может приводить к значительным, а в некоторых случаях к катастрофическим изменениям баланса их массы в СЛО и срокам очищения арктических морей от сезонного ледяного покрова. Альbedo загрязнённой поверхности уменьшается примерно до 0,2, из-за этого таяние снега ускоряется в 2–3 раза, а льда — на 50–150 %. Альbedo загрязнённой

поверхности меньше, чем незагрязнённой, в среднем на 0,2–0,3. Это способствует увеличению в среднем на 40 % количества тепла, идущего на таяние льда сверху, что в свою очередь приводит к более интенсивному прогреву прилёдного слоя воздуха и усилению «контактного» таяния по сравнению с «радиационным». Этот процесс охватывает не только поверхность самих загрязнённых льдов, но и соседних чистых участков.

Результаты авиационных наблюдений показывают, что в случае, когда снежницы на загрязнённом льду занимают половину площади его поверхности, то на незагрязнённых льдинах — лишь около 30 %. Таким образом, загрязнённость косвенным образом влияет на яркостную температуру поверхности льда — в период интенсивных процессов таяния загрязнённые льды разрушаются быстрее и на них образуется большее количество снежниц. Такие льды хуже идентифицируются методами СМР, так как их яркостная температура схожа с яркостной температурой воды.

Однако загрязнённость оказывает и прямое влияние на идентификацию льда по данным СМР. В зоне припая она носит слоистый характер, причём слои с максимальной концентрацией загрязнений чаще расположены ближе к поверхности льда. В процессе таяния на последних стадиях разрушенности после полного исчезновения с поверхности льда снежного покрова начинается вытаивание этих слоёв. Этот процесс приводит к повышенной концентрации отложений в снежницах, ускорению их сквозного протаивания, а также более высокой концентрации загрязнения на поверхности льда. Пример таких сильно загрязнённых и одновременно сильно разрушенных льдов приводится на рис. 3.2.6.1.

Поверхность льда, изображённая на рисунке 3.2.6.1, схожа по своим излучательным свойствам в микроволновом диапазоне с поверхностью очень влажной почвы (грунта). С увеличением влажности почвы уменьшается её излучательная способность; она зависит и от других свойств — содержания солей, гранулометрического состава, шероховатости поверхности, но в наибольшей степени определяется влажностью. В микроволновом диапазоне излучательная способность очень влажной почвы приближается к излучательной способности водной поверхности. Для высокочастотного канала (около 90 ГГц), который использует алгоритм ASI, различия в излучательной способности очень влажной почвы и водной поверхности очень незначительны.



Рисунок 3.2.6.1 — Фотография сильно загрязнённого морского льда 11 августа 2016 г. (фото Алексеевой Т.А.), выполненная на борту НИС «Академик Трешников» в море Лаптевых у побережья полуострова Таймыр

Вопрос загрязнённости морских льдов представляется достаточно важным, так как в Арктике такие льды занимают обширные площади. Методами дистанционного зондирования Земли грязные льды можно определить только по снимкам высокого разрешения в оптическом диапазоне, однако сцены таких снимков редки и покрывают лишь небольшие участки акватории, над которыми в летний период в большинстве случаев присутствует облачность, а зимой загрязнённость льда не видно под толщей снега. Данные экспедиционных исследований нерегулярны и покрывают небольшие районы. Одним из самых ценных источников информации об областях загрязнённого льда в российских арктических морях оказываются карты авиаразведок ААНИИ 1950–1980 гг. На рисунке 3.2.6.2 представлена оценка загрязнённости льда в июле на основе обобщения материалов 1959, 1972, 1974–1976 гг. для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (см. рисунок 3.2.6.2). Области сильно загрязнённого льда наблюдаются в районах рек Хатанга, Лена, Яна, Индигирка, Колыма и в мелководном районе Новосибирских островов. Стоит учитывать, что со времени проведения авиаразведки ледовый режим в арктических морях существенно изменился и карты распределения загрязнённости на рисунке 3.2.6.2 могут отличаться от обстановки в настоящее время вследствие изменения дрейфа и режима таяния морского льда в различные месяцы. Однако источники загрязнения в арктических морях остались прежними, и за неимением более свежей информации карта распределения загрязнённости на рисунке 3.2.6.2 ценна для понимания основных районов распределения загрязнённых льдов и в настоящее время.

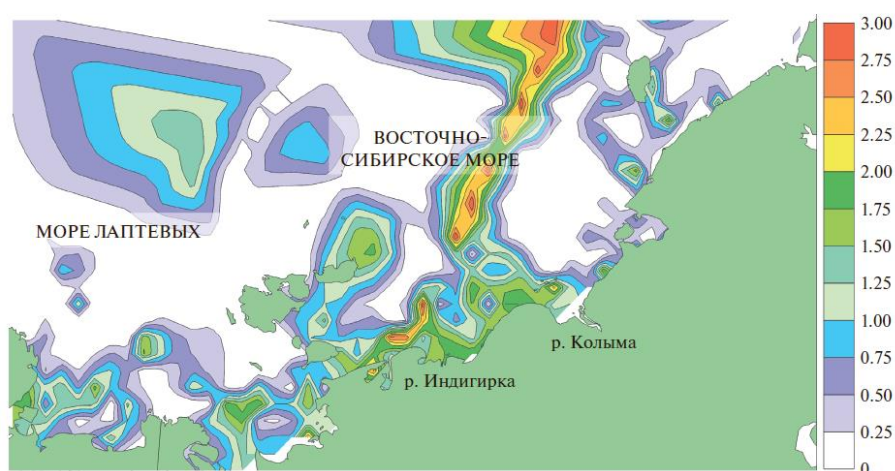


Рисунок 3.2.6.2 — Загрязнённость морского льда в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море в июле на основе данных авиаразведок ААНИИ за период 1953–1976 гг. Шкала загрязнённости определяется по 3-бальной шкале (0 — чистый лёд, 3 — сильно загрязнённый лёд)

На рисунке 3.2.6.3 показан район устья реки Колыма 26 июля 2020 г. По снимкам Terra MODIS и Landsat в видимом диапазоне можно определить, что льды, которые не идентифицируются с помощью СМР, в данном районе представляют собой зоны очень сплочённых, сплочённых и разреженных льдов с различными размерами льдин, сильно разрушенных и сильно загрязнённых. Часть дрейфующих льдов в данном районе в июле на рисунке 3.2.6.3 — это обломки разрушенного припая, сформировавшегося в течение зимнего сезона в районе устья реки Колыма, который, по мере своего нарастания, загрязнялся осадками терригенного происхождения, выносимыми речными водами.

Наиболее важным параметром, влияющим на недооценивание сплочённости морского льда в летний период, выступает разрежённость льда. В летний период поверхность ледяного покрова покрывается снежниками, вследствие чего ледяной покров «принимается» микроволновым радиометром за открытую водную поверхность. Однако сильная разрушенность морского льда приводит лишь к недооцениванию сплочённости льда, но не к его полному отсутствию на снимках СМР. В летний период одновременно с

появлением снежниц на поверхности льда постепенно происходит вытаивание более тонких льдов, а соответственно — распад сморозей, что приводит к уменьшению размеров ледяных полей. Анализ снимков в видимом диапазоне показал, что по данным СМР практически не отображаются ледовые зоны в прикромочных областях ледяных массивов, языки и полосы льда и отдельно расположенные остатки ледяных массивов, в которых ледяной покров характеризуется битыми льдами с высокой стадией разрушенности. Кроме того, в районах крупных рек, впадающих в СЛО, происходит интенсивное загрязнение льдов в процессе ледообразования в прибрежной зоне, которые затем вследствие дрейфа переносятся на значительные расстояния от побережья. Загрязнённость оказывает существенное влияние на интенсивность таяния льдов — загрязнённые льды разрушаются быстрее и на них образуется большее количество снежниц. Одновременно в процессе таяния происходит повышение концентрации загрязнения на поверхности льда, что делает такие льды похожими на поверхность очень влажной почвы. А в микроволновом диапазоне излучательная способность очень влажной почвы приближается к излучательной способности водной поверхности. Загрязнённые льды занимают значительные площади арктических морей, что подтверждается наблюдениями во время ледовой авиаразведки ААНИИ.

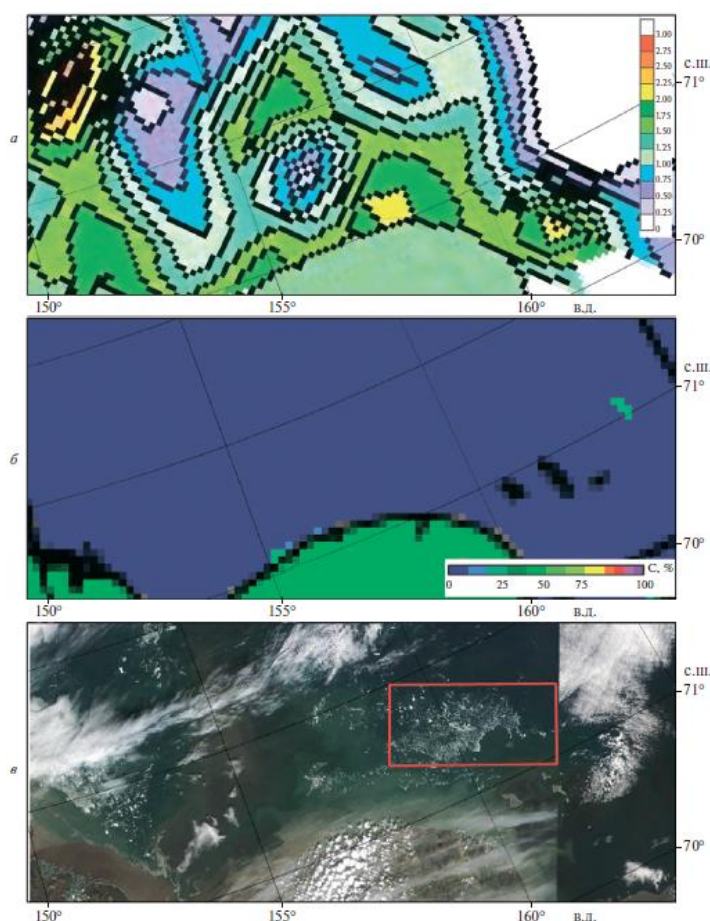


Рисунок 3.2.6.3 — Фрагмент карты загрязнённости морского льда в Восточно-Сибирском море в июле (*а*) на основе данных авиаразведок ААНИИ за период 1953–1976 гг. Шкала загрязнённости определяется по 3-бальной шкале; *б* — сплочённость льда, полученная с помощью алгоритма ASI от 26 июля 2020 г.; *в* — спутниковый снимок Terra MODIS

Для оценки наибольшей площади областей льда, неопределяемых алгоритмом ASI, были рассмотрены ледовые карты СЛО в период наиболее сильной разрушенности морского льда, но одновременно большого распространения разреженных льдов в арктических морях, пока такие льды ещё окончательно не вытаяли (конец августа). За

период 2012–2020 гг., в который доступны карты сплочённости льда, полученные в результате обработки данных радиометра AMSR-2 по алгоритму ASI, был выбран 2012 г. с максимальным количеством разреженных льдов в СЛО и 2014 г. — с их минимальным количеством. В результате «невидимые» на снимках СМР области дрейфующих льдов в конце августа в СЛО в 2012 г. составили 23,3 % от общей площади ледяного покрова, а в 2014 г. — 5,7 %.

Таким образом, данные СМР в летний период не только занижают сплочённость морского льда в Северном Ледовитом океане, но и вовсе не определяют обширные области морского льда при определённых условиях в летний период, описанных выше. Анализ данных алгоритма ASI за период 2012–2020 гг. показал, что такие области могут составлять от 5,7 до 23,3 % от общей площади ледяного покрова в СЛО в конце августа. Площадь «невидимых» областей варьируется от года к году в зависимости от сложившихся условий. Их учёт крайне важен как для практических задач (например, обеспечение судоходства), так и для научных задач при определении площади льда в СЛО. Так как из года в год площадь «невидимых» зон отличается в зависимости от сформировавшихся ледовых условий, то очевидно, что такая коррекция должна значительно изменить данные о межгодовой изменчивости площади льда в СЛО в летний период.

Заключение

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

- Развитие методов количественных исследований процессов переноса скрытого тепла и теплообмена в системе глобальной циркуляции атмосферы Земли на синоптических и климатически значимых масштабах, в том числе, переноса из Атлантики в Арктику и из тропической зоны в антарктические регионы для изучения климатических и погодных изменений арктической и антарктической зон атмосферы Земли;
- Развитие методов диагностики крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений.

При этом одними из наиболее значимых результатов, полученных в рамках данного направления, стали:

- Результаты анализа вертикально интегрированных потоков атмосферного водяного пара по данным спутникового радиотепловидения, метеозондов и реанализа.
- Результаты оценки гидрологических изменений заболоченных территорий Арктики и субарктики методами микроволновой радиометрии.
- Разработка методов оперативной оценки площадей, пройденных огнём на основе детектирования активного горения с использованием коллекции данных МС6 прибора MODIS, которые открыли новые возможности анализа многолетней динамики лесных пожаров на территории России.
- Результаты анализа масштабов аномальной горимости лесов России в 2021 г., которые, в частности показали наличие положительных устойчивых трендов в площадях, пройденных огнём на труднодоступных, неохраемых территориях.

Таким образом материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Климат» в 2021 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. Результаты, полученные по данному направлению, описаны в разделе 4.1 настоящей главы;
- Разработка научных основ совместного использования новейших микроволновых и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий, включая арктические регионы. Результаты, полученные по данному направлению, описаны в разделе 4.2 настоящей главы;
- Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оценки параметров процессов в верхнем слое океана и в приводном слое атмосферы. Результаты, полученные по данному направлению, описаны в разделе 4.3 настоящей главы.

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2021 г. результаты также изложены в основных публикациях [11–13, 56–62, 96, 115, 117–118, 123–125, 127, 129, 155].

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

В исследованиях нелинейной динамики морского волнения дистанционными средствами существенной проблемой оказывается дефицит (зачастую, отсутствие) независимой объективной информации о параметрах волнения: спектре возвышений и уклонов, особенно в коротковолновой области — капиллярных и гравитационно-капиллярных волн. На решении этой проблемы в рамках проведения лабораторных и натурных исследований были сосредоточены основные усилия отчётного периода.

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 восстановления метеопараметров атмосферы и подстилающей поверхности по радиотепловым и оптическим измерениям Земли с космических аппаратов. Поэтому исследование детальной связи параметров капиллярных волн с рассеивающими характеристиками морской поверхности — важная фундаментальная и прикладная задача. Трудность проведения таких исследований заключалась в том, что до последнего времени не существовало прямых методов дистанционного определения параметров капиллярных волн в натурных условиях.

Основой разработанного и реализованного метода становится 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 метод позволяет дистанционно определять детальную структуру всех видов гравитационных и гравитационно-капиллярных волн в широком диапазоне метеоусловий. Достигнутая

точность метода по измерению высоты поверхности раздела составила 0,8 мм, а точность привязки всей траектории к единому моменту времени — 10^{-4} с.

Поставленная задача оказалась технически весьма сложной и потребовала проведения цикла лабораторных и натурных исследований. Важным этапом при создании метода измерения капиллярных волн в морских условиях стали лабораторные измерения. На рисунке 4.1.1 представлена фотография лабораторной установки, которая позволяет с помощью звукового динамика генерировать капиллярные волны заданной амплитуды и частоты, а также обеспечивает дистанционные измерения параметров создаваемых волн.

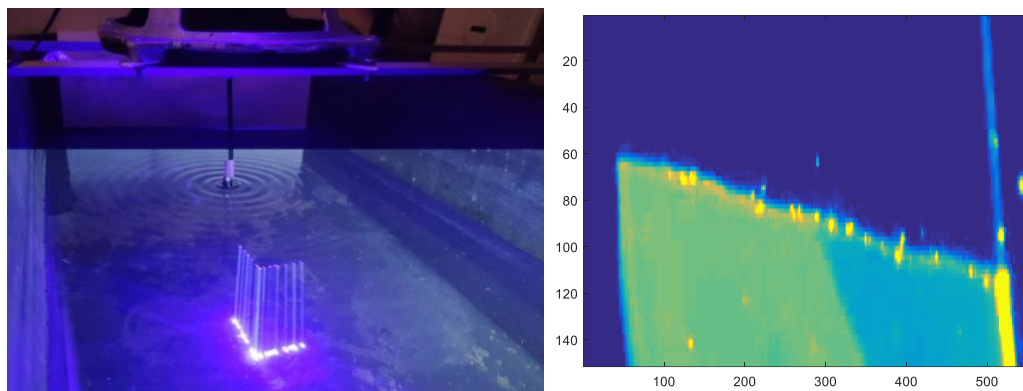


Рисунок 4.1.1 — Освещение взволнованной поверхности лазерными лучами и видеорегистрация границы раздела позволяла измерять амплитуду волнения в каждой освещённой точке

Следующим этапом было создание экспериментальной установки и натурные измерения капиллярных волн. В августе 2021 г. были проведены первые натурные измерения волнографа, который позволял проводить регистрацию капиллярных волн. Измерения проводились с морского пирса Морского гидрофизического института, и с морской гидрографической платформы, расположенной в пгт Кацивели, Крым. Пример видеокadra, полученного 26.08.2021 в 20:47 МСК на морском пирсе представлен на рисунке 4.1.2. На изображении чётко регистрируется форма волновой поверхности. За каждую 6-минутную реализацию удаётся зарегистрировать 21 600 «мгновенных» спектров (рисунок 4.1.3). Это позволяет вычислять как временные, так и пространственные спектры волнения (рисунок 4.1.4), одномерные и двумерные уклоны на любом масштабе, а также изменчивость параметров волнения при изменении метеорологической обстановки.

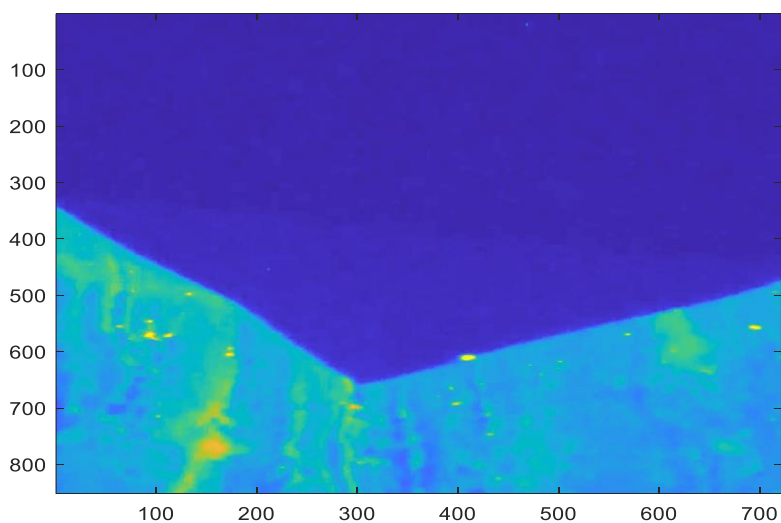


Рисунок 4.1.2 - Типичный видео кадр волнения, полученный 26 августа 2021 г. в 20:47 МСК на морском пирсе. Частота оцифровки 60 Гц

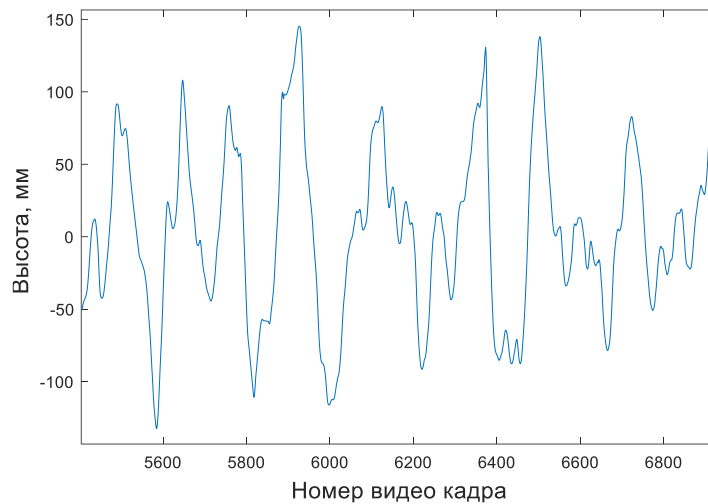


Рисунок 4.1.3 — Пример зависимости высоты волнения от номера кадра для одной точки на траектории развертки

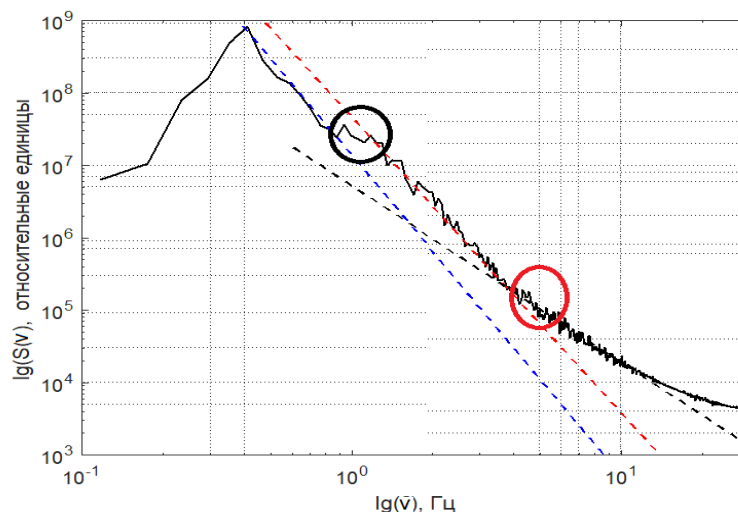


Рисунок 4.1.4 — Спектр возвышений в отдельной точке профиля в логарифмическом масштабе для развивающегося волнения 26.08.2021, Кацивели. Показатели степени на 1-м, 2-м и 3-м (капиллярном) участках составляют: $4,5 \pm 0,3$; $4,0 \pm 0,2$ и $2,6 \pm 0,3$

Измерения подтвердили возможность предложенного лазерного метода по измерению параметров морского волнения на пространственных масштабах охватывающих три порядка: от единиц миллиметров до единиц метров. Нам не известны мировые аналоги, имеющие такие характеристики. Метод запатентован и описан. Создание волнографа, позволяющего проводить прямые измерения «мгновенных» профилей морской поверхности с временной синхронизацией в 10^{-4} с и пространственной точностью лучше 1 мм открывают широкие возможности для исследования физики эволюции волнения, влияния волнения на рассеяние электромагнитных волн. Такие возможности открываются впервые. Достоинство метода заключается в прямом характере измерения аппликат и всех характеристик волнения не только во времени, но и в пространстве. Это позволяет получать большие ряды (21 000) «мгновенных» профилей волнения для каждой 6-минутной реализации. Метод полностью дистанционен, не искажает свойства поверхности, не подвержен влиянию ветра, волн и морского течения, позволяет измерять долю пены на поверхности. Экспериментально в натурных условиях доказана возможность применения предложенного метода в любое время суток и в широком диапазоне погодных условий.

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

В 2021 г. были продолжены работы по разработке научных основ совместного использования данных различных сенсоров спутникового базирования. Разрабатываемые методики совместного использования оптических и радиолокационных спутниковых данных в 2021 г. применялись для решения следующих актуальных задач контроля и оценки экологического состояния морских акваторий:

- выявления аномального зимнего цветения кокколитофорид;
- оценки загрязнения морской поверхности в результате аварийного разлива нефти;
- определения мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевых зонах.

Апробация разрабатываемых методик проводилась с помощью инструментария информационной системы See the Sea (STS) Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», который позволяет эффективно работать с оптическими, инфракрасными и радиолокационными данными различного пространственного разрешения, а также проводить картирование изучаемых процессов и оценивать экологическое состояние морских акваторий.

4.2.1 Выявление зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный период 2020/2021 годов

На основе оперативного анализа спутниковых данных, полученных с помощью сенсоров VIIRS S-NPP, MODIS Terra/Aqua, MSI Sentinel-2A, B, OLI-TIRS Landat-8 и SAR-C Sentinel-1A, -1B выявлен факт зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный период 2020/2021 гг. и прослежены последовательные стадии цветения, оценены его масштабы, интенсивность и продолжительность. Первые признаки начала цветения кокколитофорид в восточной части моря были отмечены 28 ноября 2020 г. На рисунке 4.2.1.1а отчётливо видны два ядра активного размножения водорослей, выделяющиеся как области повышенных значений яркости восходящего излучения. Центрам ядер зарождения-цветения соответствуют точки с координатами 43°50'1" с.ш., 38°51'2" в.д. и 42°38'11" с.ш., 40°5'51" в.д., расположенные примерно над изобатой 1500 м. Определённая по спутниковым данным совокупная площадь морской поверхности, соответствующей областям формирования цветения, составила около 17 000 км². 29 декабря 2020 г. (рисунок 4.2.1.1б), область цветения, проявляющаяся как область существенного повышения яркости восходящего излучения, продвинулась к северу и приобрела связность — ядра цветения слились. Цветение постепенно распространилось на глубоководную часть моря. Область цветения была вытянута в направлении юго-восток – северо-запад примерно на 430 км, достигая Керченского пролива, её ширина местами доходила до 150 км, а общая площадь, определённая по спутниковым данным, составила около 31 000 км².

Пик цветения пришёлся на 1 января 2021 г. (рисунок 4.2.1.1в). Общая площадь области цветения, определённая по спутниковым данным, составила около 39 000 км².

К концу января область цветения практически полностью располагалась в глубоководной части моря, и в ней опять, судя по спутниковому изображению от 22 января 2021 г. (рисунок 4.2.1.1г) образовалось два компактных ядра. По сравнению с состоянием на 1 января 2021 г., площадь области цветения несколько уменьшилась и составила 27 000 км².

Исследования динамики развития и всех аспектов жизнедеятельности кокколитофорид приобретают особую актуальность и значимость в связи с повышением концентрации углекислого газа в атмосфере. Эти водоросли — одни из основных

известняк-продуцирующих организмов в Мировом океане и обладают способностью соединять углекислый газ с кальцием, переводя его в нерастворимую форму — карбонат.

Выявление факта интенсивного цветения кокколитофорид в холодный период года должно внести свой вклад в уточнение причин этого явления и становится ещё одним свидетельством необходимости дальнейшего развития методов спутникового мониторинга морских акваторий.

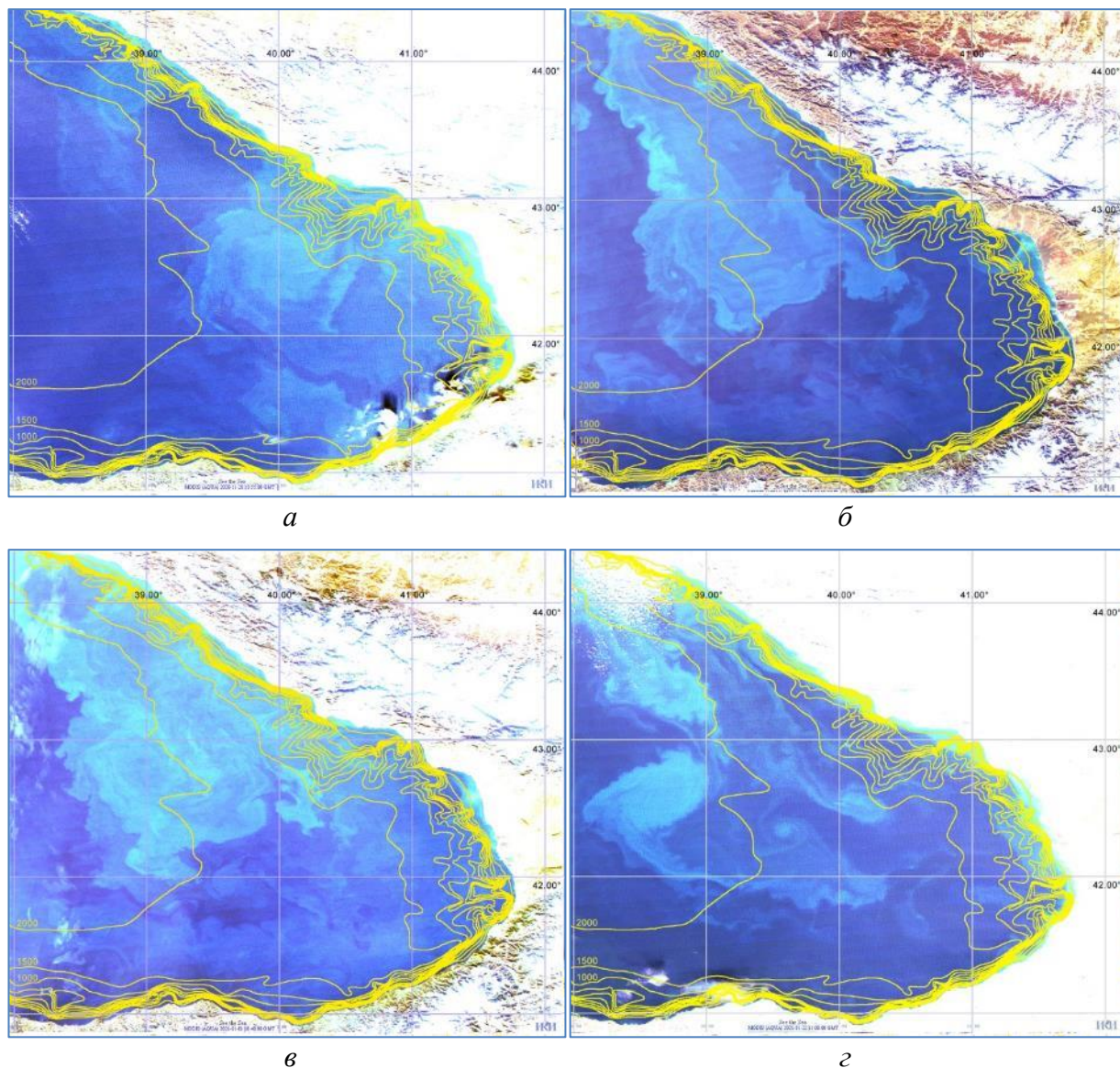


Рисунок 4.2.1.1 — Спутниковые изображения восточной части Чёрного моря, синтезированные в естественных цветах по данным сенсора MODIS ИСЗ Aqua от 28 ноября 2020 г., 10:55 UTC (а); 29 декабря 2020 г., 10:10 UTC (б); 1 января 2021 г. 10:40 UTC (в); 22 января 2021 г. 11:00 UTC (г)

4.2.2 Применение комплексного анализа спутниковых и метеорологических данных для оценки загрязнения морской поверхности в результате аварийного разлива нефти на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума

Разрабатываемые методики совместного использования радиолокационных и оптических спутниковых данных были применены для оценки загрязнения акватории северо-восточной части Чёрного моря, где 7 августа 2021 г. произошёл выброс нефти при заправке танкера Minerva Symphony на морском терминале ВПУ-1 АО «Каспийский трубопроводный консорциум» (АО «КТК-Р») в районе посёлка Южная Озереевка под

Новороссийском. Анализ распространения нефтяного загрязнения и гидродинамики вод был проведён на основе четырёх радиолокационных изображений (РЛИ), полученных радиолокаторами SAR-C спутников Европейского космического агентства Sentinel-1A, -1B и двух оптических изображений приборов MODIS-Aqua и MSI-Sentinel-2A. По радиолокационным и оптическим изображениям за 7 и 8 августа 2021 г. были получены оценки площади и объёма нефтяного загрязнения. На изображении от 7 августа, полученном через 98 мин после аварии, площадь загрязнённой нефтяной плёнкой морской поверхности составила не менее 0,21 км², а 8 августа площадь нефтяного пятна увеличилась до 83 км². Оптическое изображение MODIS-Aqua от 8 августа позволило установить форму и площадь нефтяного пятна в промежутке между двумя РЛИ, что доказало преобладание формы нефтяного загрязнения и подтвердило роль субмезомасштабного циклонического вихря в распространении нефтяного загрязнения по акватории моря (рисунок 4.2.2.1).

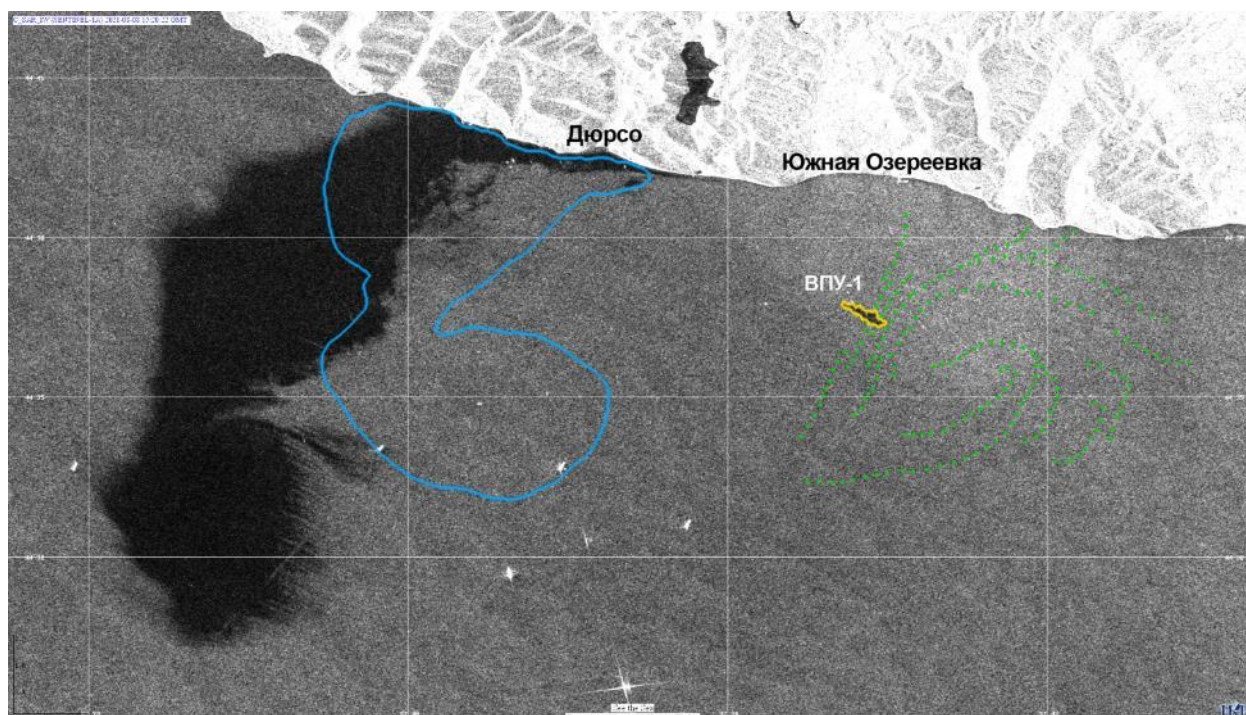


Рисунок 4.2.2.1 — Смещение нефтяного пятна и циклонического вихря с 7 по 8 августа 2021 г. по серии радиолокационных и оптических спутниковых изображений: жёлтый контур — нефтяное пятно в районе аварии, выявленное на РЛИ от 7 августа в 15:27 UTC; зелёные точки — контур циклонического вихря, выявленного на РЛИ от 7 августа в 03:33 UTC; голубой контур — проявление циклонического вихря на изображении MODIS Aqua от 8 августа в 10:25 UTC. Контуры наложены на РЛИ от 8 августа в 15:20 UTC

Для оценки скорости и направления распространения нефтяного загрязнения от источника использовались метеорологические данные о скорости и направлении ветра из разных источников.

Прибрежная акватория между Анапой и Геленджиком — это зона экологического риска вследствие постоянного нефтяного загрязнения, вызванного интенсивным судоходством в этом районе, наличием Новороссийского морского торгового порта — крупнейшего порта в России, в состав которого входит несколько нефтяных терминалов, включая КТК-Р в Южной Озереевке, вдольбереговым переносом загрязнений Основным черноморским течением и др. Поэтому здесь необходимо создать систему постоянно действующего комплексного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения акватории северо-восточной части Чёрного моря. Большой опыт проведения подобных мониторингов имеется в ИКИ РАН.

4.2.3 Комплексное использование спутниковых данных и результатов синхронных подспутниковых измерений для определения мутности воды и концентрации взвешенного вещества в приустьевых зонах Чёрного и Каспийского морей

Речной сток в море играет важную роль в физических, химических и биологических процессах в океане, особенно в шельфовых районах, выступая основным источником взвешенных и растворенных терригенных и биогенных веществ в море, а также антропогенного загрязнения. Эти вещества оказывают значительное и во многих случаях негативное влияние на прибрежную экосистему, включая продуктивность фитопланктона, перенос загрязняющих веществ в шельфовые зоны, эрозию берегов, образование искусственных пляжей, динамику биогенных веществ. Влияние огромного количества географических факторов, гидрометеорологических условий и гидрофизических процессов при большой сложности и дороговизне полевых измерений создают определённую фрагментарность информации о процессах растекания речных вод в море. Эта проблема может быть решена только с использованием спутниковых методов дистанционного зондирования, которые дают уникальную возможность практически одновременно наблюдать весь интересующий регион многократно, день за днём, в течение многих лет. Однако при получении количественных характеристик, например, таких как мутность воды и концентрация взвешенных твёрдых частиц в приустьевых зонах рек на основе спутниковых данных, необходимо проводить проверку достоверности результатов спутниковых измерений с помощью синхронных измерений *in situ*.

В 2021 г. были продолжены работы по верификации результатов, полученных с помощью четырёх алгоритмов, а именно: C2RCC, Nechad 2009, Nechad 2015 и Dogliotti, с помощью которых по данным MSI и OLI определяются количественные значения концентрации взвешенных твёрдых частиц и мутности, с нашими результатами измерений *in situ*. В 2021 г. синхронные натурные измерения были проведены в апреле – мае в приустьевой зоне р. Мзымты, впадающей в Чёрное море, и в мае — в приустьевой зоне р. Сулак, впадающей в Каспийское море. Натурные подспутниковые измерения мутности и концентрации взвешенного вещества, проведённые на 299 станциях при разных гидрометеоусловиях, в разные годы и в приустьевых зонах разных по своему типу рек, показали следующее.

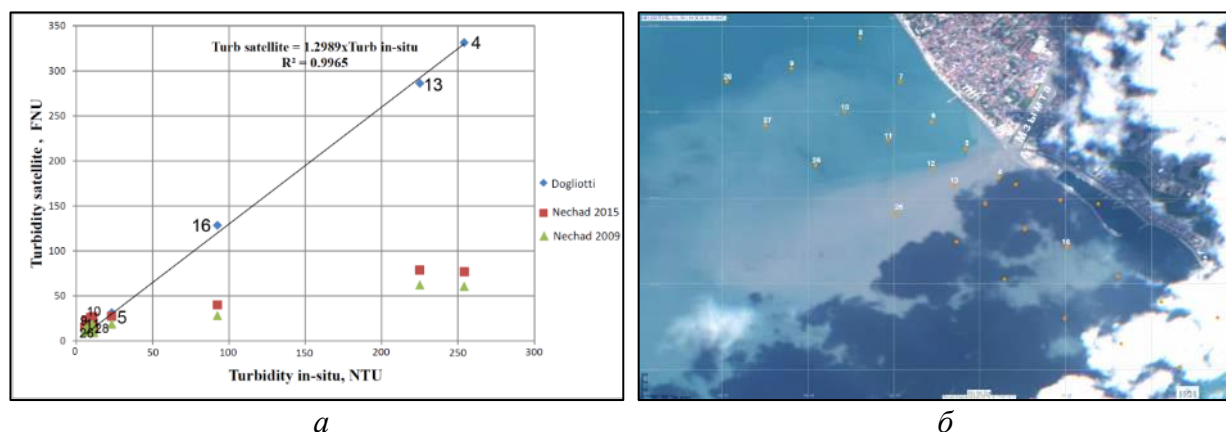


Рисунок 4.2.3.1 - Сравнение значений мутности (Turbidity), полученных *in situ* 30 апреля 2021 г. и определённых по данным MSI Sentinel-2A за тот же день с использованием различных алгоритмов (а); расположение станций подспутниковых измерений 30 апреля 2021 г. на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A, каналы 4, 3, 2 (б). Числа у маркеров — номера станций

Количественные значения мутности и концентрации взвешенного вещества, получаемые по данным спутникового зондирования сенсорами MSI Sentinel-2 и OLI

Landsat-8 с использованием указанных четырёх алгоритмов, достаточно хорошо коррелируют с измерениями этих величин *in situ*. При невысокой мутности, не более 15–20 NTU, практически все алгоритмы дают достаточно близкие значения. При значениях мутности больших 100 NTU имеет смысл применять только алгоритм Dogliotti. Все остальные алгоритмы дают слишком заниженные значения (рисунок 4.2.3.1а).

Для значений мутности 25–90 NTU необходимо проведение дальнейших исследований, поскольку зависимость получается нелинейная и разброс данных для разных рек разный.

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

4.3.1 Апробация методов количественной оценки параметров выноса вод Калининградского залива в Балтийское море на основе многолетних данных дистанционного зондирования из космоса и результатов подспутниковых натурных измерений

Район юго-восточной части Балтийского моря характеризуется повышенной вихревой активностью и сложными прибрежными динамическими процессами. В последнее десятилетие с появлением спутниковых данных высокого пространственного разрешения стало возможным более детально изучать мелкомасштабные процессы в прибрежной зоне, одними из которых являются плумы рек и выносов из заливов.

В результате многолетнего спутникового мониторинга на основе оптических данных высокого пространственного разрешения в 2021 г. с использованием информационной системы See the Sea были проанализированы все спутниковые изображения, полученные над акваторией юго-восточной части Балтийского моря в период с января 2014 по сентябрь 2021 г. (рисунок 4.3.1.1).

Проведённый анализ позволил оценить влияние ветрового поля и прибрежного течения на распространение плума в районе выноса вод Калининградского залива через Балтийский пролив. Были определены сезонная и межгодовая изменчивость проявлений выноса на спутниковых изображениях. Исследование показало, что размеры, площадь распространения, форма и направление распространения плума могут существенно изменяться как от сезона к сезону, так и от года к году. Более чем в 80 % случаев вынос сконцентрирован в прибрежной зоне около Балтийского пролива, не превышающей в размерах 9,5 км от береговой зоны и 7,5 км от створа пролива. Анализ спутниковых данных показал, что на форму плума оказывает влияние как ветер, так и система прибрежных течений. При отсутствии сформированной струи прибрежных течений и слабом ветре выносу ничего не препятствует для распространения и «растекания». В таком случае вынос чаще всего имеет «купольную» форму (http://www.iki.rssi.ru/asp/col_0008/col_0008.htm). А при сильном вдольбереговом течении (юго-западного или северо-восточного направлений) или при сильных устойчивых ветрах вынос вытягивается в виде струи, параллельной береговой линии, и направлен либо на юго-запад, либо на северо-восток. Максимальные площади выноса были зафиксированы в летние месяцы при преобладании юго-восточных/юго-юго-восточных ветров. За весь период наблюдений максимальная площадь распространения выноса была зафиксирована на спутниковом изображении от 13 августа 2020 г, она составила 219,78 км².

Были выявлены основные особенности характера распространения плума в зависимости от ветрового воздействия. При резкой смене характера ветрового режима на западной периферии выноса могут образовываться вихревые или грибовидные структуры. Вынос из пролива может сменяться затоком при устойчивых северных/северо-северо-восточных и северо-западных/западно-северо-западных ветрах, средняя скорость которых составляет 8–10 м/с. Образование затока подтверждается не только данными

дистанционного зондирования и модельными расчётами, но и проведёнными нами экспериментами с помощью лагранжевых дрейфтеров.

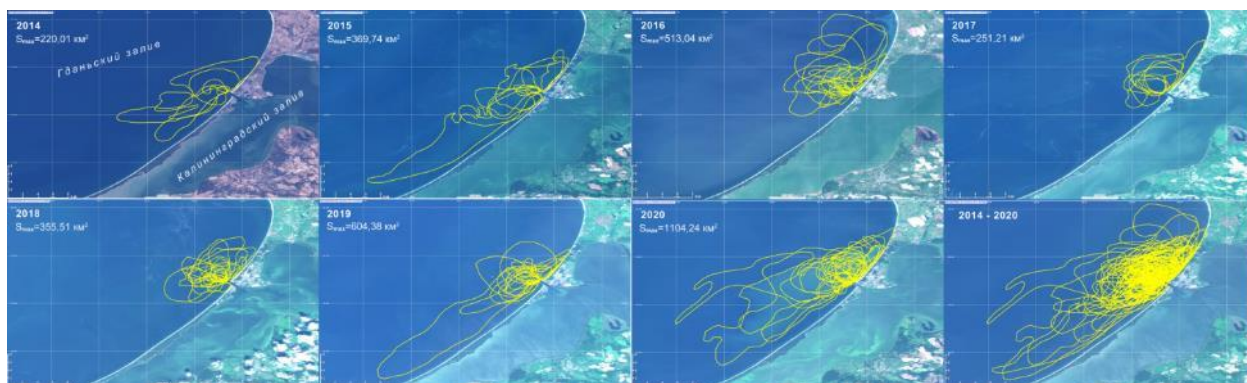


Рисунок 4.3.1.1 — Сводные карты поверхностных проявлений выноса из Калининградского залива в акваторию Гданьского залива, составленные на основе спутниковых данных за 2014–2020 гг.

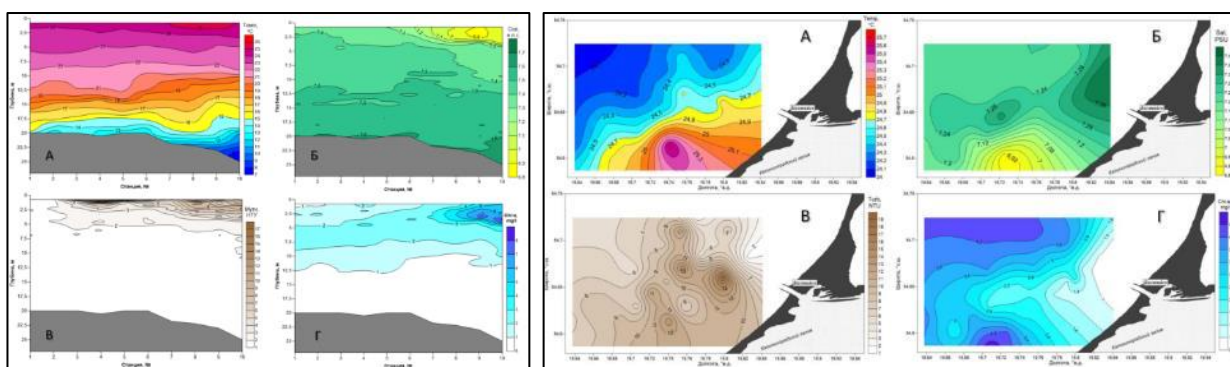


Рисунок 4.3.1.2 — Определение параметров выноса на основе данных измерений in situ 16 июля 2021 г.: слева — пример распределения температуры (а), солёности (б), мутности (в) и концентрации Chl-a (г) по глубине на станциях зондирования; справа — пространственные карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), мутности (в) и концентрации Chl-a (г)

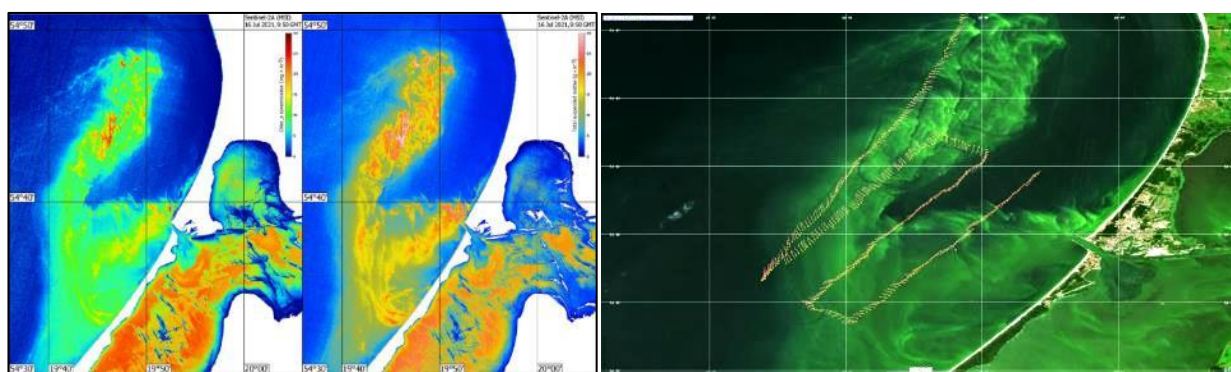


Рисунок 4.3.1.3 — Карты поверхностного распределения концентрации Chl-a и полного содержания взвешенного вещества, построенные на основе спутниковых данных MSI Sentinel-2A от 16 июля 2021 г. с использованием алгоритма C2RCC (слева); фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 16 июля 2021 г. с нанесёнными векторами течений, построенными по данным ADCP

В ходе проведения синхронных подспутниковых измерений, в 2021 г. очередные измерения проводились в июле с борта маломерного судна, была исследована тонкая вертикальная структура плюма и получены данные об основных характеристиках

гидрологического режима прибрежной зоны, находящегося под влиянием выноса из Балтийского пролива. Плюм характеризуется пониженными значениями солёности: в среднем на 1–2 единицы меньше, чем морские воды, и повышенными значениями температуры и мутности. Вертикальная мощность выноса может варьироваться от 1 до 4 м (рисунок 4.3.1.2). Это подтверждают как данные CTD-зондирования, так и данные обратного рассеивания, полученные при ADCP-профилировании.

На основе данных оптического диапазона с использованием различных алгоритмов строились карты концентрации хлорофилла-*a* и полного содержания взвешенного вещества. Полученные результаты сравнивались с натурными измерениями данных величин. Сравнение показало, что наилучшие результаты достигались при использовании алгоритма C2RCC (рисунок 4.3.1.3, слева). Измерения течений в плюме с помощью ADCP позволило выявить мелкомасштабные пространственные неоднородности, которые проникают до глубины 6 м (рисунок 4.3.1.3, справа). Совместное использование данных натурных измерений, в частности данных CTD-зондирования и ADCP-профилирования со спутниковыми данными стало возможным благодаря внедрению в 2021 г. данных ADCP в информационную систему See the Sea.

4.3.2 Апробация методов количественной оценки нефтяных загрязнений, вызванных сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты, в северо-восточной части Чёрного моря и в Каспийском море на основе многолетних данных дистанционного зондирования из космоса

В 2021 г. проведён анализ радиолокационных данных северо-восточной части Чёрного моря (акватория между Анапой и Геленджиком) за период 2018–2020 гг. С использованием информационной системы See the Sea (STS) было проанализировано более 1000 радиолокационных изображений, полученных радиолокаторами спутников Sentinel-1A, -1B. За три года мониторинга обнаружено 107 случаев нефтяных загрязнений, пополнивших базу данных в информационной системе STS. С использованием инструментов STS была построена карта-схема распределения загрязнений, обнаруженных на акватории Анапа–Геленджик в 2018–2020 гг. (рисунок 4.3.2.1а). Было проведено сравнение полученных результатов с результатами предыдущего спутникового мониторинга, проведённого в 2006–2012 гг. Как и в предыдущие годы, основными участками загрязнений становятся судоходные трассы, ведущие в порт Новороссийск. На них приходится около 85 % всех выявленных загрязнений (рисунок 4.3.2.1б). Протяжённость сбросов может достигать 15 км. Другими районами постоянных загрязнений оказываются акватории Цемесской и Геленджикской бухт, а также внешних рейдов порта Новороссийск. Учитывая, что в расчёт принимались только бесспорные случаи нефтяного загрязнения, заведомо не являющиеся «подобиями нефтяных пятен», загрязнений могло быть значительно больше. Сравнение полученных результатов с предыдущими исследованиями показало, что негативная экологическая ситуация в Новороссийском регионе сохраняется, особенно в летний и осенний периоды, т.е. в разгар курортного сезона.

В 2021 г. был проведён мониторинг всей акватории Каспийского моря с целью идентификации нефтяных загрязнений антропогенного происхождения. В результате мониторинга по данным спутниковой радиолокации за 2014–2018 гг. было выявлено более 250 случаев нефтяных загрязнений, обусловленных сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты. Активная добыча нефти и газа на шельфе Каспийского моря, а также естественные выходы углеводородов на морскую поверхность создают дополнительные сложности в верном определении судовых сбросов. Основными районами нефтяных загрязнений остаются Апшеронский п-ов (район нефтедобычи «Нефтяные Камни»), северо-западный шельф РФ (буровые установки под оператором «Лукойл»), восточный шельф Туркменистана, а также юго-восточная часть Каспия, где располагаются основные судовые трассы между Средним и Южным Каспием. Как показали результаты наших

исследований, количество нефтяных загрязнений, связанных с судовыми сбросами, значительно меньше, чем в Чёрном и Балтийском морях. Это связано с менее активным судоходством, чем в других морях и, возможно с тем, что в последнее время всё большее внимания уделяется экологической обстановке в Каспийском море в районах нефтедобычи.

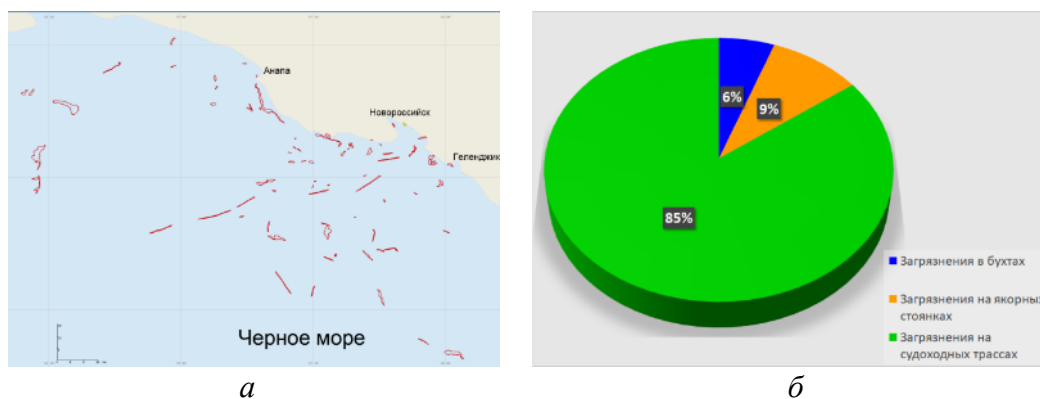


Рисунок 4.3.2.1 — Карта нефтяных загрязнений, составленная на основе анализа радиолокационных данных SAR-C Sentinel-1A, -1B, полученных над акваторией северо-восточной части Чёрного моря Анапа – Геленджик в 2018–2020 гг. (а); диаграмма основных классов нефтяных загрязнений за 2018–2020 гг. (б)

4.3.3. Восстановление температуры поверхности океана, скорости приводного ветра, интегрального паросодержания и интенсивности осадков по данным МТВЗА-ГЯ

В рамках работы обеспечения широкого научного сообщества долговременными рядами данных МТВЗА-ГЯ и продуктов их обработки в режиме свободного онлайн-доступа через инфраструктуру ЦКП «ИКИ-Мониторинг» продолжались исследования по определению параметров системы «океан – атмосфера».

4.3.3.1. ТПО, скорость ветра и интегральное паросодержание

Для восстановления температуры поверхности океана (ТПО), скорости приводного ветра и интегрального паросодержания предлагается использовать регрессионный алгоритм, включающий в себя все доступные радиометрические каналы прибора МТВЗА-ГЯ. Под радиометрическим каналом прибора понимается информация, полученная на одной частоте и на одной поляризации. Например, канал $T_{18,7}^H$ — это измерения на частоте 18,7 ГГц и на горизонтальной поляризации (горизонтальная — H, вертикальная — V). Первоначально необходимо, чтобы все радиометрические каналы имели информацию, если хотя бы у одного из каналов нет данных, результат восстановления будет неверным. Также алгоритм применим только над поверхностью океана.

Регрессионная формула состоит из 78 слагаемых (77 относятся к регрессии и 1 — к зависимости от широты). В общем виде формулу можно записать так:

$$\left. \begin{matrix} SST \\ U_{10} \\ V \end{matrix} \right| = a_0 \cdot \cos(lat) + \sum_{i=1}^{11} a_i T_i + 2 \sum_{j=1}^{55} b_j T_j^* + \sum_{i=1}^{11} c_i T_i^2, \quad (4.3.3.1.1)$$

где: a , b , c — наборы коэффициентов регрессии; T_i , T_j^* — наборы радиометрических каналов; lat — широта точки наблюдения. Набор T_i соответствует слагаемым из

радиометрических каналов (например: $T_{10,6}^V$). Набор T_j^* соответствует слагаемым из перекрёстных радиометрических каналов вида (2ab) (например: $2T_{10,6}^H T_{91,6}^V$). Регрессионное уравнение (4.3.3.1.1) очень усложнено введением перекрёстных слагаемых, однако именно они позволяют существенно повысить точность восстановления физических геопараметров.

В качестве исходных данных для ТПО, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания могут быть взяты данные реанализа или данные измерений буев. Данные реанализа взяты из источника: Climate Data Store ECMWF reanalysis (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>). Данные буев взяты с ресурса NOAA/NDBC National Oceanic and Atmospheric Administration / National Data Buoy Center (<https://www.ndbc.noaa.gov/>). Эти данные были собраны и предоставлены NOAA/NDBC в свободный доступ. За 2020 г. было собрано данных с 768 буев, расположенных по всей акватории Мирового океана.

Сравнение реанализа и данными буев показало, что корреляция между данными высокая (для ТПО практически 1) поэтому ожидается схожесть результатов: обучение регрессии данными реанализа и буев. Однако данные буев не содержат информации по интегральному паросодержанию. Также количество измерений буев много меньше, чем данных реанализа (которые имеют глобальный охват). Поэтому было принято решение использовать в качестве обучающей выборки данные реанализа.

В результате обучения регрессии были получены следующие статистические оценки качества восстановления ТПО, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания (рисунки 4.3.3.1.1 и 4.3.3.1.2).

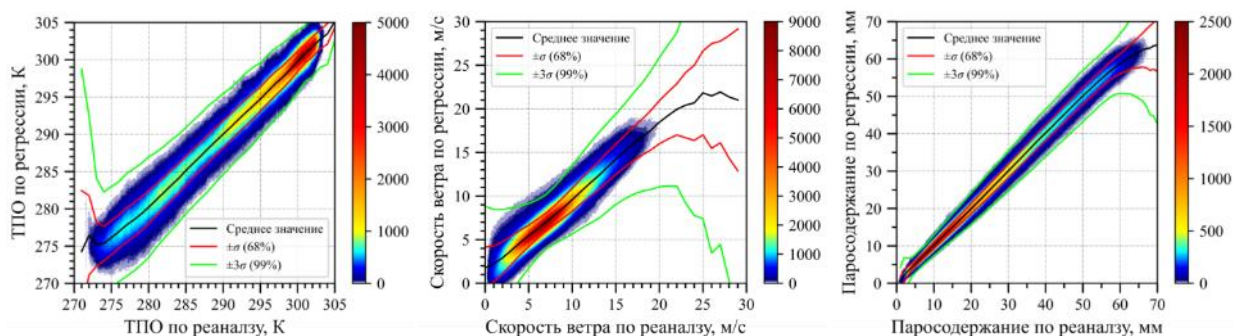


Рисунок 4.3.3.1.1 — Диаграммы рассеяния со средними значениями и доверительными интервалами для ТПО, скорости ветра и паросодержания

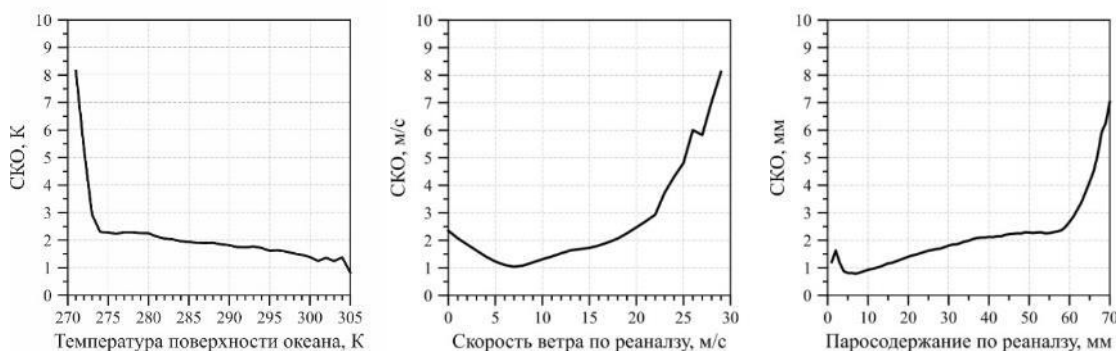


Рисунок 4.3.3.1.2 — Среднеквадратичное отклонение для ТПО, скорости ветра и паросодержания

Для ТПО коэффициент корреляции составляет 0,98. СКО при температуре от 273 до 305 К достаточно стабильно и находится в диапазоне 1,5–2,2 К. Таким образом, на

данном этапе восстановить ТПО можно с точностью 1,5–2,2 К в 68 % случаев и с точностью 4,5–6,6 К в 99 % случаев.

Для скорости ветра коэффициент корреляции составляет 0,92. Разную величину СКО при разных скоростях ветра можно объяснить тем, что наибольшее количество данных соответствует скоростям ветра порядка 6–7 м/с. Известно, что какие скорости ветра наиболее часто встречаются в океане. Поэтому для указанного диапазона больше всего данных для анализа и наилучшие показатели и по корреляции, и по СКО. Таким образом, на данном этапе восстановить скорость ветра можно с точностью 1–2,5 м/с в 68 % случаев для диапазона от 0 до ~20 м/с и с точностью 3–7,5 м/с в 99 % случаев.

Для интегрального паросодержания результаты следующие: коэффициент корреляции составляет 0,99, что выглядит отличным показателем. СКО не превышает 2,6 мм в диапазоне паросодержания от 0 до 60 мм. При большом количестве паросодержания (>60 мм) накоплено мало данных и поэтому оценки для этого диапазоне условные. Таким образом, на данном этапе восстановление интегрального паросодержания может быть проведено с точностью <2,6 мм в 68 % случаев для диапазона от 0 до ~60 мм и с точностью <7,8 мм в 99 % случаев.

Полученные на данном этапе продукты по интегральному паросодержанию можно найти в картографическом веб-интерфейсе системы Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>).

4.3.3.2 Интенсивность осадков

Радиометры серии МТВЗА-ГЯ похожи на свои зарубежные аналоги, поэтому тоже могут быть использованы для восстановления интенсивности осадков над поверхностью воды и суши. Для МТВЗА-ГЯ, как и для аналогичных приборов, существует проблема малого временного разрешения, т.е. всего пара измерений одной и той же точки в течение суток. Ещё одной проблемой стало наличие «лакун», областей, которые не охватываются наблюдениями (рисунок 4.3.3.2.1).

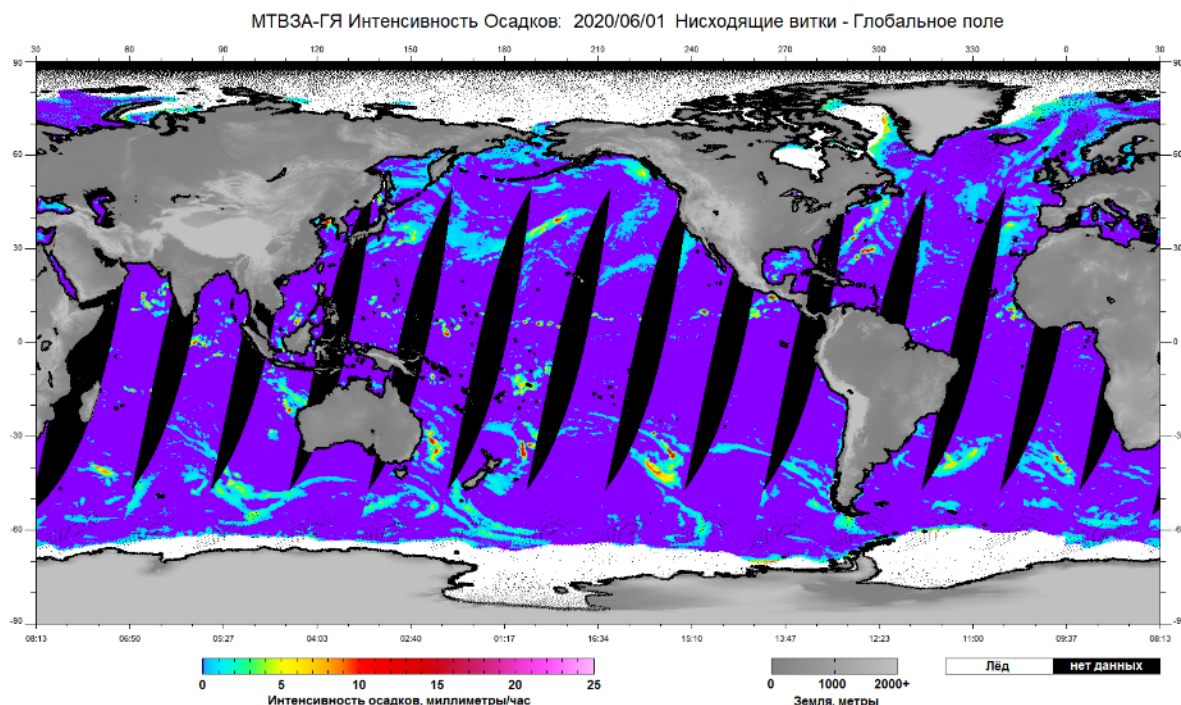


Рисунок 4.3.3.2.1 — Глобальное поле распределения осадков по данным МТВЗА-ГЯ за 1 июня 2020 г.

Для получения глобальной карты распределения осадков проводится совмещение данных прибора МТВЗА-ГЯ с данными, полученными по приборам DMSP SSMIS-F18 и

GCOM-W1 AMSR-2. Это два самых близких радиометра по времени пролёта. Прибор SSMIS-F18 пролетает на 1 ч 30 мин позже МТВЗА-ГЯ, а AMSR-2 — на 1 ч 30 мин раньше. Для восстановления осадков используется корреляционно-статистический алгоритм (в настоящее время это пробная версия), специально разработанный для прибора МТВЗА-ГЯ. Совмещение данных проводится «примитивным» способом: где нет данных по МТВЗА-ГЯ, добавляются данные от SSMIS-F18 и AMSR-2.

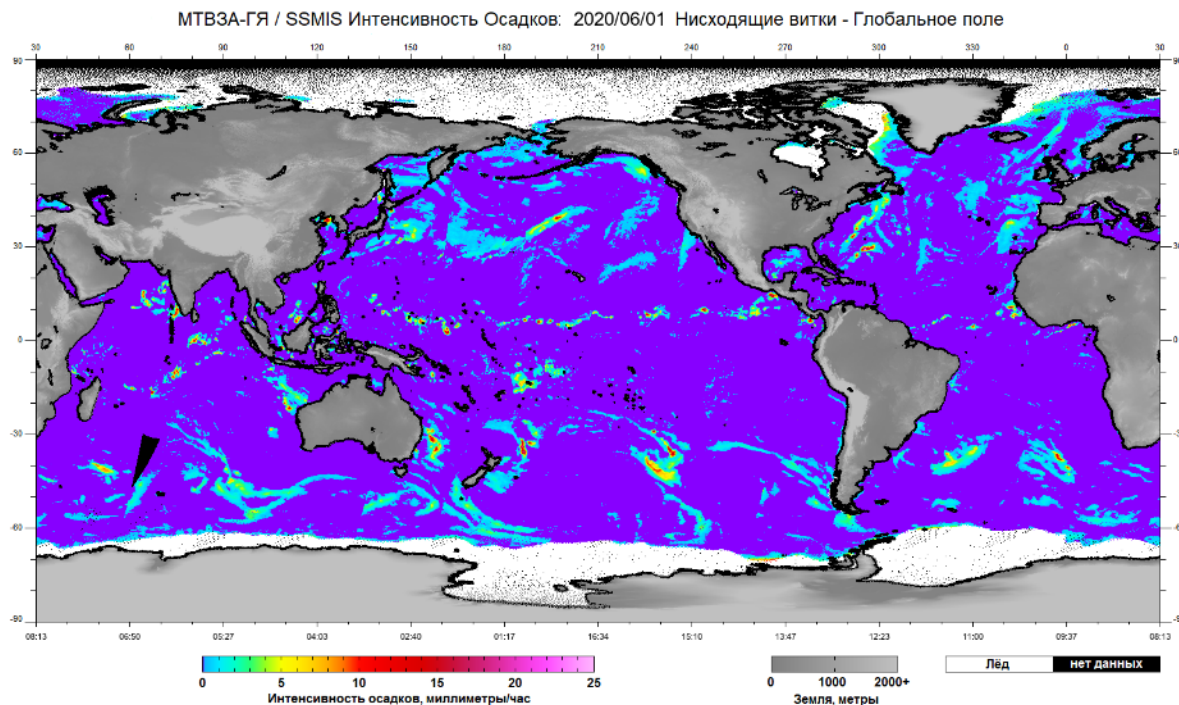


Рисунок 4.3.3.2.2 — Глобальное поле распределения осадков по совмещённым данным МТВЗА-ГЯ/SSMIS за 1 июня 2020 г.

В результате получены два набора карт осадков: 1) МТВЗА-ГЯ/SSMIS-F18 (рисунок 4.3.3.2.2) и 2) МТВЗА-ГЯ/AMSR-2 с практически полным глобальным покрытием. Качественные оценки показывают адекватное совпадение распределения осадков, особенно при совмещении с данными SSMIS. Полученные карты открывают перспективные возможности использования совместных данных разных приборов для анализа распределения и интенсивности осадков над акваторией мирового океана.

4.3.3.3 Корректировка географической привязки данных микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ

В соответствии с планом работ на 2021 г., были проведены исследования по определению качества географической привязки данных МТВЗА-ГЯ. На основании данных, поступающих со спутника «Метеор-М» № 2-2, было показано, что реализуемая в настоящий момент процедура географической привязки работает с ошибками, приводящими к явным несоответствиям линии градиентов яркостной температуры на формируемых изображениях с географической береговой линией. Обнаруженные величины наблюдаемых расхождений достигают 100–150 км (в зависимости от географического положения), что существенно больше элемента разрешения прибора (порядка 16 км).

Для анализа были выбраны данные, полученные прибором 1 июня 2020 г. (рисунок 4.3.3.3.1).

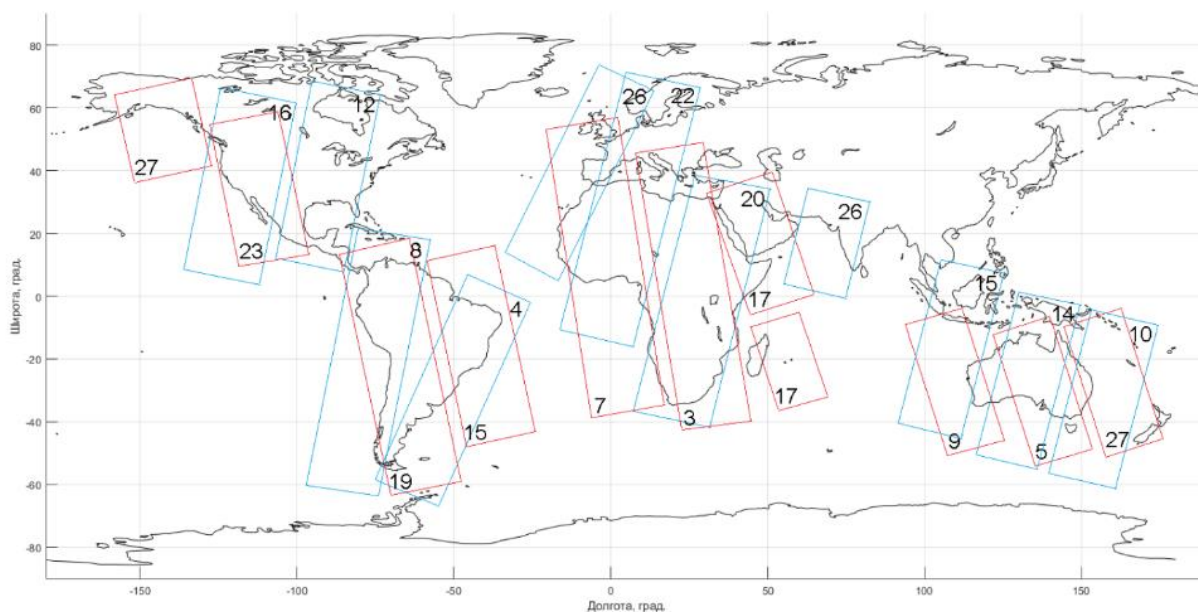


Рисунок 4.3.3.3.1 — Схематичное расположение тестовых участков за 1 июня 2020 г.

На первом этапе работы географические координаты элементов наблюдения на земной поверхности (в формате геодезических широты и долготы) использовались для определения реальных параметров наблюдения прибора. Было показано, что углы встречи с Землёй отличаются от заявленного (65°) и варьируются в пределах от $65,8$ до $67,5^\circ$ в зависимости от положения элемента на поверхности в пределах одного скана. Вариации данного угла в пределах одного полувитка имеют незначительные величины и легко объясняются несферичностью поверхности Земли. Характер зависимости угла встречи с Землёй в пределах одного скана свидетельствует, что платформа основания прибора (или весь носитель — спутник «Метеор-М» № 2-2) имеет положительный угол тангажа из диапазона $0,8\text{--}2,5^\circ$. Помимо этого наблюдаются вариации азимутальных углов сканирования МТВЗА-ГЯ при переходе между различными сканами. Последний факт не столь принципиален с точки зрения формирования радиометрических сигналов, в отличие от угла тангажа (когда изменяется ориентация антенны радиометра относительно компонент принимаемого электромагнитного излучения), но играет важную роль при выполнении географической привязки данных.

Определению точных значений углов крена, тангажа и рыскания была посвящена следующая часть работы. Для этого был использован подход, традиционно применяемый при корректировке географической привязки современных спутниковых радиометрических комплексов. Суть метода состоит в последовательном изменении трёх базовых поправочных углов, определяющих расположение сканера в орбитальной системе координат, выполнение операции геопривязки, а на её основе определение соотношения средних значений радиояркостности точек, относящихся к поверхности суши, с точками, отнесёнными к поверхности океана. Известно, что коэффициент излучения поверхности суши стремится к единице, а её радиояростная температура — к физической температуре, при этом зависимость от частоты и поляризации практически отсутствует. В то же самое время коэффициент излучения поверхности океана имеет гораздо меньшие значения, зависящие от угла встречи с Землёй, частоты и поляризации.

Для прибора МТВЗА-ГЯ и его параметров сканирования яркостная температура точек наблюдения морской поверхности варьируется в пределах от 60 до 300° . Таким

образом, минимизируя функцию $f(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{ямп}}^i - \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k T_{\text{япс}}^j$ за счёт вариаций углов крена (α), тангажа (β) и рыскания (γ), можно добиться максимального совпадения

географической береговой линии с линией максимального градиента радиояростной температуры ($T_{\text{ямп}}^i$ — яркостная температура i -й точки наблюдения, относящейся к морской поверхности; n — общее количество таких точек в анализируемой сцене). Следует отметить, что наиболее предпочтительные каналы МТВЗА-ГЯ для выполнения данной операции — это каналы с частотами 10,6; 18,7; 31,5 и 36,7 ГГц. Для случая горизонтальной поляризации функция $f(\alpha, \beta, \gamma)$ на этих частотах имеет свои минимальные значения, опускаясь до -130 К, что существенно упрощает процесс поиска оптимального решения. Кроме того, значительная разница сравниваемой температуры позволяет снизить вероятность попадания алгоритма минимизации (метод Нелдера – Мида) в точки локальных минимумов функции.

Пример коррекции географической привязки данных приведён на рисунке 4.3.3.2. Видно, что используемый подход позволяет с высокой точностью определять значения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, что существенно улучшает качество геопривязки.

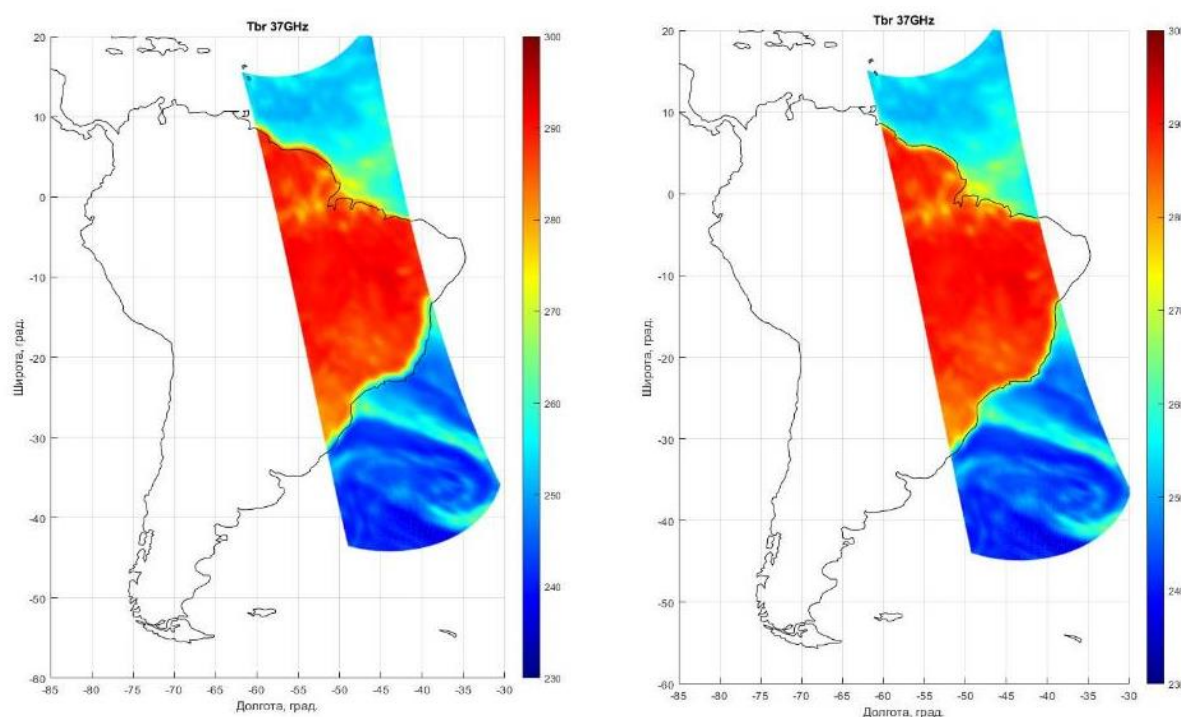


Рисунок 4.3.3.2.2 — Результаты географической привязки данных МТВЗА-ГЯ до введения корректирующих углов (слева) и после введения (справа)

К настоящему моменту обработаны данные 27 сцен, охватывающих 1 день измерений МТВЗА-ГЯ. Для них средние значения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания составляют $-0,101$, $+1,001$ и $+1,022^\circ$ соответственно. Данные результаты следует считать предварительными. Окончательные значения будут определены по результатам обработки долгосрочных рядов данных и переданы разработчикам для включения в алгоритмы предварительной обработки данных МТВЗА-ГЯ.

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, получены и опубликованы значимые результаты по следующим основным направлениям:

- Исследования нелинейной динамики морского волнения методами спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга морских акваторий.
- Разработка научных основ совместного использования новейших микроволновых 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 приповерхностном слое атмосферы.

При этом одними из наиболее значимых результатов, полученных в рамках данного направления, стали:

- Разработка высокоточного лазерного метода определения параметров морского волнения во всем диапазоне волновых чисел: от гравитационного до капиллярного. Данный метод позволяет дистанционно определять детальную структуру всех видов морских волн в широком диапазоне метеоусловий. На основе предложенного метода создан лазерный волнограф для измерения параметров высокочастотной области спектра морского волнения.
- Выявление зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный период 2020/2021 гг.
- Развитие методов количественной оценки параметров выноса вод Калининградского залива в Балтийское море на основе многолетних данных дистанционного зондирования из космоса и результатов подспутниковых натурных измерений
- Развитие методов восстановления температуры поверхности океана, скорости приповерхностного ветра, интегрального паросодержания и интенсивности осадков по данным МТВЗА-ГЯ.

Таким образом материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Океан» в 2021 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 5 МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА

Введение

Направления работ по разделу Мониторинг-Атмосфера в 2021 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 2021 г. работ кратко представлены в настоящей главе отчёта.

Полученные в 2021 г. результаты подробно изложены в списках публикаций в иностранных и российских журналах, а также в материалах различных конференций, проходивших в 2021 г., приведённых в конце отчёта [14–17, 54, 67–70, 76–78, 119, 120, 130, 132–134, 156–164].

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

5.1.1 Влияние шири зонального и меридионального ветра на формирование слоёв спорадической ионизации в ионосфере

На основе наблюдений посредством некогерентного радара (ISR Arecibo) ряд исследователей (Krall J., Huba J.D., Nossa E., Aponte N., Drop D.P. SAM13 simulations of ionospheric metallic layers at Arecibo // J. Geophysical Research. 2020. V. 125. Art. No. e2029JA027297. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JA027297>), используя численное моделирование, рассмотрели вывод, что слои ионов металла в нижней ионосфере формируются за счёт вертикальных движений ионов и их конвергенции, обусловленной широм зонального и меридионального ветра. При этом утверждалось, что для формирования структуры слоёв достаточно только меридиональной компоненты ветра, и это остаётся верным на высотах ниже 110 км, где ионы уже не замагничены. Этот вывод противоречит существующим представлениям о формировании слоёв спорадической ионизации. Подобный вывод, основанный на численном моделировании, нами был подвергнут сомнению, особенно в отношении сильных спорадических слоёв E, наблюдаемых обычно посредством радара ISR Arecibo ниже 110 км. Было аналитически показано, что скорость вертикального движения ионов классической теории ветрового сдвига полностью совпадает со скоростью вертикального движения, которая следует из формул работы (Krall et al., 2020), используемых в численном моделировании. Основанные на классическом выражении для скорости вертикального движения ионов расчёты показаны на рисунке 5.1.1.1, из которого, в частности, следует, что ниже 120 км

вертикальное движение ионов определяется зональной компонентой ветра в полном соответствии с классической теорией ветрового сдвига.

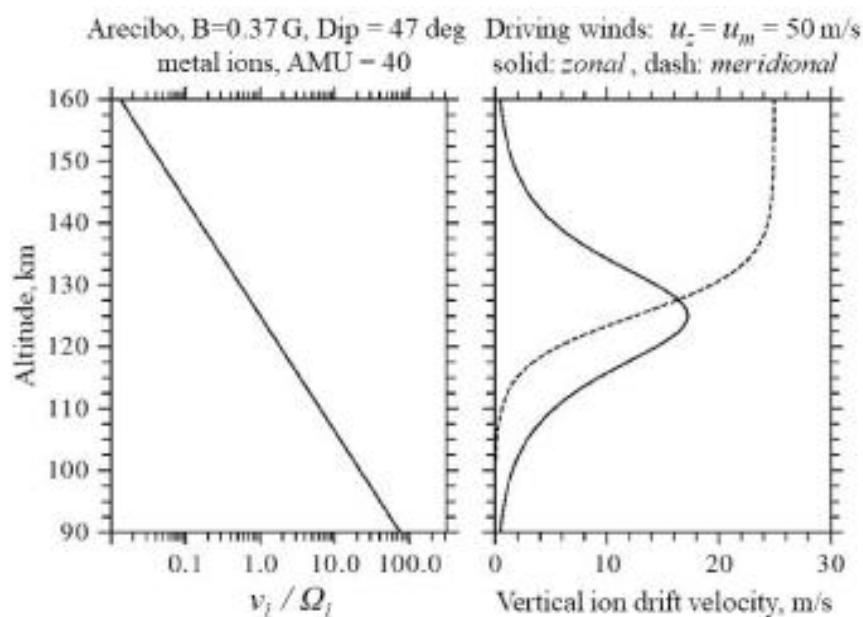


Рисунок 5.1.1.1 — Высотный профиль отношения частоты соударений ионов с нейтралами к гирочастоте над Аресибо (левая панель), используемый для построения типичных профилей ветров (правая панель), показывающих их вклад в вертикальные движения ионов над Аресибо

Таким образом, следует признать выводы работы (Krall et al., 2020) ошибочными, противоречащими устоявшимся представлениям. Ошибка, вероятно, связана с неправильным скейлингом частоты ион-нейтральных соударений при численном моделировании.

5.1.2 Проявление атмосферных движений планетарного масштаба в геомагнитных вариациях

Наибольшую интенсивность в геомагнитных вариациях имеют приливные гармоники, которые проявляются во всех геосферах (от внутреннего ядра до ионосферы), причём во внешних геосферах (атмосфера, ионосфера) воздействие обусловлено в основном термическими приливами (т.е. воздействием на внешние геосферы со стороны Солнца). Анализ показывает, однако, что достаточно часто происхождение интенсивных спектральных пиков трудно связать с гармониками приливов. При этом они оказываются достаточно близкими к периодам в 5, 10 и 16 дней. В свою очередь эти периоды соответствуют так называемым планетарным волнам или волнам Россби в атмосфере Земли, посредством которых осуществляется связь между различными внешними оболочками. Были проанализированы спектры геомагнитных вариаций, вычисленных в диапазонах периодов, близких к периодам планетарных волн: 5, 10 и 16 сут. Использованы результаты регистрации геомагнитного поля на Геофизической обсерватории «Михнево» Института динамики геосфер РАН. Спектральное оценивание на основе параметрического подхода выполнено в зимний и летний периоды времени для 2009 г. (низкая солнечная активность) и 2015 г. (высокая солнечная активность).

Впервые установлено, что гармоники, непосредственно связанные с проявлением атмосферных планетарных волн во всем диапазоне 4–17 сут наблюдаются только в зимний период, причём изменения атмосферного давления независимо от солнечной активности опережают изменения геомагнитного поля примерно на месяц. В спектрах вариаций геомагнитного поля в диапазоне 4–17 сут выделены гармоники 27-суточной

геомагнитной периодичности и гармоник, связанные с модуляционным воздействием на них 11-летним циклом, годовой и полугодовой вариаций, а в спектрах в диапазоне периодов от 12 до 17 сут удалось идентифицировать гармоники с периодами, близкими к периодам приливных волн M_f и M_{sf} .

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 Подавление акустического шума при измерении пристеночных турбулентных пульсаций давления

Турбулентные пульсации давления в турбулентном пограничном слое играют ключевую роль в приложениях, обусловленных взаимодействием турбулентного потока и обтекаемых структур. Они возбуждают вибрации в обтекаемых структурах и генерируют гидродинамические шумы обтекания, что представляет значительный интерес в широком диапазоне задач гидродинамики и аэроакустики, проблем воздушного, морского, железнодорожного и автомобильного транспорта. Рассмотрена задача оценки частотного спектра пристеночных турбулентных пульсаций давления. При этом в качестве мешающего фактора выступает внешний акустический шум. При измерении турбулентных пульсаций давления одна из трудностей состоит в том, что лабораторные экспериментальные установки (аэродинамические и гидродинамические трубы, гидрлотки, опытовые бассейны) для создания потока используют различного рода механизмы, создающие посторонние акустические шумы. Авторами разработан метод регистрации турбулентных пульсаций давления в присутствии акустической шумовой помехи. Активный метод подавления помехи основан на том, что поля пристеночных турбулентных давлений и звуковых волн имеют существенно различные пространственные масштабы. Разработан приёмник турбулентных давлений, компенсированный по акустическому шуму, выполненный из двух чувствительных элементов. Первый чувствительный элемент - миниатюрный сенсор; он генерирует сигнал, обусловленный турбулентным воздействием и акустической помехой. Второй чувствительный элемент — протяжённый сенсор; реагирует лишь на акустическое воздействие из-за некогерентного суммирования мелкомасштабных турбулентных пульсаций на его приёмной поверхности. При встречном подключении основного и компенсирующего элементов происходит электрическое вычитание акустической помехи. Дальнейшее развитие метода измерения пристеночных турбулентных давлений в условиях воздействия акустических шумов потребовало детального исследования волновых свойств компенсированного по шуму приёмника давления. В работе проведён анализ формирования сигнала двухэлементного приёмника при измерении турбулентных давлений на основе общих соотношений теории волновой фильтрации. Достаточно большим размерам апертуры приёмника соответствует волновая характеристика, сосредоточенная в области малых волновых чисел k . Получены выражения для фурье-образа распределения локальной чувствительности двухэлементного приёмника и выражение для волновой характеристики $S(k)$ двухэлементного приёмника, определяющее характер снижения волновой чувствительности приёмника в зоне малых волновых чисел.

Демонстрируются результаты численного моделирования волновой фильтрации шумокомпенсированного приёмника для типовых значений α - отношения диаметров основного и компенсирующего чувствительных элементов, равных 0,02; 0,05 и 0,1. Результаты модельных оценок волновой фильтрации поля турбулентных давлений компенсированным по шуму двухэлементным приёмником в зоне малых волновых чисел, показывают, что по мере увеличения отношения диаметров основного и компенсирующего элементов возможности подавления акустической низкочастотной

помехи возрастают. Однако при этом снижается волновой диапазон корректного отображения поля турбулентных давлений, связанного с неизменностью волновой характеристики в зоне энергонесущих волновых компонент гидродинамического воздействия. Выполнены аналитические исследования волновых свойств двухэлементного приёмника в поле турбулентных давлений. Получено, что при надлежащем выборе характеристик приёмник пульсаций давления в силу своих волновых свойств способен отсекал вклад акустической помехи. Установлены параметры и соотношения, определяющие условия эффективности подавления акустической помехи. Подход, основанный на волновой фильтрации пристеночных пульсаций давления, позволяет оценивать оптимальные размеры двухэлементного преобразователя в зависимости от условий измерений и актуального частотного диапазона. Для значений числа Маха $M = 0,1$ использование шумокompенсированного приёмника давления с оптимальным отношением размеров чувствительных элементов, составляющим 1:30, способно обеспечить подавление акустического шума в наиболее широком диапазоне безразмерных частот, лежащем в диапазоне 0,1–0,9.

5.2.2 Развитие экспериментальных исследований турбулентных пристеночных пульсаций давления. критический анализ и обобщение накопленных опытных данных

Представлен обзор современного состояния экспериментальных исследований поля турбулентных давлений в турбулентном пограничном слое. За прошедшие десятилетия выполнено огромное количество прикладных, теоретических и экспериментальных исследований пристеночных турбулентных пульсаций давлений, составляющих важную часть акустики турбулентных потоков. Представленные данные измерений пристеночных турбулентных давлений показывают, что основной массив накопленных данных относится к характеристикам турбулентных пульсаций давления под турбулентным пограничным слоем. Наряду с анализом измерений опытных данных: частотные спектры, среднеквадратичные значения, специальное внимание в обзоре направлено на методические аспекты экспериментальных исследований. В приложениях значительная часть линейных задач возбуждения шума и вибраций конструкций при турбулентном обтекании особенно эффективно может быть проанализирована и решена при частотно-волновом задании гидроаэродинамической пульсационной нагрузки. Отмеченные факторы стимулировали повышенное внимание к частотно-волновому спектру пристеночных турбулентных давлений, не ослабевающее на протяжении последних десятилетий. Всё большее распространение стали получать экспериментальные исследования частотно-волновых спектров турбулентных давлений на основе цифровой обработки сигналов. Подробно анализируются прямые методы измерений частотно-волнового спектра пристеночных турбулентных давлений. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований частотно-волнового спектра.

5.2.3 Атмосферные вихри в геомагнитной аномалии

Вихревые структуры, такие как циклоны и антициклоны, вращаются в северном и южном полушариях в противоположных направлениях. При этом экватор они не пересекают. Градиенты давления от полюсов к экватору в двух полушариях направлены взаимно противоположно. Часть энергии атмосферных вихревых структур генерируется плазменными вихрями. Показано, что на возбуждение атмосферных вихревых структур влияет структура геомагнитного поля, в частности, геомагнитные аномалии. На возбуждение торнадо в низких широтах в Атлантике оказывают воздействие плазменные процессы в Южно-Атлантической геомагнитной аномалии. Представлены расчёты для механизмов возбуждения плазменных вихрей, которые учитывают высыпания частиц кольцевого тока магнитосферы и влияние аномалий геомагнитного поля. Рассмотрены

подвижные плазменные неоднородности. Расчёты показывают, что относительная скорость движения плазменных неоднородностей влияет на спектры электрических полей. Одна из причин образования мощных вихрей в системе подвижных плазменных вихрей связана с проявлением резонансов в спектрах электрических полей взаимодействующих неоднородностей. Спектры электростатических возмущений в структуре торнадо имеют многомодовый характер. В расчётах использовано кинетическое приближение.

5.2.4 Стационарная концентрированная вихревая модель

Согласно наблюдениям и численному моделированию, поведение тороидальной скорости вихрей аналогично поведению в стационарных вихрях Ренкина или Бюргерса. Однако для описания полоидального движения в вихрях модели Бюргерса и Салливана имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих их применимость к концентрированным вихрям. В моделях Бюргерса и Салливана вертикальная скорость и давление увеличиваются без ограничений с увеличением высоты. Вертикальная скорость в модели Бюргерса является только линейной функцией z , что означает, что вертикальная скорость не ограничена какой-либо областью, а везде одинакова, т.е. это не концентрированный вихрь. Новая низкопараметрическая модель, имеющая характерные радиальные и вертикальные масштабы, также имеет характерные полоидальные и тороидальные скорости. Кроме того, давление можно сравнить с наблюдением и экспериментом не только во внутренней части вихря при $r < r_0$, но и во внешней области при $r > r_0$ и на высотах, сопоставимых с высотой вихря L . В этой новой модели, когда вертикальный и радиальный массовые потоки равны нулю, $M_z = 0$ и $M_r = 0$, условие сохранения массы не требуется в отличие от моделей Бюргерса и Салливана, где существует нефизическое предположение об источнике массы. Недавно были введены новые критерии подобия для земных и марсианских конвективных структур. Эти критерии полностью применимы к модели, разработанной в настоящей работе, и могут быть использованы для получения зависимости между характерными значениями полоидальных скоростей и пространственными масштабами вихревых структур в атмосферах Земли и Марса. Новая модель осесимметричного стационарного сосредоточенного вихря для невязкого несжимаемого потока представлена как точное решение уравнений Эйлера. В этой новой модели вихрь экспоненциально локализован не только в радиальном направлении, но и по высоте. Эта новая модель стационарного концентрированного вихря возникает, когда радиальный поток, который концентрирует завихренность в узком столбе вокруг оси симметрии, уравновешивается адвекцией вихря вдоль оси симметрии. В отличие от предыдущих моделей, скорость вихря, завихренность и давление характеризуются не только характерным радиусом вихря, но и характерной высотой вихря. Вихревая структура в радиальном направлении имеет две отдельные области, определяемые внутренней и внешней частями: во внутренней части вихревой поток направлен вверх, а во внешней части — вниз. Вихревую структуру в вертикальном направлении можно разделить на нижнюю и верхнюю области. В нижней части вихря поток центростремительный, а в верхней — центробежный. Кроме того, в верхней части вихря ранее восходящая жидкость начинает опускаться (рисунок 5.2.4.1). Показано, что эта новая модель вихря хорошо согласуется с результатами полевых наблюдений пылевых вихрей в атмосфере Земли.

Была предложена новая осесимметричная модель стационарного вихря, локализованного в радиальном и вертикальном направлениях вихрей с несжимаемым и невязким потоком, которая является решением уравнений Эйлера. В рамках модели вихрь экспоненциально локализован не только в радиальном направлении, но и по высоте. В отличие от предыдущих теоретических моделей, скорость вихря, завихренность и давление (рисунок 5.2.4.2) характеризуются не только характерным радиусом вихря r_0 , но и характерной высотой вихря L . Разработанная вихревая модель, как и в моделях Бюргерса и Салливана, удовлетворяет только невязким граничным условиям и поэтому

далеко не соответствует адекватному описанию вихря на границе. Фактически, на жёсткой границе уравновешенное центробежное поле давления вихревого ядра нарушается в тонком пограничном слое, в котором большой радиальный приток обусловлен несбалансированным полем давления. Эти модели строго применимы только над пограничным слоем трения, где течение развивается приблизительно за счёт эффектов динамики баланса. Показано, что предложенная новая аналитическая модель концентрированных вихрей хорошо согласуется с полевыми наблюдениями типичных пылевых вихрей в атмосфере Земли.

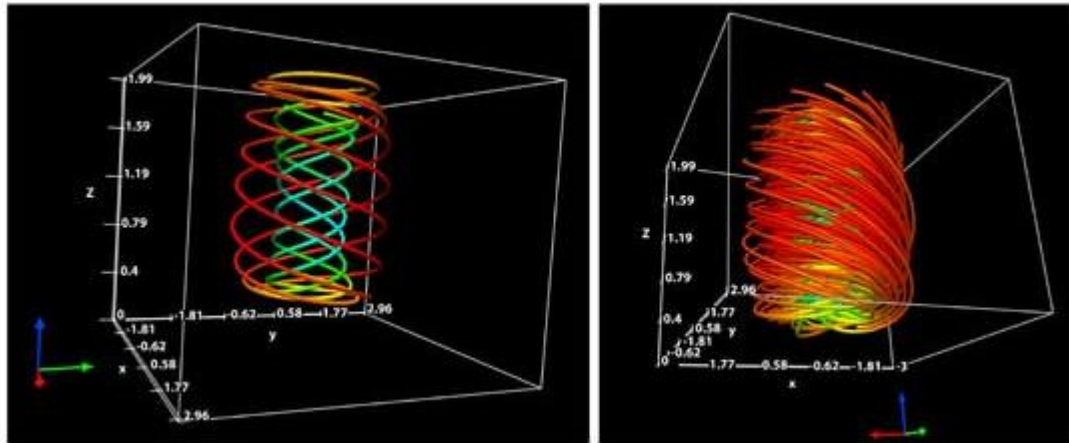


Рисунок 5.2.4.1 — Нормализованные трёхмерные линии тока поля скорости вихря. На левой панели показаны только четыре линии потока. Светло-голубой и зелёный цвета линий тока соответствуют внутренней структуре вихря. Красный и янтарный цвета соответствуют внешней части вихря. На правой панели показано более сорока линий скоростного потока. Красные, зелёные и синие цвета ортогональных векторов обозначают оси x , y и z соответственно.

Визуализация была рассчитана для $r_0 = 1$ и $L = 10$

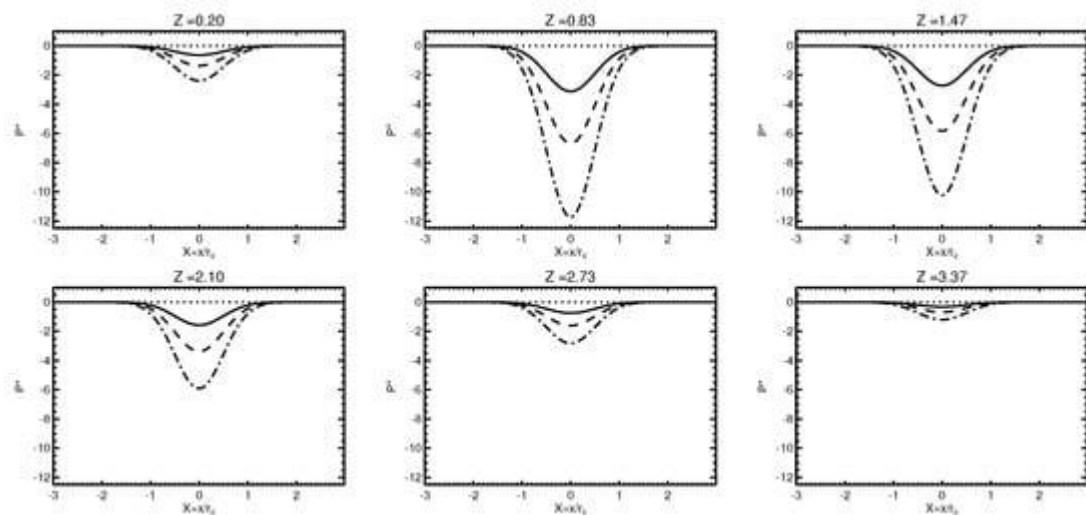


Рисунок 5.2.4.2 — Поведение нормализованного давления поперек вихря на разных высотах $Z = z/L$ для значений V_0/V_0 , равных 9,34, 14,0 и 18,7 (сплошные, пунктирные и пунктирно-точечные графики соответственно)

5.2.5 Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения мезомасштабных вихрей

Предложена единая интерпретация спирального циклогенеза, применяемая для зарождения интенсивных спиральных мезомасштабных вихрей в разных климатических

поясах планеты — тропических и квазитропических (среднеширотных) циклонов, и полярных ураганов. Фундаментальным базисом служит теория турбулентного вихревого динамо (ИКИ, 1983), дающая порог возбуждения крупномасштабной неустойчивости в атмосфере и тем самым основу для точной количественной диагностики времени начала циклогенеза. Показано, что ключевую роль в реализации динамо-эффекта в атмосфере играет вихревая облачная конвекция, открытая американскими учёными (2004) и известная под названием Vortical Hot Towers (VHTs) — вихревых горячих башен. Конфигурация полей облачной конвекции, типичных для начала крупномасштабной вихревой неустойчивости, является диагностической основой для практического применения. Обоснована оперативная метеодиагностика зарождения тропических циклонов с помощью анализа GOES Imagery и облачно-разрешающего численного моделирования для зоны развивающегося вихревого возмущения. Диагностика основана на подобию конфигураций VHTs в поле температуры (спутниковые данные) и вертикальной спиральности (численное моделирование). Диагностика тропического циклогенеза на основе теории турбулентного вихревого динамо позволит метеослужбам дистанционно определить момент зарождения урагана значительно раньше (от нескольких до десятков часов), чем это реализуется в настоящее время.

5.2.6 Изменение климата: численное моделирование поведения тропических циклонов в контексте глобального потепления

Изменение климата и особенно глобальное потепление в последние годы вызывают много вопросов, связанных с многочисленными катастрофами, вызванными тропическими циклонами (ТЦ). Проведено численное исследование регионального циклогенеза и динамики на основе малопараметрической (МППМ) нелинейной модели. В модели используется система сопряжённых нелинейных дифференциальных уравнений для максимальной скорости ветра и температуры поверхности океана в зоне ТЦ. Модель позволяет описать формирование ТЦ из слабой тропической депрессии с последующим усилением его интенсивности до уровня тайфуна. После обобщений и дальнейшего развития этой модели, стало возможным описывать процессы зарождения, развития и последующего затухания в связи с выходом на побережье. Обобщённая МППМ-модель содержит свободные параметры, выбором которых можно управлять динамикой циклогенеза, например, числом формирующихся ТЦ в активном сезоне, максимальной скоростью ветра и длительностью ТЦ, а также временами последующего затухания вихрей. В рамках модели рассмотрена генерация четырёх мощных атмосферных вихрей с различной временной динамикой в течение активного сезона со сроком жизни 7–16 сут. При глобальном потеплении численные расчёты показывают усиление ТЦ при нагревании поверхности океана на 0,5–1 °C, максимальная скорость ветра резко возрастает.

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

5.3.1 Анализ способов взаимного перехода между микроскопическими параметрами рассеивающей среды и параметрами обратного сигнала из атмосферы с использованием эквивалентного рассеивающего объекта

Предложена модель трёхмерного эквивалентного рассеивающего объекта, который можно сопоставить рассеивающему слою по базовым лидарным коэффициентам. Этот объект порождает такие же базовые коэффициенты (коэффициент обратного рассеяния, коэффициент экстинкции), как исследуемый рассеивающий слой. Показано, что указанные коэффициенты для такого объекта можно смоделировать посредством сферического сегмента и усечённого конуса. При этом геометрия указанных фигур позволяет смоделировать отношение базовых коэффициентов в широком диапазоне.

Отмеченная особенность допускает применение указанного подхода для описания микроструктуры исследуемого рассеивающего объекта, поскольку использует минимальный набор микрофизических параметров. К таким параметрам относятся эквивалентное сечение и концентрация эквивалентных рассеивающих частиц. Обоснована применимость предлагаемого подхода для измерения концентрации эквивалентных частиц по сигналу обратного рассеяния. При этом область применимости метода может быть расширена для несферических частиц, сечения которых — выпуклые геометрические фигуры. Наличие сечений в виде невыпуклых фигур может давать различные значения для эквивалентного сечения, найденного по 2d- и 3d-экранам. Вместе с тем такое несоответствие может выступать индикатором наличия невыпуклых сечений в рассеивающем слое. Отмечено, что предложенный подход характеризуется тем, что переход от набора лидарных данных к микроструктуре рассеивающего слоя осуществляется через эквивалентный экран. Обосновано преимущество данного подхода, которое заключается в возможности минимального использования априорной информации о рассеивающей среде при описании эквивалентного экрана (функция распределения по сечениям частиц, мнимая и действительные части коэффициента преломления).

5.4 Исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов

Продолжались работы по анализу данных, комплекса мониторинга ионизирующих излучений в приземной атмосфере (Институт технологии аэронавтики ИТА, Бразилия) и данных глобальной сети нейтронных детекторов «COSMOS». В настоящее время отсутствует однозначное объяснение вариаций потоков низкоэнергичных нейтронов в различных временных шкалах и локациях (так, например, остаётся неясной роль диффундирующего из земной коры радона в генерации популяции тепловых нейтронов в приземной атмосфере). Проблема прежде всего связана тем, что регистрируемый поток зависит, как от типа детектора, так и от его окружения (закрытое помещение, открытый воздух, ландшафт и пр.). Вследствие этого корректная интерпретация данных экспериментальной установки требует тщательного моделирования распространения нейтронов в окружающей детектор среде. В настоящее время для решения подобных задач широко используется программный пакет Geant4, разработанный в ЦЕРНе. Имевшиеся в распоряжении к началу года вычислительные мощности (два ноутбука) были недостаточными для работы с пакетом. Пришлось приобрести достаточно мощный ПК с повышенными оперативной и твердотельной памятью и установить необходимое программное обеспечение для проведения как самих расчётов, так и анализа и визуализации их результатов (перейти с традиционного Windows на Linux вместе с соответствующими редактором и компилятором). Проблема осложняется ещё и тем, что в рассматриваемых экспериментах использованы не шаровые, а цилиндрические газоразрядные счётчики, эффективность которых для потоков нейтронов с различными энергиями и угловыми распределениями в литературе не рассмотрена. В настоящее время созданы и отлажены программы для моделирования следующих процессов:

- 1) эффективность цилиндрического счётчика для различных энергий и угловых распределений падающих нейтронов;
- 2) выход из почвы нейтронов, рождающихся в цепи распада природного радона;
- 3) упрощённая модель атмосферного ливня (с подавлением ветвей реакций не ведущих к образованию нейтронов).

Предварительные результаты показаны на рисунках 5.4.1 и 5.4.2.

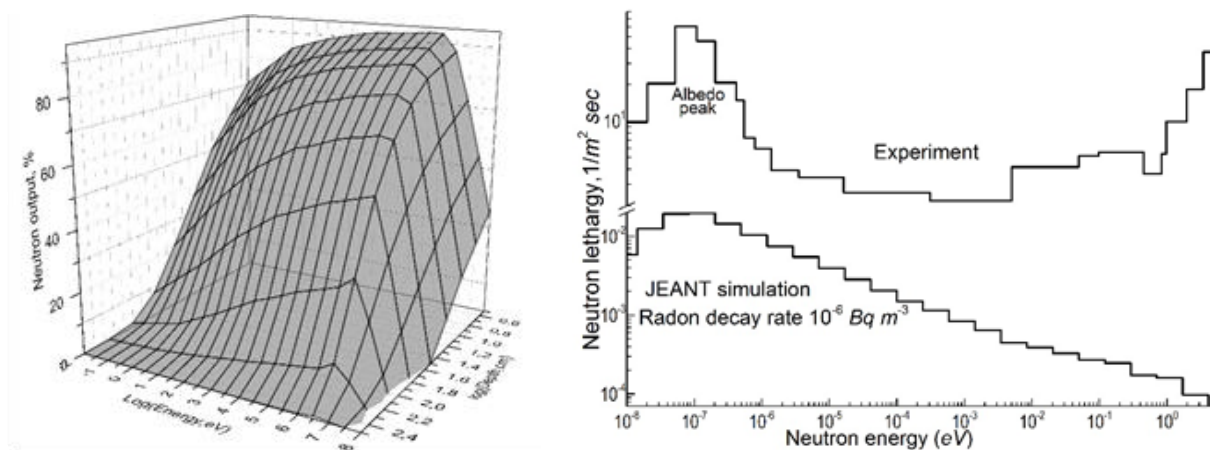


Рисунок 5.4.1 — Вероятность выхода нейтронов из почвы в зависимости от их энергии и глубины их рождения (левая панель); сравнение расчётного спектра выходящих из земли нейтронов с наблюдаемым на поверхности почвы (правая панель)

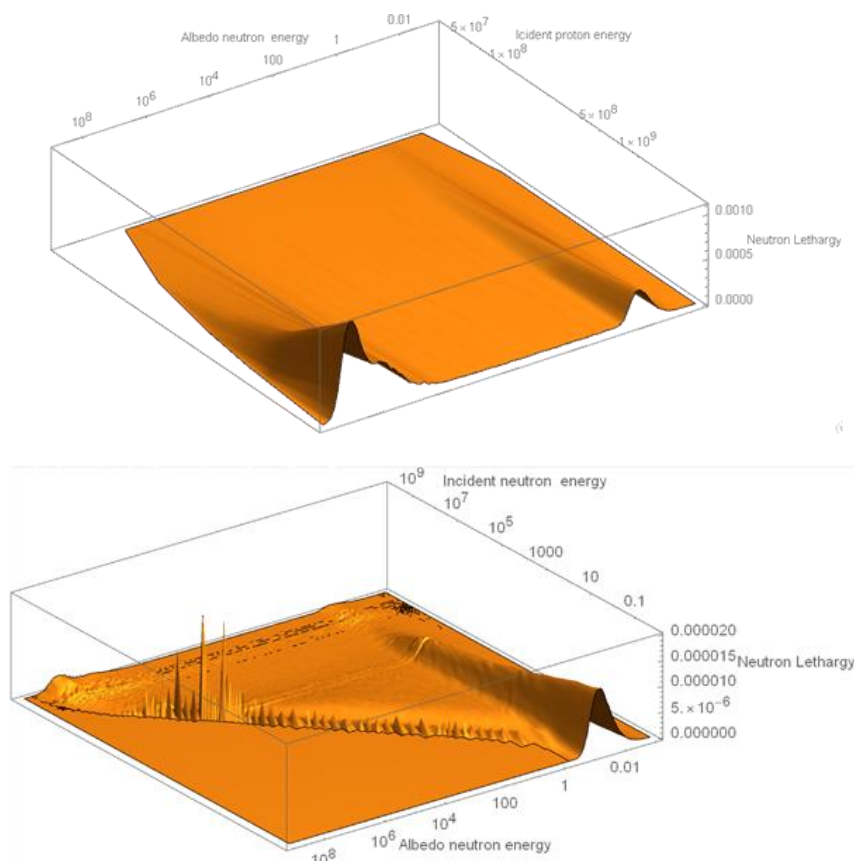


Рисунок 5.4.2 — Спектр нейтронов альбеда на поверхности воды в зависимости от энергии (эВ) падающего: протона (верхний рисунок) и нейтрона (нижний рисунок)

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

5.5.1 Восстановление температурно-влажностных профилей атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2-2

Восстановление трёхмерной структуры атмосферы по данным радиотепловых спутниковых измерений является одной из актуальнейших задач ДЗЗ. Температурно-влажностное профилирование атмосферы занимает здесь особое место, поскольку

радиотепловые сигналы, регистрируемые на спутнике, имеют достаточно сильную зависимость от этих геофизических параметров. Кроме того, очевидна важность этой задачи для климатических и других исследований.

С 2020 г. в Институте космических исследований РАН ведётся работа по внедрению данных МТВЗА-ГЯ в информационный сервис «Вега-Science» ЦКП «ИКИ-Мониторинг». «Вега-Science» предоставляет распределённый доступ к многолетним ежедневно пополняющимся архивам спутниковых данных и получаемые на их основе различным информационным продуктам. 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 на основе данных МТВЗА-ГЯ. Из-за хорошего качества и простоты реализации для этих целей был выбран метод искусственных нейронных сетей (ИНС).

Для восстановления профиля температуры $T(p)$ и абсолютной влажности $\rho(p)$ по данным радиотеплового спутникового зондирования достаточно использовать ИНС прямого распространения с одним скрытым слоем. Для внесения нелинейности в работу сети применяют нелинейные функции активации, в нашем случае используется функция гиперболического тангенса.

Для восстановления профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ в качестве предикторов могут быть использованы все поступающие со спутника данные: яркостные температуры, координаты пикселей и т.д, но основную информацию всё же несут радиометрические сигналы. МТВЗА-ГЯ имеет 31 радиометрический канал, но по техническим причинам для использования пригодны только 28. Основную чувствительность к профилю температуры имеют 10 каналов в полосе поглощения кислорода 50–60 ГГц, к профилю влажности чувствительны 3 канала в близи линии поглощения 183,31 ГГц. Максимум весовых функций влажности не превышает высоты в 10 км или изобары на уровне 200 мб, поэтому как профиль температуры, так и профиль влажности восстанавливаются только для тропосферы. Всю восстанавливаемую толщу тропосферы (от 1000 до 200 мб) было решено разбить на 8 слоёв толщиной 100 мб и проводить восстановление среднего значения температуры и влажности в этих слоях. Значения в каждом атмосферном слое является отдельным продуктом и восстанавливается отдельной ИНС. В первом приближении в качестве предикторов используются яркостные температуры всех радиометрических каналов, далее будет проведена оптимизация.

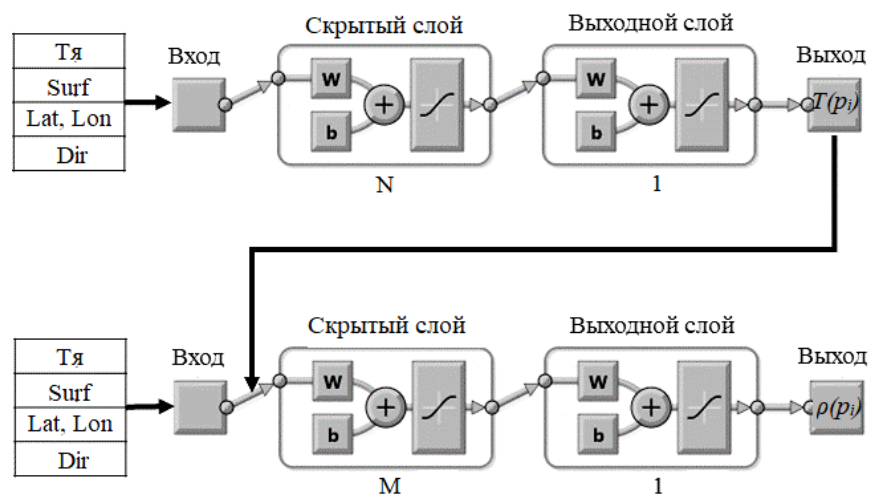


Рисунок 5.5.1.1 — Общая схема восстановления профилей температуры и влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ с помощью ИНС

Кроме радиометрической информации, в качестве предикторов используются флаги типа поверхности (Surf) направление полувитка (Dir), а также координаты центра пятна ДН. Восстановление профиля абсолютной влажности требует информации о профиле температуры атмосферы, поэтому первым этапом восстанавливается профиль 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 следующим образом:

Таблица 5.5.1.1

	Суша	Растительность/ суша	Прибрежный район	Лёд	Возможно лёд	Вода	Береговой район
Уровень, мб	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
Уровень, мб	RMSE восстановления влажности, г/м³/%						
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 5.5.1.2

Тип подстилающей поверхности	Суша		Вода		Суша		Вода	
Источник	МТВЗА	MiRS	МТВЗА	MiRS	МТВЗА	MiRS	МТВЗА	MiRS
Уровень, мб	RMSE восстановления температуры, К				RMSE восстановления влажности, %			
950	4,8	4,3	1,66	2,2	24,3	34	8,1	20
550	2,3	1,5	1,4	1,5	43,1	56	34,8	51
350	3,4	1,6	1,4	1,9	52,1	56	39,2	53

В момент разработки алгоритмов восстановления радиотепловые данные МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2-2 были накоплены за период с марта по декабрь 2020 г. — всего 10 мес. В качестве подспутниковых данных для построения алгоритмов восстановления были использованы данные реанализа ECMWF Era5. 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 Ega5 составляет 1 ч и горизонтальное разрешение $0,25 \times 0,25^\circ$ на регулярной прямоугольной сетке координат. Профили из реанализа были пересчитаны в значения абсолютной влажности и усреднены на 8 слоёв 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 широтного распределения количества данных. Временное совмещение данных осуществлялось в пределах ± 30 мин. После совмещения, полученная выборка была разбита на обучающую и тестовую подвыборки. Обучающая подвыборка содержала данные во временном интервале от марта до октября 2020 г., тестовая подвыборка ноябрь – декабрь 2020 г. Для уменьшения объёма и исключения горизонтальных пространственных корреляционных эффектов полученные подвыборки были прорежены случайным образом и конечный размер для обучающей выборки составил 12 млн точек, а для тестовой выборки — 3 млн точек.

На основе полученных выборок была проведена оптимизация топологии общей схемы ИНС (рисунок 5.5.1.1) для достижения наилучшей точности восстановления профилей и уменьшения вычислительной нагрузки при восстановлении. В начале, экспериментально было подобрано количество 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 количество скрытых нейронов $N = 38$. 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 типестилающей поверхности для точки измерений. Всего в данных имеется 7 типов поверхности: Суша, растительность/суша, прибрежный район, лёд, возможно лёд, вода и береговой район. Результаты восстановления приведены в таблице 5.5.1.1. Также, результаты восстановления были сопоставлены с мировыми аналогами. В частности, с системой Microwave Integrated Retrieval System (MIRS) – система оперативного восстановления метеопараметров на основе радиотепловых спутниковых данных ATMS и др. Основана на физическом алгоритме. Результаты сравнения приведены в таблице 5.5.1.2.

Видно, что результаты восстановления по данным МТВЗА-ГЯ с помощью разработанного алгоритма находятся на уровне мировых аналогов и даже превосходят их. Разработанный алгоритм уже внедрён в сервис «Vega-Science» и часть продуктов можно получить на сайте <http://sci-vega.ru/maps/leaflet.shtml>.

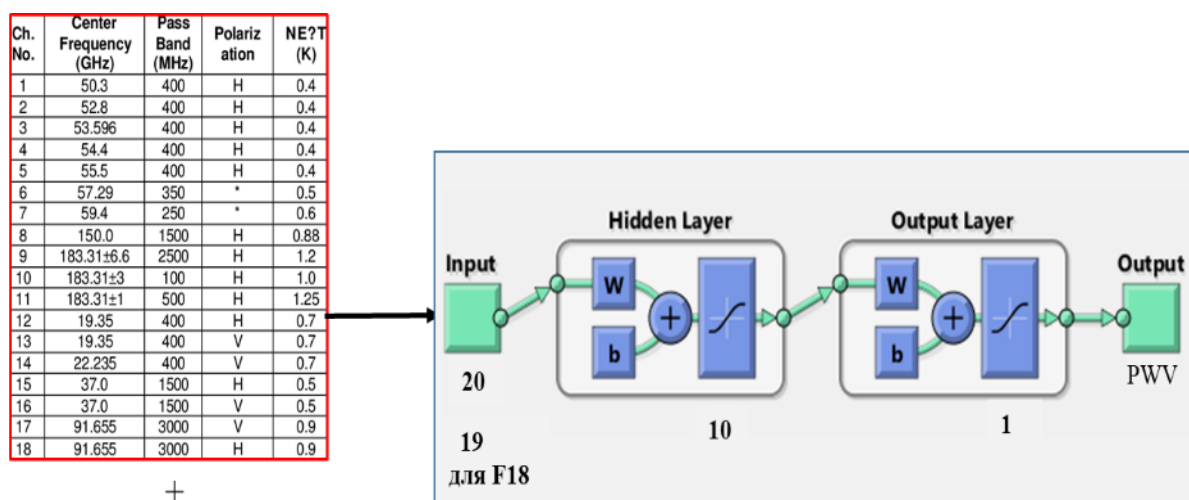
5.5.2 Восстановление интегрального паросодержания атмосферы над сушей по данным SSMIS

Одним из направлений работы отдела 55 ИКИ РАН является восстановление детальной динамики атмосферного водяного пара на климатически значимых масштабах. Для этого необходима информация об интегральном паросодержании атмосферы над всем земным шаром с хорошим временным и пространственным разрешением за максимально возможный период времени. Такая информация может быть получена из различных источников, но основным на сегодняшний день являются пассивные микроволновые наблюдения из космоса. Наиболее длительные непрерывные и качественные наблюдения водяного пара осуществляются в рамках программы министерства обороны США DMSP радиотепловыми приборами SSM/I и SSMIS.

Прибор SSMI имеет измерительный канал в слабой линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц, где сильно влияние подстилающей поверхности. Высокая яркость покровов не позволяет хорошо различать излучение атмосферно водяного пара над сушей. Эту проблему призвано решить следующее поколение приборов — SSMIS, которые содержат дополнительные более высокочастотные каналы в сильных линиях поглощения

водяного пара и кислорода 183 и 60 ГГц. Данный прибор работает более 17 лет и на основе его измерений можно построить достаточно длинные непрерывные временные ряды данных. Для обработки данных SSMIS необходимо было разработать алгоритмы восстановления интегрального паросодержания атмосферы над всеми типами подстилающих поверхностей.

В настоящее время доступны данные трёх приборов SSMIS на спутниках DMSP F16 F17 и F18. Они летят друг за другом в течение двух часов и поэтому позволяют покрывать данными поверхность земного шара практически без разрывов дважды в день. В полном объёме данные SSMIS удалось получить только в виде файлов TDR — это данные антенных температур, которые собраны в один полный виток вокруг Земли. Для их обработки пришлось сначала разделить данные на дневной и ночной полувитки. Так же пришлось осуществить сведение каналов, которые объединены в пять наборов, каждый из которых имеет свои координаты пятна ДН и количество измерений на один скан. Для работы было решено использовать каналы с 1-го по 18-й, которые чувствительны к профилям температуры и влажности тропосферы характеристикам подстилающей поверхности и интегральному водозапасу атмосферы. Каналы с 19-го по 24-й которые отвечают за температурное зондирование стратосферы было решено не использовать. Так же, учитывая факт наличия только антенных температур и техническим проблем в различных каналах, не представляется возможным разработка общего алгоритма для всех 3 спутников, каждый обрабатывается отдельным алгоритмом.



- Высота поверхности
- Флаг типа поверхности

Рисунок 5.5.2.1 — Схема алгоритма восстановления интегрального паросодержания (PWV) по данным SSMIS

Для быстрой обработки большого количества спутниковых данных в условиях ограниченности ресурсов хорошо подходит нейросетевой подход восстановления. Для того чтобы обучить и проверить сеть была сформирована выборка совмещённых спутниковых и подспутниковых измерений для каждого из трёх приборов SSMIS. Были обработаны данные за 2020 г. В качестве подспутниковых измерений использовались данные реанализа ECMWF ERA5. Реанализ содержит глобальные поля водяного пара с периодичностью 1 ч на прямоугольной регулярной сетке с пространственным разрешением 0,25°. Спутниковые данные и данные реанализа совмещались по времени в пределах ± 15 мин. В результате была получена общая выборка по 8 млн пикселей для каждого прибора. Каждая из них случайным образом была разбита на обучающую размером 5 млн пикселей и тестовую — 3 млн пикселей. Обучение проводилось для всех

типов поверхности. Использовалась сеть прямого распространения с одним скрытым слоем и сигмоидной функцией активации (рисунок 5.5.2.1). Входными параметрами сети были выбраны 18 каналов SSMIS для F16 и F17 и 17 каналов для F18 и также информация о высоте рельефа и флаг типа поверхности.

После обучения сети были получены результаты восстановления интегрального паросодержания над всеми типами поверхности, представленные на рисунке 5.5.2.2.

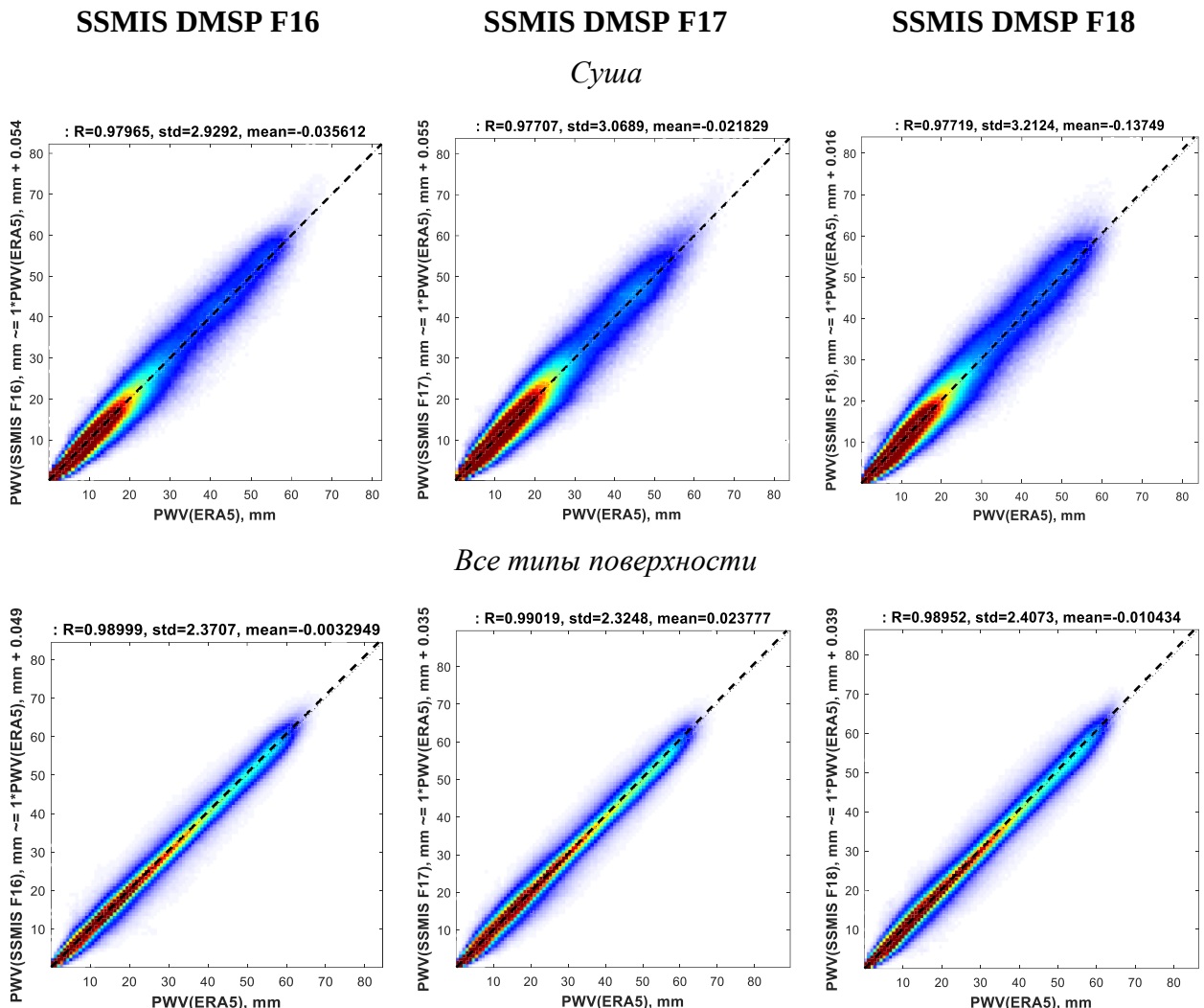


Рисунок 5.5.2.2 — Диаграммы рассеяния интегрального паросодержания атмосферы, восстановленного по SSMIS и полученных из реанализа Era5

Из рисунка видно, что разработанный алгоритм обеспечивает среднеквадратичную ошибку восстановления интегрального паросодержания над сушей порядка 3 мм, и 2,4 мм по всему земному шару. Восстановленное глобальное поле интегрального паросодержания атмосферы, сформированное из данных трёх спутников DMSP представлено на рисунке 5.5.2.3. Эти данные имеют хорошее качество и могут быть использованы в дальнейшем для исследования детальной динамики атмосферного водяного пара.

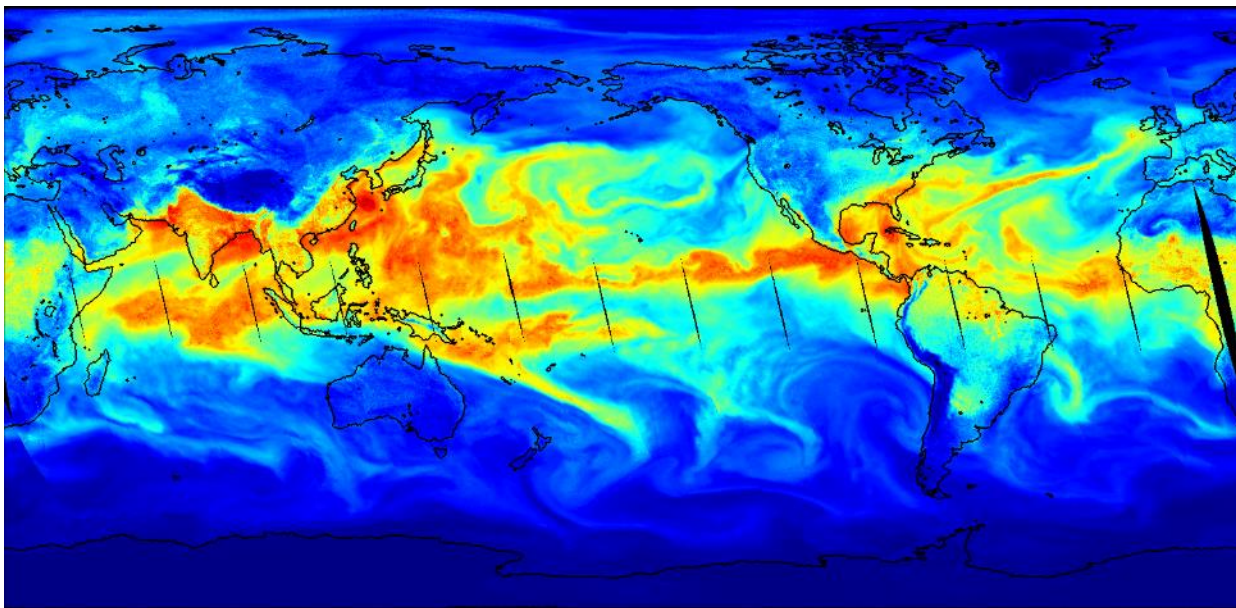


Рисунок 5.5.2.3 — Глобальное поле интегрального паросодержания атмосферы, сформированное из данных трёх приборов SSMIS за 20 августа 2020 г.

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.

При этом одними из наиболее значимых результатов, полученных в рамках данного направления, стало развитие методов решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы на данным ДЗЗ, ориентированных в том числе на использовании информации российских космических систем.

Таким образом материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Атмосфера» в 2021 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 6 МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ

Введение

Настоящий раздел посвящён вопросам создания перспективных методов, подходов развития спутниковых систем наблюдения Земли из Космоса и их элементов, включая системы первичной обработки данных. Работы, входящие в данный раздел, направлены на повышение качества и возможностей действующих и перспективных спутниковых систем ДЗЗ для обеспечения их эффективного использования при решении задач мониторинга и исследования различных природных и антропогенных процессов, объектов и явлений. В 2021 г. в рамках настоящего раздела были запланированы работы по следующим основным направлениям:

- разработка методов и алгоритмов автоматической полётной геометрической калибровки КМСС-М и КМСС-2, в том числе, создание банка контрольных точек;
- разработка методики и проведение полётной радиометрической калибровки приборов КМСС-М и КМСС-2.

В настоящем разделе отчёта представлены основные результаты выполненных в 2021 г. работ. Подробно полученные результаты описаны в работах [71, 72, 165].

6.1 Разработка методик, методов и алгоритмов полётных радиометрической и геометрической калибровок приборов КМСС-М и КМСС-2, в том числе, создание банка контрольных точек

Таблица 6.1.1 — Результаты проверки точности калибровки КМСС-2 (конфигурация 311)

Кадр	Канал	Число	Среднее смещение КТ по	Среднее смещение КТ по
221_011074_0_0_04	1	184	–85	53
	2	240	–85	45
	3	141	–87	78
221_011103_0_0_02	1	104	23	–8
	2	87	40	–23
	3	100	19	–21
221_011103_0_0_03	1	204	15	–22
	2	317	23	–24
	3	155	14	–20
221_011117_0_0_03	1	138	–16	24
	2	245	–19	19
	3	99	–28	41
221_011131_0_0_04	1	272	6	14
	2	299	2	13
	3	221	13	4
221_011160_0_0_03	1	394	38	–24
	2	404	43	–29
	3	351	38	–32
221_011174_0_0_02	1	57	41	17
	2	56	35	–5
	3	24	–27	9
221_011174_0_0_03	1	250	63	–102
	2	269	62	–98
	3	218	55	–98

В течение отчётного периода проведена плановая ежегодная полётная геометрическая калибровка КМСС-2 с использованием созданного в ИКИ РАН на основе изображений Sentinel каталога контрольных точек (КТ), выбранных в районе Эгейского и Чёрного морей. Результаты проверки точности калибровки, проведённой по изображениям с корректной навигационной привязкой, приведены в таблице 6.1.1. Ошибки абсолютной географической привязки изображений КМСС-2 не превышают ~100 м, ошибки межканального совмещения изображений — 33 м.

В то же время необходимо отметить, что вследствие нештатной ситуации на борту космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2-2 периодически возникают ошибки в навигационной информации, которые могут приводить к ошибкам геопривязки изображений КМСС-2 во многие сотни метров, которые не имеют систематического характера и не могут быть устранены калибровкой. При этом точность совмещения спектральных каналов КМСС-2 сохраняется. Для восстановления точности геопривязки изображений КМСС-2, выходящих за пределы района калибровки, используется их корреляция с КТ из глобального каталога Landsat. Технология автоматической коррекции геопривязки изображений КМСС-2 описана в разделе 3.1 отчёта ИКИ РАН по теме «Вектор» за 2020 г. и опубликована в работах [72, 165].

6.2. Разработка методики и проведение полётной радиометрической калибровки приборов КМСС-М и КМСС-2

Полётная радиометрическая калибровка камер МСУ, входящих в состав Комплексов многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 выполнена в соответствии с разработанной методикой ежегодного контроля и поддержания радиометрического качества получаемых данных. Методика абсолютной полётной радиометрической калибровки КМСС определяет мероприятия по проведению в период январь – февраль съёмок однородных снежных полей Антарктиды. Изображения полигонов выбирались по признаку наличия протяжённых однородных участков, наблюдаемых в безоблачных условиях. Файлы радиометрической коррекции приборов уточнены по результатам кросс-калибровок приборов КМСС-М/МСУ-100М (МСУ-201 и МСУ-202) со спектрорадиометром MODIS на КА Terra и КМСС-2/МСУ-100ТМ (МСУ-221 и МСУ-222) со спектрорадиометром MODIS на КА Aqua.

На рисунках 6.2.1, 6.2.3 показаны рассчитанные коэффициенты коррекции чувствительности элементарных детекторов ПЗС-линеек камер КМСС-М и КМСС-2 по сравнению с предыдущим годом. В большинстве случаев коэффициенты коррекции не превышают 5 % процентов (по сравнению с результатами за 2020 г.), т.е. находятся в пределах ошибок калибровки, что подтверждает стабильность чувствительности камер и стабильность отражательных характеристик Антарктиды. Распределение коэффициентов чувствительности элементарных детекторов КМСС-М показано на рисунке 6.2.2. На рисунках 6.2.4 и 6.2.5 представлены распределения коэффициентов чувствительности элементарных детекторов КМСС-2 с учётом их коррекции для актуальной комбинации ПЗС-линеек (3-1-1) в спектральных каналах камер МСУ-100ТМ (калибровка остальных линеек, которые до сих пор не использовались на этапе лётной эксплуатации, не проверялась и осталась такой же, как при лётных испытаниях). По результатам ежегодной полётной калибровки сформированы актуальные файлы радиометрической калибровки камер КМСС-М и КМСС-2.

При сопоставлении КСЯ природных объектов по данным КМСС-М и MODIS на КА Terra отличие коэффициента линейной регрессии от 1, которое можно рассматривать как оценку расхождения абсолютной калибровки этих сенсоров, составляет 1–5 % в зависимости от спектрального канала, а СКО КСЯ не превышает 0,045. При сопоставлении КСЯ природных объектов по данным КМСС-2 и MODIS на КА Aqua

отличие коэффициента линейной регрессии от 1, составляет 1–5 % в зависимости от спектрального канала, а СКО КСЯ не превышает 0,034.

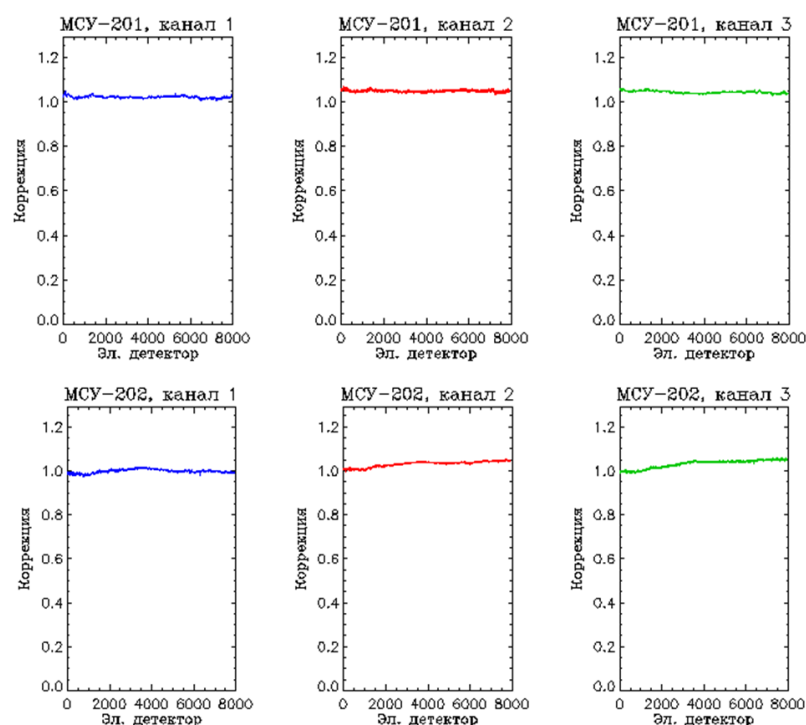


Рисунок 6.2.1 — Коэффициенты коррекции чувствительности элементарных детекторов КМСС-М по результатам калибровки в январе – феврале 2021 г.

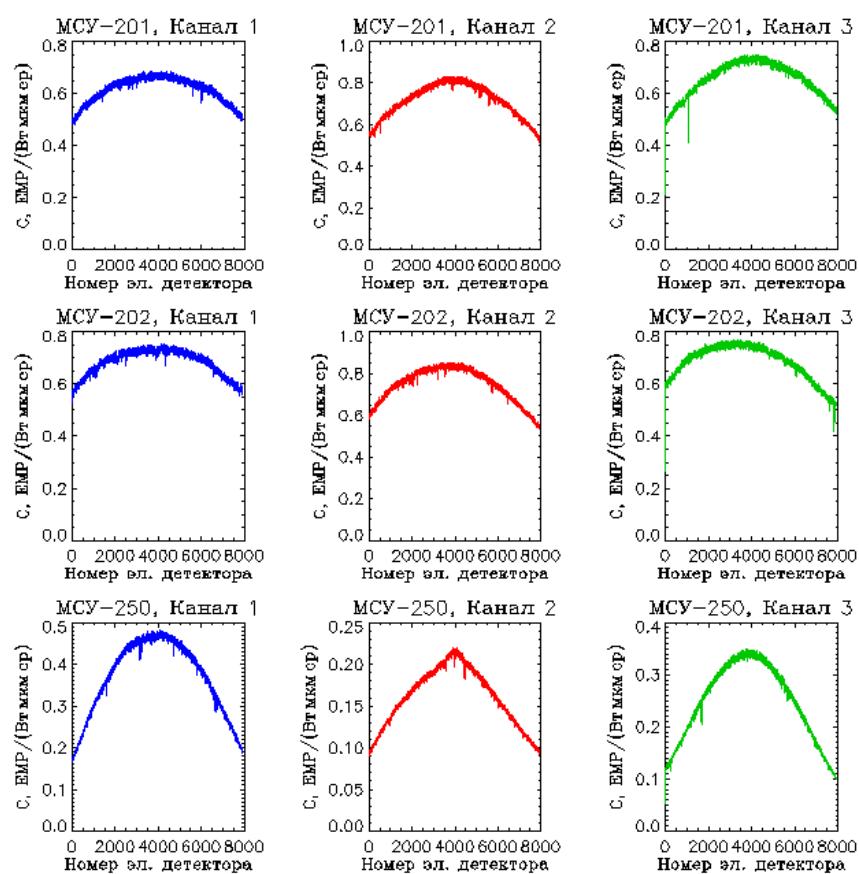


Рисунок 6.2.2 — Коэффициенты чувствительности элементарных детекторов КМСС-М по результатам калибровки в январе – феврале 2021 г.

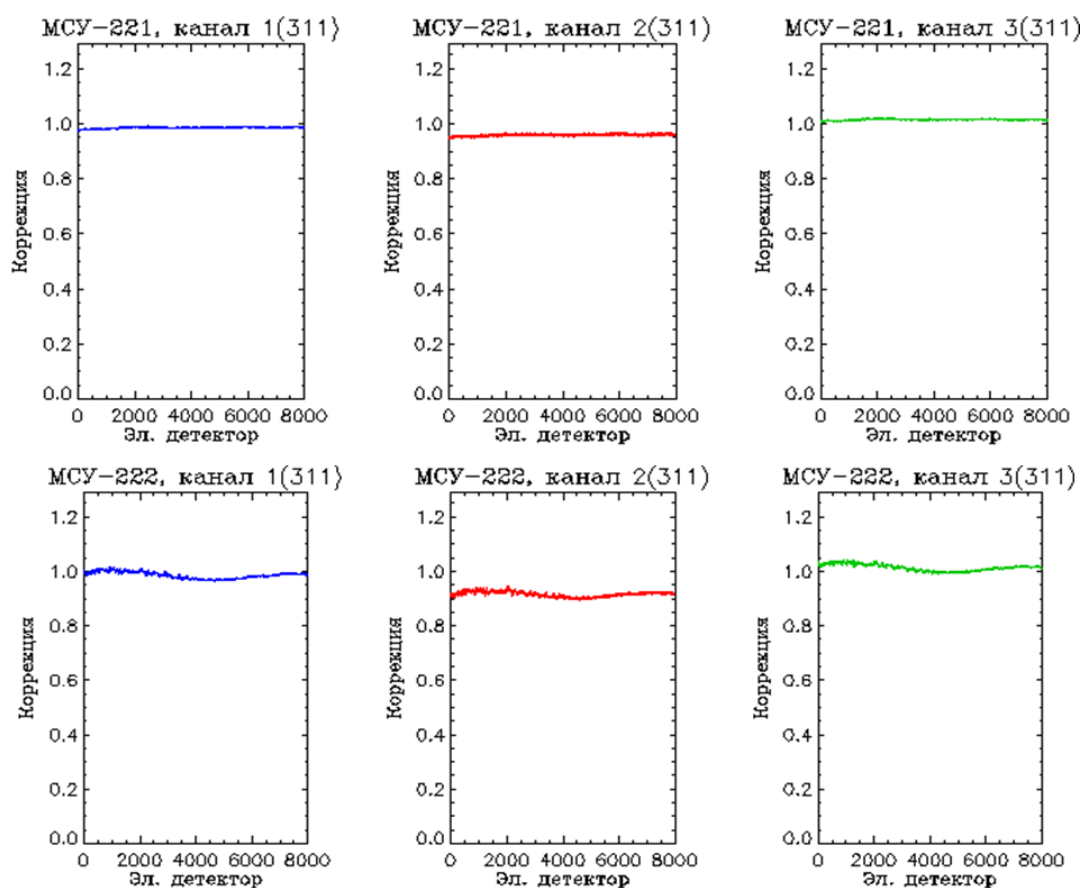


Рисунок 6.2.3 — Коэффициенты коррекции чувствительности элементарных детекторов КМСС-2 по результатам калибровки в январе – феврале 2021 г.

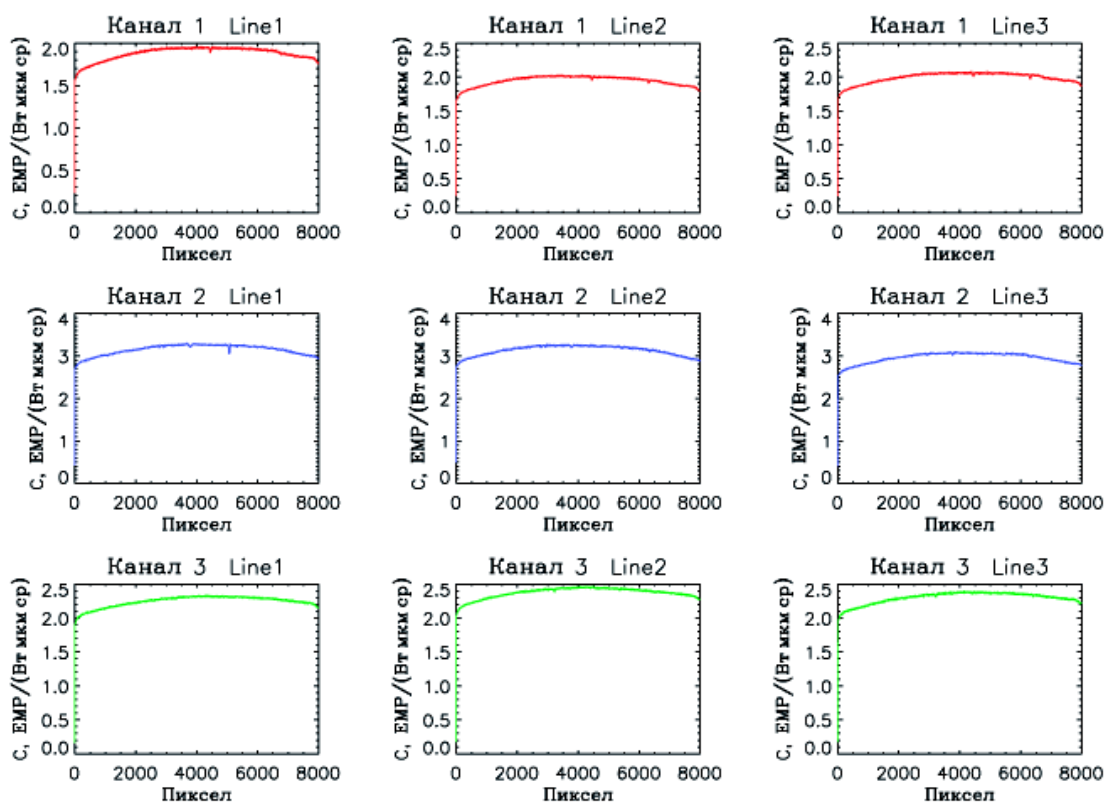


Рисунок 6.2.4 — Коэффициенты чувствительности элементарных детекторов камеры КМСС-2/МСУ-221, скорректированные по результатам калибровки в январе – феврале 2021 г.

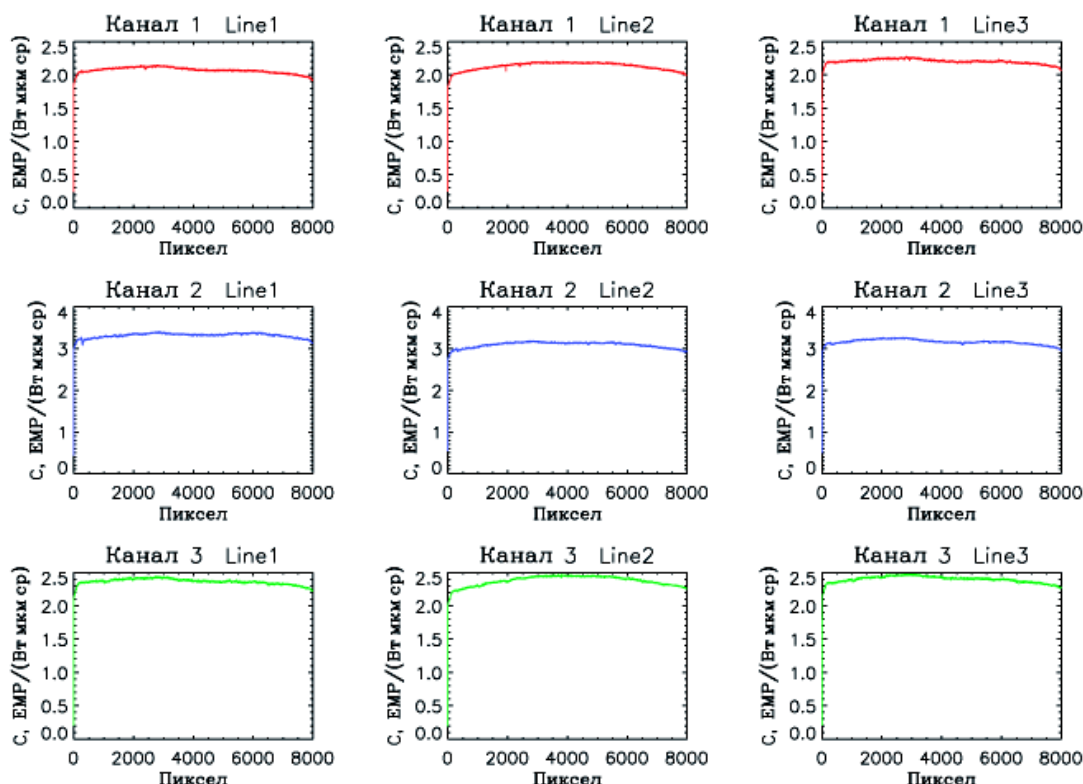


Рисунок 6.2.5 — Коэффициенты чувствительности элементарных детекторов камеры КМСС-2/МСУ-222, скорректированные по результатам калибровки в январе – феврале 2021 г.

Заключение

По теме Мониторинг-Эффект работы выполнялись в рамках утверждённого плана. Особое внимание было уделено вопросам качества получаемых целевых видеоданных комплексов КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2: разработке методов и алгоритмов автоматической полётной геометрической калибровки, в том числе созданию банка контрольных точек и разработке методики и проведению полётной радиометрической калибровки приборов.

Ежегодная полётная геометрическая калибровка КМСС-2 проведена с использованием каталога контрольных точек (КТ), созданного в ИКИ РАН на основе изображений Sentinel. При наличии корректных навигационных данных ошибки абсолютной географической привязки изображений КМСС-2 не превышают ~100 м, ошибки межканального совмещения изображений — 33 м.

Проведённая радиометрическая калибровка приборов КМСС-М и КМСС-2 со спектрорадиометром MODIS и полученные результаты подтверждают эффективность разработанных методик поддержания радиометрического качества получаемых данных, которые при регулярной валидации и корректировке не превышают 5 % по сравнению с результатами за предыдущий год, при существующем межгодовом тренде уменьшения чувствительности в спектральных каналах КМСС, обусловленном естественным изменением физических свойств оптических приборов.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Эффект» в 2021 г. выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 7 МОНИТОРИНГ-ИНФРАСТРУКТУРА

Введение

Раздел 7 («Мониторинг-Инфраструктура») темы «Мониторинг» в рамках тематики дистанционного мониторинга природных и антропогенных процессов, объектов и явлений, включает мероприятия, направленные на широкое распространение новых знаний в научном сообществе, встречи ведущих специалистов для продуктивного обсуждения актуальных задач, новых методов и их физических основ, передачу опыта и обучение молодых учёных. Для достижения этих целей были проведены работы по организации научных встреч, издательской и информационной деятельности, в том числе в сети интернет.

В 2021 г. в рамках работ по теме «Мониторинг-Инфраструктура» были запланированы следующие работы и научно-образовательные мероприятия:

- проведение ежегодной Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (прежнее название — Всероссийская открытая конференция с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»);
- проведение научных семинаров и школ-конференций по фундаментальным проблемам ДЗЗ из космоса;
- выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»;
- подготовка и повышение квалификации кадров на базе НОЦ ИКИ РАН. В том числе:
 - 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»;
 - проведение конкурса работ молодых учёных, работающих в области дистанционного мониторинга Земли, природных и антропогенных процессов;
 - научно-методическое обеспечение работ базовых кафедр ИКИ РАН и образовательных курсов, проводимых специалистами ИКИ РАН по направлению «Дистанционного зондирования и исследования Земли из космоса».

Настоящий раздел посвящён описанию мероприятий, выполненных в рамках направления «Мониторинг-Инфраструктура» в 2021 г. Информация о полученных в данном направлении результатах также представлена в работах [21, 22, 46–49].

7.1. Проведение ежегодной международной конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://conf.rse.geosmis.ru/>)

15–19 ноября 2021 г. в Институте космических исследований Российской академии наук была проведена Девятнадцатая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». В связи с эпидемиологической обстановкой конференция проводилась в смешанном очно-онлайн формате.

Все мероприятия конференции транслировались через программу Zoom, одновременно проходило пять заседаний секций. Видео всех заседаний выложено в YouTube, с ними можно ознакомиться на сайте <https://www.youtube.com/watch?v=oZOr-Xrn7aQ>.

Работа конференции осуществлялась в рамках следующих секций:

- два пленарных заседания,

- первое из которых было посвящено проблемам климатических изменений и мониторинга потоков парниковых газов в природных экосистемах;
- второе — спутниковому мониторингу опасных явлений, в том числе произошедших в 2021 г.;
- дистанционные исследования поверхности океана и ледяных покровов;
- дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов;
- дистанционное зондирование ионосферы;
- дистанционные методы в геологии и геофизике;
- дистанционное зондирование растительных и почвенных покровов;
- дистанционное зондирование планет Солнечной системы;
- 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.

В рамках пленарного заседания была проведена панельная дискуссия на тему «Проблемы мониторинга потоков парниковых газов в природных экосистемах».

В рамках конференции было проведено два круглых стола:

- Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда Арктики: достижения, проблемы, задачи и перспективы;
- Высокоспиритическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М», который прошёл в НИЦ «Планета».

Всего на конференции было представлено 454 доклада, из них 295 устных и 169 стендовых. Была организована возможность общения с докладчиками в формате «Вопрос – ответ».

Для участия в конференции зарегистрировалось 1044 человек из 13 стран, 78 городов и из 304 организаций. В заключительные два дня конференции было проведено выездное пленарное заседание Госкорпорации «Роскосмос» в НЦ ОМЗ на тему: «Проблемные вопросы внедрения и использования цифровых сервисов и услуг на основе данных ДЗЗ из космоса».

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.

7.2 Проведение научных семинаров и школ-конференций по фундаментальным проблемам ДЗЗ из космоса

7.2.1 Проведение ежегодной Всероссийской научной школы-конференции молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса (<http://conf.rse.geosmis.ru/>)

В рамках Девятнадцатой международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 1–19 ноября 2021 г. в ИКИ РАН проходила Семнадцатая Всероссийская научная школа-конференция молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса. Во время проведения Школы-конференции были прочитаны лекции ведущими российскими, а также учёным из США по проблемам исследования климатических изменений и оценки бюджета углерода.

Был проведён мастер-класс на тему «Особенности картографирования основных видов сельскохозяйственных угодий с использованием данных дистанционного зондирования в сервисе Вега».

Лекции и мастер-класс транслировались также в online режиме.

Молодые учёные представили 52 устных и 21 стендовый доклада.

7.2.2 Проведение Всероссийского семинара «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=814>)

В 2021 г. в ИКИ РАН был организован и начал 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 позволит 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.

7.3 Выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://jr.rse.cosmos.ru/>)

В по состоянию на начало декабря 2021 г. было выпущено пять номеров очередного Восемнадцатого тома научного журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 6-й номер журнала будет опубликован в конце декабря. Всего в 2021 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 и Scopus.

7.4 Проведение работ по подготовке и повышению квалификации кадров на базе Научно-образовательного центра ИКИ РАН. В том числе:

7.4.1 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»

Работа со школьниками в ИКИ РАН ведётся по нескольким направлениям:

- 1) проведение «Дней открытых дверей», на которых школьники могут ознакомиться с деятельностью ИКИ РАН, узнать о сотрудничестве с вузами;
- 2) работа выставочного зала ИКИ РАН, в котором представлены как направления деятельности Института, так и макеты космических аппаратов;
- 3) чтение научно-популярных лекций, освещающих основные задачи космической физики;
- 4) проведение консультаций, рецензирования и руководство научными работами школьников.

В рамках программы «Академический класс в московской школе» были проведены семинары для учителей в том числе по работе с данными ДЗЗ.

В октябре 2021 г. в ИКИ РАН был проведён один «День открытых дверей».

НОЦ ежегодно организует конференции и школы молодых учёных, по вопросам исследования и использования космического пространства, организует участие молодых

учёных ИКИ РАН в работе профильных школ и конференций, в том числе международных.

В 2021 г. были проведены следующие мероприятия:

- Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики. В конференции принимали участие молодые учёные и аспиранты ИКИ РАН, базовых кафедр МФТИ, а также МГУ имени М.В. Ломоносова, МГПУ им. В.И. Ленина, ГЕОХИ, МИФИ. Участвовали представители ГАИШ, ЛГУ, МАИ. Были представители из стран СНГ. По результатам конференции издаются Труды конференции.
- Ежегодная студенческая научная конференция МФТИ.

7.4.2 Проведение конкурсов работ молодых учёных, работающих в области дистанционного мониторинга Земли, природных и антропогенных сред

В рамках Семнадцатой Всероссийской научной школы-конференции по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса был проведён конкурс работ молодых учёных. Всего в конкурсе устных и стендовых докладов приняло участие 73 работы молодых учёных. По результатам конкурса было присуждено 1 первая, 2 вторых и 4 третьих премии, а также 10 поощрительных грамот.

В рамках конкурса научных работ ИКИ РАН, проведённого в 2021 г., в номинации «Лучшая работа, выполненная молодыми учёными», было присуждено 12 премий, две из которых по направлению темы «Мониторинг».

7.4.3 Научно-методическое обеспечение работ базовых кафедр ИКИ РАН и образовательных курсов, проводимых специалистами ИКИ РАН, по направлению «Дистанционного зондирования и исследования Земли из космоса»

Продолжается работа кафедры в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова (МГУ) на факультете космических исследований (ФКИ) (<http://cosmos.msu.ru/>). В сентябре 2017 г. на факультете началось обучение по программам магистратуры, в 2018 г. прошёл первый приём на специалитет, в 2021 г. пятый набор в магистратуру.

Одна из программ: «Методы и технологии дистанционного зондирования Земли» (научный руководитель: зам. директора ИКИ РАН, доктор технических наук Лупян Евгений Аркадьевич).

Задачи программы «Методы и технологии дистанционного зондирования Земли» формировались с учётом того, что перед факультетом стоят как задачи подготовки специалистов для проведения научных исследований, так и решения различных практических задач, в том числе создание новых методов, технологий и систем, обеспечивающих возможность получения и использования оперативной объективной информации о различных процессах и явлениях.

Программа спланирована таким образом, чтобы студенты могли научиться разрабатывать методы и программные комплексы для автоматизированной работы с данными современных и перспективных систем ДЗЗ, в том числе развивать методы моделирования различных процессов с использованием информации, полученной на основе данных ДЗЗ. В рамках программы читаются курсы по проектированию, созданию и внедрению автоматизированных систем сбора, обработки, архивации и представления данных ДЗЗ, обеспечивающих работу со сверхбольшими объёмами информации; созданию распределённых систем дистанционного мониторинга различных природных и антропогенных процессов и объектов. В рамках обучения студенты принимают участие в различных научных разработках, связанных с современными технологиями использования данных дистанционного зондирования.

Специалисты ИКИ РАН участвуют в проведении лекций и семинаров, а также руководят курсовыми работами и магистерскими диссертациями.

В 2021 г. специалистами ИКИ РАН были прочитаны следующие курсы лекций:

- Методы дистанционного зондирования растительного покрова Земли.
- Дистанционное зондирование водных объектов.
- Методы построения информационных систем дистанционного мониторинга.

В рамках программы в магистратуре в 2021 г. обучалось 10 магистрантов. В аспирантуре проходят обучение 2 аспиранта.

В 2021 г. состоялся четвёртый выпуск магистрантов кафедры «Методы и технологии дистанционного зондирования Земли» факультета космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова.

В работе кафедры (чтение лекций, проведение семинаров и практик, руководство курсовых работ и магистерских диссертаций) в 2021 г. принимало участие 16 сотрудников ИКИ РАН.

В ИКИ РАН также проходят практику и готовят магистерские диссертации по направлениям, связанным с дистанционным зондированием Земли, студенты МФТИ.

В 2021 г. сотрудники ИКИ РАН начали вести курсы и семинары, связанные с технологиями дистанционного зондирования, в Высшей школе экономики.

Заключение

Представленные в данном разделе материалы показывают, что научно-исследовательские работы по направлению «Мониторинг-Инфраструктура» проводились в полном соответствии с планом.

Как и в предыдущие годы наиболее значимым и объёмным научным мероприятием стала Девятнадцатая международная конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», в которой в 2021 г. приняло участие более 1100 учёных, специалистов, студентов и аспирантов.

Можно считать, что научно-исследовательские работы по направлению «Мониторинг-Инфраструктура» выполнены в полном объёме.

РАЗДЕЛ 8 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИКИ РАН, ВЫПОЛНЕННЫХ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ В 2021 ГОДУ

8.1. Создание методов оперативной оценки состояния озимых сельскохозяйственных культур на основе данных спутниковых наблюдений

Основной задачей созданных методов является проведение оперативной оценки состояния посевов озимых сельскохозяйственных культур на территории Российской Федерации на основе данных спутниковых наблюдений, метеорологической и статистической информации. Актуальность задачи определяется, с одной стороны, необходимостью заблаговременного получения объективной информации о посевах для принятия обоснованных управленческих решений в сфере агропромышленного комплекса (АПК) различными организациями и ведомствами, с другой — возможностью получения соответствующих сведений благодаря накопленному в Центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» уникальных многолетних архивов данных спутниковых дистанционных наблюдений дистанционного зондирования, метеорологических и статистических данных по территории России и сопредельных государств. Основой разработанных методов являются созданные в ИКИ РАН технологии регулярного, вплоть до ежедневного, построения безоблачных композитов и формирования на основе многолетних наблюдений региональных временных портретов (норм развития) сельскохозяйственных культур (рисунок 8.1.1).

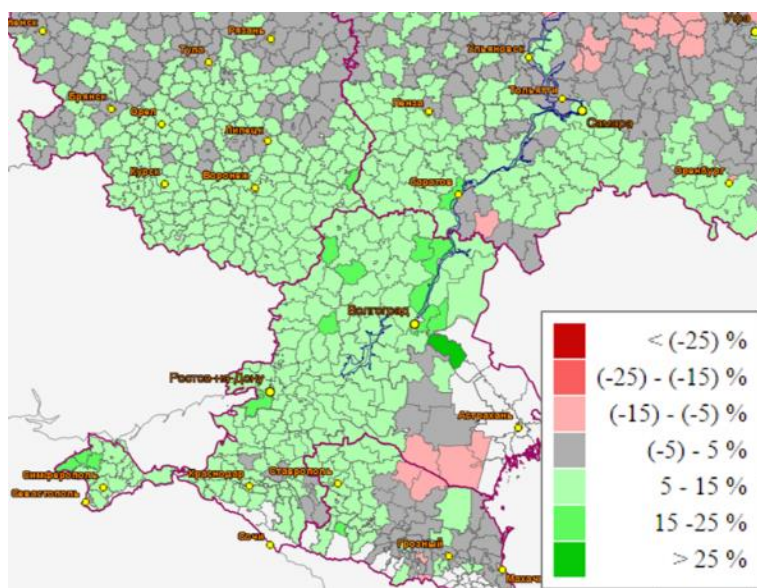


Рисунок 8.1.1 — Пример карты. Разница максимальных значений NDVI озимых, достигнутых к 26-й неделе 2021 г. (28 июня – 4 июля), и среднеемноголетних максимумов (характеристика хорошо коррелирует с урожайностью)

Разработанные методы уже сегодня достаточно эффективно используются в различных информационных системах для получения оперативных данных и оценок развития и гибели озимых культур.

8.2. Методика комплексного анализа спутниковых и метеорологических данных для оценки загрязнения морской поверхности в результате аварийных разливов нефти

Многолетний опыт работ ИКИ РАН и ИО РАН позволил, на основе анализа нескольких десятков тысяч спутниковых радиолокационных изображений, реализовать методику визуального анализа, с большой достоверностью выявляющую области нефтяных

загрязнений морской поверхности. Пример применения совместного анализа радиолокационных и оптических спутниковых изображений, а также метеорологических данных для оценки загрязнения акватории северо-восточной части Чёрного моря, где 7 августа 2021 г. произошёл выброс нефти при заправке танкера *Minerva Symphony* на морском терминале ВПУ-1 АО «Каспийский трубопроводный консорциум» (АО «КТК-Р»), приведён на рисунке 8.2.1.

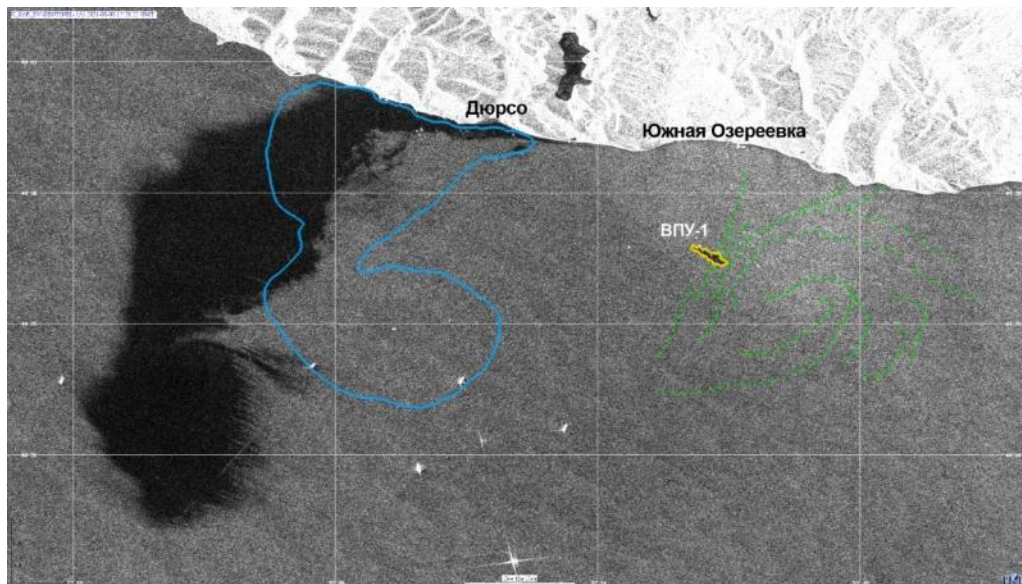


Рисунок 8.2.1 — Смещение нефтяного пятна и циклонического вихря с 7 по 8 августа 2021 г. По серии радиолокационных (РЛИ) и оптических спутниковых изображений: жёлтый контур — нефтяное пятно в районе аварии, выявленное на РЛИ от 7 августа в 15:27 UTC (площадь не менее 0,21 км²); зелёные точки — контур циклонического вихря, выявленного на РЛИ от 7 августа в 03:33 UTC; голубой контур — проявление циклонического вихря на изображении MODIS Aqua от 8 августа в 10:25 UTC. Контуры наложены на РЛИ от 8 августа в 15:20 UTC (площадь нефтяного пятна 83 км²)

Реализованная методика закладывает технологическую основу для создания остро необходимой системы постоянно действующего комплексного спутникового мониторинга нефтяных загрязнений акватории северо-восточной части Чёрного моря, особенно прибрежной акватории между Анапой и Геленджиком, являющейся зоной повышенного экологического риска.

РАЗДЕЛ 9 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИКИ РАН, ГОТОВЫЕ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В 2021 ГОДУ

Создана уникальная карта удельных запасов углерода в лесах России на основе данных дистанционного зондирования

Институтом космических исследований РАН и Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН разработаны новые подходы, а также уникальный комплекс методов и технологий, позволяющие на основе спутниковых данных дистанционного зондирования осуществлять оценку запасов углерода в лесах России (рисунок 9.1). Разработанные методы основаны на использовании данных измерений оптических характеристик земного покрова для оценки ключевых характеристик лесов, определяющих запасы в них углерода, включая породный состав и объем древесной биомассы. Использование полученных характеристик совместно с имеющимися зависимостями и моделями роста лесов, позволяет оценивать их возраст и продуктивность, а также вычислять запас углерода в живых и мёртвых фракциях деревьев и напочвенного покрова.

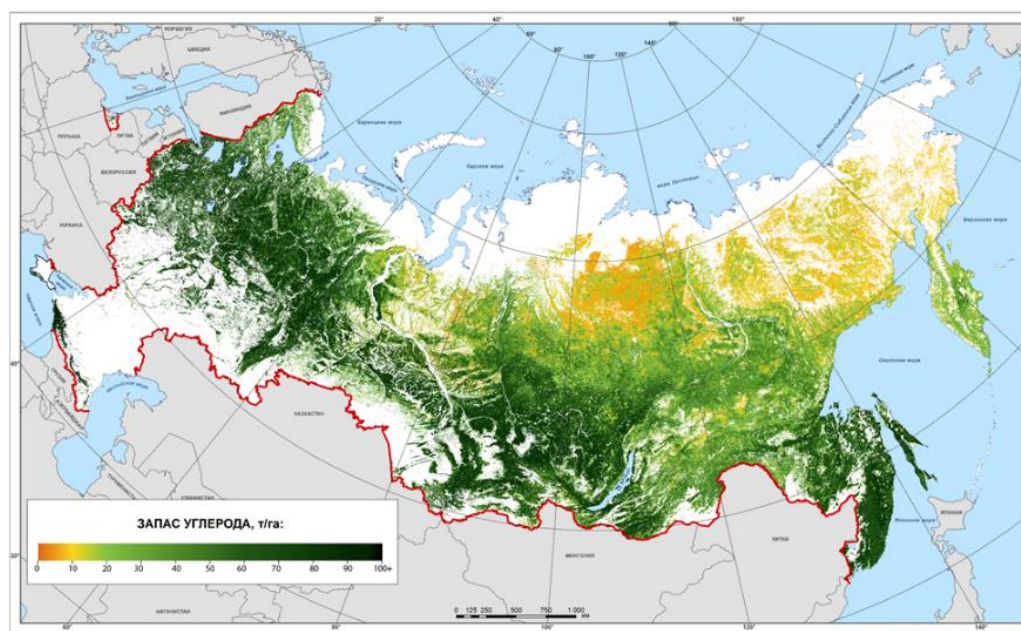


Рисунок 9.1 — Удельный запас углерода в лесах России на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса

Полученная карта отражает детальную информацию о пространственном распределении запаса углерода в лесах России, общий объем которого (без учёта почв), согласно полученным данным, превышает $52 \cdot 10^9$ т. Полученные результаты открывают возможность решения важнейшей государственной задачи объективной оценки содержания углерода в лесах России, что не обеспечивается ни одним из других существующих в настоящее время методов.

Исследования выполнены в рамках проекта «Космическая научная обсерватория мониторинга углерода лесов России» при поддержке гранта Российского научного фонда на проведение исследований на базе Лабораторий мирового уровня. При проведении исследований использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>).

РАЗДЕЛ 10 ГРАНТЫ ПО НАПРАВЛЕНИЮ МОНИТОРИНГ

Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)

18-29-24121 Разработка методов и основ дистанционного компьютеризированного мониторинга изменений окружающей среды в местах расположения источников техногенных отходов и отвалов	Лупян Е.А. д-р техн. наук	2018–2021
19-37-90114 Разработка подходов и методов дистанционного мониторинга водных ресурсов в регионах Средней Азии на примере контроля состояния рек бассейна Амударьи	Лупян Е.А. д-р техн. наук	2019–2021
19-35-60007 Пространственно-временные закономерности динамики состояния аридных пастбищных ландшафтов на основе анализа спектрально-отражательных свойств	Шинкаренко С.С. канд. с.-х. наук	2019–2022
19-45-343001 Пространственно-временные особенности теплового поля урбанизированных территорий засушливой зоны по данным спутниковой съёмки	Кошелева О.Ю.	2019–2021
20-05-00198-а Спутниковая микроволновая радиометрия эстуариев российской Арктики — анализ гидрологического режима в период ледостава	Тихонов В.В. канд. физ.-мат. наук	2020–2022
20-07-00200-а Развитие методов радиоинтерферометрии в задачах СВЧ радиометрического дистанционного зондирования Земли	Смирнов М.Т. канд. физ.-мат. наук	2020–2022
20-02-00181 Измерение пристеночных пульсаций давления в условиях воздействия вибраций, акустического шума и флуктуаций температуры	Кудашев Е.Б. д-р техн. наук	2020–2022

Российский научный фонд (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	Барталев С.А. д-р техн. наук	2019–2022
19-71-20035 Информационно –вычислительная система вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН – Чёрное море» и её интеграция с программно-аппаратным комплексом ЦКП «ИКИ-Мониторинг»	Агошков В.И. д-р физ.-мат. наук	2019–2022

19-75-20088 Создание опирающейся на данные дистанционного зондирования Земли методологии анализа и прогнозирования влияния климатических и экологических факторов на заболеваемость природно-очаговыми инфекциями	Малеев В.В. д-р мед. наук	2019–2022
19-74-20185 Научные основы учета, оценки экологического состояния, климатогенной роли и пожарной опасности антропогенно измененных торфяных болот на основе спутниковых и наземных данных	Сиринов А.А. д-р биол. наук	2019–2022
19-77-20060 Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования	Лаврова О.Ю. канд. физ.-мат. наук	2019–2022
РНФ 21-77-00018 Закономерности динамики состояния ландшафтов речных пойм зоны недостаточного увлажнения в условиях гидрологических и климатических изменений	Шинкаренко С.С., канд. с.-х. наук	2021–2023

Программы фундаментальных исследований

МК-4903.2021.1.5 грант Президента РФ для поддержки молодых ученых – 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 год	Кашницкий А.В. канд. техн. наук	2021–2022
---	------------------------------------	-----------

Зарубежные программы и совместные с зарубежными

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)	Гитас Я., проф., д.н.	2018–2022
---	-----------------------	-----------

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что по результатам работ по направлению темы «Мониторинг» сотрудниками ИКИ РАН опубликовано — 167 работ, из них опубликовано:

- в зарубежных изданиях — 19;
- книг — 0;
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах — 53;
- статьи в сборниках материалов конференций — 6;
- материалы конференций — 56;
- тезисы, доклады — 31;
- 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 100 научных и образовательных организациях.

На наш взгляд, важным является и тот факт, что результаты, полученные в рамках различных направлений работ по теме «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 (<http://www.pushkino.aviales.ru/>), 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) (<http://osm.smislab.ru/>), 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 Вега-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/>).
- Технологии 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 соответствии с утверждённым планом и полностью выполнены.

ПУБЛИКАЦИИ

Опубликовано — 167 работ, из них:

- в зарубежных изданиях — 19;
- главы в книгах — 0;
- книг — 0;
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах — 53;
- статьи в сборниках материалов конференций — 6;
- материалы конференций — 56;
- тезисы, доклады — 31;
- патенты — 2;
- публикаций по грантам РФФИ — 33;
- в соавторстве с зарубежными авторами — 4;
- статьи в WOS и Scopus — 56;
- статьи в WOS и Scopus (Q1, Q2) — 6;
- статьи в WOS и Scopus (Q3, Q4) — 42 (из них в печати — 6);
- статьи в WOS и Scopus (без Q) — 8;
- статьи ниже Q4 с DOI — 15 (из них в печати — 2);
- статьи ниже Q4 без DOI — 0.

Публикации в зарубежных изданиях

1. Denisov P.V., Kashnitskiy A.V., Loupian E.A., Sereda I.I., Tolpin V.A., Troshko K.A. Possibilities of vega satellite monitoring services for arable land use assessment on the example of Smolensk region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. V. 723(3). 032072. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032072. **(Scopus)** «Мониторинг»
2. Balashov I.V., Loupian E.A., Bartalev S.A., Bourtsev M.A., Mazurov A.A. ISDM-Rosleskhoz operation and evolution experience // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. V. 806. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012007. **(Scopus)** «Мониторинг»
3. Lozin D.V., Balashov I.V., Loupian E.A. Possibilities of near real-time forest cover damage estimation based on fires radiative power data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. V. 806. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012019. **(Scopus)** «Мониторинг»
4. Kashnitskiy A.V., Balashov I.V., Saigin I.A., Stytsenko F.V., Loupian E.A. Research database of burnt areas over Russia based on high resolution remote sensing data // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation “Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes” (SDM-2021), 2021. V. 3006. P. 108–115. DOI: 10.25743/SDM.2021.79.43.015. **(Scopus)**
5. Konstantinova A.M., Loupian E.A., Balashov I.V., Kashnitskiy A.V. Approaches to monitoring natural and anthropogenic objects in an analysis of the environment around large industrial facilities // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation “Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes” (SDM-2021), 2021. V. 3006. P. 127–134. DOI: 10.25743/SDM.2021.46.67.017 **(Scopus)** РФФИ «Мониторинг»
6. Konstantinova A.M., Bril A.A. Monitoring of NO₂ emission at Russian cities scale using TROPOMI (Sentinel-5P) data // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation “Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes” (SDM-2021). 2021. V. 3006. P. 476–483. DOI: 10.25743/SDM.2021.97.73.057 **(Scopus)** РФФИ «Мониторинг»

7. Horváth A., Carr J.L., Girina O.A., Wu D.L., Bril A.A., Mazurov A.A., Melnikov D.V., Hoshyaripour G.F., Buehler S.A. Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery — Part 1: Methodology // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. Iss. 16. P. 12189–12206. DOI: doi.org/10.5194/acp-21-12189-2021. **(WOS Q1, Scopus Q1) «Мониторинг»**
8. Horváth A., Girina O.A., Carr J.L., Wu D.L., Bril A.A., Mazurov A.A., Melnikov D.V., Hoshyaripour G.F., Buehler S.A. Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery — Part 2: Case studies // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. Iss. 16. P. 12207–12226. DOI: doi.org/10.5194/acp-21-12207-2021. **(WOS Q1, Scopus Q1) «Мониторинг»**
9. Shelekhov A.P., Shelekhov E.A., Ilin G.N., Bykov V.Y., Stempkovsky V.G., Shishikin A.M., Rutkevich P.B. Method of operational forecasting of aircraft icing conditions by means of atmosphere microwave remote sensing // *Microwave Remote Sensing: Data Processing and Applications*. SPIE. 2021. V. 11861. P. 18–25. DOI: 10.1117/12.2598008 **(Scopus)**
10. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E., Sterlyadkin V., Chernushich A., Sharkov E. Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermvision, Radiosondes, and Reanalysis // *Remote Sensing*. 2021. V. 13(9). Art. No. 1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639> **(Web of Science, Scopus Q1, РИНЦ) «Мониторинг»**
11. Kniazev N., Elizarov D., Lavrova O., Nazirova K., Krayushkin E. Web service for storing and processing sea water data measured in situ concurrently with satellite survey // *An Intern. J. Earth Sciences (Formerly Bollettino di Geofisica teorica ed applicata)*. 2021. V. 62. Suppl. 1. P. 186–188. http://www3.inogs.it/bgo/provapage.php?id_articolo=877. **(Scopus, Q3, РИНЦ) «Мониторинг»**
12. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Storchkov A. Comparison of in Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea // *Remote Sensing*. 2021. V. 13(1). Art. No. 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>. **(Web of Sciences, Q1, Scopus, РИНЦ) «Мониторинг»**
13. Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., and Likhacheva M.V. Scanning laser wave recorder with registration of “instantaneous” sea surface profiles // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2021. V. 38. No. 8. P. 1415–1424. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>. **(Web of Science, Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»**
14. Haldoupis C., Shalimov S. On the altitude dependence and role of zonal and meridional wind shears in the generation of E region metal ion layers // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2021. V. 214. 105537. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105537> **(Web of Sciences-Q3; Scopus) «Мониторинг»**
15. Onishchenko O.G., Fedun V., Pokhotelov O.A., Horton W., Astafieva N., Skirvin S.J., Verth G. The stationary concentrated vortex model. *Climate*, 2021. 9(3), 39. <https://doi.org/10.3390/cli9030039> **(Scopus-Q3) РФФИ «Мониторинг»**
16. Levina G. How Does Cyclogenesis Commence Given a Favorable Tropical Environment? // *Environ. Sci. Proc.* 2021. V. 8(1). 20. <https://doi.org/10.3390/ecas2021-10320> **«Мониторинг»**
17. Levina G.V. Turbulent vortex dynamo in the Earth’s atmosphere and the emerging opportunity to affect tropical cyclogenesis // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2028. 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012017 **(Web of Sciences-Q4; Scopus) «Мониторинг»**
18. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2021. V. 14. (В печати.) **(Web of Sciences - Q1, Scopus) «Мониторинг»**

19. Kolbudaev P.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A. The methods and automatic technology aimed at imagery georeferencing, cloud screening, atmospheric and radiometric correction of KMSS-M satellite data // E3S Web of Conferences, 2021. V. 333. 01006. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202133301006. (Scopus) «Мониторинг»

Публикации в отечественных научных рецензируемых изданиях

20. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Миклашевич Т.С., Плотников Д.Е., Радченко М.В., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. (Scopus, Q3) «Мониторинг»
21. Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А., Кобец Д.А. Итоги Девятнадцатой Всероссийской международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. (В печати.) (Scopus, Q3) «Мониторинг»
22. Ведешин Л.А., Герасютин С.А. Развитие отечественной метеорологической системы (к 60-летию разработки метеорологических спутников в СССР) // Земля и Вселенная. 2021. № 5. (В печати.) «Мониторинг»
23. Лупян Е.А., Середа И.И., Денисов П.В., Трошко К.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Дистанционный мониторинг состояния озимых культур зимой 2020–2021 гг. на Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 165–172. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-165-172. (Scopus, Q3) «Мониторинг»
24. Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Нуждаев А.А., Кашицкий А.В., Марченков В.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Дистанционные наблюдения эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 81–91. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-81-91. (Scopus, Q3) РФФИ «Мониторинг»
25. Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А.Н., Комарова И.А. Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 149–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164. (Scopus, Q3) РФФИ «Мониторинг»
26. Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А. Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254. (Scopus, Q3) «Мониторинг»,
27. Гирина О.А., Мельников Д.В., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Сорокин А.А., Крамарева Л.С. Непрерывный мультиспутниковый мониторинг вулканов для обнаружения извержений на примере бокового прорыва вулкана Ключевской в феврале 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 261–267. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-261-267. (Scopus, Q3) РФФИ «Мониторинг»
28. Златопольский А.А. Эффект «согласованного голосования» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 64–72. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-64-72. (Scopus, Q3) Мониторинг

29. Денисов П.В., Середа И.И., Трошко К.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
30. Шинкаренко С.С. Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
31. Трошко К.А., Денисов П.В., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности состояния зерновых культур в регионах европейской части России и Сибири в июне 2021 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 325–331. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
32. Денисов П.В., Иванов А.Б., Мишуков Н.П., Петухов Д.А., Подъяблонский П.А., Трошко К.А. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы с использованием технологий дистанционного зондирования Земли // Управление рисками в АПК. 2021. Вып. 39. С. 37–45. DOI: 10.53988/24136573-2021-01-03. **«Мониторинг»**
33. Денисов П.В., Лупян Е.А., Толпин В.А., Трошко К.А. Спутниковый сервис «Вега-PRO» для сельскохозяйственного мониторинга // Управление рисками в АПК. 2021. Вып. 39. С. 22–36. DOI: 10.53988 /24136573-2021-01-02. **«Мониторинг»**
34. Дегай А.Ю., Андреев М.В., Егоров В.А., Пытков В.Н., Черных В.Н. Развитие методов автоматического распознавания ледового покрытия на основе спутниковых данных оптического и ближнего инфракрасного диапазона для системы мониторинга рыболовства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 27–40. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-27-40. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
35. Константинова А.М., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Лупян Е.А. Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 41–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52. **(Scopus, Q3) РФФИ «Мониторинг»**
36. Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Сенько К.С., Балашов И.В., Мазуров А.А. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
37. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Выприцкий А.А. Динамика площадей водоёмов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
38. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Оценка площади опустынивания на юге европейской части России в 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 291–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
39. Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С. Связь сезонной динамики температуры поверхности и NDVI урбанизированных территорий засушливой зоны (на примере Волгоградской агломерации) // Исследование Земли из космоса. 2021. № 4. С. 72–83. DOI: 10.31857/S0205961421040084. **РФФИ «Мониторинг»**

40. Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С., Гордиенко О.А., Омаров Р.С., Дубачева А.А. Сезонные и многолетние особенности температуры поверхности в городах засушливой зоны (на примере городов юго-востока европейской части России и Западного Казахстана) // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3(63). С. 426–439. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-44. **РФФИ**
41. Шинкаренко С.С., Иванов Н.М., Берденгалиева А.Н. Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока европейской России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. № 6(3). С. 23–44. DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.035>. (**WOS, Scopus Q2**) **РФФИ «Мониторинг»**
42. Хвостиков С.А., Барталев С.А. Возможности применения данных спутникового мониторинга для моделирования динамики развития природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
43. Златопольский А.А., Симонов Д.А., Захаров В.С. Порядковая статистика долин — длина, ширина, направление (на примере Буреинского хребта) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 97–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-97-107. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
44. Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А., Васильченко А.А., Выпрлицкий А.А. Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 226–241. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
45. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Романова И.М., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Крамарева Л.С. Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения вулкана Чиринкотан (Северные Курилы) в 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 321–327. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-321-327. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
46. Ведешин Л.А. Первый советский метеорологический спутник. К 60-летию начала разработки спутников серии «Метеор» // Исследование Земли из космоса. 2021. № 2. С. 94–95. DOI: 10.31857/S020596142102010X. **«Мониторинг»**
47. Ведешин Л.А. Первые космические исследования Мирового океана и атмосферы Земли (к 60-летию начала научных экспериментов на ИЗС серии «Космос» и «Интеркосмос») // Исследование Земли из космоса. 2021. № 5. С. 94–96. DOI: 10.31857/S0205961421050092. **«Мониторинг»**
48. Ведешин Л.А. Россия-США: 50 лет сотрудничества в космосе (Итоги научно-технического сотрудничества с США по программе «Интеркосмос») // Исследование Земли из космоса. 2021. № 3. С. 94–96. DOI: 10.31857/S0205961421030088. **«Мониторинг»**
49. Ипатов А.В., Ведешин Л.А. Применение лазеров в наземных и дистанционных космических наблюдениях (К 60-летию начала экспериментов по лазерной локации Луны) // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 96–98. DOI: 10.31857/S020596142106004X. **«Мониторинг»**
50. Алексеева Т.А., Фролов С.В., Федяков В.Е., Макаров Е.И., Миронов Е.У., Соколова Ю.В. Анализ ледовых условий круглогодичного плавания судов ледового класса Arc7 в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 236–248. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248>. (**РИНЦ**) **«Мониторинг»**
51. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А. Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане,

- неопределяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22–38. DOI: 10.31857/S0205961421060026. (РИНЦ) «Мониторинг»
52. Алексеева Т.А., Фролов С.В., Сероветников С.С. Обзор методов и основных результатов измерения толщины морского льда в Арктике // Российская Арктика. 2021. № 12. С. 33–49. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-33-49. (РИНЦ) «Мониторинг»
 53. Егорова Е.С., Филиппов Н.А., Алексеева Т.А., Сероветников С.С., Соколов В.Т. Судовые наблюдения за ледяным покровом Арктического бассейна в летний сезон 2021 года // Российская Арктика. 2021. № 4(15). (В печати.) (РИНЦ) «Мониторинг»
 54. Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Мазуров А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Чернушич А.П., Черный И.В., Стрельцов А.М., Шарков Е.А., Екимов Н.С. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
 55. Ермаков Д.М., Деменев А.Д., Мещерякова О.Ю., Березина О.А. Особенности разработки регионального водного индекса для мониторинга воздействия изливов кислых шахтных вод на речные системы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 222–237. (Scopus, Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
 56. Князев Н.А., Лаврова О.Ю., Костяной А.Г. Спутниковый радиолокационный мониторинг нефтяных загрязнений в акватории Анапа – Геленджик за период 2018–2020 гг. // Океанологические исследования. 2021. Т. 49. № 1. С. 163–185. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).8. (РИНЦ) «Мониторинг»
 57. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Луян Е.А. Нефтяной разлив на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума под Новороссийском 7 августа 2021 г.: первые результаты спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 304–310. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-304-310. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
 58. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Луян Е.А. Нефтяной разлив на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума под Новороссийском 7 августа 2021 г.: комплексный анализ спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 28–43. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-28-43. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
 59. Крек Е.В., Лаврова О.Ю., Крек А.В. Нефтяное загрязнение пляжа Балтийской косы в результате разлива мазута с судна на внешнем рейде порта Калининград в июле 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 309–314. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-309-314. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
 60. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный сезон 2020/2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 255–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-255-26. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
 61. Назирова К.Р., Краюшкин Е.В. Мониторинг распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива (Юго-Восточная Балтика) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 271–284. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
 62. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., Лихачева М. В. Струнный волнограф с инфракрасной регистрацией длины струн // Приборы и техника

- эксперимента. 2021. № 4. С. 119–124. DOI: 10.31857/S003281622104011X. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
63. Тихонов В. В., Соколова Ю. В., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю. О возможности восстановления снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 47–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-47-64. **(Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»**
 64. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Романов А. Н., Алексеева Т. А., Синицкий А. И., Тихонова М. В., Шарков Е. А., Комарова Н. Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185–199. **(Scopus Q3, РИНЦ) РФФИ «Мониторинг»**
 65. Alekseeva T.A., Raev M.D., Tikhonov V.V., Sokolova J.V., Sharkov E.A., Frolov S.V., Serovetnikov S.S. Comparative Analysis of Sea Ice Area in the Arctic, Derived from Satellite Microwave Radiometry (Algorithm VASIA2), with AARI Ice Charts // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. No. 9. P. 1076–1080. DOI: 10.1134/S0001433821090383. **(Web of Sciences, Scopus Q3) «Мониторинг»**
 66. Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Tikhonov V.V., Smolyanitsky V.M., Afanasyeva E.V., Raev M.D., Sharkov E.A. Analysis of sea ice areas undetectable by satellite microwave radiometry (ASI algorithm) in the Arctic Ocean // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. No. 12. (В печати.) **(Web of Sciences, Scopus Q3) «Мониторинг»**
 67. Ижовкина Н. И., Артеха С. Н., Ерохин Н. С., Михайловская Л. А. Атмосферные вихри в геомагнитной аномалии, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 299–306. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-299-306> **(Scopus-Q3) «Мониторинг»**
 68. Кудашев Е. Б., Яблоник Л. Р. Развитие экспериментальных исследований турбулентных пристеночных пульсаций давления. критический анализ и обобщение накопленных опытных данных // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 6. С. 639–649. DOI: 10.31857/S0320791921060034 **(РИНЦ) (РФФИ)** [переводная версия: Kudashev E.B., Yablonik L.R. Development of Experimental Research of Turbulent Surface Pressure Fluctuations: Critical Analysis and Generalization of Accumulated Experimental Data // Acoustical Physics. 2021. V. 67. No. 6. P. 623–632. DOI: 10.1134/S1063771021060038 **(Web of Sciences-Q4; Scopus)] «Мониторинг»**
 69. Рябова С. А., Шалимов С. Л. О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности Земли в диапазоне периодов планетарных волн // Физика Земли. 2021. № 1. С. 51–60. DOI: 10.31857/S0002333721010075 **(РИНЦ)** [переводная версия: Riabova S.A., Shalimov S.L. On the Geomagnetic Variations Observed on the Earth's Surface in the Period Range of Planetary Waves. Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. P. 46–53. <https://doi.org/10.1134/S1069351321010079> **(Web of Sciences-Q4; Scopus)] «Мониторинг»**
 70. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Использование специальных экранов, моделирующих рассеянное в среде излучение, для измерения эквивалентного поперечного сечения частиц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 298–306. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-298-306> **(Scopus-Q3) «Мониторинг»**
 71. Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Полянский И. В. Межгодовой тренд чувствительности камер комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» №2 по результатам полётной калибровки в 2015–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 53–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60. **(SCOPUS, Q3) «Мониторинг»**

72. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В. Коррекция автоматической географической привязки изображений комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» №2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 75–81. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81. (SCOPUS, Q3) «Мониторинг»

Статьи в сборниках материалов конференций

73. Балашов И.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Бурцев М.А., Мазуров А.А. Опыт эксплуатации и развития ИСДМ-Рослесхоз // Цифровые технологии в лесном секторе. Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции-вебинара. Санкт-Петербург. 18–19 февр. 2021. 2021. С. 20–22. «Мониторинг»
74. Лозин Д.В., Балашов И.В., Лупян Е.А. Возможности оперативной оценки повреждений лесного покрова на основе данных о радиационной мощности пожаров // Цифровые технологии в лесном секторе. Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции-вебинара. Санкт-Петербург. 18–19 февр. 2021. 2021. С. 78–81. «Мониторинг»
75. Шинкаренко С.С. Динамика площадей опустынивания на черных землях // Материалы 9-го Международного симпозиума «Степи Северной Евразии» / под науч. ред. акад. РАН А.А. Чибилёва. Оренбург: ОГУ, 2021. С. 863–865. DOI: 10.24412/cl-36359-2021-863-865. «Мониторинг»
76. Levina G. Diagnosis of Pre-Depression Large-Scale Vortex Instability in the Tropical Atmosphere // EGU General Assembly 2021. 19–30 Apr. 2021. EGU21-6966., <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6966> «Мониторинг»
77. Zolnikova N., Shkevov R., Erokhin N., Mikhailovskaya L., Sheiretsky K., Nikolov H. Climate change: numerical simulations of tropical cyclones behavior in the context of the global warming // Conference Proceedings. 11th Congress of the Balkan Geophysical Society. 2021. V. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202149BGS76> «Мониторинг»
78. Shkevov R., Zolnikova N., Erokhin N., Mikhailovskaya L. Tropical cyclones behavior study by a low parametric nonlinear model in global warming environment // 11th Congress of the Balkan Geophysical Society. 2021. Submitted, in review. «Мониторинг»

Материалы конференций

79. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Романова И.М., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2020–2021 гг. и их опасность для авиации // 24-я Научная конференция, посвященная Дню вулканолога». Вулканизм и связанные с ним процессы». 29–30 марта 2021, ИВиС ДВО РАН. 2021. С. 25–28. «Мониторинг»
80. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Романова И.М., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2020–2021 гг. и их опасность для авиации // 24-я Научная конференция, посвященная Дню вулканолога». Вулканизм и связанные с ним процессы». 29–30 марта 2021, ИВиС ДВО РАН. 2021. С. 25–28. «Мониторинг»
81. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А., Романова И.М., Лупян Е.А., Кашицкий А.В., Сорокин А.А., Крамарева Л.С. Эксплозивное извержение вулкана Безымянный 21 октября 2020 г. // 24-я Научная конференция, посвященная Дню вулканолога». Вулканизм и связанные с ним процессы». 29–30 марта 2021, ИВиС ДВО РАН. 2021. С. 29–31. «Мониторинг»
82. Белоконь З.С., Толпин В.А., Пыркова О.А., Андреев М.В., Василец П.М., Пырков В.Н. Рассмотрение возможности классификации треков судов на промысле краба по данным спутникового позиционирования // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021). Материалы 17-й Международной

- научно-технической конференции. М.: Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН., 2021. Т. 2. С. 15–18. DOI: 10.29006/978-5-6045110-2-2. **«Мониторинг»**
83. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Лупян Е.А., Прошин А.А., Матвеев А.М. Методы и автоматическая технология географической привязки, маскирования мешающих факторов и атмосферной коррекции разнотональных изображений КМСС-М на больших территориях // Материалы 8-й Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». 14–17 сент. 2021, Красноярск. 2021. С. 81–86. **«Мониторинг»**
84. Кашицкий А.В., Бурцев М.А., Прошин А.А. Технология создания безоблачных бесшовных ежемесячных композитных изображений по данным спутников серии Sentinel-2 // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 32. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
85. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Методы и технология автоматической географической допривязки спутниковых данных высокого разрешения по данным низкого разрешения // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 33. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
86. Кашицкий А.В., Балашов И.В., Стыценко Ф.В. Создание набора данных для уточнения полученных по информации активного горения пройденных огнем площадей // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 31. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
87. Бурцев М.А., Волкова Е.Е., Десинов С.Л., Кудякова С.Т. Формирование архива геопривязанных данных МКС на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 79. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
88. Кашицкий А.В., Плотников Д.Е., Толпин В.А., Лупян Е.А. Сравнение осредненного в пределах полей различного размера значений вегетационного индекса NDVI, полученного в течение сезона вегетации по данным приборов MSI, MODIS и КМСС // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 92. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
89. Константинова А.М., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Лупян Е.А. Разработка унифицированной технологии мониторинга объектов с использованием спутниковых данных // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 96. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
90. Константинова А.М., Бриль А.А. Мониторинг качества воздуха с помощью данных TROPOMI в информационной системе «Вега-Science» // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 98. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РФФИ «Мониторинг»**
91. Котельников Р.В., Лупян Е.А. Оценка формы распределения площадей лесных пожаров для зон с разным уровнем охраны // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 100. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
92. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лупян Е.А. Возможности технологии космических гидропостов при оценке речного стока // Материалы 19-

- й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 105. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РФФИ «Мониторинг»**
93. Дегай А.Ю., Солодилов А.В., Пырков В.Н., Черных В.Н., Пыркова О.А. Новые проблемы обеспечения информационной безопасности в системах мониторинга подвижных объектов и возможности их устранения на примере системы мониторинга рыболовства // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 84. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
94. Дегай А.Ю., Черных В.Н., Пырков В.Н. Рассмотрение возможности определения ледового покрытия на основе композитных спутниковых данных оптического и ближнего инфракрасного диапазона для системы мониторинга рыболовства // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 85. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
95. Константинова А.М., Балашов И.В., Лупян Е.А., Сычуглов И.Г., Толпин В.А. Публичный интерфейс оперативных данных сервисов созвездия Вега // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 97. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
96. Моисеенко Г.С. Использование эмпирических ортогональных функций для мониторинга цветения *Karenia brevis* // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 258. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
97. Руткевич П.Б., Руткевич Б.П. Генерация вихревой структуры в ограниченной области спиральной турбулентности // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 195. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
98. Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения вулкана Чиринкотан (Северные Курилы) в 2021 // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 315. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
99. Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Нуждаев А.А., Кашицкий А.В., Уваров И.А. Дистанционный мониторинг вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской в 2020–2021 гг. // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 316. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
100. Денисов П.В., Трошко К.А., Лупян Е.А. Возможности системы Вега для оценки состояния сельскохозяйственных культур и особенности развития посевов в сезоне 2020–2021 гг. // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 341. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
101. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В. Особенности возможного применения технологии оперативной оценки повреждений лесного покрова на основе данных о радиационной мощности пожаров // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–

- 19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 359. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
102. *Лузян Е.А., Стыценко Ф.В., Сенько К.С., Балашов И.В., Мазуров А.А.* Оценка площадей пройденных лесными пожарами с использованием данных коллекции МС6 прибора MODIS // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 361. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
103. *Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Егоров В.А.* Развитие предварительной обработки данных спутниковых наблюдений приборов VIIRS и MODIS для задачи мониторинга растительного покрова // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 366. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
104. *Плотников Д.Е., Трошко К.А., Денисов П.В., Щербенко Е.В., Толпин В.А., Кобец Д.А.* Картографирование пахотных земель России на основе сезонных временных серий MODIS высокого временного разрешения // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 374. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
105. *Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Мониторинг процессов опустынивания в Северо-Западном Прикаспии // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 394. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
106. *Ворушилов И.И., Барталев С.А., Егоров В.А.* Построение и радиометрическая нормализация безоблачных зимних композитных изображений покрытой снегом земной поверхности // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 335. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
107. *Лузян Е.А., Балашов И.В., Сенько К.С., Кобец Д.А., Лозин Д.В.* Лесные пожары в Российской Федерации в 2021 году (аномалия или тенденция?) // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 3. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
108. *Лузян Е.А., Ермаков Д.М.* Современные возможности и перспективы использования спутниковых методов мониторинга параметров углеродного цикла Земли и потоков парниковых газов // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 4. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
109. *Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Возможности спутникового мониторинга процессов опустынивания земель на юге России // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 7. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
110. *Бурцев М.А., Мазуров А.А., Бриль А.А., Фролова Е.А., Екимов Н.С., Воронин А.А.* Организация работы с данными КА «Арктика-М» №1 в рамках ОСД НИЦ «Планета» // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 80. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
111. *Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Матвеев А.М., Прошин А.А., Лузян Е.А.* Автоматическая технология построения ежедневных безоблачных композитных изображений КМСС для количественной оценки состояния земной поверхности // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного

- зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 451. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
112. Антошкин А.А., Денисов П.В., Трошко К.А. Особенности картографирования основных видов сельскохозяйственных угодий с использованием данных дистанционного зондирования в сервисе Вега (мастер-класс) // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 430. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **«Мониторинг»**
113. Алексеева Т.А., Тихонов В.В., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Сероветников С.С., Ретина И.А., Раев М.Д., Шарков Е.А. Восстановление сплоченности морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии и особенности их применения для научных и практических задач // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 436. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
114. Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Алексеева Т.А., Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Смоляницкий В.М. Анализ влияния загрязненности и разрушенности на определение сплоченности морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии в летний период // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 437. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
115. Елизаров Д.А. Автоматизация процесса обработки и анализа данных подспутниковых измерений и интеграция их в спутниковую информационную систему «See the Sea» // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 229. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
116. Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Пашинов Е.В., Чернушич А.П. Расчет динамики поля интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным МТВЗА-ГЯ: возможности и перспективы // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 163. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
117. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю. Крупные нефтяные разливы в море в 2021 г. // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 2. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
118. Назирова К.Р. Результаты исследования распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива с 2014 по 2021 гг. // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 261. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
119. Пашинов Е. В., Ермаков Д.М. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы над сушей по данным SSMIS // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 188. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a **(РИНЦ) «Мониторинг»**
120. Пашинов Е.В., Ермаков Д.М., Кузьмина А.В., Стерлядкин В.В. Алгоритм восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ Метеор-М №2-2 для сервиса «Вега-Science» // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 46. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a **(РИНЦ) «Мониторинг»**

121. Романов А.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Сезонная и межгодовая динамика радиояркостных температур акваторий восточных морей Северного Ледовитого океана // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 439. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) РФФИ «Мониторинг»**
122. Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Оценка гидрологических изменений заболоченных территорий Арктики и субарктики по данным дистанционного микроволнового зондирования // Международная конф. «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике». 8–12 нояб. 2021. Салехард: сб. тез. Правительство ЯНАО, 2021. С. 363–365. **(РИНЦ) РФФИ «Мониторинг»**
123. Садовский И.Н., Корректировка географической привязки данных микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 59. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a **(РИНЦ) «Мониторинг»**
124. Сазонов Д.С. Восстановление геопараметров системы «океан-атмосфера» по радиометрическим измерениям МТВЗА-ГЯ // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 61. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a **(РИНЦ) «Мониторинг»**
125. Сазонов Д.С. Построение совмещенных карт распределения осадков над океаном, используя данные МТВЗА-ГЯ, SSMIS и AMSR-2 // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 60. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a **(РИНЦ) «Мониторинг»**
126. Соколова Ю.В., Алексеева Т.А., Афанасьева Е.В., Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А. Алгоритм VASIA2: расширение существующей базы данных и перспективы её использования в исследованиях морского льда // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. С.440. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
127. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Кузьмин А.В., Ростовцева Е.И. Прецизионный лазерный волнограф: результаты натурных измерений // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 287. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a **(РИНЦ) «Мониторинг»**
128. Тихонов В.В., Романов А.Н., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Синицкий А.И., Тихонова М.В., Шарков Е.А., Комарова Н.Ю. Гидрологический режим Обской губы в зимний период и его связь с климатическими изменениями региона // Материалы Международной конф. «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике». 8–12 нояб. 2021, Салехард. Правительство ЯНАО, 2021. С. 414-418. **(РИНЦ) РФФИ «Мониторинг»**
129. Уваров И.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Инструменты управления базой данных результатов интерпретации спутниковых изображений при исследовании явлений в Мировом океане в рамках информационной системы See the Sea // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 120. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) «Мониторинг»**
130. Зольникова Н.Н., Ерохин Н.С., Шкевов Р., Михайловская Л.А. Численный анализ динамики тропического циклогенеза и её связь с изменениями климата в рамках

- малопараметрической модели //Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 187. (<http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=197&thesis=8689>) **«Мониторинг»**
131. Тихонов В.В., Романов А.Н., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Синецкий А. И., Тихонова М. В., Шарков Е. А., Комарова Н. Ю. Гидрологический режим Обской губы в период ледостава по данным спутниковой микроволновой радиометрии и его связь с гидролого-климатическими изменениями региона и бассейна реки Обь // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 291. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **(РИНЦ) РФФИ**
 132. Арумов Г.П., Бухарин А.В. Использование параметров объема для моделирования частиц в задаче интерпретации сигнала обратного рассеяния от приземного слоя атмосферы // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 152. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a (доклад: XIX.D.300 <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=197&thesis=8802>) **«Мониторинг»**
 133. Арумов Г.П., Бухарин А.В. Использование оптических элементов для создания компактных схем зондирования в задачах определения трансформации пучка в рассеивающей среде // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 153. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a (доклад: XIX.D.302 <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=197&thesis=8804>) **«Мониторинг»**
 134. Левина Г.В. О применении теории турбулентного вихревого динамо для дистанционной диагностики зарождения квазитропических циклонов и полярных ураганов // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 173. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a (доклад: XIX.D.112 <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=197&thesis=8614>) **«Мониторинг»**

Тезисы, доклады, циркуляры

135. Rutkevich P.B., Golitsyn G.S., Tur A.V. Coriolis force influence on the AKA effect // European Geosciences Union (EGU General Assembly), 2021. 13421. DOI: doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13421.
136. Бриль А.А., Каиницкий А.В., Мазуров А.А., Константинова А.М. Возможности анализа данных об испарении и накопленном экологическом ущербе в системе «Вега-science» // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 36. **«Мониторинг»**
137. Константинова А.М., Лупян Е.А., Бриль А.А. Анализ концентрации диоксида азота с использованием спутниковых данных как индикатора загрязнения воздуха в разрезе крупных городов России и мира // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 46–47. **«Мониторинг»**
138. Белов Я., Каиницкий А.В. Экологический мониторинг озер в зонах добычи нефти и газа с помощью данных дистанционного зондирования Земли // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 31. **«Мониторинг»**
139. Берденгалиева А.Н., Иванов Н.М., Шинкаренко С.С. Картографирование выгоревших площадей в пойменных ландшафтах Нижней Волги // 18-я Конференция молодых

- учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 32–33.
140. Волкова Е.Е., Бурцев М.А. Разработка системы автоматизированной привязки данных наблюдения Земли, поступающих с международной космической станции // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 37.
 141. Енина Е.А., Балашов И.В. Динамический инструмент верификации уточненных контуров пожаров // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 43. **«Мониторинг»**
 142. Ёлкина Е.С. Оценка возможностей создания опорных выборок по спутниковым данным методом экспериментальной интерпретации // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 44.
 143. Лозин Д.В., Балашов И.В., Лупян Е.А. Возможности оперативной оценки повреждений лесного покрова на основе данных о радиационной мощности пожаров // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 48. **«Мониторинг»**
 144. Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М. Оценка качества работы сетей космических гидропостов на реке Амударье // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 53–54. **«Мониторинг»**
 145. Сайгин И.А., Стыценко Ф.В., Барталев С.А. Методика динамической актуализации опорной выборки для классификации растительности на основе спутниковых данных // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 59–60. **«Мониторинг»**
 146. Самофал Е.В., Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А. Классификация лесных гарей по времени лесовозобновления по данным MODIS // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 61–62. **«Мониторинг»**
 147. Шинкаренко С.С. Пыльные бури на юге Европейской части России и спутниковый мониторинг их последствий // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 63. **РФФИ «Мониторинг»**
 148. Шинкаренко С.С., Васильченко А.А., Выприцкий А.А. Мониторинг площадей Крымских водохранилищ // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 64. **«Мониторинг»**
 149. Шинкаренко С.С., Васильченко А.А., Силова В.А. Опыт определения зоны мелиоративного влияния полезащитных лесных насаждений // 18-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. / под ред. А.М. Садовского 14–16 апр. 2021, Москва, ИКИ РАН. 2021. С. 65. **«Мониторинг»**
 150. Shabanov N., Marshall G., Rees G., Bartalev S., Tutubalina O., Golubeva E. Climate driven phenological changes in the Russian Arctic derived from MODIS LAI time series

- 2000–2019 // Arctic Science Summit Week. Portugal (Lisbon). 25 March. 2021
«Мониторинг»
151. *Лулян Е.А., Барталев С.А., Саворский В.П.* Возможности современных спутниковых систем и технологий для оценки влияния транспортной инфраструктуры на состояние окружающей среды, включая контроль параметров, необходимых для оценки «углеродного следа» // Научно-практический семинар «Экология и транспорт» . АО «НИИАС». 30 июня 2021 **«Мониторинг»**
 152. *Лулян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Прошин А.А.* Создание инфраструктуры дистанционного экологического мониторинга объектов, обеспечивающих работу ОАО «РЖД» и состояния окружающей среды в районах их расположения, на основе разработанных и апробированных технических решений // Научно-практический семинар «Экология и транспорт» . АО «НИИАС». 2021. **«Мониторинг»**
 153. *Rutkevich P.B., Golitsyn G.S., Tur A.V.* Coriolis force influence on the AKA effect // European Geosciences Union General Assembly (EGU). 2021
 154. *Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А.* Оценка площади зон морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых методами спутниковой микроволновой радиометрии в летний период // 2-я Всероссийская науч. конф. «Моря России: год науки и технологий в РФ — десятилетие наук об океане ООН». 20–24 сент., 2021, Севастополь: тез. докл. 2021. С. 67–68. **(РИНЦ)**
 155. *Князев Н.А., Елизаров Д.А.* Веб-сервис для хранения и обработки данных подспутниковых измерений // 18-я Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. докл. ИКИ РАН, Москва, 14–16 апр. 2021 / под ред. А.М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 45. **«Мониторинг»**
 156. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Подавление акустического шума при измерении пристеночных турбулентных пульсаций давления // Доклады Седьмой Открытой Всероссийской конференции по Аэроакустике. М.: Изд-во ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, 2021. URL: <https://cloud.mail.ru/public/b4Qx/Po7WscrJ1> **(РФФИ)**
«Мониторинг»
 157. *Zolnikova N., Shkevov R., Erokhin N., Mikhailovskaya L., Sheiretsky K., Nikolov H.* Climate change: numerical simulations of tropical cyclones behavior in the context of the global warming // 11th Congress of the Balkan Geophysical Society, BGS2021. 10–14 Oct. 2021. Romania. **«Мониторинг»**
 158. *Erokhin N.S., Zolnikova N.N., Mikhailovskaya L.A., Shkevov R., Sheiretsky K.* Climate changes simulations by a low parametric nonlinear model // 17th International Scientific Conference “Space Ecology Safety” SES 2021. 20–22 Oct. 2021, Sofia. Conference program. 2021. P. 8. URL: http://space.bas.bg/SES/index/2021/2021_SES_Program.pdf. **«Мониторинг»**
 159. *Зольникова Н.Н., Ерохин Н.С., Шкевов Р., Михайловская Л.А.* Численный анализ динамики тропического циклогенеза и её связь с изменениями климата в рамках малопараметрической модели // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 26. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. XIX.A.187. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=197&thesis=8689>. **«Мониторинг»**
 160. *Левина Г.В.* О применении теории турбулентного вихревого динамо для дистанционной диагностики зарождения квазитропических циклонов и полярных ураганов // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 173. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a (доклад: XIX.D.112 <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=197&thesis=8614>) **«Мониторинг»**

161. *Левина Г.В.* Спиральный циклогенез от экватора до полюсов // XXX Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике. 20–21 дек. 2021, Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова. Краткие аннотации выступлений. С. 32–33.
162. *Levina G.V.* Helical tropical cyclogenesis: detection of pre-depression large-scale vortex instability // The AMS 34th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Virtual Meeting. 10–14 May 2021. Abstract 371535/16C.7. Oral presentation. <https://ams.confex.com/ams/34HURR/meetingapp.cgi/Paper/371535> «Мониторинг»
163. *Levina G.* How does cyclogenesis commence given a favorable tropical environment? // The 4th Electronic Conference on Atmospheric Science (ECAS 2021). Electronic presentation. <https://sciforum.net/paper/view/10320> «Мониторинг»
164. *Levina G.V.* Turbulent vortex dynamo in the Earth's atmosphere and the emerging opportunity to affect tropical cyclogenesis // The 4th Virtual Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes. 12–14 Oct. 2021. Invited presentation. <http://conf.nsc.ru/mhd2021/en> «Мониторинг»
165. *Жуков Б.С., Жуков С.Б., Кондратьева Т.В., Полянский И.В.* Технология автоматической геопривязки снимков КМСС-2 по опорным ориентирам на местности // Тезисы докладов Седьмой всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». 6–9 сент. 2021, Россия, Таруса. 2021. С. 27. (SCOPUS) «Мониторинг»

Патенты

166. *Стерлядкин В.В.* Сканирующий оптический волнограф. Патент на изобретение RU № 2746186. Оpubл. 04.08.2021.
167. *Стерлядкин В.В.* Сканирующий лазерный волнограф с регистрацией «мгновенной» формы поверхности. Патент на изобретение RU № 2749727. Оpubл. 06.16.2021.

Публикации (РНФ)

1. *Барталев С.С., Стыценко Ф.В.* Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/S0024114821020029. **РНФ**
2. *Shabanov N.V., Marshall G., Rees G., Bartalev S.A., Tutubalina O.V., Golubeva E.I.* Climate-driven phenological changes in the Russian Arctic derived from MODIS LAI time series 2000–2019 // Environmental Research Letters. 2021. DOI: doi.org/10.1088/1748-9326/ac0be2. (**WOS Q1, Scopus Q1**) **РНФ**
3. *Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A.A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S.A., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F.* Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. V. 11. 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9. (**WOS-Q1, Scopus Q1**) **РНФ**
4. *Rees W.G., Tomaney J., Tutubalina O.V., Zharko V.O., Bartalev S.A.* Estimation of Boreal Forest Growing Stock Volume in Russia from Sentinel-2 MSI and Land Cover Classification // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 21. 4483. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13214483>. (**WOS-Q1, Scopus Q1**) **РНФ**
5. *Girina O.A., Loupian E.A., Sorokin A.A., Romanova I.M., Melnikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Kashnitskiy A.V., Uvarov I.A., Korolev S.P., Malkovsky S.I., Kramareva L.S.* Information Technologies for the Analyzing of Kamchatka and the Kuril Islands Volcanoes Activity in 2019-2020 // Ceur Workshop Proceedings. ITHPC 2021. Short Paper Proceedings of the 6th International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing, 2021. V. 2930. P. 112–118. (**Scopus**) (s2.0-85113713804) **РНФ**
6. *Лаврова О.Ю., Уваров И.А., Крашенинникова Ю.С.* Спутниковые наблюдения извержения грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море 4 июля 2021 г.

- // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 332–336. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336. **(Scopus, Q3) РНФ**
7. Kudrenko S., Ordiz A., Stytsenko F.V., Barysheva S.L., Bartalev S.A., Baskin L., Swenson J.E. Brown bear-caused human injuries and fatalities in Russia are linked to human encroachment // Animal Conservation. 2021. DOI: doi.org/10.1111/acv.12753. **(WOS Q1, Scopus Q1) РНФ**
 8. Шинкаренко С.С., Васильченко А.А., Берденгалиева А.Н., Выприцкий А.А. Спутниковый мониторинг состояния водных объектов в условиях недостаточного увлажнения // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 69. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 9. Уваров И.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Инструменты управления базой данных результатов интерпретации спутниковых изображений при исследовании явлений в Мировом океане в рамках информационной системы See the Sea // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 119. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 10. Уваров И.А., Дубянский В.М., Малеев В.В., Платонов А.Е., Титков А.В. Возможности анализа данных мониторинга природно-очаговых инфекций в информационной системе “Вега-Science” // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 118. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 11. Богодухов М.А., Барталев С.А., Жарко В.О. Исследование возможностей оценки динамики высоты леса на территории России на основе использования разновременных данных ATL08 спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 333. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 12. Жарко В.О., Барталев С.А., Богодухов М.А. Разработка карты высот лесного покрова России на основе совместного использования продуктов обработки оптических и лидарных спутниковых данных ДЗЗ // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 347. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 13. Сайгин И.А., Стыценко Ф.В., Барталев С.А. Создание временной серии карт растительности на основе динамической актуализации обучающей выборки // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 378. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 14. Стыценко Ф.В., Сайгин И.А., Барталев С.А. Методика ежегодной актуализации данных о площадях необлесенных гарей на территории России // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 381. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 15. Хвостиков С.А., Барталев С.А. Оценка потенциальной эмиссии углерода от лесных пожаров на основе данных ДЗЗ и результатов моделирования // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 387. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 16. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Егоров В.А., Ворущилов И.И. Уточнение оценок показателей горизонтальной структуры древесного полога по спутниковым данным высокого пространственного разрешения Sentinel-2 // Материалы 19-й Международной

- конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 388. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
17. Шабанов Н.В., Барталев С.А., Ховратович Т.С. Алгоритм разделения индекса листовой поверхности между верхним и нижним ярусом лесов России // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 392. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 18. Шинкаренко С.С., Берденгалиева А.Н., Дорошенко В.В., Иванов Н.М. Анализ горимости аридных ландшафтов европейской части России // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 393. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 19. Уваров И.А., Бриль А.А., Марченков В.В., Пармузин Е.И., Захарова Н.Б., Шелопут Т.О. Интеграция результатов численного моделирования гидрофизических параметров состояния воды Черного моря в информационную систему See the Sea // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 117. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 20. Барталев С.А., Лукина Н.В. Комплексное использование данных дистанционного зондирования из космоса и наземных измерений как основа национальной системы мониторинга бюджета углерода в лесах России // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 1. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. **РНФ**
 21. Барталев С.А., Ворушилов И.И., Егоров В.А., Шабанов Н.В. Исследование возможностей использования данных LAI для оценки запаса стволовой древесины // 18-я Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. докл. ИКИ РАН, Москва, 14–16 апр. 2021 / под ред. А.М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 30. **РНФ**
 22. Богодухов М.А., Барталев С.А., Ворушилов И.И., Жарко В.О. Исследование возможностей совместного использования продуктов обработки оптических и лидарных спутниковых данных ДЗЗ для картографирования высоты лесного покрова // 18-я Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. докл. ИКИ РАН, Москва, 14–16 апр. 2021 / под ред. А.М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 34–35. **РНФ**
 23. Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Оценка точности восстановления искаженных и пропущенных данных спутниковых наблюдений растительного покрова в режиме оперативного мониторинга // 18-я Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тез. докл. ИКИ РАН, Москва, 14–16 апр. 2021 / под ред. А.М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 50. **РНФ**
 24. Lavrova O., Kostianoy A., Bocharova T. Monitoring Storm-Surge Events in Coastal Zones Using Satellite Data // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 7378–7381. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554259. (**Web of Sciences, Scopus, РИНЦ**) **РНФ**
 25. Mityagina M., Lavrova O. Oil Slicks from Natural Hydrocarbon Seeps in the Caspian Sea as Viewed Via Satellite Remote Sensing // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 7382–7385. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554173. (**Web of Sciences, Scopus, РИНЦ**) **«Мониторинг», РНФ**
 26. Lavrova O.Yu., Nazirova K.R., Soloviev D.M., Alferieva Y.O., Storchkov A.Ya., Bocharova T.Yu. Remote sensing of suspended particulate matter: case studies of the Sulak (Caspian Sea) and the Mzymta (Black Sea) mouth areas // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2021. V. 11857. Art. No. 1185705.

- <https://doi.org/10.1117/12.2599809>. (**Web of Sciences, Scopus, РИНЦ**) **«Мониторинг», РНФ**
27. *Mityagina M.I., Lavrova O.Yu.* Usage of SAR and VIS data for monitoring of the surface oil pollution in the off-shore oil-producing area of the Caspian Sea // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2021. V. 11857. Art. No. 118570N. DOI: 10.1117/12.2599689 (**Web of Sciences, Scopus, РИНЦ**) **«Мониторинг», РНФ**
 28. *Лаврова О.Ю., Уваров И.А., Крашенинникова Ю.С.* Спутниковые наблюдения извержения грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море 4 июля 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 332–336. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336. (**Scopus Q3, РИНЦ**) **«Мониторинг», РНФ**
 29. *Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М.* Распространение речных и лагунных вод в Каспийском, Черном и Балтийском морях // Материалы 6-й Международной научно-практической конф. Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2021. Ч. 2. С. 57–62. (**РИНЦ**) **РНФ**
 30. *Князев Н.А.* Особенности выявления нефтяных судовых загрязнений в Каспийском море по данным спутниковой радиолокации // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 238. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. (**РИНЦ**) **«Мониторинг-Океан», РНФ**
 31. *Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю., Назирова К.Р.* Пространственно-временная структура поверхностных проявлений вихревых образований в Каспийском море по данным радиолокационных спутниковых изображений за период 2007–2015 гг. // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 243. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. (**РИНЦ**) **«Мониторинг-Океан», РНФ**
 32. *Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Соловьев Д.М., Алферьева Я.О., Князев Н.А., Строчков А.Я., Краюшкин Е.В., Жук Е.В.* Верификация различных алгоритмов определения концентрации взвешенного вещества и мутности по данным MSI Sentinel-2 и OLI Landsat-8 во время подспутниковых измерений в приустьевых зонах рек Сулак и Мзымта // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 246. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. (**РИНЦ**) **«Мониторинг-Океан», РНФ**
 33. *Назирова К.Р.* Картирование вихревых структур в Каспийском море на основе оптических спутниковых данных высокого пространственного разрешения для периода с 2014-2018 гг. и 2021 г. // Материалы 19-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 260. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a. (**РИНЦ**) **«Мониторинг-Океан», РНФ**

Минобрнауки

1. *Шабанов Н.В., Михайлов Н.В., Тихонов Д.Н., Тутубалина О.В., Медведев А.А., Тельнова Н.О., Барталев С.А.* Валидация оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS для редкостойных лесов Кольского полуострова с использованием материалов съёмок беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 156–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-156-170. **Минобрнауки (RFMEFI61618X0099) и Британский Совет (грант Institutional Links No 352397111) (Scopus, Q3)**

Публикации в соавторстве с зарубежными авторами

1. Horváth A., Carr J.L., Girina O.A., Wu D.L., Bril A.A., Mazurov A.A., Melnikov D.V., Hoshyaripour G.F., Buehler S.A. Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery — Part 1: Methodology // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. Iss. 16. P. 12189–12206. DOI: doi.org/10.5194/acp-21-12189-2021. **(WOS Q1, Scopus Q1) «Мониторинг»**
2. Horváth A., Girina O.A., Carr J.L., Wu D.L., Bril A.A., Mazurov A.A., Melnikov D.V., Hoshyaripour G.F., Buehler S.A. Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery — Part 2: Case studies // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. Iss. 16. P. 12207–12226. DOI: doi.org/10.5194/acp-21-12207-2021. **(WOS Q1, Scopus Q1) «Мониторинг»**
3. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Storchkov A. Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea // *Remote Sensing*. 2021. V. 13(1). Art. No. 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>. **(Web of Sciences, Q1, Scopus, РИНЦ) «Мониторинг»**
4. Onishchenko O.G., Fedun V., Pokhotelov O.A., Horton W., Astafieva N., Skirvin S.J., Verth G. The stationary concentrated vortex model. *Climate*, 2021. V. 9(3). 39. <https://doi.org/10.3390/cli9030039> **«Мониторинг»**

Публикации по теме Мониторинг в рецензируемых изданиях

1. Denisov P.V., Kashnitskiy A.V., Loupian E.A., Sereda I.I., Tolpin V.A., Troshko K.A. Possibilities of vega satellite monitoring services for arable land use assessment on the example of Smolensk region // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. V. 723(3). 032072. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032072. **(Scopus) «Мониторинг»**
2. Balashov I.V., Loupian E.A., Bartalev S.A., Bourtsev M.A., Mazurov A.A. ISDM-Rosleskhoz operation and evolution experience // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. V. 806. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012007. **(Scopus) «Мониторинг»**
3. Lozin D.V., Balashov I.V., Loupian E.A. Possibilities of near real-time forest cover damage estimation based on fires radiative power data // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. V. 806. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012019. **(Scopus) «Мониторинг»**
4. Konstantinova A.M., Loupian E.A., Balashov I.V., Kashnitskiy A.V. Approaches to monitoring natural and anthropogenic objects in an analysis of the environment around large industrial facilities // *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation «Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes» (SDM-2021)*, 2021. V. 3006. P. 127–134. 10.25743/SDM.2021.46.67.017 **(Scopus) РФФИ «Мониторинг»**
5. Konstantinova A.M., Bril A.A. Monitoring of NO₂ emission at Russian cities scale using TROPOMI (Sentinel-5P) data // *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation «Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes» (SDM-2021)*, 2021. V. 3006. P. 476–483. 10.25743/SDM.2021.97.73.057 **(Scopus) РФФИ «Мониторинг»**
6. Horváth A., Carr J.L., Girina O.A., Wu D.L., Bril A.A., Mazurov A.A., Melnikov D.V., Hoshyaripour G.F., Buehler S.A. Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery – Part 1: Methodology // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. Iss. 16. P. 12189–12206. DOI: doi.org/10.5194/acp-21-12189-2021. **(WOS Q1, Scopus Q1) «Мониторинг»**

7. Horváth A., Girina O.A., Carr J.L., Wu D.L., Bril A.A., Mazurov A.A., Melnikov D.V., Hoshyaripour G.F., Buehler S.A. Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery – Part 2: Case studies // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. Iss. 16. P. 12207–12226. DOI: doi.org/10.5194/acp-21-12207-2021. **(WOS Q1, Scopus Q1) «Мониторинг»**
8. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E., Sterlyadkin V., Chernushich A., Sharkov E. Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermvision, Radiosondes, and Reanalysis // *Remote Sensing*. 2021. V. 13(9). Art. No. 1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639> **(Web of Science, Scopus Q1, РИНЦ) «Мониторинг»**
9. Kniazev N., Elizarov D., Lavrova O., Nazirova K., Krayushkin E. Web service for storing and processing sea water data measured in situ concurrently with satellite survey // *An Intern. J. Earth Sciences (Formerly Bollettino di Geofisica teorica ed applicata)*. 2021. V. 62. Suppl. 1. P. 186–188. http://www3.inogs.it/bgo/provavpage.php?id_articolo=877. **(Scopus, Q3, РИНЦ) «Мониторинг»**
10. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Strochkov A. Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea // *Remote Sensing*. 2021. V. 13(1). Art. No. 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>. **(Web of Sciences, Q1, Scopus, РИНЦ) «Мониторинг»**
11. Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., and Likhacheva M.V. Scanning laser wave recorder with registration of “instantaneous” sea surface profiles // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2021. V. 38. No. 8. P. 1415–1424. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>. **(Web of Science, Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»**
12. Haldoupis C., Shalimov S. On the altitude dependence and role of zonal and meridional wind shears in the generation of E region metal ion layers // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2021. V. 214. 105537. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105537> **(Web of Sciences-Q3; Scopus) «Мониторинг»**
13. Onishchenko O.G., Fedun V., Pokhotelov O.A., Horton W., Astafieva N., Skirvin S.J., Verth G. The stationary concentrated vortex model // *Climate*. 2021. V. 9(3). 39. <https://doi.org/10.3390/cli9030039> **(Scopus-Q3) РФФИ «Мониторинг»**
14. Levina G. How Does Cyclogenesis Commence Given a Favorable Tropical Environment? // *Environ. Sci. Proc.* 2021. V. 8. 20. <https://doi.org/10.3390/ecas2021-10320> **«Мониторинг»**
15. Levina G.V. Turbulent vortex dynamo in the Earth’s atmosphere and the emerging opportunity to affect tropical cyclogenesis // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2028. 012017. DOI:10.1088/1742-6596/2028/1/012017 **(Web of Sciences-Q4; Scopus) «Мониторинг»**
16. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Миклашевич Т.С., Плотников Д.Е., Радченко М.В., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
17. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2021. V. 14. (В печати.) **(Web of Sciences - Q1, Scopus) «Мониторинг»**
18. Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А., Кобец Д.А. Итоги Девятнадцатой Всероссийской международной конференции «Современные проблемы

- дистанционного зондирования Земли из космоса» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. (В печати.) **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
19. *Ведешин Л.А., Герасютин С.А.* Развитие отечественной метеорологической системы (к 60-летию разработки метеорологических спутников в СССР) // Земля и Вселенная. 2021. № 5. (В печатью) **«Мониторинг»**
 20. *Лузян Е.А., Середа И.И., Денисов П.В., Трошко К.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А.* Дистанционный мониторинг состояния озимых культур зимой 2020–2021 гг. на Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 165–172. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-165-172. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
 21. *Гирина О.А., Лузян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Романова И.М., Нуждаев А.А., Кашицкий А.В., Марченков В.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П.* Дистанционные наблюдения эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 81–91. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-81-91. **(Scopus, Q3) РФФИ «Мониторинг»**
 22. *Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгадзе А.Н., Комарова И.А.* Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 149–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164. **(Scopus, Q3) РФФИ «Мониторинг»**
 23. *Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А.* Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
 24. *Гирина О.А., Мельников Д.В., Лузян Е.А., Маневич А.Г., Сорокин А.А., Крамарева Л.С.* Непрерывный мультиспутниковый мониторинг вулканов для обнаружения извержений на примере бокового прорыва вулкана Ключевской в феврале 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 261–267. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-261-267. **(Scopus, Q3) РФФИ «Мониторинг»**
 25. *Златопольский А.А.* Эффект «согласованного голосования» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 64–72. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-64-72. **(Scopus, Q3) Мониторинг**
 26. *Денисов П.В., Середа И.И., Трошко К.А., Лузян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А.* Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
 27. *Шинкаренко С.С.* Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
 28. *Трошко К.А., Денисов П.В., Лузян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А.* Особенности состояния зерновых культур в регионах европейской части России и Сибири в июне 2021 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 325–331. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331. **(Scopus, Q3) «Мониторинг»**
 29. *Денисов П.В., Иванов А.Б., Мишуков Н.П., Петухов Д.А., Подъяблонский П.А., Трошко К.А.* Прогнозирование урожайности озимой пшеницы с использованием

- технологий дистанционного зондирования Земли // Управление рисками в АПК. 2021. Вып. 39. С. 37–45. DOI: 10.53988/24136573-2021-01-03. **«Мониторинг»**
30. Денисов П.В., Лупян Е.А., Толпин В.А., Трошко К.А. Спутниковый сервис «Вега-PRO» для сельскохозяйственного мониторинга // Управление рисками в АПК. 2021. Вып. 39. С. 22–36. DOI: 10.53988 /24136573-2021-01-02. **«Мониторинг»**
31. Дегай А.Ю., Андреев М.В., Егоров В.А., Пырков В.Н., Черных В.Н. Развитие методов автоматического распознавания ледового покрытия на основе спутниковых данных оптического и ближнего инфракрасного диапазона для системы мониторинга рыболовства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 27–40. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-27-40. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
32. Константинова А.М., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Лупян Е.А. Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 41–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52. (**Scopus, Q3**) **РФФИ «Мониторинг»**
33. Лупян Е.А., Стыценок Ф.В., Сенько К.С., Балашов И.В., Мазуров А.А. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
34. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Выприцкий А.А. Динамика площадей водоёмов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
35. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Оценка площади опустынивания на юге европейской части России в 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 291–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
36. Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С. Связь сезонной динамики температуры поверхности и NDVI урбанизированных территорий засушливой зоны (на примере Волгоградской агломерации) // Исследование Земли из космоса. 2021. № 4. С. 72–83. DOI: 10.31857/S0205961421040084. **РФФИ «Мониторинг»**
37. Шинкаренко С.С., Иванов Н.М., Берденгалиева А.Н. Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока европейской России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. № 6(3). С. 23–44. DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.035>. (**WOS, Scopus Q2**) **РФФИ «Мониторинг»**
38. Хвостиков С.А., Барталев С.А. Возможности применения данных спутникового мониторинга для моделирования динамики развития природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
39. Златопольский А.А., Симонов Д.А., Захаров В.С. Порядковая статистика долин – длина, ширина, направление (на примере Буреинского хребта) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 97–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-97-107. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
40. Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А., Васильченко А.А., Выприцкий А.А. Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021.

- Т. 18. № 5. С. 2262241. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241. (**Scopus, Q3**)
«Мониторинг»
41. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Романова И.М., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Крамарева Л.С. Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения вулкана Чиринкотан (Северные Курилы) в 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 321–327. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-321-327. (**Scopus, Q3**) **«Мониторинг»**
 42. Ведешин Л.А. Первый советский метеорологический спутник. К 60-летию начала разработки спутников серии «Метеор» // Исследование Земли из космоса. 2021. № 2. С. 94–95. DOI: 10.31857/S020596142102010X. **«Мониторинг»**
 43. Ведешин Л.А. Первые космические исследования Мирового океана и атмосферы Земли (к 60-летию начала научных экспериментов на ИЗС серии «Космос» и «Интеркосмос») // Исследование Земли из космоса. 2021. № 5. С. 94–96. DOI: 10.31857/S0205961421050092. **«Мониторинг»**
 44. Ведешин Л.А. Россия-США: 50 лет сотрудничества в космосе (Итоги научно-технического сотрудничества с США по программе «Интеркосмос») // Исследование Земли из космоса. 2021. № 3. С. 94–96. DOI: 10.31857/S0205961421030088. **«Мониторинг»**
 45. Ипатов А.В., Ведешин Л.А. Применение лазеров в наземных и дистанционных космических наблюдениях (К 60-летию начала экспериментов по лазерной локации Луны) // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 96–98. DOI: 10.31857/S020596142106004X. **«Мониторинг»**
 46. Алексеева Т.А., Фролов С.В., Федяков В.Е., Макаров Е.И., Миронов Е.У., Соколова Ю.В. Анализ ледовых условий круглогодичного плавания судов ледового класса Arc7 в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 236–248. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248>. (**РИНЦ**) **«Мониторинг»**
 47. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А. Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22–38. DOI: 10.31857/S0205961421060026. (**РИНЦ**) **«Мониторинг»**
 48. Егорова Е.С., Филиппов Н.А., Алексеева Т.А., Сероветников С.С., Соколов В.Т. Судовые наблюдения за ледяным покровом Арктического бассейна в летний сезон 2021 года // Российская Арктика. 2021. № 4(15). (В печати.) (**РИНЦ**) **«Мониторинг»**
 49. Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Мазуров А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Чернушич А.П., Черный И.В., Стрельцов А.М., Шарков Е.А., Екимов Н.С. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВ3А на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303. (**Scopus Q3, РИНЦ**) **«Мониторинг»**
 50. Ермаков Д.М., Деменев А.Д., Мещерякова О.Ю., Березина О.А. Особенности разработки регионального водного индекса для мониторинга воздействия изливов кислых шахтных вод на речные системы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. (В печати.) (**Scopus, Q3, РИНЦ**) **«Мониторинг»**
 51. Князев Н.А., Лаврова О.Ю., Костяной А.Г. Спутниковый радиолокационный мониторинг нефтяных загрязнений в акватории Анапа – Геленджик за период 2018–2020 гг. // Океанологические исследования. 2021. Т. 49. № 1. С. 163–185. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).8. (**РИНЦ**) **«Мониторинг»**

52. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Луян Е.А. Нефтяной разлив на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума под Новороссийском 7 августа 2021 г.: первые результаты спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 304–310. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-304-310. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
53. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Луян Е.А. Нефтяной разлив на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума под Новороссийском 7 августа 2021 г.: комплексный анализ спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 28–43. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-28-43. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
54. Крек Е.В., Лаврова О.Ю., Крек А.В. Нефтяное загрязнение пляжа Балтийской косы в результате разлива мазута с судна на внешнем рейде порта Калининград в июле 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 309–314. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-309-314. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
55. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный сезон 2020/2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 255–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-255-26. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
56. Назирова К.Р., Краюшкин Е.В. Мониторинг распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива (Юго-Восточная Балтика) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 271–284. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
57. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., Лихачева М. В. Струнный волнограф с инфракрасной регистрацией длины струн // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 4. С. 119–124. DOI: 10.31857/S003281622104011X. (РИНЦ) «Мониторинг»
58. Тихонов В. В., Соколова Ю. В., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю. О возможности восстановления снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 47–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-47-64. (Scopus Q3, РИНЦ) «Мониторинг»
59. Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Алексеева Т.А., Синуцкий А. И., Тихонова М. В., Шарков Е. А., Комарова Н. Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. (В печати.) (Scopus Q3, РИНЦ) РФФИ «Мониторинг»
60. Alekseeva T.A., Raev M.D., Tikhonov V.V., Sokolova J.V., Sharkov E.A., Frolov S.V., Serovetnikov S.S. Comparative Analysis of Sea Ice Area in the Arctic, Derived from Satellite Microwave Radiometry (Algorithm VASIA2), with AARI Ice Charts // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. No. 9. P. 1076–1080. DOI: 10.1134/S0001433821090383. (Web of Sciences, Scopus Q3) «Мониторинг»
61. Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Tikhonov V.V., Smolyanitsky V.M., Afanasyeva E.V., Raev M.D., Sharkov E.A. Analysis of sea ice areas undetectable by satellite microwave radiometry (ASI algorithm) in the Arctic Ocean // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. No. 12. (В печати.) (Web of Sciences, Scopus Q3) «Мониторинг»
62. Ижовкина Н.И., Артеха С.Н., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А. Атмосферные вихри в геомагнитной аномалии, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 299–306. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-299-306> (Scopus-Q3) «Мониторинг»

63. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Развитие экспериментальных исследований турбулентных пристеночных пульсаций давления. критический анализ и обобщение накопленных опытных данных // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 6. С. 639–649. DOI: 10.31857/S0320791921060034 **(РИНЦ) РФФИ 2** [переводная версия: *Kudashev E.B., Yablonik L.R.* Development of Experimental Research of Turbulent Surface Pressure Fluctuations: Critical Analysis and Generalization of Accumulated Experimental Data // Acoustical Physics. 2021. V. 67. No. 6. P. 623–632. DOI: 10.1134/S1063771021060038 **(Web of Sciences-Q4; Scopus)**] **«Мониторинг»**
64. *Рябова С.А., Шалимов С.Л.* О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности Земли в диапазоне периодов планетарных волн // Физика Земли. 2021. № 1. С. 51–60. DOI: 10.31857/S0002333721010075 **(РИНЦ)** [переводная версия: *Riabova S.A., Shalimov S.L.* On the Geomagnetic Variations Observed on the Earth's Surface in the Period Range of Planetary Waves // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. P. 46–53. <https://doi.org/10.1134/S1069351321010079> **(Web of Sciences-Q4; Scopus)**] **«Мониторинг»**
65. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Использование специальных экранов, моделирующих рассеянное в среде излучение, для измерения эквивалентного поперечного сечения частиц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 298–306. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-298-306> **(Scopus-Q3)** **«Мониторинг»**
66. *Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В.* Межгодовой тренд чувствительности камер комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» №2 по результатам полетной калибровки в 2015–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 53–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60. **(SCOPUS, Q3)** **«Мониторинг»**
67. *Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В.* Коррекция автоматической географической привязки изображений комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 75–81. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81. **(SCOPUS, Q3)** **«Мониторинг»**